

2001-341

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И КУЛЬТУРЫ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ

Диссертационный совет Д 05.01.127

На правах рукописи

Кожухметов Какимсегит Хамитович

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

05.23.01-Строительные конструкции, здания и сооружения

01.02.04-Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

БИШКЕК-2001

Работа выполнена в Кыргызском государственном университете
строительства, транспорта и архитектуры, в институте физики и
механики горных пород национальной академии наук
Кыргызской республики

Научные консультанты: доктор технических наук,
академик НАН КР,
профессор *Айтматов И. Т.*,
доктор технических наук,
член-корреспондент НАН КР,
профессор *Тентиев Ж. Т.*

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор *Жунусов Т.Ж.*,
доктор технических наук,
профессор *Сахиев Д. М.*,
доктор технических наук,
профессор *Свиденко В. Н.*

Ведущая организация: Казахский научно-исследовательский
институт сейсмостойкого строительства
и архитектуры

Защита состоится *28 сентября* 2001 г. в *14.30* часов на заседании диссер-
тационного Совета Д 05.01.127 Кыргызского Государственного университета строи-
тельства, транспорта и архитектуры, 720023, Бишкек, ул. Малдыбаева 34^Б

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызского государствен-
ного университета строительства, транспорта и архитектуры

Автореферат разослан *27 августа* 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета, к.т.н. *Белинская* БЕЛИНСКАЯ Т. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для рационального использования недр, обеспечения безопасности ведения горных работ и экономичности производства необходимо широкое внедрение методов прогнозирования и контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива в период разведки, а также во время строительства и эксплуатации инженерных сооружений различного назначения в горнодобывающей промышленности и гидротехническом строительстве.

Существующие в настоящее время экспериментальные методы не отражают реального напряженного состояния породного массива, натурные методы экспериментирования в массовом масштабе трудоемки и дороги. На современном этапе развития науки создание пригодной для всех случаев горно-геологических и горно-технических ситуаций единой механико-математической модели расчета не представляется возможным. Отсюда вытекает актуальность построения расчетных моделей, которые учитывали бы главные влияющие факторы, выявляемые с помощью экспериментов и данных натурных наблюдений.

Появление новых мощных вычислительных средств в настоящее время позволяет численно оценивать НДС как конструктивных элементов подземных сооружений, так и вмещающих породных массивов с учетом их структурных неоднородностей, особенностей прочностных и деформационных свойств и т.д.

Многие геомеханические факторы задаются приближенно. Например, породный массив еще до вмешательства в него горными работами находится в напряженном состоянии, которое зависит от региональной геологической истории. Это напряженное состояние не может быть определено или задано с высокой степенью надежности. Геометрические, деформационные и прочностные свойства породных массивов, содержащих разрывы, трещины, плоскости напластований, тектонические трещины и т.д., задаются приближенно. Поэтому желательна разработка гибкого вычислительного инструмента, позволяющего легко и достаточно быстро решать поставленную задачу для различных вариантов исходных данных.

Предлагаемая работа посвящена разработке гранично-элементных моделей расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов с учетом основных горно-геологических и горно-технических факторов, а также исследованию устойчивости массивов вокруг подземных сооружений с учетом близости дневной поверхности и влияния рельефа местности.

Диссертационная работа выполнена в рамках Общесоюзной научно-технической программы «Разработка научно-обоснованных предложений по совершенствованию рациональных типов строительных конструкций, обла-

дающих высокой сейсмостойкостью и имеющих оптимальную материалоемкость» (1982-86 гг.); программы научных исследований АН СССР «Механика» (2.1.10.2), раздел «Разработка теоретических основ расчета на прочность деформируемых тел и сред» (1985-91 гг.); плана Академии наук Кыргызской Республики по темам:

«Совершенствование методов контроля, управления горным давлением и создание унифицированных методов расчета конструктивных параметров систем разработок рудных месторождений на больших глубинах в горно-складчатых областях (№ гос. регистрации 0186.0121971), раздел 3 «Определение напряженного состояния конструктивных элементов систем разработок и развитие численных методов расчета прочности целиков, потолочин камер пологопадающих рудных месторождений Средней Азии»,

«Создать и внедрить эффективную и безопасную технологию ведения горных работ, системы автоматизированного прогноза удароопасности рудных и нерудных месторождений и строительстве подземных сооружений» (Постановление ГКНТ СССР от 29.10.1985 г., № 552), раздел «Разработать методику расчета напряжений в блочном массиве горных пород с учетом неоднородности механических свойств и выдать рекомендации по ее использованию»;

«Государственной комплексной программы развития науки, техники и новых технологий в КР до 2005 г.»; плановой научно-исследовательской тематики кафедры металлических и полимерных конструкций КГУСТА с участием Санкт-Петербургского ГАСУ (№ гос. регистрации 01880002184).

Целью диссертационной работы является исследование НДС конструктивных элементов подземных сооружений и вмещающих породных массивов с учетом основных горно-геологических и горно-технических факторов на основе гранично-элементного моделирования.

Поставленная цель достигается решением ряда задач:

- модифицировать прямой метод граничных элементов применительно к решению задач геомеханики;
- разработать гранично-элементную модель НДС породного массива блочно-неоднородного строения;
- моделировать слоистые и трещиновато-блочные массивы однородными анизотропными средами;
- развить модель расчета НДС анизотропного массива горных пород с тектоническими трещинами на основе метода граничных элементов;
- построить аналитико-численную модель оценки НДС мелкослоистого массива пород;
- разработать гранично-элементную модель расчета НДС породного массива с пластообразными залежами;
- выявить влияние трещиноватости массива на НДС конструктивных элементов подземных сооружений;

- гранично-элементные модели оценки напряженно-деформированного состояния породных массивов и конструктивных элементов возводимых в них сооружений с учетом таких основных горно-технических факторов, как размеры, формы, взаимное расположение подземных выработок, порядок производства очистных выемок;
- метод оценки напряженно-деформированного состояния окрестностей выработок, проводимых вблизи тонкослойной залежи;
- новый расчетный метод напряженно-деформированного состояния породных массивов вокруг подземных сооружений различного назначения с учетом рельефа местности;
- модифицированный применительно к решению задач об оценке напряженного состояния конструктивных элементов подземных сооружений и вмещающих массивов пород прямой метод граничных элементов;
- решение задач о напряженном состоянии конструктивных элементов приповерхностных (расположенных близко к дневной поверхности) сооружений прямым методом граничных элементов;
- замкнутое представление интегральных коэффициентов разрешающих уравнений прямого метода граничных элементов;
- способ решения разрывных задач горной геомеханики методом граничных элементов.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на IV-Казахстанской межвузовской конференции по математике и механике (г.Алма-Ата, 1972), на Всесоюзной конференции по комплексному исследованию физических свойств горных пород и процессов (г.Москва, 1981), на V Всесоюзной конференции по динамике оснований, фундаментов и подземных сооружений (г.Ташкент, 1982), на Всесоюзной конференции по нелинейным проблемам теории упругости (г.Фрунзе, 1985), на Всесоюзной конференции по механике горных пород (г.Тбилиси, 1985), на I-Всесоюзном семинаре «Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья» (г.Фрунзе, 1987), на II-Всесоюзном семинаре «Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья» (г.Фрунзе, 1990), на III-Всесоюзном семинаре «Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья» (г.Фрунзе, 1991), на Научно-технической конференции ППС и студентов КАСИ (г.Бишкек, 1996), на Международной научной конференции «Технологии и перспективы современного инженерного образования, науки и производства» (г.Бишкек, 1999), на Научном семинаре каф. механики КТУ им. И.Раззакова (г.Бишкек, 2000), на Международной научно-практической конференции «Современное состояние перспективы развития строительной науки» (г.Бишкек, 2000).

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, списка литературы и приложений. Текстовая часть изложена на 290 страницах и приложений на 12 страницах. В работе содержатся 11 таблиц, 107 рисунков, список литературы насчитывает 247 наименований, в том числе 49 - на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен литературный обзор, из которого видно, что важной составной частью выбора варианта системы разработки месторождения, удовлетворяющего требованиям безопасности труда, экономической технологии, минимальности потерь и разубоживания полезного ископаемого, является изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород и конструктивных элементов самой системы разработки. Согласно определению М.И. Агошкова под конструктивными элементами системы разработки понимаются части, на которые делится породный массив блока, нарезные и очистные выработки блока и возводимые в этих выработках искусственные сооружения и устройства.

Обеспечение устойчивости или возможности регулирования НДС конструктивных элементов системы является важнейшим этапом, предшествующим выбору оптимальных значений горнотехнических параметров очистных работ по технико-экономическим показателям. Вопросы систематизации основных влияющих геологических и горнотехнических факторов, совершенствования методов и методик их учета при оценке НДС и прочности конструктивных элементов подземных сооружений различного назначения имеют большое научное и практическое значение.

Одним из важных направлений дальнейшего совершенствования методологии решения проблем механики горных пород при разработке месторождений является типизация месторождений на структурно-геологической основе. В трудах И.Т. Айтматова, С.Г. Авершина, М.В. Гзовского, Ю. А. Косыгина, Г.Я. Новика, В.В. Ржевского, Г.В. Тохтуева указывается, что типизация месторождений по их морфологии, условиям залегания и геомеханическим признакам важна не только для выбора и обоснования систем и технологии разработки, но и для системного подхода к решению задач горной геомеханики математико-механическими методами.

Определению часто используемого понятия «массив горных пород» (или «породный массив») обращались известные ученые Н.С. Буличев, П.Н. Панюков, В.В. Рац, А.В. Сидоренко, Г.Л. Фисенко, С.Н. Чернышев. Следует заметить, что геомеханические модели массивов пород должны основываться на общих представлениях, учитывающих общие физические процессы формирования горной породы как твердого тела с определенными механическими свойствами и структурой. Важнейшей структурной характеристикой массива является его трещиноватость, сложившаяся как ре-

зультат геологической истории развития этого массива. При этом породные массивы в механическом отношении принципиально отличаются от конструкционных материалов существенной неоднородностью естественного поля напряжений в массиве, пространственной изменчивостью деформационных и прочностных свойств пород и существенным влиянием масштабного фактора на их механические характеристики.

Применительно к различным задачам технической геологии трещиноватость скальных пород изучалась рядом исследователей, которые выделяли несколько уровней трещин и разрывов по их длине. Большой вклад в классификацию трещиноватости внесли И.Т. Айтматов, И.М. Багринцева, С.А. Батугин, Н. Вокс, Э.Г. Газнев, R.M. Sirieys, К.В. Руппенейт, С.Н. Чернышев и др. Обзор исследований по механическим свойствам трещины представлен в работах Г.Н. Кузнецова, Р.С. Paris, Ю.М. Картошова, R.E. Goodman, F.H. Kullhawy. Деформирование трещин необходимо рассматривать как в нормальном, так и в параллельном к ним направлениях. На прочностные свойства трещин при сдвиге влияют следующие основные факторы: угол трения ϕ по гладкой скальной поверхности; дилатансия; хрупкость, прочность и шероховатость стенок; механические свойства заполнителя; степень прерывистости трещин.

Влияние структурной расчлененности массива на его механические свойства рассматривается в работах Б.В. Гусева, Г.Н. Кузнецова, Ю.И. Туринцева. Эти исследования базируются, в основном, на физическом моделировании блочного массива и преследуют цель определения величины коэффициента структурного ослабления массива.

Как уже отмечалось, в механическом отношении породные массивы принципиально отличаются от обычных конструкционных материалов. До проведения выработок и строительства подземных сооружений нетронутый массив испытывает начальные напряжения, т.е. находится в естественном напряженном состоянии. Последнее является одной из важнейших геомеханических характеристик породного массива. Оно вызывается собственным весом пород и продолжающимися неотектоническими процессами. В этой связи проблема определения естественного напряженного состояния породного массива вблизи горных выработок является весьма важной, так как от правильного задания исходного поля напряжений во многом зависит конечный результат исследований. Сложность этой задачи определяется многочисленностью факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние земной коры.

В горном деле до недавнего времени господствовали гипотезы о гидростатическом (А. Гейм) и негидростатическом (А.Н. Динник) распределении начальных напряжений. В последующем проведены многочисленные экспериментальные исследования по определению

естественного поля напряжений на территории различных стран и континентов. Здесь следует указать на важные работы Н.Воск, E.Brugel, Н.П.Влоха, П.В.Егорова, М.Cappozza, П.Н.Кропоткина, Г.А.Крупенникова, G.Martin, C.Ranalli, И.А.Турчанинова, Г.А.Маркова, N.Hast.

Анализ результатов по определению естественных напряжений в пределах рудников Центральной Азии выполнен И.Т.Айтматовым, установившим ряд особенностей распределения горизонтальных напряжений массивов горноскладчатых областей: во-первых, горизонтальные напряжения по своим значениям превосходят вертикальные; во-вторых, на различных глубинах в крепких породах горизонтальные напряжения выше, чем в относительно слабых; в-третьих, вертикальные напряжения в среднем близки к независимо от прочности горной породы. Сопоставление этих результатов с результатами их расчета по зависимостям, основанным на гипотезах Гейма и Динника, показывает весьма значительные расхождения между измеренными и расчетными значениями напряжений.

Наряду с лабораторными и натурными методами исследования НДС породных массивов следует обратить внимание на теоретические методы горной геомеханики, обладающие универсальностью по условиям применения, большой информативностью, широкими возможностями учета влияния отдельных факторов, их совокупности и прогнозирования состояния проектируемых параметров горных работ. Под теоретическими методами горной геомеханики понимаются аналитические и численные методы механики деформируемого тела, а также методы, основанные на применении теории размерностей, гипотез и инженерных теорий.

Работа К.В. Руппенеята, оказавшаяся на переходе от схем, основанных на специальных гипотезах, к решениям, использующим классические методы механики сплошных сред при оценке поведения кровли очистных выработок, показала эффективность применения расчетных методов для исследования проявлений горного давления и выбора параметров с учетом достаточно сложных горнотехнических условий. В области применения методов теории упругости в горной геомеханике пионерскими являются работы А.Н.Динника, С.Г.Михлина, Г.Н.Савина, посвященные исследованию распределения напряжений в однородной плоскости вокруг прямоугольных отверстий (выработок) с различными соотношениями сторон.

Существенное развитие аппарат аналитического решения задач о напряженном состоянии породного массива получил в работах Д.Н. Шермана.

Вопросы предельного равновесия массивов горных пород с закрепленной полостью, а также некоторых подземных сооружений

рассматриваются в работах М.Т. Алимжанова с точки зрения теории статической устойчивости упругого либо упругопластического равновесия тел. В частности, проявления горного давления рассматриваются как процесс потери устойчивости равновесия горного массива, сопровождающийся изменением формы выработки.

В подавляющем большинстве практических задач, возникающих в прикладных науках и инженерном деле, в частности, в горной геомеханике, необходимо учитывать сложное строение, физико-механические свойства рассматриваемых сред, а также нерегулярность границ объектов. Однако аналитическое решение таких задач весьма затруднительно. Поэтому приходится прибегать к численным методам решения с использованием компьютерных технологий. Численные методы, используемые в практических приложениях, могут быть разделены на три основные группы: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ).

В настоящее время одним из самых широко применяемых является метод конечных элементов. Однако существует множество задач, для которых конечноэлементная реализация недостаточно удовлетворительна. Это обстоятельство заставляет искать альтернативные методы, основанные на граничных интегральных уравнениях (ГИУ). Такие методы, переживающие в настоящее время бурное развитие, известны как методы граничных элементов (МГЭ).

Суть МГЭ заключается в использовании в полной мере фундаментальных свойств решений дифференциальных уравнений в частных производных. С идейной стороны главной в методе является зависимость между значениями искомых функций внутри рассматриваемой области и их значениями на границе. Эта зависимость устанавливается переходом от дифференциальных уравнений к интегральным соотношениям. Последовательное использование этой идеи приводит к замене дифференциальных уравнений, требующих нахождения неизвестных функций во всей области, на эквивалентные интегральные зависимости, в которые в качестве неизвестных входят значения функций только на границе области. Такие уравнения, как уже отмечалось, именуется граничными интегральными уравнениями (ГИУ). По сути своей МГЭ представляет собой численную реализацию решения ГИУ.

То, что будущее расчетных методов теории упругости неизбежно связано с использованием ГИУ, можно видеть из одной из ранних работ И.В. Мухелишвили. Причем в работе его учеников А.Я. Гордидзе и А.К. Рухадзе содержатся все компоненты современного МГЭ. В ней показано, что ГИУ могут служить не только целям теоретических исследований, но и средством численного решения прикладных

задач.

Пионером в области использования ЭВМ для систематического решения ГИУ в задачах теории упругости является Ш.Массоне. С появлением новой компьютерной техники исчез характерный до этого дисбаланс между трудоемкостью расчетов на основе ГИУ и практической нуждой в них. Интенсивное использование ЭВМ для решения задач теории упругости началась с конца 60-х годов работами М.А.Жасwon, F.J.Rizzo, D.J.Shippy, T.A.Cruse. С тех пор теоретическим вопросам и практическому применению МГ посвящены исследования многих ученых – Р. К. Банерjee, С.А.Вrebbia, А.М.Линькова, Д.Теллеса, Ж.Т.Тентиева, А.Г.Угодчикова, S.K.Vogel, Н.М.Хуторянского и др.

Взаимные соотношения и связи МГЭ и методов Бубнова, Трешфца, конечных элементов, конечных разностей и моментов рассмотрены в книге С.А.Вrebbia как следствия обобщенной трактовки метода взвешенных остатков.

Следует особо отметить, что МГЭ становится даже для инженеров все более привычным средством проведения расчетов. Появляются отработанные простые в использовании пакеты прикладных компьютерных программ. Одновременно продолжается расширение сферы применения МГЭ с охватом все более сложных задач.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что для теоретического исследования НДС находят дальнейшее развитие аналитические и численные методы. Однако чисто аналитическое решение многих задач весьма затруднительно, поэтому ученые много внимания уделяли и уделяют развитию численных методов. В последние годы бурно развиваются методы граничных элементов.

Данная диссертационная работа посвящена разработке гранично-элементных моделей расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов с учетом основных горно-геологических и горно-технических факторов, а также исследованию устойчивости массивов вокруг подземных сооружений с учетом близости дневной поверхности и влияния рельефа местности.

Во второй главе дана новая аналитико-численная методика решения задач горной геомеханики. За исходную математико-механическую основу построения гранично-элементных моделей (ГЭ моделей) расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов подземных сооружений и окружающих породных массивов с учетом особенностей их строения и основных горно-технических факторов в предлагаемой работе принимается прямой метод граничных элементов (ПМГЭ), который по сравнению с другими численными методами имеет следующие преимущества: уменьшение объема вычислений вследствие дискретизации не всей рассматриваемой области, а только ее границы; значительное сокра-

щение времени на подготовку входной информации; возможность вычислять в линейных задачах значения искомых величин не только в узлах, но и в любой внутренней точке области, не прибегая к аппроксимации, что особенно важно для зон с большими градиентами функций; автоматический учет условий на бесконечности; сравнительная простота решения разнообразных контактных задач (задачи о трещинах, о системах слоев и блоков и т.д.), обусловленная тем, что в ПМГЭ легко связывать усилия и разрывы смещений на контактах.

Приведен математический аппарат метода граничных элементов, модифицированного применительно к решению задач о напряженно-деформированном состоянии конструктивных элементов подземных сооружений различного назначения. Подробно изложена рабочая процедура метода, исходя из которой удобно создавать компьютерные программы для численного решения сложных задач оценки напряженного состояния конструкций и конструктивных элементов сооружений и окружающего массива пород.

Путем численного решения тестовых задач исследованы точность и сходимость конечно-элементных и гранично-элементных процедур. Дискретизация границ осуществлялась линейными элементами.

Как альтернатива обычной процедуре численного решения задач по прямому методу граничных элементов, предложено замкнутое представление разрешающих уравнений метода путем аналитического вычисления их интегральных коэффициентов.

Обычно численные вычисления интегралов неудобны при наличии угловых точек, так как в этих точках происходит резкое изменение направления нормали к поверхности и, следовательно, граничных нагрузок. Для преодоления этого взамен «сдвоенных узлов» введены «разрывные элементы», позволяющие существенно сократить вычислительную процедуру и время компьютерного счета при решении конкретных задач, особенно при решении обширного класса задач с входящими углами, где важнее всего знать решение на геометрическом разрыве и вблизи него.

При применении метода граничных элементов к оценке напряженно-деформированного состояния решение может сильно искажаться во внутренних точках, когда расстояние от них до границы тела порядка (или меньше) длины соответствующего граничного элемента. Во избежание этого предложен способ, основанный на устранении сингулярностей при решении задач методом граничных элементов.

В третьей главе излагаются гранично-элементные модели расчета напряженного состояния конструктивных элементов подземных сооружений и вмещающих породных массивов с учетом особенностей их геологического строения.

В четвертой главе излагаются результаты построения гранично-элементных моделей ГЭ моделей расчета НДС породных массивов с уче-

том некоторых основных особенностей геологического строения последних. Разработана ГЭ модель расчета НДС породного массива блочно-неоднородного строения. Рассматриваемая область массива горных пород может состоять из взаимодействующих однородных подобластей со своими упругими характеристиками, границы неоднородности рассматриваются как трещины контакта.

Когда рассматривается однородный и изотропный породный массив, содержащий тектонические нарушения, то применение ПМГЭ к такой среде не оптимально с точки зрения вычислительного процесса. Более эффективным оказывается применение специальных форм ГИУ, позволяющих использовать ту особенность контактных задач, что усилия на соприкасающихся границах остаются непрерывными и зависят только от линейных комбинаций предельных значений разрыва смещений. Это почти вдвое снижает число неизвестных и существенно упрощает расчеты.

Интересен вопрос о нахождении макроскопических характеристик неоднородных массивов по свойствам составляющих их элементов. Определение напряжений в слоистом массиве сведено к вычислению с помощью МГЭ напряжений в эквивалентной однородной среде.

Известно, что большинство горных пород, особенно метаморфические и осадочные, обладает значительной анизотропией. Как показано выше, слоистый и рассеченный сетью трещин на блоки породный массив можно свести к эквивалентному однородному анизотропному массиву.

Если породный массив имеет слоистое строение, когда мощность любого слоя толщи по меньшей мере на порядок меньше характерного поперечного размера горных выработок, то состояние такого массива можно описывать уравнениями однородного трансропного тела с плоскостью изотропии, совпадающей с плоскостью напластования пород. Это анизотропное тело здесь играет роль либо непосредственной модели реального массива, либо некоторого эквивалента его слоистой модели. С учетом этого рассматривается мелкослоистый массив горных пород как однородное трансропное тело, плоскость изотропии которого в общем случае расположена под углом к горизонту. Для решения задач о НДС такого массива используется изложенный выше математический аппарат МГЭ. При этом естественно учитывать механические характеристики и фундаментальные решения (ядра ГИУ) для трансропных сред.

Для трансропного тела имеет место тензор упругости C_{ijmn}

$$C_{ijmn} = a_1 \delta_{ij} \delta_{mn} + a_2 (\delta_{im} \delta_{jn} + \delta_{in} \delta_{jm}) + a_3 \delta_{i3} \delta_{j3} \delta_{m3} \delta_{n3} + a_4 (\delta_{i3} \delta_{j3} \delta_{mn} + \delta_{ij} \delta_{m3} \delta_{n3}) + a_5 (\delta_{in} \delta_{j3} \delta_{m3} + \delta_{i3} \delta_{n3} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{j3} \delta_{n3} + \delta_{i3} \delta_{m3} \delta_{jn}) \quad (1)$$

где δ_{ks} - тензор Кронекера, коэффициенты a_i определяются через технические константы материала,

и первый фундаментальный тензор для трансропного массива:

$$U_{ik} = \frac{1}{4\pi r} [K \delta_{ik} + L \gamma_i (\gamma_1 \delta_{1k} + \gamma_2 \delta_{2k}) + M \gamma_i \delta_{3k}] \\ U_{3k} = \frac{1}{4\pi r} [M (\gamma_1 \delta_{1k} + \gamma_2 \delta_{2k}) + N \delta_{3k}] \quad (2)$$

где $i=1,2$; функции K, L, M, N зависят только от r_3

Второй фундаментальный тензор $P_{ik}(x, \xi)$ находим из соотношения между нагрузками и перемещениями (2).

Одним из важных классов задач горного дела является класс задач, связанный с разработкой пластообразных залежей. Один из размеров таких залежей мал по сравнению с двумя другими их размерами. Если пластообразная залежь и выработка в ней не изменяются вдоль простирания залежи, то задачу можно представить двумерной, т.е. рассматривать случай плоской деформации. Напряженное состояние вокруг выработок в пластообразной залежи можно определять с помощью ГЭ модели блочно-неоднородного массива, изложенного выше. Однако при этом в ряде случаев масштаб и геометрия задачи затрудняют получение удовлетворительного решения. В частности, горная выработка может иметь высоту один или два метра, а ширину от нескольких десятков до сотен метров. Если планировка горных работ включает несколько таких близкорасположенных выработок, то для устойчивости численных результатов размеры граничных элементов, на которые разбиваются поверхности выработок и залежи, должны выбираться порядка мощности залежи, что приводит к весьма большой системе алгебраических уравнений.

Это затруднение преодолено с помощью ГЭ модели. Поверхности залежи дискретизируются так, чтобы длины двух сопряженных граничных элементов были существенно больше мощности залежи. Тогда прямоугольные области (рис. 1), образуемые между противоположно расположенными граничными элементами, можно рассматривать как сечения тонких пластин. Следовательно, можно принять, что компоненты тензора деформации в локальной системе координат \bar{x}_i в пределах толщины залежи не изменяются и определяются через значения перемещений залежи в произвольных его граничных узлах A и A_1 (рис. 1):

$$\bar{\varepsilon}_{12}^A = \frac{1}{h} (\bar{u}_1^{A_1} - \bar{u}_1^A), \quad \bar{\varepsilon}_{22}^A = \frac{1}{h} (\bar{u}_2^{A_1} - \bar{u}_2^A) \quad (3)$$

В глобальной системе координат примем условия равновесия пласта

$$p_i^{A_1} + p_i^A = 0, \quad (i=1,2), \quad (4)$$

где $p_i^{A_1}$ и p_i^A - значения нагрузок в узлах A и A_1 соответственно.

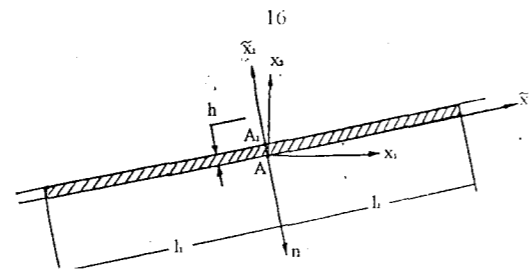


Рис. 1. Жильная рудная залежь

Пользуясь далее законом Гука и соотношениями между нагрузками и перемещениями получим выражения

$$\frac{G_p}{h} [n_1(u_1^{A_1} - u_1^A) + n_2(u_2^{A_1} - u_2^A)] = -\frac{1}{2(1+\nu_n)} (n_1 p_1^A + n_2 p_2^A), \quad (5)$$

$$\frac{G_p}{h} [n_2(u_1^{A_1} - u_1^A) - n_1(u_2^{A_1} - u_2^A)] = -(n_2 p_1^A - n_1 p_2^A),$$

которые вместе с (4) представляют необходимые условия, заменяющие ГИУ пластовой залежи. Решение этих уравнений совместно с уравнениями (2.62) для вмещающих пород дает искомое поле перемещений и напряжений в рассматриваемом массиве с пластовой залежью.

Таким образом, известные алгоритмы классических расчетных моделей мало пригодны для оценки напряженного состояния породных массивов блочного строения, поэтому в данной работе построена гранично-элементная модель, позволяющая эффективно решать задачи определения напряженно-деформированного состояния блочно-неоднородного массива пород. Прямое применение метода граничных элементов к однородной изотропной среде, содержащей тектонические нарушения, с точки зрения вычислительного процесса не оптимально, поэтому нами предлагается гранично-элементная модель оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, основанная на специально разработанных граничных интегральных уравнениях. Даны гранично-элементные модели расчета напряженно-деформированного состояния слоистых и содержащих взаимоперпендикулярные системы трещин породных массивов; предложена ГЭ модель расчета мелкослоистого массива; с помощью ГЭ моделирования построен метод оценки НДС массива с пластовой залежью.

Четвертая глава посвящена применению гранично-элементных моделей расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов к задачам горной геомеханики при учете горно-технических факторов, определяющих выбор конструктивных элементов подземных сооружений с точки зрения прочности. Дана постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния породных массивов вокруг подземных выработок

В отличие от обычных краевых задач прикладной механики, где рассматривается деформация тел, свободных от напряжений до нагружения, в задачах горной геомеханики необходимо прежде всего постулировать начальное (естественное) напряженное состояние нетронутого массива горных пород. В случае, когда породный массив можно представить однородной геомеханической моделью, начальное поле напряжений можно принять в виде

$$\sigma_{ij}^0 = -\gamma N (\bar{\lambda}_1 \delta_{1i} \delta_{1j} + \bar{\lambda}_2 \delta_{2i} \delta_{2j} + \bar{\lambda}_3 \delta_{3i} \delta_{3j}) = -\gamma N \bar{\lambda}_k \delta_{ki} \delta_{kj}, \quad (6)$$

где σ_{11}^0 и σ_{33}^0 - начальные горизонтальные напряжения соответственно в направлениях осей x_1 и x_3 , σ_{22}^0 - начальное вертикальное напряжение; $\bar{\lambda}_k = \nu_k / (1 - \nu_k)$ - коэффициенты бокового распора; γ - объемный вес пород; N - глубина залегания рассматриваемой точки массива; знак "-" перед напряжениями означает, что они являются сжимающими.

Однако анализ естественного напряженного состояния массивов пород на основе натуральных измерений и данных неотектонических движений земной коры высокогорных районов показывает, что экспериментально определенные значения компонентов тензора напряжения значительно отличаются от соответствующих их значений, получаемых по формулам (6).

В результате статистической обработки экспериментального материала по естественным напряжениям в породных массивах рудных месторождений Средней Азии и Казахстана взамен выражениям (6) И.Т.Айтматовым получены следующие средние значения начальных напряжений:

для крепких пород с модулем упругости от $(5-6)10^4$ до $(10-11)10^4$ МПа

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^0 &= -(5,0 + 1,86 \gamma N), \text{ МПа,} \\ \sigma_{33}^0 &= -(4,5 + 1,12 \gamma N), \text{ МПа,} \\ \sigma_{22}^0 &= -\gamma N, \text{ МПа;} \end{aligned} \quad (7)$$

для пород средней прочности с модулем упругости от $(2-3)10^4$ до $(5-6)10^4$ МПа

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^0 &= -(5,0 + 2,14 \gamma N), \text{ МПа,} \\ \sigma_{33}^0 &= -(3,0 + 1,14 \gamma N), \text{ МПа,} \\ \sigma_{22}^0 &= -\gamma N, \text{ МПа;} \end{aligned} \quad (8)$$

глубина N от дневной поверхности (в метрах).

Реальные скальные массивы отличаются существенной структурной

и геомеханической неоднородностью. Если рассматривать плоскую схему геометрической модели массива в масштабах месторождения или его участков, то такая модель будет представлять собой структурно – геологическую карту или план (разрез), на которой для различных горных пород (слоев) указаны пределы изменения или зависимости изменения параметров их механических свойств. Так как указанная модель не просто характеризует механические параметры массива, но отражает и его структуру (блочность и неоднородность строения), то ее можно назвать структурно-геомеханической моделью скальных массивов.

В данной работе рассматривается один из видов (или приближений) неоднородности строения скального массива - кусочная неоднородность. Кусочно-неоднородный массив состоит из контактирующих между собой однородных по своим механическим свойствам участков горных пород. Механические характеристики этих участков могут существенно отличаться друг от друга.

Для расчета напряженного состояния такого неоднородного массива пород вышеприведенные соотношения (6)-(8) уже непригодны. Оценку напряжений в кусочно-неоднородном массиве пород можно осуществлять в следующем порядке:

- выделить некоторую часть массива вокруг проектируемой (или уже существующей) выработки;
- поставить граничные условия по краям выделенной части массива, которые могут быть выбраны исходя из соотношений (6), (7) или (8);
- определить перемещения и усилия в составляющих массив однородных участках с помощью метода граничных элементов, изложенного в гл. 2;
- поставить условия на контактах между однородными участками. Эти участки по контактными поверхностям могут локально скользить друг относительно друга, отрываться друг от друга или работать совместно. В последнем случае на любой k -й контактной поверхности будут иметь место условия

$$u_i^{k(+)} = u_i^{k(-)}, \quad p_i^{k(+)} = -p_i^{k(-)}, \quad (9)$$

где $u_i^{k(+)}$ и $u_i^{k(-)}$ - найденные по методу граничных элементов значения перемещений u_i в соприкасающихся между собой точках однородных участков массива, расположенных соответственно слева и справа от k -й контактной поверхности; $p_i^{k(+)}$ и $p_i^{k(-)}$ - соответствующие значения усилий p_i , определяемые также по МГЭ.

В данной главе рассматривается также протяженные незакрепленные подземные выработки с произвольной формой контура (границы) Γ (рис.2). На контуре таких сооружений полные усилия (нагрузки) p_i должны быть

равными нулю, т.е.

$$p_i = \sigma_{ij} n_j = 0 \quad \text{на } \Gamma \quad (10)$$

Полные напряжения σ_{ij} в массиве пород вокруг выработок состоят из двух слагаемых:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \tilde{\sigma}_{ij}, \quad (11)$$

где σ_{ij}^0 - напряжения в нетронутом массиве пород; $\tilde{\sigma}_{ij}$ - дополнительные напряжения, вызываемые в массиве при проведении в нем горных выработок. Напряжения $\tilde{\sigma}_{ij}$ удовлетворяют уравнениям равновесия при нулевых условиях на бесконечности.

Подстановка (11) в (10) дает следующее граничное условие для дополнительных усилий $\tilde{p}_i = \tilde{\sigma}_{ij} n_j$:

$$\tilde{p}_i = -\sigma_{ij}^0 n_j \quad \text{на } \Gamma \quad (12)$$

Неизвестные дополнительные перемещения u_i узловых точек границы вычисляются по МГЭ, а дополнительные напряжения $\tilde{\sigma}_{ij}$ в этих узлах относительно локальной системы координат x'_i (рис. 2) - по формулам

$$\tilde{\sigma}'_{11} = \frac{1}{1-\nu} \left(\frac{E}{1+\nu} \tilde{\epsilon}'_{11} + \nu \tilde{p}'_2 \right), \quad \tilde{\sigma}'_{22} = \tilde{p}'_2 = \ell_{2j} p_j, \quad \tilde{\sigma}'_{12} = \ell_{1j} p_j, \quad (13)$$

где

$$\ell_{ij} = \cos(x'_i, x_j), \quad (14)$$

а деформацию $\tilde{\epsilon}'_{11}$ в любом i -ом граничном узле можно вычислить, например, по методу конечных разностей:

$$\tilde{\epsilon}'_{11} = \frac{n_2^i [u_1^{(i+1)} - u_1^{(i-1)}] - n_1^i [u_2^{(i+1)} - u_2^{(i-1)}]}{n_2^i [x_1^{(i+1)} - x_1^{(i-1)}] - n_1^i [x_2^{(i+1)} - x_2^{(i-1)}]}, \quad (15)$$

где n_j^i - значения компонент вектора внешней нормали $\vec{n}(n_1, n_2)$ i -го элемента; $u_j^{(i+1)}$ и $u_j^{(i-1)}$ - значения компонент вектора перемещения $\vec{u}(u_1, u_2)$ соответственно в $(i+1)$ -ом и $(i-1)$ -ом узлах; $x_j^{(i-1)}$ и $x_j^{(i+1)}$ - координаты x_1 и x_2 соответственно $(i-1)$ -го и $(i+1)$ -го узлов; компоненты n_j нормали i -го элемента вычисляются через координаты x_j^i и x_j^{i+1} крайних точек i -го элемента:

$$n_1^i = -\frac{1}{L^i} (x_2^{i+1} - x_2^i), \quad n_2^i = -\frac{1}{L^i} (x_1^{i+1} - x_1^i), \quad (16)$$

где

$$L^i = \sqrt{(x_1^{i+1} - x_1^i)^2 + (x_2^{i+1} - x_2^i)^2} \quad (17)$$

Дополнительные напряжения $\tilde{\sigma}_{ij}$ в глобальной системе координат x_j

легко определить по найденным напряжениям $\tilde{\sigma}'_{ks}$ в локальной системе координат x'_j с помощью формул тензорного преобразования, т.е.

$$\tilde{\sigma}_{ij} = m_{ik} m_{js} \tilde{\sigma}'_{ks}, \quad m_{ij} = \cos(x_i, x'_j). \quad (18)$$

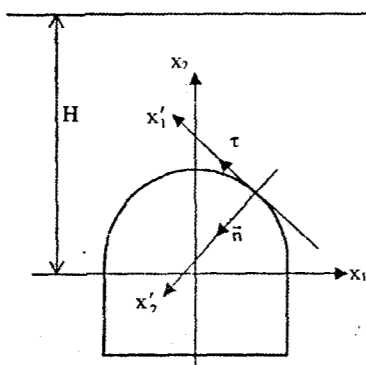


Рис. 2. Подземная выработка:
 x_1, x_2 – глобальные координаты;
 x'_1, x'_2 – локальные координаты точек границы выработки Γ ;
 $\bar{n}, \bar{\tau}$ – единичные нормальный и касательный вектора в точке границы Γ

Далее в главе дано решение ряда задач с учетом конкретных горно-технических факторов. С помощью ГЭ модели расчета анизотропного массива горных пород проведена численная оценка напряженного состояния породного массива вокруг выработки сводчатого профиля, находящейся в зоне влияния глубокого каньона. Контур выработки аппроксимируется восемью суперэлементами, каждый из которых затем автоматически разбивается еще на десять элементов. В зонах большей кривизны, где следует ожидать большой градиент напряжений, проводится сгущение граничных элементов. В качестве суперэлементов использованы отрезки парабол и дуги окружности. Это позволило с помощью минимального числа суперэлементов достаточно точно аппроксимировать границу выработки. На рис. 3 представлены контурные напряжения для шатрообразной выработки, расположенной как в анизотропной, так и в изотропной среде. Из него видно, что распределение контурных напряжений для анизотропного и изотропного случаев качественно подобно, хотя и имеется некоторое количественное различие. Сравнивая полученные значения напряжений с соответствующими аналитическими данными, можно сделать следующие выводы: контурные напряжения, полученные численным и аналитическим методами, качественно совпадают между собой; наибольшее расхождение результатов наблюдается в зонах концентрации напряжений, причем погрешность для анизотропного массива выше, чем для изотропного. Исследовано влияние трещиноватости вмещающего сооружения массива на его напряженно-деформированное состояние. Рассматривается напряженное состояние массива с тонкими параллельными трещинами вокруг двух подземных камер и в целике между ними (рис.4).

Основной материал массива изотропный, трещины заполнены глиной. Геометрические размеры задачи представлены на рис. 4.

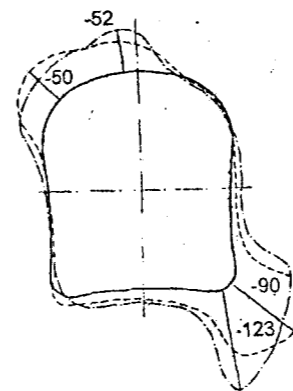


Рис. 3. Контурные напряжения на границе выработки:

----- для анизотропного массива; - - - - - для изотропного массива

Выработки расположены на глубине 185 м. Начальные напряжения в массиве:

$$\sigma_{11}^0 = -2,5 \text{ МПа} ; \quad \sigma_{22}^0 = -5 \text{ МПа} ; \quad \sigma_{12}^0 = 0.$$

Граница каждой камеры разбивается на 32 элемента. На рис. 5 показаны контурные напряжения, полученные для правой камеры. Их величины в точках границы отложены вдоль линии, соединяющей центр выработки с рассматриваемой точкой. Заметим, что концентрации упругих напряжений в этих точках не имеют практического значения, поскольку углы выработок в действительности сглажены либо по проекту, либо в результате локальных разрушений породы в углах. На рис. 5 сплошной линией изображены тангенциальные напряжения для изотропного тела, пунктирной - для анизотропного. Видно, что анизотропная модель приводит к уменьшению сжимающих напряжений в боковых сторонах камеры к появлению высоких растягивающих напряжений в кровле и в подошве камеры.

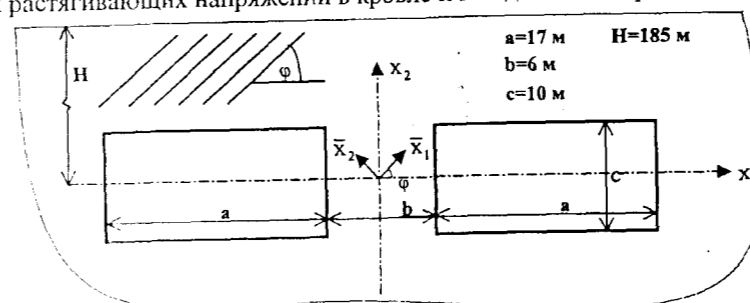


Рис. 4 Целик между двумя камерами в анизотропном массиве

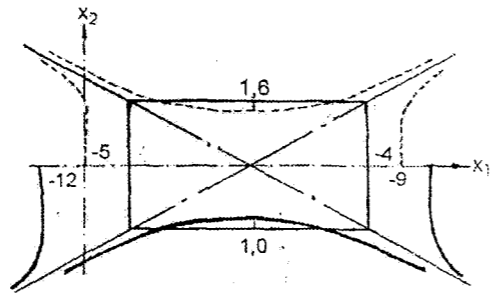


Рис 5. Тангенциальные напряжения на контуре правой камеры

На рис. 6. показано изменение напряжений $-\sigma_{11}$ и $-\sigma_{22}$ в зависимости от x_1 . Из этого рисунка видно также, что анизотропия сдвигает максимум опорного давления вглубь массива, несколько разгружает целик и вызывает появление горизонтальных растягивающих напряжений в целике между выработками. Отсюда следует, что учет анизотропии породного массива может привести к неверным выводам относительно устойчивости подземных выработок и целиков.

Рассматривается напряженно-деформированное состояние породного массива вокруг двух прямоугольных выработок, проводимых вблизи геологического нарушения.

Расчетная схема задачи показана на рис. 7. На рис. 8 показана диаграмма тангенциального напряжения на сторонах контура при значениях физико-механических характери-

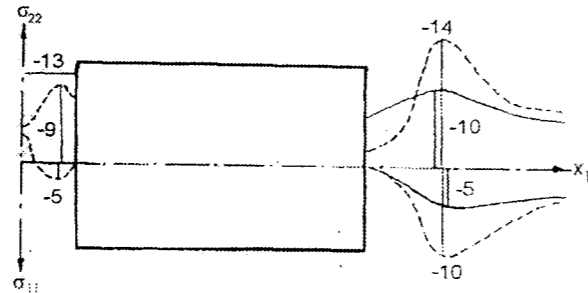


Рис. 6. Вертикальные и горизонтальные напряжения вдоль оси x_1
 — для изотропного массива, - - - для анизотропного массива

стик нарушения: $E_n=1$ МПа, $\nu_n=0,3$ (рис. 8). Эти результаты получены путем дискретизации нарушения элементами длиной порядка двух длин элементов разбивки контура выработки. Как и следовало ожидать, учет геологического нарушения приводит к несимметричности решения. Тангенци-

альные сжимающие напряжения уменьшаются на боковых стенках левой выработки и увеличиваются на боковых стенках правой выработки. С практической точки зрения интересным является появление зон растягивающих напряжений в кровле и почве выработок. Величины этих растягивающих напряжений зависят от степени жесткости нарушения. В случае малой жесткости нарушения в почве обеих выработок возникают зоны растяжения.

Изучается напряженно-деформированное состояние породных массивов вокруг системы подземных сооружений. На рис.9 показано система выработок, имеющая вместо сплошной камерной разработки. Принято, что породный массив однородный и изотропный. Анализ решения показывает прежде всего, что наличие зон всестороннего растяжения в кровле и почве выработок, особенно ближайших к камере. В этих же областях мала интенсивность касательных напряжений. Следовательно, как в кровле, так и в почве выработок не должно быть динамических проявлений напряжений. Регулярными наблюдениями за состоянием выработок не было отмечено ни одного случая шелушения или интенсивного заколообразования в кровле, в них наблюдалось заметное раскрытие субвертикальных трещин и имели место единичные случаи вывалов. Динамические разрушения имели место в бортах выработок, близких к очистным камерам.

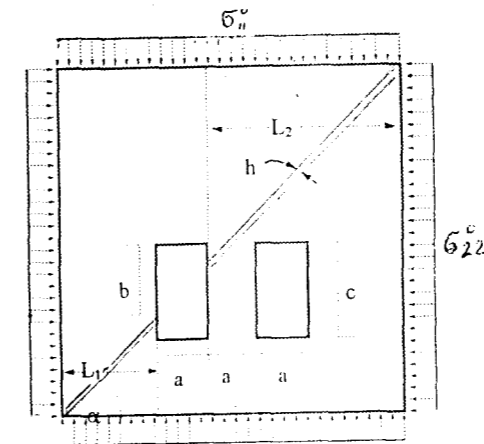


Рис 7. Две очистные выработки вблизи геологического нарушения.
 $a=6$ м, $b=8$ м, $c=10$ м, $h=0,1$ м, $L_1=18$ м, $L_2=26$ м, $\alpha=45^\circ$,
 $\sigma_{11}^0 = -2,5$ МПа, $\sigma_{22}^0 = -5$ МПа, $\sigma_{12}^0 = 0$

Интенсивность касательных напряжений в нетронутом массиве предполагалась равной 12,5 МПа. В результате расчетов в целиках, близких к камере, получено значение интенсивности касательных напряжений более 30 МПа. В непосредственной близости от контуров всех выработок отме-

чены зоны повышенных сжимающих напряжений. Натурные измерения и визуальные наблюдения подтверждают наибольшую подверженность разрушению целиков, ближайших к камерам. Полученные результаты

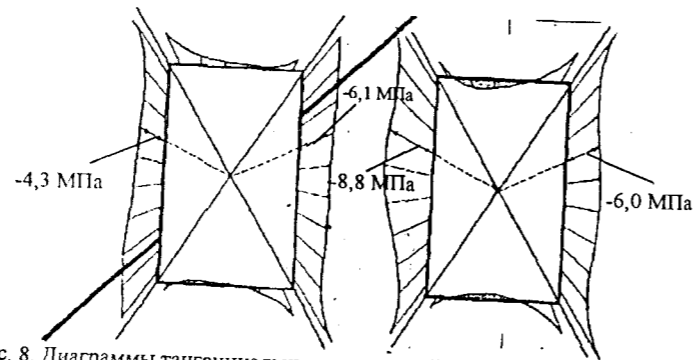


Рис. 8. Диаграммы тангенциальных напряжений на контурах выработок, проведенных вблизи геологического нарушения; зоны растягивающих напряжений заштрихованы; $E=10^4$ МПа, $\nu=0,2$; $E_n=1$ МПа, $\nu_n=0,3$

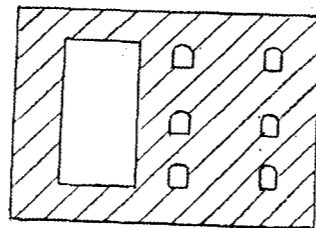


Рис. 9. Система выработок

расчетов и их сравнение с выявленными закономерностями позволяют заключить, что упругая модель породного массива может быть использована для качественного анализа и количественной оценки напряженного состояния окрестности системы выработок; расчеты по упругой модели дают возможность планировать проведение инструментальных измерений в выработках; максимальные концентрации напряжений испытывают целики, ближайшие к очистному пространству; в подготовительных выработках необходимо предусматривать крепление, работающее в бортах в условиях динамических разрушений, а в кровле предотвращающее вывалы по тектонической нарушенности; в бортах выработок, ближних к камере, приурочена к пяте свода, где и происходит абсолютное большинство случаев динамических разрушений.

Важный класс задач связан с выработками в пластообразных (жиль-

ных) залежах. Такие залежи характеризуются тем, что один их размер мал по сравнению с двумя другими размерами. Напряжения и смещения, вызванные проведением выработки в пластообразной залежи, можно вычислять, используя специальный вариант метода граничных элементов. Однако для целей проектирования зачастую нет необходимости рассматривать детально каждую выработку. Обычно приходится иметь дело с крупномасштабной задачей оценки влияния одной выработки на другую или влияния всех выработок на напряжения и смещения некоторого участка массива (или залежи), в котором планируется провести туннель или какую-либо другую вспомогательную выработку. В таких случаях наиболее важными оказываются взаимные смещения верхней и нижней поверхностей пласта, а их можно моделировать с помощью *одного* элемента разрывных смещений, представляющего собой короткий отрезок, включающий обе поверхности (и верхнюю, и нижнюю) пластообразного тела. Иначе говоря, пренебрегают реальной мощностью залежи, и она представляется как контакт, заполненный сжимаемым материалом. Такой контакт моделируется пластовыми элементами. Каждый пластовой элемент связан с постоянным разрывом смещений с компонентами D_s и D_n , представляющими собой взаимное нормальное и касательное смещения верхней и нижней поверхностей пласта. Решение конкретной задачи определяется значениями разрывов смещений во всех пластовых элементах. Их можно найти, как обычно, путем решения системы алгебраических уравнений. Вид этой системы зависит от того, допускается или нет начальное деформирование пласта. При использовании пластовых элементов принимаются два предположения: 1) мощность пласта пренебрежимо мала по сравнению с его продольными размерами, 2) каждый пластовой элемент вне выработки работает как пружина с заданными нормальной и сдвиговой жесткостями. Можно ожидать, что ошибки, обусловленные этими предположениями, малы для тонких пластов. Это можно проверить, сравнив решение, полученное с использованием пластовых элементов с гранично-элементным решением, в котором учитывается мощность пласта и обе ее поверхности моделируются по отдельности. В качестве примера рассмотрена изолированная прямоугольная выработка шириной $2L$ в пласте мощностью h в бесконечном массиве пород. Выработка вытянута вдоль оси x_1 , как показано на рис. 10, и предполагается, что на бесконечности имеет место одноосное напряженное состояние $\sigma_{22}^0 = -P$. Можно было бы получить гранично-элементное решение при произвольных упругих свойствах пласта, но для простоты положим, что он имеет такие же свойства, как и окружающий его массив. Для рассматриваемой задачи получены численные решения: 1) применением прямого метода граничных интегралов к прямоугольной выработке для случая $2L/h = 10$, $\nu=0,2$ и $P/E = 10^{-3}$; 2) использованием пластового элемента при значении жесткости пласта K_n , равном E/h .

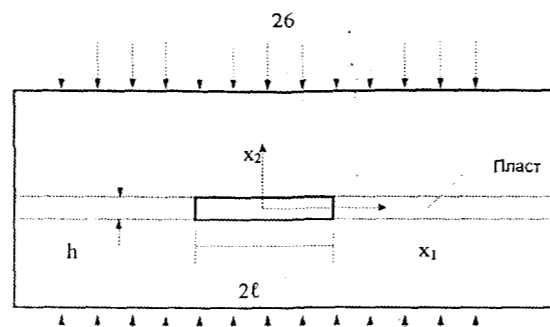


Рис. 10. Прямоугольная выработка в однородном массиве пород

В этой задаче необходимо задавать только нормальную жесткость. Вычисленное распределение взаимного нормального смещения противоположных поверхностей пласта ($x_2 = \pm h/2$) показано на рис. 11, на котором сплошная кривая представляет график разности смещений $u_2(x_1, -h/2) - u_2(x_1, +h/2)$, определенной с помощью прямого метода граничных интегралов, а пунктирная линия дает непосредственно разрывы смещений, вычисленные с использованием модели пластового элемента. Видно, что эти два решения хорошо согласуются между собой.

Рассмотрено также напряженно-деформированное состояние массива пород вокруг выработки, проводимой вблизи пластообразной залежи. Результаты расчета пока зан на рис. 12.

Исследовано напряженно-деформированное состояние массива пород при камерной системе разработки полезных ископаемых с закладкой. При отработке некоторых крутопадающих мощных рудных тел применяют камерную систему с закладкой выработанного пространства. Например, при отработке руды в условиях Текелийского свинцово-цинкового

$$\{u_2(x_1, -h/2) - u_2(x_1, +h/2)\} / h$$

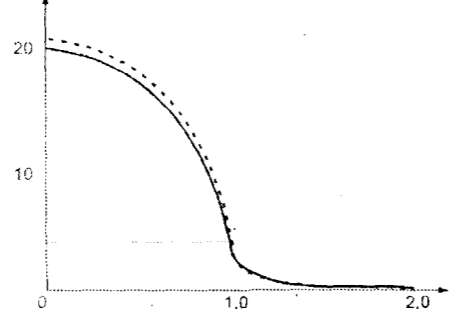


Рис. 11. Относительные нормальные смещения поверхности пласта:
1 – решения с использованием пластовых элементов
2 – решение с использованием прямого метода граничных элементов

месторождения выработанные пространства полностью закладываются бетоном. Вмещающий массив сложен сланцами (рис. 13).

Отработка руды производится четырьмя подкамерами в следующем порядке:

- отрабатывается камера 1 и закладывается бетоном,
- отрабатывается камера 3 и закладывается бетоном,
- отрабатывается камера 2 и закладывается бетоном,
- отрабатывается камера 4 и закладывается бетоном.

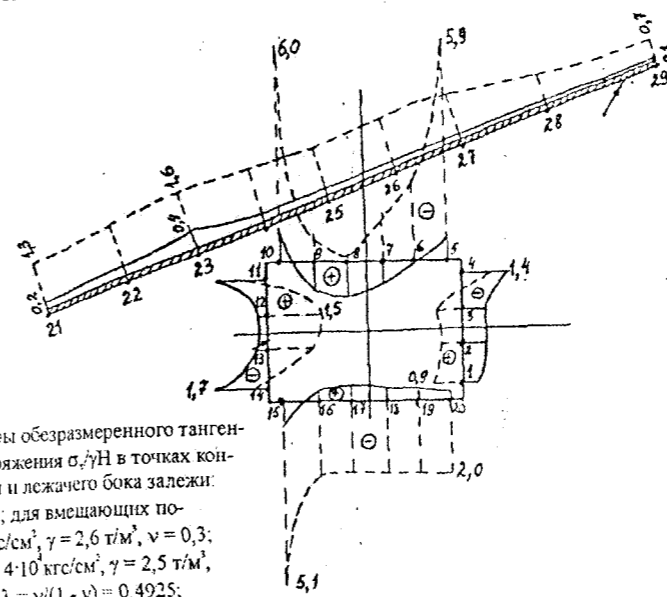


Рис. 12. Эпюры обезразмеренного тангенциального напряжения σ_{ij} в точках контура выработки и лежачего бока залежи:
• узловая точка, для вмещающих пород $E = 4 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$, $\gamma = 2,6 \text{ т/м}^3$, $\nu = 0,3$;
для залежи $E = 4 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$, $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$, $\nu = 0,33$; --- $\lambda = \nu / (1 - \nu) = 0,4925$;
- - - $\lambda = 3$
М 1:100 (см), 1 см : 1 ед. σ_{ij}

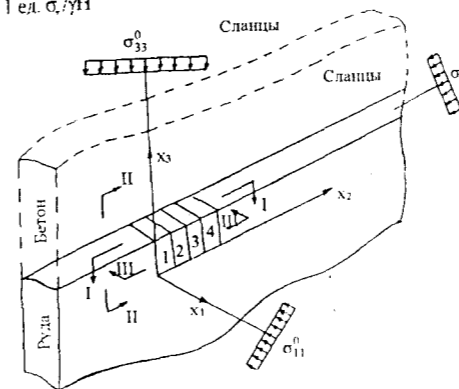


Рис. 13. Схема камерной системы отработки рудного тела: 1, 2, 3, 4 – подкамеры

Все размеры камер соизмеримы между собой, следовательно, при определении напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг камер необходимо рассматривать пространственную задачу, трудно поддающуюся решению. Поэтому целесообразно эту пространственную задачу разбить на ряд плоских задач для сечений I-I, II-II, III-III (рис. 13.), решение которых позволит учесть неоднородность строения массива вокруг блока камер.

Слагающие массив породы представлены рудой, сланцами и бетоном деформационные характеристики которых резко отличаются между собой. Упругий модуль бетона в 40 раз меньше, чем сланцев, и в 60 раз ниже, чем руды, поэтому несмотря на то, что отработанное пространство закладывается бетоном, в окрестности контактов руда-бетон происходит резкая концентрация напряжений. Численные результаты для тангенциальных граничных напряжений показаны на рис. 14.

На контактах сланцы-руда-бетон наблюдаются большие сдвиговые усилия, поэтому вследствие неоднородности массива нагрузку в окрестности камеры по оси x_1 необходимо увеличить в среднем в 4 раза ($K_n = \sigma_{\max}^{\text{плоск}} / \sigma_{\infty} = -150 / (-33) = 4,5$; K_n — коэффициент неоднородности, получаемый из решения задачи для сечения II-II).

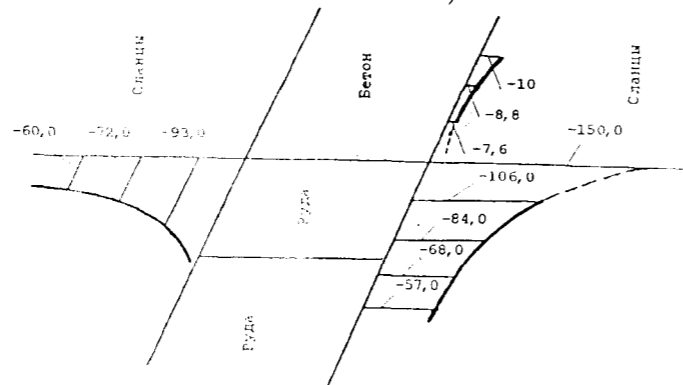


Рис. 14. Распределение тангенциальных граничных напряжений в сечении II-II

Таким образом, в данной главе дана постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии геомеханически однородных и неоднородных массивов вокруг подземных сооружений; путем гранично-элементного моделирования решена задача об оценке напряженного состояния анизотропного массива пород вокруг сводчатой выработки, проводимой вблизи глубокого каньона; в целях выяснения влияния трещиноватости породного массива исследовано его напряженное состояние вокруг двух подземных камер в целом и между ними. Основной материал принят

изотропным, а трещины заполнены глиной; при изменении расстояния между трещинами до 6 раз значения максимальных растягивающих напряжений изменяется незначительно (примерно на 5%), а максимальное растягивающее напряжение изменяется ощутимо (более, чем на 50%, причем чем меньше расстояние между трещинами, тем выше напряжения); исследование поле напряжений в породном массиве вокруг двух камер когда левая камера пересекается геологическим нарушением показывает, что оно распределяется несимметрично. Контурные сжимающие напряжения уменьшаются на боковых стенках левой выработки и увеличиваются на боковых стенках правой выработки. Оказывается, что в кровле и почве камер имеет место растягивающие напряжения, причем их величины зависят от степени жесткости нарушения. В случае малой жесткости нарушения в почве обеих камер возникают зоны растяжений; в результате решения задачи о напряженно-деформированном состоянии породного массива вокруг очистной камеры и выработок, проводимых вблизи нее, прежде всего отмечено наличие зон всестороннего растяжения в кровлях и почвах ближайших камер выработок; в непосредственной близости от границ всех выработок отмечаются зоны повышенных сжимающих напряжений. Натурные измерения и визуальные наблюдения подтверждают наибольшую подверженность разрушению к камерам целиком; больший класс задач горной геомеханики связан с проведением выработок в пластообразных залежах, характеризующихся малой мощностью. Напряжения и смещения, вызываемые проведением выработок в таких пластах можно вычислять с помощью прилагаемого специального варианта метода граничных элементов. Решение задачи для одной прямоугольной выработки, расположенной в пласте показывает, что распределения взаимного нормального смещения противоположных поверхностей пласта, определенные прямым методом граничных элементов и с использованием модели пластового элемента хорошо согласуются между собой. Из анализа результатов решения следует, что точность модели с пластовыми элементами зависит от значений начальных нормальных и касательных напряжений, действующих в пласте, а также от размеров взаимного расположения выработок; исследовано распределение напряжений в вмещающем массиве пород и в конструктивных элементах камерной системы отработки круто падющих рудных тел с закладкой. Поставлена задача отработки руды четырьмя подкамерами. Слагающий массив породы представлены рудой, сланцем и бетоном, деформационные свойства которых резко отличаются между собой. Решение показывает, что чем больше отработанное пространство (даже заложено), тем больше концентрация напряжений. Отсюда следует, что наиболее опасной с точки зрения устойчивости оказывается отработка последней (четвертой) камерой.

В пятой главе рассмотрена проблема оценки напряженного состояния конструктивных элементов подземных сооружений и окружающих по-

родных массивов с учетом близости дневной поверхности и влияния рельефа местности.

Когда глубина заложения горных выработок мала, нельзя пренебрегать влиянием дневной поверхности на напряженно-деформированное состояние массива вокруг них. Наличие неровностей дневной поверхности, гор и впадин существенно сказывается на напряженном состоянии как массива ниже уровня долин, так и нагорной его части.

Во главе для оценки напряженного состояния конструктивных элементов приповерхностных сооружений и вмещающих горных массивов предложена гранично-элементная модель. В этой модели массив горных пород имитируется весовым полупространством и полуплоскостью, фундаментальные решения для которых автоматически учитывают условия на дневной поверхности и на бесконечности.

Для расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов сооружений неглубокого заложения и вмещающих их пород разработана гранично-элементная модель, учитывающая форму рельефа дневной поверхности. На основе ГЭ модели рассматривается задача о напряженном состоянии породного массива с рельефом дневной поверхности в виде одиночной протяженной горы. Расчет выполнен по компьютерной программе, составленной на базе разрешающих соотношений ПМГЭ.

Геометрическая схема задачи, дискретизация рассматриваемой области и ее границы, а также эпюра контурного напряжения показаны на рис. 15. Приняты следующие значения физико-механических характеристик пород: $E = 4 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2$, $\nu = 0,25$, $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$. Граница выбранного участка массива разбивается на 223 постоянных элемента, и напряжения и перемещения рассматриваются в его 223 граничных и 150 внутренних точках.

На рис. 16 показаны картины распределения вертикального напряжения в нижележащем массиве и в горном хребте. На этом рисунке для сравнения приведены также соответствующие результаты, полученные с помощью других методов. Как видим, значения напряжения, рассчитанные исходя из предлагаемой ГЭ модели и аналитически, наиболее близки друг к другу, но ощутимо отличаются от решения, соответствующего весу пород.

Исследовано поле напряжений вокруг подготовительных и очистных выработок мелкого заложения. На примере прямоугольной очистной выработки не глубокого заложения показано влияние на напряженное состояние степени близости дневной поверхности. Данную задачу можно решить аналитически или численно, в частности, с помощью МГЭ.

По результатам расчетов построены линии равных значений безразмерных напряжений $\sigma_{11} / \gamma H$ и $\sigma_{22} / \gamma H$ (рис. 17 и 18). В результате анализа полученных данных установлены следующие закономерности распределения напряжения от действия собственного веса пород:

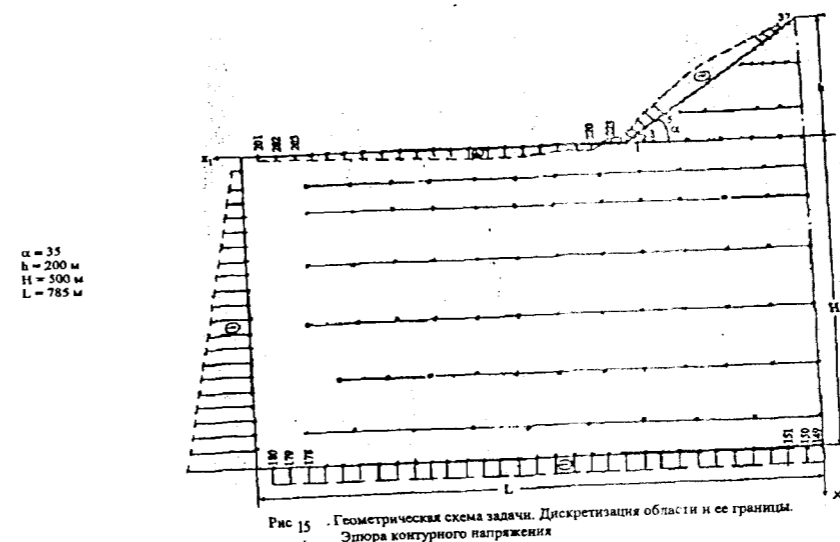


Рис. 15. Геометрическая схема задачи. Дискретизация области и ее границы. Эпюра контурного напряжения

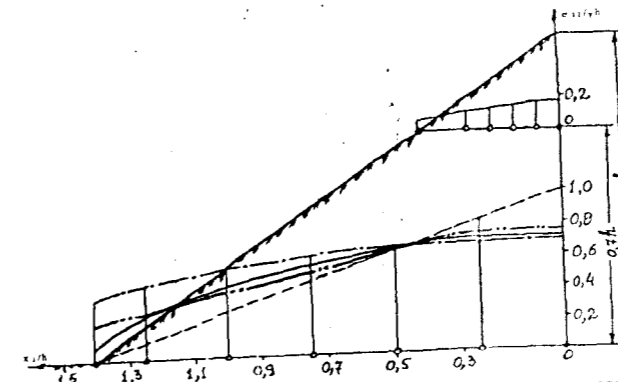


Рис. 16. Распределение вертикальных напряжений в одиночном горном хребте, соответствующих весу пород (---); рассчитанных аналитически (.....); рассчитанных по МКЭ (-.-.-.-); рассчитанных по МГЭ (—)

- 1) в горизонтальных сечениях кровли выработок с удалением от оси x_2 в массив безразмерное напряжение возрастает от некоторого значения $\sigma_{22} / \gamma H \leq 0,2$, достигая максимального значения на расстоянии $x_1/L = 0,6$, а затем убывает до значения $\sigma_{22} / \gamma H = 1$;
- 2) резкий переход напряжения $\sigma_{22} / \gamma H$ к максимуму имеет место в интервале $0,4 < x_1/L < 0,6$;

- 3) максимальные значения напряжения $\sigma_{22}/\gamma H$ возрастают с приближением к контуру выработки от 0,7 до 1,4 для $H/L=2$, от 1 до 2,1 для $H/L=1$, от 1,25 до 3,7 для $H/L=0,67$;
- 4) максимальная концентрация напряжения σ_{22} имеет место в углах и стенках выработок, достигая (в стенках выработок по сечениям $x_2=H$) значений $2,2\gamma H$ для $H/L=2$, $3,5\gamma H$ для $H/L=1$ и $6\gamma H$ для $H/L=0,67$;
- 5) безразмерное напряжение $\sigma_{11}/\gamma H$ в сечениях, прилегающих к стенкам выработок, возрастает от 0 до 0,36 для $H/L=2$, от 0 до 0,64 для $H/L=1$ и от 0 до 1 для $H/L=0,67$, а затем постепенно убывает до значений, близких к нулю. При этом расстояние от выработки до места, где достигается максимум напряжения σ_{11} , не превышает величины $x_1=0,15L$;
- 6) в сечениях выше кровли и ниже почвы выработок напряжение σ_{11} оказывается растягивающим. Максимальные значения безразмерного растягивающего напряжения $\sigma_{11}/\gamma H$ наблюдаются на линии $x_1=0$ и возрастают с приближением к границе выработки до 1 для $H/L=2$, до 1,5 для $H/L=1$ и до 2,5 для $H/L=0,67$.

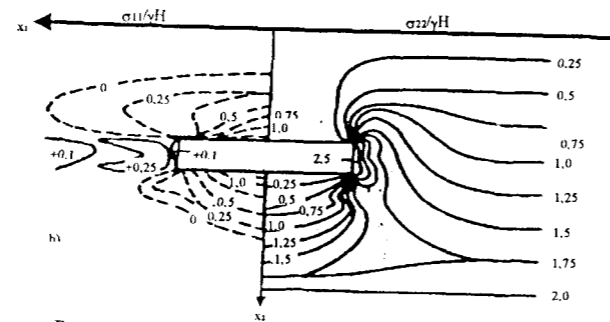


Рис. 17. Линии равных значений безразмерных напряжений $\sigma_{11}/\gamma H$ и $\sigma_{22}/\gamma H$ для $H/L=1$

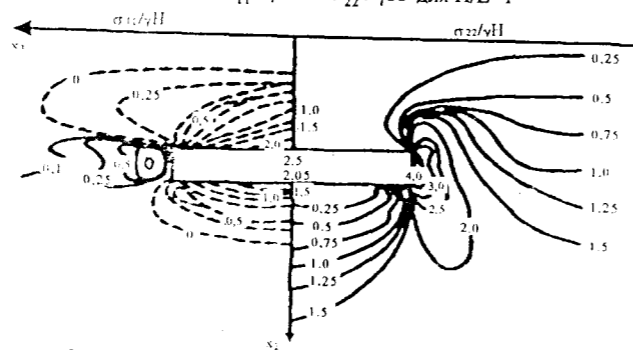


Рис. 18. Линии равных значений безразмерных напряжений $\sigma_{11}/\gamma H$ и $\sigma_{22}/\gamma H$ для $H/L=0,667$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе дано новое направление в решении имеющей важное практическое и социальное значение крупной научной проблемы, заключающейся в разработке аналитико-численных методов оценки напряженно-деформационного состояния конструктивных элементов подземных и приповерхностных сооружений и вмещающих массивов пород на основе гранично-элементного моделирования, направленных на обеспечение безопасности, экономичности и эффективности ведения работ при освоении горных территорий.

В заключение по работе можно сделать следующие основные выводы.

1. Показано, что для теоретического исследования напряженно-деформированного состояния актуально дальнейшее развитие аналитических и численных методов. Однако чисто аналитическое решение подавляющего большинства задач весьма затруднительно, поэтому ученые много внимания уделяют новым эффективным численным методам. В настоящее время интенсивно используются удачно дополняющие друг друга методы конечных и граничных элементов. В силу ряда своих специфических особенностей в задачах механики подземных сооружений и сплошных сред методы граничных элементов все более превалируют над другими известными численными методами.

2. Разработан модифицированный метод граничных элементов для решения задач в напряженном состоянии конструктивных элементов подземных сооружений различного назначения и окружающих породных массивов. В целях повышения эффективности метода интегральные коэффициенты разрешающей системы уравнений вычислены в аналитически замкнутой форме, а также дан новый подход к решению разрывных задач.

3. Разработаны гранично-элементные модели оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов подземных сооружений и вмещающих породных массивов, которые

- имеют блочно-неоднородное строение;
- однородны и содержат тектонические трещины;
- имеют слоистое и трещиновато-блочное строение;
- анизотропны и содержат тектонические трещины;
- имеют мелкослоистое строение;
- содержат пластообразные (жильные) залежи.

4. Разработаны гранично-элементные модели для решения задач горной геомеханики с учетом горнотехнических факторов. С помощью этих моделей решены практически важные задачи о напряженно-деформированном состоянии

- анизотропных массивов пород вокруг подземной выработки, проходящей вблизи глубокого каньона;

- трещиноватых породных массивов, вмещающих подземные выработки;
 - массивов пород вокруг подземных сооружений различного назначения;
 - окрестности выработки, проводимой вблизи пластообразной залежи;
 - породных массивов при камерной системе разработки полезных ископаемых с закладкой отработанных пространств.
5. Исследовано напряженное состояние конструктивных элементов подземных сооружений и окружающих их массивов с учетом близости дневной поверхности и влияния формы рельефа местности. При этом
- учет влияния дневной поверхности осуществляется применением постросенных нами модификации прямого метода граничных элементов для деформируемых полупространства и полуплоскости;
 - учет влияния рельефа местности достигается введением в метод граничных элементов объемных (гравитационных) сил;
 - оценено влияние глубины заложения подземных сооружений на распределение напряжений вокруг них;
 - решена задача о напряженном состоянии массива под одиночной горой.
6. По результатам исследований разработаны и переданы для внедрения
- на объектах треста Средаздорстрой (г. Душанбе) рекомендации «Исследование устойчивости скальных склонов и разработка рекомендаций по укреплению откосов»;
 - на объектах Средазцветмет (г.Ташкент) «Методические рекомендации по расчету целиков с учетом опасности ударов при разработке Ингичкинского вольфрамого месторождения»;
 - Текелийскому свинцово-цинковому комбинату (Казахстан) рекомендации по расчету устойчивых параметров камер при отработке маломощных рудных тел Текелийского месторождения;
 - в учебном процессе в качестве учебного пособия при подготовке инженеров, магистров и аспирантов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Кожаметов К.Х., Кравченко О.Ф. К вопросу о выборе критерия локального разрушения // Сб. «Пластичность и прочность материалов и конструкций».- Фрунзе: изд. ФПИ, 1981,-с. 68-71.
2. Джороев Т.Д., Кожаметов К.Х., Кравченко О.Ф., Об оценке устойчивости скальных откосов//Известия АН Кирг.ССР, 1981, №4, с.21-27.

АННОТАЦИЯ

Диссертациялык иш чектуу элементардин негизги туз методунун эффективдуу эсеп моделдерин иштеп чыгууга ар турдуу сооружеилердин конструкциялык элементарин чыналуу-майышуу абалына баа берууго тоо тектериндеги, тоо-геологиялык жана тоо-техникалык факторлордун эсеби менен байланышкан актуалдуу проблеманы чечууго арналган.

Тоо геомеханикалык эсептерди чыгарууда пайданалуучу практикалык жактан ыңгайлуу формадагы чектуу интегралдардын туз методу иштелип чыкты.

Ар турдуу эсептерди чыгарууда пайда болуучу кыйынчылыктардан чыгуу учун «кош туйундор» «узгультуктуу элементар» менен алмашылып эсептоо бир кыйлаа женилдетилген.

Изотроптук, анизотроптук жана жаракалуу тоо тектердин чыналуу-майышуу абалын изилдоо учун чектуу элементардин атайын модели иштелип чыкты.

Жер бетине жакын жайгашкан сооружеилердин конструкциялык элементарин чыналуу-майышуу абалын эсептоого ыңгайлуу эффективдуу модели иштелип чыкты.

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы - разработке основанных на прямом методе граничных элементов эффективных расчетных моделей для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов сооружений различного назначения и вмещающих массивов горных пород с учетом основных горно-геологических и горно-технических факторов.

Применительно к решению задач горной геомеханики построена модификация прямого метода граничных интегралов, в которой разрешающие соотношения представлены в удобной для практического применения альтернативной форме путем аналитического вычисления интегральных коэффициентов основной алгебраической системы уравнений метода.

Для преодоления трудностей, возникающих при рассмотрении разрывных задач, взамен «сдвоенных узлов» вводятся «разрывные элементы», позволяющие существенно сократить вычислительную процедуру и время машинного счета при решении обширного класса задач с входящими углами.

Для исследования напряженно-деформированного состояния изотропных, анизотропных, а также трещиноватых породных массивов предложены специальные гранично-элементные модели.

Разработаны эффективные расчетные модели для определения напряженного состояния конструктивных элементов приповерхностных сооружений с учетом близости дневной поверхности и формы рельефа местности.

ANNOTATION

Dissertation the activity is dedicated to the solution of an actual problem - mining founded on a direct method of boundary units of effective computational models for an estimation of tight - strained state of structural members of facilities of different assignment and containing rock masses with allowance for of main mining-and-geological and mine technical factors.

With reference to problem solving of mining geomechanics the modification of a direct method of boundary integrals is constructed, in which one the resolving ratio are shown in convenient for operational use to the alternate form by analytical calculation of integral factors of the main algebraic set of equations of a method.

For overcoming difficulties arising by consideration of burst problems, return "of twin clusters" the burst units "are entered", permitting it is essential to reduce a computing procedure and time of the machine score at the solution of the vast class of problems with reentrant angles.

For research of tight - strained state isotropic, anisotropic, and also jointed rock masses the special boundary element models are offered.

The effective computational models for definition of a state of stress of structural members of near-surface facilities with allowance for of affinity of a daylight area and form of a relief of terrain are developed.