

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И.РАЗЗАКОВА
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ им.
Н.ИСАНОВА**

Диссертационный совет Д.01.15.505

**На правах рукописи
УДК:622.831(043.5)**

МОЛДОШЕВ РУСЛАН АЛДАШЕВИЧ

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД С
УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ДИЛАТАНСИИ И РАЗУПРОЧНЕНИЯ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук**

Бишкек – 2015 г.

Диссертационная работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Абдылдаев Эркинбек Кыянович;

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тажибаев Кушбакали Тажибаевич;

доктор физико-математических наук,
профессор
Салиев Алишер Борубаевич;

Ведущая организация: Институт математики и механики
при КазНУ им. аль-Фараби.

Защита состоится 12 июня 2015 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Межвузовского диссертационного совета Д.01.15.505 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при Кыргызском государственном техническом университете им. И.Раззакова и Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г.Бишкек, пр. Мира, 66, ауд.1/314.

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

Автореферат разослан " ____ " _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.01.15.505,

к.ф.-м.н., доцент

Мекенбаев Б.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Известно, что твердые тела и прочные горные породы до некоторого предела близки по своим свойствам к линейно-упругим средам и определяются законом Гука. При воздействии значительных сил, превышающих прочность, тела испытывают неупругие деформации. Поэтому изучение механизма неупругого деформирования после достижения предела прочности имеет большое значение при расчете несущей способности различных современных конструкций и при исследовании закономерностей проявлений горного давления в процессе горного производства.

Аналитические решения задачи о напряженно-деформированном состоянии среды вокруг выработок при неравномерном сжатии в упруго-пластической постановке с учетом запредельного деформирования малочисленны. Получены некоторые решения задачи в условиях пластичности Треска и Кулона. В этих решениях имеются упрощающие предположения, что область неупругих деформаций охватывают весь контур выработки, угол внутреннего трения равен нулю и др.

Особенности запредельного деформирования породных массивов вблизи подземных выработок заключается в том, что вокруг горных выработок образуются зоны разрушения, зоны пластических и упругих деформаций охватывающих часть контура или весь контур в зависимости от граничных условий и профилей контура, а также заданного закона состояния среды. Математическое описание процесса формирования областей неупругих деформаций вблизи выработок и получения решения аналитическим методом представляется достаточно сложным. В связи с этим для наиболее полного исследования данной проблемы на сегодняшний день, необходимо использовать эффективные численные методы математики и механики с применением современной информационной техники и технологии.

Связь темы диссертации с основными научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ кафедры "Механика" Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Целью диссертационной работы является установления механизма и закономерностей изменения напряженного состояния массива в процессе горного производства, с учетом эффекта дилатансии и разупрочнения пород.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- на основе анализа и обобщение результатов научных исследований, достижений техники и практики по оценке напряженно-деформированного

состояния горного массива вблизи подземных выработок определит общую методику исследования проблемы;

- сформулировать на основе краткой записи тензорной и векторно-матричной, основные положения теории деформирования горных пород и построить соответствующие математические соотношения;

- на основе изучения особенностей экспериментальных диаграмм предельного деформирования (дилатансии и разупрочнения) горных пород обосновать расчетные механические характеристики массива пород;

- разработать математические модели сред для оценки напряженно-деформированного состояния массива вокруг подземных выработок (отверстий), позволяющей учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в процессе неупругой деформации горных пород;

- разработка численных процедур, алгоритмов и программ, реализующих расчетные модели на основе метода конечных элементов.

- решение практических задач, установления механизма и закономерностей изменения напряженного состояния массива в процессе ведения подземных горных работ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использован комплексный метод включающий анализ натуральных, лабораторных и аналитических исследований, выполненных на основе современных информационных технологий с использованием методов математического моделирования, теории пластичности, разрушения и численных методов математики.

Научная новизна полученных результатов:

- разработаны механико - математические модели сред для оценки напряженно-деформированного состояния массива вокруг подземных выработок (отверстий) кругового и сводчатого поперечного сечения, позволяющей учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в процессе неупругой деформации горных пород. В разработанной модели среды, в отличие от известных, описание границ прочности и текучести рассматривается в плоскости деформации, являющейся оптимальной для численной реализации и проведения сложных расчетов;

- в процессе исследования выделены новые характерные деформационные зоны, в моделях упруго - пластической дилатирующейся среды и среды с разупрочнением и дилатансии, построены с единых позиций соответствующие математические уравнения связи напряжений и деформаций;

- разработана методика и численные процедуры, на основе деформационной теории пластичности и метода конечных элементов, реализующие на ПК

линейно - упругий характер деформирования горных пород в допредельной стадии и позволяющая учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в запредельной стадии деформирования;

- в процессе решение задачи установлено, что зоны пластических деформаций вокруг горизонтальной выработки кругового поперечного сечения при коэффициенте дилатансии $\lambda = 1$ представляет собой эллипсоподобную фигуру, с ростом коэффициента дилатансии λ зоны неупругих деформаций при сравнительно небольших значениях бокового распора имеют форму четырехлистника. При этом размеры этих зон, а также смещения (конвергенция) точек выработки определяются комплексом деформационных и прочностных характеристик массива. С увеличением коэффициента дилатансии, также растет величина конвергенции.

Практическая значимость полученных результатов. Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования разработанного метода, алгоритмических и программных средств, для расчета напряженно-деформированного состояния горного массива вблизи выработок и оценки устойчивых параметров обнажений, позволяющих прогнозировать развитие геомеханических процессов в массивах с учетом эффекта дилатансии и разупрочнения.

Экономическая значимость полученных результатов. Разработанные механико - математические модели сред для оценки напряженно-деформированного состояния массива вокруг подземных выработок (отверстий), позволяющей учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в процессе неупругой деформации горных пород, позволяют повысить безопасность ведения горных работ и эффективности добычи полезных ископаемых. Разработанные методы и численные процедуры могут служить дополнением к дорогостоящим экспериментальным исследованиям.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- механико - математические модели сред для оценки напряженного состояния массива вокруг подземных выработок на современных глубинах разработки, позволяющей учитывать запредельные свойств горных пород, как разрыхление - увеличения объема (дилатансия) и разупрочнение (снижение сопротивляемости), применение которого во многом сближает расчетные прогнозируемые и реальные величины напряжений и деформаций;

- обоснованные расчетные механические характеристики массива пород сопротивляемость пород сдвигу: сцепление - C , угол внутреннего трения - φ , деформационные характеристики массива: модуль упругости - E ,

коэффициент Пуассона - ν с учетом соответственно коэффициентов структурного ослабления d_i и $R_{осл}^E, R_{осл}^v$;

- размеры, формы зон пластических деформаций и разрушения вокруг горизонтальной выработки кругового поперечного сечения при различных значениях коэффициента дилатансии и параметра разупрочнения; приближенный способ определения нагрузок в зависимости только от прочности контактирующих пород, не являются достаточно обоснованным для условия весьма прочных пород, поскольку нагрузка в районах прочного слоя формируется в основном в зависимости, от жесткости крепи и механических характеристик окружающего массива.

Личный вклад соискателя состоит в проведении самостоятельных исследований, в получении научных результатов для упруго - пластических задач вокруг подземных выработок (отверстий) кругового и сводчатого поперечного сечения и их анализа. В формулировании основных выводов, на основе которых были выполнены исследования механико-математических моделей сред для оценки напряженного состояния массива с учетом дилатансии и разупрочнение горных пород.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью постановки задачи и методов их решения, современными представлениями механизма деформирования породного массива вокруг горных выработок и адекватностью построенных математических моделей сред к реальным свойствам массива; доказательством научных положений строгими теоретическими методами, аналитическими расчетами и сопоставительным анализом конкретных примеров; системным подходом к исследованию решаемой проблемы и согласованностью результатов расчета с известным аналитическим решением и данным натурных наблюдений.

Апробация работы. Основные результаты исследований и научные положения диссертации докладывались на Международной научной конференции «Математическое моделирование в естественных науках» КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, 1997г.; на международной научно-практической конференции «Проблемы геомеханики и преподавания естественных дисциплин», КазГосЖенПУ, Алматы, 2012г.; на Международной научно-практической конференции (ММ ИТ ЭАУР) посвященной 50-летию КазЭУ им. Т.Рыскулова, Алматы, 2013г.; на Международной научной конференции, Бишкек, 2013г.; на 6 Международной научной конференции "Актуальные проблемы механики и машиностроения" посвященной 80-летию Казахского Национального технического университета имени К.И.Сатпаева и академика Национальной инженерной

академии РК, Действительного члена Нью-Йоркской Академии, д.ф.-м.н., профессора А.Н.Тюреходжаева 18-19 июня 2014, г.Алматы; на расширенном заседании кафедры «Механика» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (Бишкек - 2013г., 2014г)

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Материалы диссертационной работы опубликованы в 13 научных статьях в периодических изданиях Кыргызской Республики и Республики Казахстан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 147 страницах компьютерного текста, включая 47 рисунков, 10 таблиц и состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 91 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится анализ современного состояния изучаемой проблемы, указывается актуальность и необходимость проведения данного исследования, цель и задачи исследования, научная новизна, практическая и экономическая значимость, основные положения диссертации, выносимые на защиту, ее краткое содержание и апробации работы.

В первой главе на основе современного представление механизма деформирования массива вблизи выработок разработана общая методика исследования проблемы и в процессе изучения особенностей экспериментальных диаграмм запредельного деформирования (дилатансии и разупрочнения) горных пород обоснованы расчетные механические характеристики массива пород.

Деформации горных пород около выработок на современных глубинах разработки в основном протекают за пределами прочности. При этом при решении задач геомеханики большое значение имеет учет таких запредельных свойств горных пород, как разрыхление - увеличения объема (дилатансия) и разупрочнение (снижение сопротивляемости). Наиболее существенной особенностью в поведении горных пород является эффект разрыхления - увеличения объема (дилатансия) в процессе неупругой деформации. Явление разрыхления обнаружил известный ученый О. Рейнольдс, проводя опыты с песком под воздействием простого сдвига. Результаты экспериментальных испытаний горных пород отечественных и зарубежных ученых также показало, что горные породы увеличиваются в объеме при разрушении. Этот же эффект был подтвержден данными замеров перемещений по глубинным реперам и наблюдением в стенках скважин, пройденных в выработках с использованием прибора РВП. Результаты экспериментальных исследований поведения горных пород на жестком прессе стимулировали интенсивное развитие теоретических и численных

методов расчета проявлений горного давления в выработках. Первые математические модели, отражающие основные закономерности поведения разупрочняющихся материалов, предложены проф. Л.М. Качановым, где соотношения, определяющие однозначную связь между девиаторами напряжений и деформаций, ассоциируется законом пластического течения. На рис. 1 показана серия полных диаграмм для пород разной хрупкости, полученные профессорами А.Н. Ставрогиным и А.Г. Протосення в условиях одноосного сжатия на жестком прессе. Как видно из графиков, ниспадающие ветви проходят у некоторых пород на много круче, чем участок, описываемый законом Гука; поперечные деформации ε_2 на порядок превышают продольные ε_1 ; наблюдается очень сильное разрыхление породы за пределом прочности. Рассмотрим возможную интерпретацию полученных графиков связи деформаций ε_1 и ε_3 при пластическом течении для условий плоской деформации. При стабилометрических испытаниях прирост осевых деформаций $d\varepsilon^p_1$ сопровождается поперечными деформациями $d\varepsilon^p_2 = d\varepsilon^p_3 = d\varepsilon^r_3$. При этом объемная деформация равна

$$\varepsilon_v = d\varepsilon^p_1 + 2 d\varepsilon^r_3 \quad (1)$$

В условиях плоской деформации объемная деформация составляет

$$\varepsilon_v = d\varepsilon^p_1 + 2 d\varepsilon^p_3 \quad (2)$$

Если считать, что объемные изменения в обоих вариантах деформирования при данной величине прироста деформаций $d\varepsilon^p_1$ являются одинаковыми, то из равенства правых частей уравнений будет следовать

$$d\varepsilon^p_3 = 2 d\varepsilon^r_3 \quad (3)$$

т. е. при таком предположении скорость возрастания деформаций при плоском деформировании должна в два раза превышать скорость возрастания радиальных деформаций при стабилометрических испытаниях.

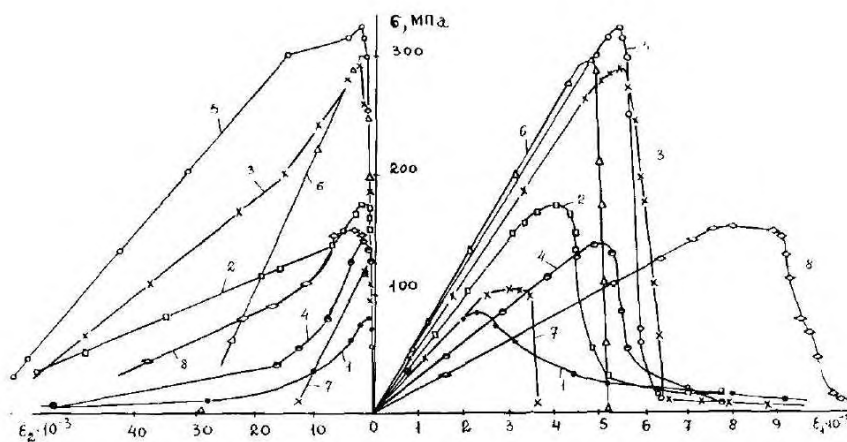


Рис. 1. Полные диаграммы для серии горных пород
 1 - мрамор; 2 - биотитовый гранит; 3 - биотитовый плагиогранит; 4 - песчаник НВО; 5 - плагиогранит; 6 - диабаз; 7 - талькохлорист; 8 - песчаник ВО.

Рассматривая с этой точки зрения графики на рис. 1 можно отметить, что коэффициент дилатансии λ при одноосном сжатии составляет около 10, по мере же увеличения бокового давления быстро снижается. При боковых давлениях свыше 200 кгс/см^2 (что составляет 30% от прочности на одноосное сжатие) λ становится равной $\cong 1$, т. е. Течение становится практически эквиволлюмиальным. Кроме того, независимо от величины бокового давления течение становится эквиволлюмиальным ($\lambda=1$) при осевых деформациях свыше $\varepsilon_0 \cong 1.2\%$. При одноосном сжатии или малой величине гидростатического давления увеличение осевых деформаций сверх величины, соответствующей пределу прочности образца, ведет к быстрому снижению его сопротивляемости. При увеличении гидростатического давления сопротивление образца по отношению к максимальному уровню уменьшается. Важной особенностью процесса деформирования образцов является определенная стабилизация сопротивляемости образца в запредельной области, которая может быть названа остаточной прочностью $\sigma^{\text{ост}}$.

Качественное решение задачи механики твердого деформируемого тела в значительной мере зависит от правильного выбора исходных данных. Для горных выработок, расположенных на больших глубинах, характерным является разрушение и запредельное деформирование пород вблизи контура выработок. Для описания этих процессов обычно привлекаются упруго - пластические решения, в качестве исходных данных к которым вводится большой комплекс механических характеристик, определяемых по полному паспорту прочности и деформируемости пород. В связи со сложностью проведения натуральных испытаний показатели паспорта прочности и деформируемости в большинстве случаев определяются в лабораторных условиях на монолитных образцах ограниченных размеров. При этом переход от механических характеристик монолита к аналогичным характеристикам реального массива осуществляются путем введения поправочных коэффициентов, учитывающих особенности строения массива пород и его напряженное состояние.

В качестве основных параметров, характеризующих сопротивляемость пород сдвигу рассматриваются сцепление C и угол внутреннего трения - φ . Нами на основе обобщения многочисленных экспериментов выявлено, что углы внутреннего трения для разрушенного и не разрушенного пород практически одинаковы, а сцепление существенно меняется.

Вопрос о взаимосвязи между механическими свойствами массива и образцов пород рассматривался во многих работах. Это взаимосвязь в

диссертационной работе определяется через значения коэффициентов структурного ослабления массива:

$$d_i = \frac{1}{1+a \ln(H_i/h_i)} \quad (4)$$

где коэффициент a — возрастает от 1 до 7 с увеличением прочности образцов пород от 1.0 до 100 МПа; H_i - глубина залегания, i - го типа пород; h_i - размер структурного блока i - го типа пород.

При этом зависимость между сцеплением в массиве (C_M) и в образце (C_0) через коэффициент d_i имеет вид

$$C_M = d_i C_0 \quad (5)$$

Для массивов, ослабленных трещинами

$$C_M = C_T + (C_0 - C_T)d_i \quad (6)$$

где C_T - сцепление контактов трещин.

Использование приведенных зависимостей позволяют в дальнейшем определить расчетные прочностные характеристики породного массива.

Характеристиками упругого поведения массива горных пород являются деформационные свойства E - модуль упругости и коэффициент Пуассона ν . Определение E и ν в настоящее время распространено почти так же, как определение прочностных показателей горных пород. Деформационные характеристики обычно определяются в лабораторных условиях на образцах горных пород в режиме нагрузки и разгрузки для нескольких циклов, измерением их продольных и поперечных деформаций. При этом модуль упругости

$$E_0 = \sigma^{жс} / \varepsilon_1^y \quad (7)$$

где $\sigma^{жс}$ - максимальное приложенное напряжение перед разгрузкой; ε_1^y - упругая продольная деформация при разгрузке; коэффициент Пуассона:

$$\nu_0 = \varepsilon_3^y / \varepsilon_1^y \quad (8)$$

где ε_3^y - упругая поперечная деформация при разгрузке;

При переходе от деформационных свойств пород определенных на образцах вышеизложенным способом, к деформационным свойствам массива необходимо учитывать характер нарушенности массива, закладывая в расчетную схему коэффициенты структурного ослабления $R_{осл}$:

$$R_{осл}^E = \frac{E_M}{E_0}; R_{осл}^\nu = \nu_M / \nu_0 \quad (9)$$

Во второй главе разработаны механико - математические модели сред для оценки напряженного состояния массива вокруг подземных выработок на современных глубинах разработки, позволяющей учитывать запредельные свойств горных пород, как разрыхление - увеличения объема (дилатансия) и

разупрочнение (снижение сопротивляемости), применение которого во многом сближает расчетные прогнозируемые и реальные величины напряжений и деформаций.

В пространстве главных напряжений предел текучести будет формировать некоторую поверхность, которую называют поверхностью текучести. Общий вид уравнения поверхности текучести записывается:

$$F(\{\sigma\}), f(k) = 0 . \quad (10)$$

где $f(k)$ — некоторая функция, характеризующая расширение поверхности текучести по мере возрастания параметра упрочнения k . В качестве параметра упрочнения обычно используется величина накопленных пластических деформаций. При $f(k) > 0$ уравнения описывают поверхности, находящиеся внутри соответствующей предельной поверхности; при $f = 0$ поверхность текучести совпадает с предельной поверхностью.

Рассмотрим некоторое обобщение теории пластического течения для случая идеальной пластичности. Кроме функции текучести F , иногда вводится пластический потенциал $\Phi(\sigma_{ij})$, ($i, j = 1, 2, 3$) так, чтобы уравнения пластического течения можно было представить в виде:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (11)$$

Наиболее важным является простейший случай, когда функция текучести и пластический потенциал совпадают $F = \Phi$. В этом случае имеем

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (12)$$

и пластическое течение развивается по нормали к поверхности текучести.

Связь (12) называется принципом нормальности или ассоциированным законом течения. Рассмотрим принцип нормальности в условиях плоской деформации. На осях σ_1, σ_3 этот критерий изображается прямой ВЕ, параллельной прямой $\sigma_1 = \sigma_3$ (рис.2).

Вектор пластической деформации ε_m , соответствующий принципу нормальности, перпендикулярен прямой ВЕ и соответственно наклонен к осям ε_1 и ε_3 под углом 45° . При этом компоненты вектора ε_1^p и ε_3^p равны по абсолютной величине и противоположны по знаку, а их сумма, соответствующая изменению объема, равна нулю:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1^p + \varepsilon_3^p = 0 \quad (13)$$

таким образом, принцип нормальности для сред, подчиняющихся критерию Треска (Сен - Венан, Мизеса, Губера) предсказывает равнообъемный характер пластического течения.

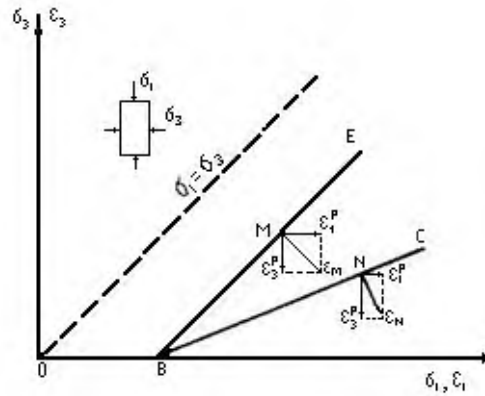


Рис. 2. Графическое изображение ассоциированного закона течения в условиях плоской деформации.

Если условие текучести подчиняется критерию, зависящему не только от второго, но и от первого (линейного) инварианта тензора напряжений, то принцип нормальности будет предсказывать изменение объема в процессе пластического деформирования. На рис.2 прямая BC соответствует критерию Кулона. Вектор пластических деформаций ε_N перпендикулярен прямой BC и

$$|\varepsilon_1^p| > |\varepsilon_3^p| \quad (14)$$

При этом

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1^p + \varepsilon_3^p < 0 \quad (15)$$

т.е. происходит увеличение объема разрыхление (дилатансия).

Механические свойства горных пород весьма сложны и разнообразны. Для приближенного описания в том или ином диапазоне напряжений и деформаций могут быть использованы упрощенные механико-математические модели состояния. Механические испытания горных пород и грунтов при исследовании деформационных свойств проводятся, при постоянном боковом давлении σ_3 с постепенно увеличиваемой осевой деформацией ε_1 . Модели рассматриваются в условиях плоской деформации.

Величины σ_1 и ε_3 получаются как функции от σ_3 и ε_1 . В связи с этим оказывается удобным уравнения связи представить в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E\varepsilon_1 + \nu\sigma_3, \\ \varepsilon_3 &= \frac{1-\nu^2}{E}\sigma_3 - \nu\sigma_1 \end{aligned} \quad (16)$$

Эти уравнения при различных фиксированных значениях σ_3 в осях $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ и ε_1, σ_1 дают два семейства прямолинейных графиков, с помощью которых по заданным значениям деформаций можно определить напряжения. Запишем критерий Кулона в следующем виде:

$$\sigma_1 = S + \sigma_3 \operatorname{ctg} \psi \quad (17)$$

где $S = 2C \operatorname{ctg} (\pi/4 - \varphi/2)$ - прочность на одноосное сжатие;

Угол наклона Ψ прямой BC к оси σ_1 определяется соотношением:

$$\operatorname{ctg} \psi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad (18)$$

где C , φ - сцепление и угол внутреннего трения.

Уравнение (17) на рис.3 изображается прямой BC . В области растяжения область упругости ограничивается прямой AB , имеющей уравнение:

$$\sigma_3 = T, \quad (19)$$

где T - прочность на растяжение ($T < 0$).

Если после выхода напряженного состояния на критериальную границу дальнейшее неупругое деформирование (пластическое течение) происходит с упрочнением, то напряженное состояние в процессе пластического течения будет характеризоваться точками, лежащими вне контура ABC , и не вернется в пределы заштрихованной области. Для таких упрочняющихся сред границы области упругости, записанные через напряжения, будут однозначны для всего процесса деформирования.

Реальные горные породы далеко не все и не при всяких условиях обладают свойствами упрочнения. Прежде всего, это утверждение относится к условиям растяжения. Если при первоначальном растяжении, пока не произошел разрыв, границей упругости является отрезок AB (рис.3), то после образования трещин разрыва, растягивающие напряжения в среде существовать не могут, и новая граница области упругости будет иметь вид уже не $\sigma_3 = T$, а $\sigma_3 = 0$. Кроме того, в процессе запредельного пластического деформирования в условиях $\sigma_3 > 0$ также происходит нарушение природной спаянности, разупрочнение и вместо контура текучести BC порода будет характеризоваться некоторой линией EF , лежащей внутри первоначального контура.

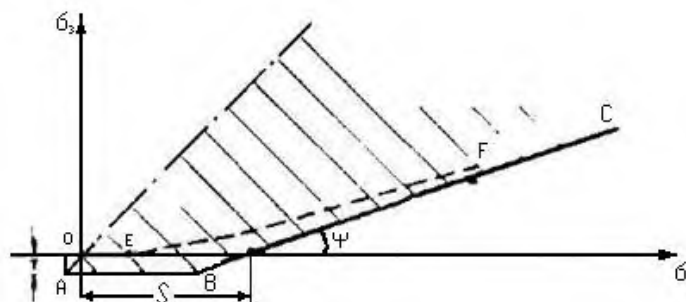


Рис.3. Обобщенные критериальные границы горной породы.

Рассмотрим модель разупрочняющейся и разрыхляющейся среды, у которой сопротивляемость напряжениям σ_1 при пластическом течении зависит не только от σ_3 , но и от величины деформации ε_1 .

Полная графическая характеристика механических свойств рассматриваемой среды представлена на рис.4. Граница упругого состояния в координатах главных напряжений описывается линией ABC (рис.3), а в

Напряжения, соответствующие деформациям зоны II, например точки E' , определяются следующим образом. Координаты ε_1 и ε_3 точки E' могут быть представлены в виде упругих $(\varepsilon_1^y, \varepsilon_3^y)$ и пластических $(\varepsilon_1^p, \varepsilon_3^p)$ компонент. Упругие компоненты, представляющие собой координаты точки D' являются деформациями на момент начала пластического течения, которое от точки D' до точки E' происходило при неизменном напряженном состоянии:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_1^y + \varepsilon_1^p \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_3^y + \varepsilon_3^p\end{aligned}\quad (22)$$

После несложных преобразований найдем величину σ_3 :

$$\sigma_3 = \frac{[E(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + S(v-1)]}{(1-v \operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \psi - v)} \quad (23)$$

Итак, по заданным деформациям ε_1 и ε_3 найдено главное напряжение σ_3 ; напряжение σ_1 определяется выражением (17). Уравнение (17) и (23) являются уравнениями связи напряжений и деформаций для принятой модели среды в процессе пластического течения. Далее надо установить уравнение связи для области III, ограничиваемой границей $K'L'F'$. Здесь деформации ε_3 превышают (по абсолютной величине) возможную величину ε_3 при пластическом течении, которая определяется линией $L'F'$. Значит, деформация ε_3 настолько велика, что в элементе среды напряжения σ_3 должны бы быть меньше нуля, т. е. растягивающими, поскольку деформированное состояние находится уже за пределами упругой зоны, структура среды уже нарушена и она не может сопротивляться растягивающим напряжениям. Следовательно, влево от линии $L'F'$ (рис.4б) $\sigma_3 = 0$, т. е. напряженное состояние является одноосным сжатием. При этом напряжения σ_1 будут зависеть только от величины деформации ε_1 и определяться графиком одноосного сжатия $O''L''F''$ на (рис.4а), т. е. в пределах зоны III $\sigma_1 = S$, а в пределах зоны IV, где ε_1 меньше предельной упругой деформации одноосного сжатия $\sigma_1 = E\varepsilon_1$. В зоне V обе деформации растягивающие и находящиеся за пределами упругости, структура среды нарушена и не способна сопротивляться растягивающим напряжениям т.е. $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$.

В третьей главе разработана методика и численные процедуры, на основе деформационной теории пластичности и метода конечных элементов, реализующие на ПК линейно - упругий характер деформирования горных пород в допредельной и позволяющая учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в запредельной стадии деформирования. Основная процедура МКЭ обеспечивает решение линейных задач: установившейся ламинарной фильтрации и напряженно- деформированного состояния среды с линейно-упругой связью напряжений и деформаций. Получение различных нелинейных решений достигается многократным повторением линейных решений. Основная концепция МКЭ состоит в том, что искомую

непрерывную величину, будь то напор фильтрационного потока или перемещения точек деформированного тела, аппроксимируют кусочным набором простейших функций, заданных над ограниченными конечными подобластями (элементами). С помощью такой процедуры интегрирование дифференциальных уравнений в постановке задачи сводится к решению системы линейных уравнений. Количественные значения неизвестной величины отыскиваются в ограниченном числе точек (узлов) области, а в пределах элементов значения неизвестной функции и ее производных, определяются уже аппроксимирующими функциями и их производными. Гладкая поверхность функции H аппроксимируется набором треугольных участков плоскостей типа i, j, k' (рис.5), определенных над треугольной же подобластью i, j, k (конечным элементом) рассматриваемой области в плоскости x, y . Положение плоскости в пространстве определяется однозначно тремя точками, лежащими на одной прямой. Очевидно, для аппроксимации гладкой поверхности функции H участками плоскостей конечные элементы i, j, k должны быть треугольными.

Отклонение аппроксимирующей кусочной поверхности от реальной гладкой будет тем больше, чем больше кривизна гладкой поверхности и чем больше размер конечного элемента. Отсюда вытекает основное правило построения сетей конечных элементов: сгущение сети в местах ожидаемых высоких градиентов искомой функции. Математический аппарат МКЭ обеспечивает сведение задачи интегрирования бигармонического дифференциального уравнения к решению системы линейных уравнений, в которой в качестве неизвестных фигурируют значения в узлах конечных элементов. Плоский участок, аппроксимирующий функцию над одним конечным элементом, имеет уравнение линейного полинома.

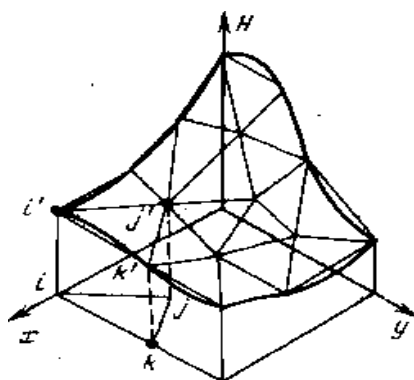


Рис.5. Кусочно-элементная аппроксимация гладкой функции $H(x, y)$.

В максимальной степени возможности МКЭ раскрываются при анализе явлений в средах со сложными нелинейными свойствами. В

диссертационной работе обоснована процедура при решении задач с учетом запредельных свойств горных пород. В общем случае исходное напряженное состояние рассматриваемой области характеризуется точками, находящимися внутри поверхности текучести по формуле (10) - $F(\{\sigma\},k) = 0$. При постепенном увеличении нагрузок первоначально область будет деформироваться упруго, и лишь по достижении определенного уровня нагрузки, напряжения в элементах наиболее напряженных зон (ННЗ) начнут последовательно выходить на поверхность текучести.

Для получения конечно-элементного решения нагрузка прикладывается малыми ступенями, а связь напряжений и деформаций в элементе в пределах ступени определяется либо упругой матрицей, если элемент упруг, либо упругопластической матрицей $[D_{yn}]$, если напряжения в элементе вышли на поверхность текучести. Шаг за шагом напряжения в элементах суммируются с переменной МЖС. В этом варианте для всех элементов, напряженное состояние которых находится на поверхности текучести, составляются упругопластические касательные матрицы $[D_{yn}]$. Для элементов, напряженное состояние которых находится внутри поверхности текучести, составляются упругие матрицы $[D]$; величина очередной ступени нагружения принимается такой, чтобы напряженное состояние наиболее нагруженного элемента (ННЭ) из числа упругих элементов вышло на поверхность текучести. На n -м шаге нагружения матрицы $[D_{yn}]$ элементов, зависящие от напряжений, оказываются рассчитанными по напряженному состоянию на конец $(n - 1)$ -го шага. Этот процесс применим для сред с ассоциированным законом течения, обеспечивающим симметричность матриц $[D_{yn}]$ так как несимметричность МЖЭ привела бы к несимметричности МЖС, что сильно осложнило бы решение системы уравнений. Величина очередной ступени нагружения, обеспечивающей вывод ННЗ на поверхность текучести, определяется следующим образом. Пусть напряженное состояние упругого элемента определяется точкой А внутри поверхности текучести (рис.6), т.е. $F(\{\sigma\},k) < 0$. Прикладываем пробную ступень нагрузки, которая выводит напряженное состояние элемента в точку В вне поверхности текучести или внутри нее. Решая совместно уравнения прямой АВ и поверхности текучести $F(\{\sigma\},k) = 0$, определяем точку первой АВ с поверхностью текучести – точку С, которая будет лежать внутри отрезка АВ или вне его. Отношение длин отрезков AC/AB называют коэффициентом перегрузки k_n . Если $AB > AC$, то $k_n > 1$, и наоборот.

Для количественной и качественной оценки решения МКЭ по разработанной программе на ПК проведено решение, сопоставимое с известной задачей Л.А. Галина. Заданы свойства идеально-пластической среды с критерием текучести Треска (то есть с углом внутреннего трения $\varphi = 0$), качественно эквивалентные свойствам среды задачи Галина.

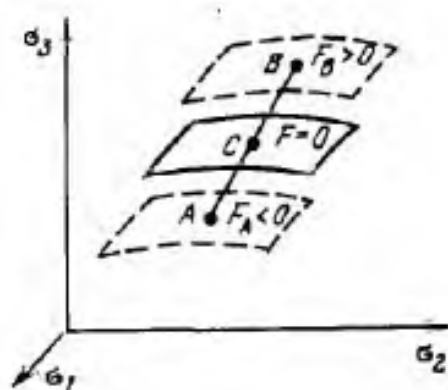


Рис.6. Графическое изображение вывода ННЭ на поверхность текучести.

Численные характеристики: $E = 10^3$ Мпа, $\nu = 0.3$, $\gamma = 0$, $c = 1$ Мпа, $\varphi = 0$. Коэффициент дилатансии $\lambda = 1$, что обеспечивает равнообъемное течение. Чтобы выяснить характер роста зоны пластических деформаций с изменением нагрузки, задача решалась в двух вариантах. В первом варианте нагрузка $\sigma_y = 3$ Мпа и $\sigma_x = 2.4$ Мпа прикладывалась целиком, во втором задавалось приращением в пять ступеней. Результаты расчетов по вариантам, соответствующих полной нагрузке совпадают.

По полученному решению контур пластической зоны представляет собой эллипсоподобную фигуру с большой полуосью $a=3,14R$ и малой полуосью $b=1,77R$ (R -радиус отверстия). Из решения Галина следует, что зона пластических деформаций имеет вид эллипса с полуосями $a=3,05R$, $b=1,64R$ (рис.7). Сопоставления значения напряжений, в пластической зоне полученные по формулам Галина и по расчетной схеме МКЭ очень близки. При этом напряжение вблизи контура отверстия равны пределу прочности на одноосное сжатие, а вдали от контура на поверхности заданным напряжениям.

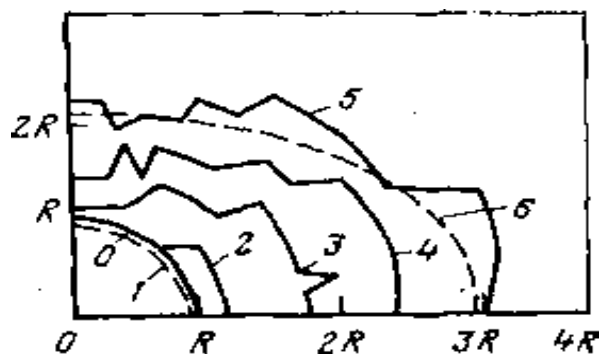


Рис.7. Решение задачи Л.А. Галина: 0- исходный контур отверстия; 1- контур после погружения; 2 — 5- границы пластических зон после 2, 3, 4, 5 шагов нагружения; 6 — контур пластической зоны по аналитическому решению.

В работе в условиях плоской деформации получена серия решений для горизонтальной протяженной горной выработки кругового поперечного сечения радиусом R , находящей в поле вертикальных и горизонтальных напряжений σ_y и σ_x с учетом дилатансии и разупрочнения пород. В результате численных расчетов установлены формы и размеры зон неупругих деформаций, напряженное состояние породного массива и величина конвергенции контура выработки. Анализ результатов показал существенную зависимость размеров зоны неупругих деформаций от свойств среды. Отмечено, что по модели разупрочняющейся и дилатирующейся среды размеры зон неупругих деформаций, намного больше, чем по другим моделям. Это связано с переходом нескольких элементов породного массива в состояние полного разрушения. Форма неупругой зоны подобна четырехлистнику и существенно увеличивается с ростом нагрузки. Кроме того, наблюдается снижение уровня вертикальных напряжений вблизи выработки и область концентраций напряжений отодвигается от контура выработки вглубь массива. В таблице приведены средние величины конвергенции (расчетные и измеренные перемещения контуров) в долях радиуса выработки. Сопоставление полученных расчетных результатов и экспериментальных данных показывает их близость.

Таблица - Средние величины конвергенции

Среда	Средняя величина конвергенции в долях R (т.е. U_r/R)	
	$\sigma_y = S = 3.5$ МПа,	$\sigma_y = 2S = 7$ МПа
Упруго-пластическая $\lambda=3$	-0.020	-0.102
Упруго-пластическая $\lambda=6$	- 0.027	-0.124
Упруго-пластическая $\lambda=9$	-0.038	-0.161
Разупрочняющаяся $\lambda=3$	-0.032	-0.150
Методические указания измеренные	ВНИМИ -0.060	-0.178

Исследовано взаимодействия крепи сводчатого сечения с неоднородным породным массивом с учетом неупругого деформирования горных пород. Рассматривалась горная однопутевая выработка пролетом 2,5 м и высотой 2,25 м. Крепь, имеющая постоянную толщину 25 см, очерчена в верхней части до уровня горизонтального диаметра по радиусу $R_0=1,25$ м (внутренний радиус), ниже - вертикальными стенками длиной 1 м; обратный свод- горизонтальный, прямолинейный. Вследствии симметрии крепи

относительно вертикальной оси в расчетной схеме рассматривалась лишь половина области массива и крепи, которая разбивалась на треугольные конечные элементы. Массив принимался невесомым, а нагрузка от собственного веса пород (γH) на отметке расположения оси выработки переносилась на верхнюю границу области. Рассмотрено два варианта глубины расположения выработки : $H_1=400$ м и $H_2=1200$ м.

Для всех серии расчетов принят постоянный угол внутреннего трения массива $\phi=30^\circ$, упругие характеристики крепи: модуль упругости $E_k=25 \cdot 10^3$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu_k=0,2$ и массива $E_m=6 \cdot 10^3$ МПа, $\nu_m=0,2$. Для создания коэффициента бокового распора в слое, близким к единице, коэффициент Пуассона слоя $\nu_{сл}$ принимался близким к 0,5 ($\nu_{сл}=0,48$). Прочность пород во всех случаях принимались в 500 раз меньше модуля упругости. На рис.8 представлены результаты расчета относительных нормальных ($P/\gamma H$), касательных ($q/\gamma H$) нагрузок (напряжений) и относительных нормальных напряжений в крепи ($\sigma_\theta/\gamma H$). Из анализа результатов решения задачи взаимодействия крепи сводчатого сечения с неоднородным породным массивом следует, что приближенный способ определения нагрузок в зависимости только от прочности контактирующих пород, не являются достаточно обоснованным для условий весьма прочных пород. Нагрузка в районе прочного слоя формируется в основном в зависимости, от жесткости крепи и механических характеристик окружающего массива. Анализ проведенных исследований показывает необходимость внесения поправок в традиционные методы построения эпюр нормальных нагрузок на крепь.

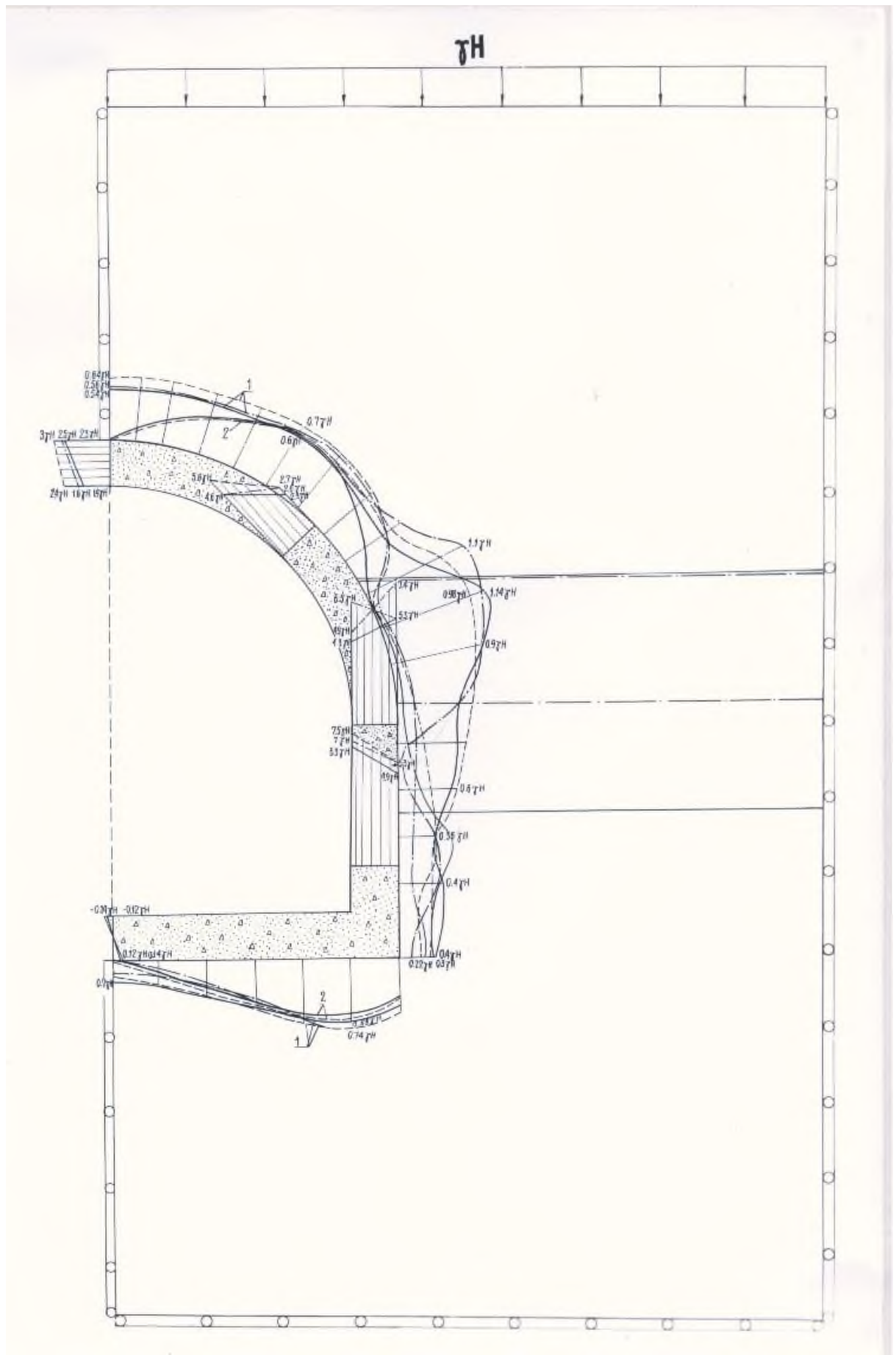


Рис.8. Эпюры нагрузок и напряжений для систой среды по вариантам- 1, 2, 3: 1 – нормальных; 2 – касательных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержатся новые научно обоснованные результаты по решению важной прикладной задачи - установления механизма и закономерностей изменения напряженного состояния массива в процессе горного производства, с учетом эффекта дилатансии (увеличения объема) и разупрочнения (снижение сопротивляемости), применение которого во многом сближает расчетные прогнозируемые и реальные величины напряжений и деформаций.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

- разработаны механико - математические модели сред для оценки напряженно-деформированного состояния массива вокруг подземных выработок (отверстий) кругового и сводчатого поперечного сечения, позволяющей учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в процессе неупругой деформации горных пород. В разработанной модели среды, в отличие от известных, описание границ прочности и текучести рассматривается в плоскости деформации, являющейся оптимальной для численной реализации и проведения сложных расчетов;

- в процессе исследования выделены новые характерные деформационных зон, в моделях упруго - пластической дилатирующей среды и среды с разупрочнением и дилатансии, построены с единых позиций соответствующие математические уравнения связи напряжений и деформаций;

- разработана методика и численные процедуры, на основе деформационной теории пластичности и метода конечных элементов, реализующие на ПК линейно - упругий характер деформирования горных пород в допредельной стадии и позволяющая учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения в запредельной стадии деформирования;

- в процессе решения задачи установлено, что зоны пластических деформаций вокруг горизонтальной выработки кругового поперечного сечения при коэффициенте дилатансии $\lambda = 1$ представляет собой эллипсоподобную фигуру, с ростом коэффициента дилатансии λ зоны неупругих деформаций при сравнительно небольших значениях бокового распора имеют форму четырехлистника. При этом размеры этих зон, а также смещения (конвергенция) точек выработки определяются комплексом деформационных и прочностных характеристик массива. С увеличением коэффициента дилатансии, также растет величина конвергенции;

- установлено, что при использовании модели разупрочняющейся и дилатирующейся среды, по сравнению с другими моделями, увеличиваются размеры зоны неупругих деформаций, снижаются уровни напряжений σ_y вблизи контура выработки, что наблюдается в практике горных работ;

- из анализа результатов решения задачи взаимодействия крепи сводчатого сечения с неоднородным породным массивом следует, что приближенный способ определения нагрузок в зависимости только от прочности контактирующих пород, не являются достаточно обоснованным для условий весьма прочных пород. Нагрузка в районе прочного слоя формируется в основном в зависимости, от жесткости крепи и механических характеристик окружающего массива. Анализ проведенных исследований показывает необходимость внесения поправок в традиционные методы построения эпюр нормальных нагрузок на крепь.

Оценка полноты решений поставленных задач. Цель, поставленная в работе, достигнута, сформулированные задачи, включающие проведение теоретических, методических и экспериментальных исследований, решены полностью, выполненные разработки являются завершенными и доведены до практического использования.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. **Молдошев Р.А.** Метод конечных элементов при моделировании задач геомеханики [Текст] / Э.К.Абдылдаев, Р.А.Молдошев // Материалы международной конференции «Математическое моделирование в естественных науках» КазНУ им. аль-Фараби, - Алматы, 1997. -С.361-362.
2. **Молдошев Р.А.** Оценка устойчивости горных выработок на основе МКЭ [Текст] / Э.К. Абдылдаев, Р.А.Молдошев // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы геомеханики и преподавания естественных дисциплин», КазГосЖенПУ, -Алматы,-2012. -С. 196-198.
3. **Молдошев Р.А.** Анализ напряженного состояние породного массива вокруг выработок сложной конфигурации [Текст] / Р.А.Молдошев // Республиканский научно-теоретический журнал "Наука и новые технологии" №7, -Бишкек,-2012. -С. 3-4.
4. **Молдошев Р.А.** Расчет взаимодействие крепи с неоднородным породным массивом [Текст] / Р.А.Молдошев // Республиканский научно-теоретический журнал "Наука и новые технологии" №7, -Бишкек,-2012. -С. 55-57.
5. **Молдошев Р.А.** Численная процедура расчета напряженного состояние породного массива вблизи выработок [Текст] / Р.А.Молдошев,

Ч.Э.Абдылдаев, Э.К.Абдылдаев // Интернет -журнал ВАК Кыргызской Республики pakkr.org:81/jurnal/, №4 -Бишкек, -2012.

6. **Молдошев Р.А.** Модели учитывающие запредельные характеристики горных пород [Текст] / Р.А.Молдошев, Ч.Э.Абдылдаев, Э.К.Абдылдаев // Интернет -журнал ВАК Кыргызской Республики pakkr.org:81/jurnal/, №4 - Бишкек, -2012.

7. **Молдошев Р.А.** Деформационные модели, учитывающие дилатансии и разупрочнения горных пород [Текст] / Р.А.Молдошев, Ч.Э.Абдылдаев, Э.К.Абдылдаев // Вестник Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева №1(95), -Алматы, -2013. -С. 21-24

8. **Молдошев Р.А.** Анализ напряженного состояние целика методом конечных элементов [Текст] / Р.А.Молдошев // Вестник Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева, №2(95), - Алматы, -2013. -С. 16-19.

9. **Молдошев Р.А.** Вопросы компьютерного моделирования в геомеханике [Текст] / Р.А.Молдошев, К.Токпанова, А.Мукамбедшаева // Материалы научно-практической конференции (ММ ИТ ЭАУР) посвященной 50-летию КазЭУ им. Т.Рыскулова, том 2, -Алматы,-2013. -С. 176-179.

10. **Молдошев Р.А.** Дискретизация области в методе конечных элементов [Текст] / Р.А.Молдошев, А.Мукамбедшаева, Серик Акерке // Материалы научно-практической конференции (ММ ИТ ЭАУР) посвященной 50-летию КазЭУ им. Т.Рыскулова, том 2, -Алматы,-2013. -С.161-164.

11. **Молдошев Р.А.** Напряженное состояние массива с учетом дилатации горных пород [Текст] / Р.А. Молдошев, Э.К. Абдылдаев // Материалы научно-практического симпозиума (Казахстан 2050: стратегиясы жэна латын эліпбіне кошу урдісі), -Алматы,-2013. -С.17-21.

12. **Молдошев Р.А.** Вопросы моделирования прикладных задач [Текст] / Р.А.Молдошев, Ч.Э.Абдылдаев, А.Мукамбедшаева, Э.К.Абдылдаев // Теоретический и прикладной научно-технический журнал, Известия КГТУ им. И. Раззакова. № 32 (часть II), - Бишкек, - 2014. - С. 29-33.

13. **Молдошев Р.А.** Информационная технология при численном моделировании задач геомеханики [Текст] / Ч.Э.Абдылдаев, Р.А.Молдошев, А.Мукамбедшаева, Э.К.Абдылдаев // Материалы международной научной конференции « Актуальные проблемы механики и машиностроения» (19-20 июня 2014 г.), КазНТУ им К. Сатпаева, том 2, - Алматы.-2014. -С.76-82.

Молдошев Руслан Алдашевичтин «Дилатансиянын жана бошондоонун натыйжасын эске алуу менен тоо тектеринин массивинин чыңалган абалына баа берүү» темасындагы 01.02.04. – Деформацияланып жаткан катуу телолордун механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты даражасын изденип алууга карата жазылган диссертациясынын

КОРУТУНДУСУ

Негизги сөздөр: дилатансия, бошондоо, чөйрө, массив, тоо теги, чыңалган абалы, жер алдында иштетип чыгаруу, деформацияланып жаткан катуу тело, жол-жобо, сызыктуу эместик, пластикалуулук, модель, деформациялануу, эсептик чоңдуктар, мүнөздүү зоналар.

Изилдөөнүн объектиси: деформацияланууга туш болуп жаткан катуу тело, тоо тектүү массивден иштелип чыгуулар.

Иштин максаты: тоо-кен өндүрүшү процессиндеги иштеп чыгуулардын айланасындагы массивдин чыңалган абалынын механизмдерин жана мыйзам ченемдүүлүктөрүн, тоо тектеринин дилатансиялануусун жана бошондоосун эске алуу менен аныктоо.

Изилдөөнүн методдору: Алдыга коюлган милдеттерди чечүү үчүн өзүнө заманбап маалыматтык технологиялардын негизинде математикалык моделдештирүү методдорун, пластикалуулук теорияларын, талкалануу жана математиканын сандык методдорун пайдалануу менен аткарылган табигый, лабораториялык жана аналитикалык изилдөөлөрдүн талдоого алынышын камтыган комплекстүү метод пайдаланылган.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыгы: Татаал эсептөөлөрдү жүргүзүүдө жана сандык жактан иш жүзүнө ашырууга оптималдуу болуп саналган, бизге белгилүү болгон деформациялануунун бетинде бышыктуулук менен ийкемдүүлүк чектик шарттарын аткарбай турган учурдагы дилатансиялануу жана бошондоо натыйжалуулуктарын эске алуу менен жер алдындагы иштеп чыгуулардын-өткөөлдүктөрдүн(көзөнөк) айланасындагы массивдин чыңалган-деформацияланган абалына баа берүү үчүн чөйрөлөрдүн механикалык-математикалык моделдери иштелип чыккан. Тоо тектеринин чектөөгө чейинки чен-өлчөмүндө өзгөрүүнүн ПКда сызыктуу-серпилгичтүү мүнөзүн ишке ашыруучу жана өзгөрүүнүн чектен сырткаркы чен-өлчөмүндө дилатансия жана бошондоо натыйжасын көңүлгө алууга мүмкүндүк берүүчү, өзгөрүүнүн ийкемдүүлүк теориясынын жана чектүү элементтер методу ыкмаларынын негизинде сандык эсептөөлөрү иштелип чыкты.

Сунуштоолор: Иштелип чыккан методдор жана сандык жол-жоболор иштеп чыгуулардын айланасындагы тоо кендеринин чыңалган-деформацияланган абалын эсептөө жана ачылып калуулардын туруктуу параметрлерине баа берүү үчүн колдонулушу ыктымал, жана алар кымбат баага тура турган эксперименталдык изилдөөлөргө карата кошумчалоо катары кызмат кыла алат. Алар университеттердеги механика жана геомеханика боюнча атайын курстардын программаларына киргизүү үчүн сунушталышы ыктымал.

РЕЗЮМЕ

диссертации Молдошева Руслана Алдашевича на тему: « Оценка напряженного состояния массива пород с учетом эффекта дилатансии и разупрочнения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Ключевые слова: дилатансия, разупрочнение, среда, массив, порода, напряженное состояние, подземная выработка, деформируемое твердое тело, процедура, нелинейность, пластичность, модель, деформация, расчетные величины, характерные зоны.

Объект исследования: деформируемое твердое тело, выработки в породном массиве.

Целью работы является установления механизма и закономерностей изменения напряженного состояния массива вокруг выработок в процессе горного производства, с учетом эффекта дилатансии и разупрочнения пород.

Методы исследования: Для решения поставленных задач использован комплексный метод включающий анализ натуральных, лабораторных и аналитических исследований, выполненных на основе современных информационных технологий с использованием методов математического моделирования, теории пластичности, разрушения и численных методов математики.

Полученные результаты и их новизна: Разработаны механико - математические модели сред для оценки напряженно-деформированного состояния массива вокруг подземных выработок (отверстий), позволяющей учитывать эффекты дилатансии и разупрочнения, где в отличие от известных, описание границ прочности и текучести рассматривается в плоскости деформации, являющейся оптимальной для численной реализации и проведения сложных расчетов. Разработана методика и численные процедуры, на основе деформационной теории пластичности и метода

конечных элементов, реализующие на ПК линейно - упругий характер деформирования горных пород в допредельной стадии и позволяющая учитывать дилатансии и разупрочнения в запредельной стадии деформирования.

Рекомендации: Разработанные методы и численные процедуры могут быть использованы для расчета напряженно-деформированного состояния горного массива вокруг выработок и оценки устойчивых параметров обнажений, могут служить дополнением к дорогостоящим экспериментальным исследованиям. Они могут быть рекомендованы в программы спецкурсов по механике и геомеханике в университетах.

SUMMARY

of the Moldoshev Ruslan Aldashevich's dissertation on "Evaluation of Stress Condition of Rock Extract Considering the Effect of Dilation and Softening" for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.02.04 – Deformable Solids Mechanics.

Key words: dilatation, softening, environment, extract, rock, stress condition, underground working, deformable solid, procedure, nonlinearity, plasticity, model, deformation, calculated values, characteristic zones.

Subject of research: deformable solid, workings in the rock extract. The aim is to determine the mechanism and patterns of change in the stress condition of the extract around workings in the mining industry, taking into account the effect of dilation and softening rocks.

Methods of research: To achieve the objectives it was used complex method that includes the analysis of field, laboratory and analytical researches carried out on the basis of modern information technologies using mathematical modeling, theory of plasticity, fracture and numerical methods for mathematics.

Results obtained and their novelty: Mechanical and mathematical models of the environments are developed to assess stress-deformed condition of the extract around underground workings (holes) that allow to take into account the effects of dilation and softening, where in contrast to the known, the description of the boundaries of strength and fluidity is seen in the plane of deformation which is optimal for numerical implementation and carrying out complex calculations. The technique and numerical procedures are developed based on the deformation theory of plasticity and the finite element method that implement linearly elastic nature of rock deformation on a PC in prelimit stage and allowing taking into account the dilation and softening in the transcendent stage of deformation.

Recommendation: The developed methods and numerical procedures can be used to calculate the stress-deformed condition of the rock extract around the workings and evaluate stable parameters of exposures, may be served as addition to costly experimental researches. They may be recommended to the programs of special courses on mechanics and geomechanics in universities.