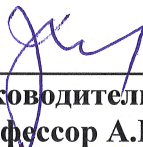


**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УТВЕРЖДАЮ**

  
\_\_\_\_\_  
Руководитель ОПОП ВО  
Профессор А.Г. Протосеня

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД,  
РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ  
ТЕПЛОФИЗИКА**

<b>Уровень высшего образования:</b>	Подготовка кадров высшей квалификации
<b>Направление подготовки:</b>	21.06.01 Геология, разведка и разработка полезных ископаемых
<b>Направленность (профиль):</b>	Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика
<b>Форма обучения:</b>	очная
<b>Нормативный срок обучения:</b>	4 года
<b>Составитель:</b>	д.т.н., проф. А.Г. Протосеня

Санкт-Петербург

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические рекомендации разработаны на основе рабочей программы дисциплины «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэродинамика и горная теплофизика» и предназначены для проведения практических занятий по дисциплине.

Процесс изучения дисциплины обучающимися направлен на закрепление формирования профессиональных компетенций:

Способность планировать и проводить эксперименты, обрабатывать и анализировать их результаты (ОПК-1).

Готовность проводить определения прочностных и деформационных характеристик горных пород в лабораторных и натуральных условиях, в том числе при наличии структурно-механических ослаблений, закономерностей деформирования различных типов пород, геомеханических моделей породных массивов, концентрации напряжений вокруг выработок и методов определения их устойчивости (ПК-1).

Готовность проводить оценку напряженно-деформированного состояния массива горных пород, определять закономерности геомеханических процессов, происходящих в результате производства горных работ при строительной, открытой и подземной геотехнологиях и освоении подземного пространства, определять нагрузки на крепь выработок и конструкции подземных сооружений, их параметры по нормативным документам и численными методами (ПК-2).

Способность организовывать теоретические и экспериментальные исследования гидро-, пыле-, аэро-, газо- и термодинамических процессов, протекающих в технических системах освоения недр для разработки методов и средств управления аэрогазодинамическими и тепловыми процессами при освоении минеральных, энергетических и пространственных ресурсов недр (ПК-3.)

В результате изучения дисциплины обучающийся должен демонстрировать способность и готовность к научно-исследовательской деятельности в области геомеханики:

- осуществлять разработку физических и математических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере;
- планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития в общетехническом, общенаучном и социальном контекстах.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Процесс обучения в аспирантуре предусматривает практические занятия. Практические занятия играют важную роль в выработке у обучающихся навыков применения полученных знаний для решения практических задач совместно с преподавателем. Традиционно практические занятия проводятся через 2-3 лекции и логически продолжают работу, начатую на лекции.

**Цель практических занятий.** Практические занятия призваны углублять, расширять, детализировать знания, полученные на лекции в обобщенной форме и содействовать выработке навыков профессиональной деятельности. Они развивают научное мышление и речь, позволяют проверить знания обучающихся и выступают как средство оперативной обратной связи.

Практическое занятие имеет важное значение в подготовке аспиранта, и позволяет:

1. Научить правильно распознавать, с какими объектами приходится иметь дело в каждом конкретном случае выполнения профессиональных обязанностей.

2. Сформировать профессиональные умения и практические навыки работы с каждым объектом.

Преподаватель выполняет *консультирующую, координирующую и направляющую* функцию. На практических занятиях очень высока степень самостоятельности обучающихся. На нее отводится 70% учебного времени занятия.

## ТЕМАТИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### Раздел I. Прочностные свойства горных пород и массивов

Требуется изучить механические явления и процессы в породных массивах, связанные с добычей полезных ископаемых и освоение подземного пространства для нужд народного хозяйства. Рассматривается физическое состояние породных массивов при воздействии горных и горностроительных работ. Нужно знать прочностные и деформационные характеристики в породных массивах. Нужно знать геологическое и тектоническое строение горных массивов. Требуется изучить классификации массивов по прочности, слоистости, трещиноватости и склонностью к разрушению. Методы изучения и прогнозирования состава, строения, состояния и свойств горных массивов. Для овладения содержанием первого раздела можно использовать углубленную и научную литературу.

### Раздел II. Геомеханические модели горных пород и массивов

Одним из наиболее эффективных методов изучения механических процессов в породных массивах, а также их взаимодействия с подземными сооружениями является метод моделирования, основанный на замене реального породного массива некоторым его идеализированным отображением. Сами модели могут быть физическими, математическими, аналоговыми. Математические модели широко используются в геомеханике, поскольку они обладают наибольшей общностью, свободны от влияния частных факторов, характеризующих горнотехническую ситуацию, позволяют не только качественно, но и количественно прогнозировать развитие механических процессов. При этом точность решений зависит от того, насколько обоснованы и представительны исходные предпосылки.

Массив горных пород в общем случае является физически дискретной, неоднородной, анизотропной средой с начальным напряженным состоянием, механические процессы деформирования которой носят нелинейный временной характер. Факторы, влияющие на формирование в породном массиве структурно-механических особенностей, могут быть *геологические* (физико-механические и эрозийные свойства горных пород, условия их залегания, степень нарушенности, блочность, а также гидрогеологические условия и начальное напряженное состояние) и

*инженерно-технические* (форма и размеры выработки, ее расположение в массиве, способ проходки и поддержания, место и время установки крепи относительно проходческого забоя, качество проходческих работ и др.).

Очевидно, что математическое описание подобной среды является крайне сложным, а решение конкретных задач обычными аналитическими методами

становится практически невозможным из-за непреодолимых математических трудностей. Реальный массив заменяют геомеханической моделью, которая с определенной степенью приближения отображает механические свойства реального массива горных пород, закономерности их изменения в пространстве и времени и предопределяет характер реализации механических процессов в массиве.

Следует учитывать два основных аспекта. Во-первых, при переходе от массива горных пород к его геомеханической модели ряд структурно-механических особенностей учитываются не в явном виде, а косвенно. Например, массив горных пород с системной трещиноватостью естественного происхождения может быть представлен моделью нетрещиноватой, но анизотропной среды с эквивалентными характеристиками.

Во-вторых, в конкретной горно-геологической и горно-технической обстановке степень проявления различных структурно-механических особенностей может быть таковой, что их учет не внесет принципиальных качественных и количественных изменений в оценку изучаемых механических процессов. Последнее обстоятельство приводит к мысли о целесообразности иметь не одну универсальную геомеханическую модель, а их набор, причем каждая из этих моделей должна быть эквивалентна реальному массиву по его основному признаку (в данных условиях).

С точки зрения структурно-механических особенностей реальный массив горных пород может быть представлен моделями сплошной и дискретной среды.

По характеру связи между напряжениями и деформациями геомеханические модели сплошной среды подразделяют на модели линейно и нелинейно деформируемой среды, однородной или неоднородной, изотропной или анизотропной.

С точки зрения поведения перечисленных моделей во времени они могут быть отнесены к классу реономных или склерономных сред.

Геомеханика своими достижениями во многом обязана широкому применению моделей и методов механики сплошной среды, и в первую очередь механики твердого деформируемого тела (теории упругости, теории пластичности, теории предельного равновесия и теории ползучести). Модели дискретной среды лучше отражают реальные свойства породных массивов, и применение их может оказаться весьма перспективным. Однако в настоящее время, несмотря на определенные достижения механики дискретной среды, ее практическое использование представляется затруднительным, поэтому в дальнейшем ограничимся анализом моделей и методов механики сплошной среды, согласно которой перемещения, деформации и напряжения в точках среды являются непрерывными функциями координат. В основе выбора геомеханической модели сплошной среды лежат понятие элементарного объема и условие квазисплошности.

Требуется изучить напряженное состояние в области произвольной точки твердого тела. Для этого из тела выделяется бесконечно малый параллелепипед с тремя парами граней, параллельными координатным плоскостям. По каждой грани полное напряжение имеет три составляющих. Всего на всех гранях действуют 18 составляющих напряжений. Следует учесть, что одноименные напряжения на

противоположных гранях параллелепипеда различаются друг от друга лишь на приращение по той координате, которая изменяется при переходе от одной грани к другой (количество неизвестных становится равным девяти).

Составляют шесть условий равновесия, в результате чего получают три соотношения, выражающих хорошо известный из сопротивления материалов закон взаимности касательных напряжений, и три дифференциальных уравнения, содержащих девять неизвестных напряжений. Учитывая закон взаимности касательных напряжений, число неизвестных напряжений уменьшается до шести.

Если тело находится в движении, то к действующим силам добавляют силы инерции. Полученные три дифференциальных уравнения называются дифференциальными уравнениями равновесия и движения.

Чтобы полностью изучить напряженное состояние в произвольной точке тела, надо знать составляющие полного напряжения по любой площадке, проходящей через эту точку.

Рассматриваем условия равновесия элементарного тетраэдра, выделенного из тела тремя плоскостями, параллельными координатным, и четвертой плоскостью, пересекающей все три координатные оси. Предполагая, что площадь наклонной грани в пределе стремится к нулю, получаем уравнения, связывающие напряжения по наклонной площадке, проходящей через рассматриваемую точку, и по площадкам, параллельным координатным плоскостям. Таким образом, напряженное состояние в данной точке тела вполне определяется шестью составляющими, или компонентами напряжения, по трем координатным площадкам, проходящим через эту точку. Совокупность составляющих напряжений по трем координатным площадкам образует так называемый тензор напряжений. Итак, напряженное состояние в точке тела вполне определяется шестью компонентами тензора напряжений.

Совокупность девяти компонентов деформаций образует тензор деформаций; он определяет деформированное состояние в данной точке тела. Тензор деформаций записывается в виде матрицы, аналогичной тензору напряжений, причем нормальным напряжениям соответствуют линейные деформации, а касательным напряжениям – половины угловых деформаций.

Ввиду взаимности сдвигов, аналогичной взаимности касательных напряжений, число неизвестных угловых деформаций равно трем. Поэтому тензоры напряжений и деформаций фактически характеризуются шестью компонентами. Для деформаций существуют три взаимно перпендикулярных направления, называемых главными осями деформаций. Волокна, направленные по ним, только удлиняются или укорачиваются, но не поворачиваются, т.е. сдвиги в главных осях деформаций равны нулю.

Кубическое уравнение для определения главных удлинений записывается аналогично соответствующему уравнению для главных напряжений путем замены компонентов тензора напряжений на соответствующие компоненты тензора деформаций.

Компоненты малой деформации связаны с тремя компонентами смещения в той же точке ( $u$ ,  $v$  и  $w$ ) шестью дифференциальными зависимостями, называемыми соотношениями Коши. Шесть уравнений, связывающих компоненты деформаций между собой, называются уравнениями неразрывности или совместности деформаций или уравнениями Сен-Венана. Физический смысл этих уравнений

таков: тело, сплошное и непрерывное до деформации, остается сплошным и непрерывным и после деформации.

Следует познакомиться с разложением тензора деформаций на шаровой тензор деформаций и девиатор деформаций, необходимых для уяснения основ теории пластичности.

По степени литологической неоднородности массивы горных пород подразделяют на два вида:

1) непрерывно-неоднородные, т.е. такие, в которых изменение свойств при переходе от одной литологической разности к другой не вызывает скачкообразного изменения механического состояния;

2) с кусочной неоднородностью, характеризующиеся резким изменением свойств при переходе от одной литологической разности к другой.

Массивы первого вида относят к квазиоднородным. Массивы второго вида являются неоднородными, и их геомеханическая модель должна учитывать макрослоистость.

Однородные, квазиоднородные и непрерывно-неоднородные массивы можно считать сплошными средами, а массивы с кусочной неоднородностью – дискретными.

Следует также иметь в виду относительный характер неоднородности. В зависимости от соотношения размеров исследуемой области массива и элемента неоднородности одна и та же структура может оказаться квазиоднородной и неоднородной.

В зависимости от характера деформирования массива, записанного в виде связей между напряжениями и деформациями, т.е. уравнений (закона) состояния среды, геомеханические модели сплошного однородного массива можно разбить на пять классов. Необходимо отметить, что можно привести и другие классификации геомеханических моделей.

### **ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ**

Рассматривается упругая и пластическая деформация. Условия пластичности материалов Треска-Сен-Венана и Мизеса.

Необходимо проанализировать уравнения теории пластического течения, деформационной теории пластичности и связь между ними и рассмотреть область их применимости.

Для простого нагружения А.А.Ильюшиным предложена зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций  $T$  и  $\Gamma$ .

$$T = A\Gamma^\alpha, \quad (1)$$

где  $A, \alpha > 0$  – постоянные.

Оценивая ограничения, отметим, что пренебрегать сжимаемостью обычно можно при достаточно развитых (хотя и малых) пластических деформациях. Значительно более жестким ограничением является одночленная степенная аппроксимация (1). В ряде случаев (например, при идеальной пластичности) эта зависимость дает плохое приближение. Степенной закон (1) приводит к более или менее приемлемому приближению при развитых пластических деформациях и заметном упрочнении материала.

Сказанное позволяет считать, что в случаях развитых пластических деформаций и заметного упрочнения при пропорциональном возрастании нагрузок приближенно реализуется простое нагружение.

Необходимо рассмотреть плоское деформированное состояние, задачи о штампе, о сжатии пластического слоя, упруго-пластическую задачу и другие.

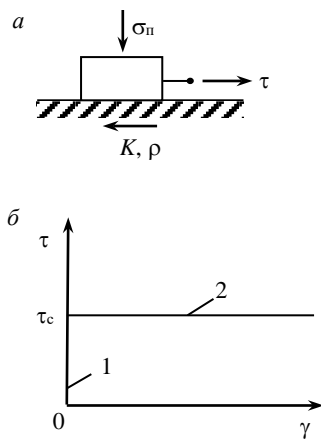


Рис.1. Структурная схема (а) и диаграмма напряжений (б) жесткопластической модели  
1 – отсутствие деформаций (жесткий участок);  
2 – пластические деформации

*Жесткость* – способность тела воспринимать нагрузку без деформации.

*Прочность* – способность материалов воспринимать нагрузки без разрушения. Прочность материала характеризуется пределом прочности, т.е. размером минимальных напряжений (сжимающих, растягивающих), при которых происходит разрушение материала.

*Пластичность* – свойство горных пород испытывать при нагружении (при достижении предела упругости) необратимые (остаточные, пластические) деформации.

Понятие пластичности связывается с понятием прочности, поскольку пластические деформации горных пород предшествуют их разрушению.

Пластичность характеризуется размером пластических (остаточных) деформаций, воспринимаемых породой без разрушения. Чем меньше пластические деформации, тем менее пластичной, т.е. более хрупкой, является порода. *Хрупкость* – это способность пород разрушаться без предшествующих пластических деформаций.

Для характеристики прочности горных пород и материалов крепи горных выработок и обделок подземных сооружений применяются жесткопластические модели на основе теории прочности Кулона – Мора.

Основные положения теории прочности следующие:

- 1) пластическая деформация (разрушение) происходит путем сдвига по площадкам скольжения;
- 2) сдвигу по площадке скольжения препятствует сцепление и трение;
- 3) прочность (пластичность) материала определяется только максимальными и минимальными главными напряжениями ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ), среднее по величине главное напряжение ( $\sigma_2$ ) оказывает слабое влияние на прочность.

Из схемы (рис.1) следует условие прочности Кулона – Мора:

$$\tau_c = K + \sigma_n \operatorname{tg} \rho, \quad (2)$$

где  $K$  – сцепление;  $\rho$  – угол внутреннего трения.

Условие (2) называют также условием предельного состояния. Графическое изображение этого уравнения представляет собой паспорт прочности горных пород (рис.7, а) – это огибающая наибольших кругов напряжений, которые испытывает порода на пределе прочности. Из геометрии кругов напряжений и огибающей (об-

щей касательной к этим кругам) можно получить следующие соотношения: предел прочности на одноосное сжатие

$$\sigma_{сж} = \frac{2K \cos \rho}{1 - \sin \rho},$$

условие прочности в главных напряжениях

$$\sigma_1 = \sigma_{сж} + \beta \sigma_3,$$

где  $\beta$  – параметр объемной прочности,  $\beta = 1 + \sin \rho / (1 - \sin \rho)$ .

Условие пластичности (прочности) в наиболее общем виде имеет вид

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = (\sigma_x + \sigma_y + 2K \operatorname{ctg} \rho)^2 \sin^2 \rho.$$

Пластическая модель Кулона – Мора имеет две прочностные характеристики пород:  $K$  и  $\rho$ . Параметры  $\sigma_{сж}$  и  $\beta$  являются производными от первых двух.

## УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Для массива горных пород, в котором по мере роста напряжений имеют место вначале упругие деформации, а при некоторой величине напряжений – пластические, применимы упругопластические модели (рис.3).

В начальный период существования выработки наибольшая концентрация напряжений имеет место на ее контуре. При достижении напряжениями выработки предела прочности горной породы на сжатие она переходит в предельное состояние. Здесь порода испытывает двухосное напряжение.

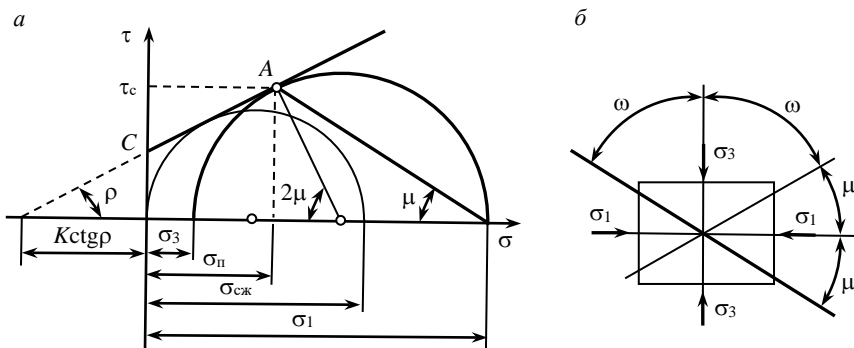


Рис.2. Диаграмма наибольших кругов напряжений – паспорт прочности пород (а) и ориентировка площадок скольжения относительно главных напряжений (б) в пластической среде

Для определения размеров зоны предельного состояния массива вокруг выработки необходимо знать прочность горных пород в объемном напряженном состоянии. Согласно теории прочности Мора, она может быть представлена в общем виде математической

зависимостью

$$\tau = f(\sigma), \quad (3)$$

где  $\tau = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$  – наибольшее касательное напряжение;  $\sigma = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$  – среднее нормальное напряжение;  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные напряжения ( $\sigma_1 > \sigma_3$ ).

Согласно этому условию, породы переходят в предельное состояние, если наибольшее касательное напряжение при данном напряженном состоянии достигнет огибающей кругов Мора. При меньших значениях  $\tau$  породы находятся в упругом состоянии. При этом величина  $\tau$  зависит от среднего напряжения  $\sigma$ .

В зависимости (3) аналитический вид функции неизвестен. Для описания огибающей были предложены различные нелинейные зависимости, получившие



названия условий предельного состояния или условий пластичности. Наибольшее распространение имеет

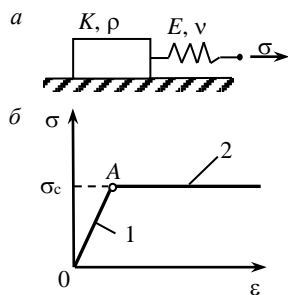


Рис. 3. Структурная схема (а) и диаграмма напряжений упруго-пластической модели (б)  
1 – область упругих деформаций; 2 – область пластических деформаций

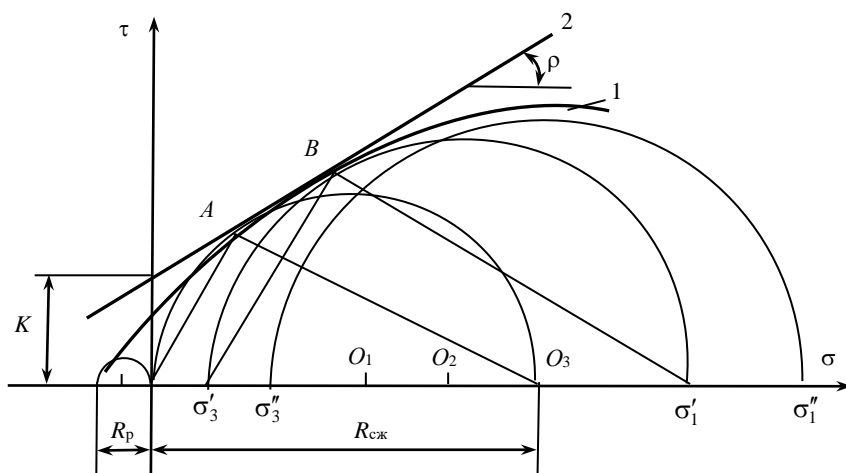


Рис.4. Паспорт прочности горной породы  
 $R_{сж}$  и  $R_p$  – пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении  
1 – криволинейная огибающая кругов Мора; 2 – касательная к огибающей

линейная функция, предложенная Кулоном,

Значения  $K$  и  $\rho$  зависят от расположения точки касания линии 2 к криволинейной огибающей 1 (рис.4). Обычно характеристики выбирают по среднему напряжению  $\sigma$ .

Из нелинейных зависимостей наиболее полно описывает огибающую кругов главных напряжений экспоненциальное условие, предложенное проф. А.Н.Ставрогиным,

$$\tau = \tau_0 e^{AC},$$

где  $C = \sigma_3/\sigma_1$ ;  $A, \tau_0$ ; – характеристики горной породы, их значения для основных типов пород определены экспериментально<sup>1</sup>.

### Раздел III. Геомеханические процессы в породных массивах при ведении горных и горностроительных работ

Начальные гравитационные и тектонические поля напряжений в массивах горных пород, их связь с геодинамическим полем напряжений. Характер напряженно-деформированного состояния массива при таких полях, оценка компонентов тензора напряжений в его заданных точках. Геомеханические процессы, происходящие в геологической среде под влиянием горных работ и управление ими при подземных и открытых работах, а также подземном строительстве. Методы и средства исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Нахождение зоны предельного состояния вокруг выработки сводится к решению упруго-пластической задачи. При этом рассматривалось сечение массива плоскостью, перпендикулярной к оси выработки и исследовалось напряженное состояние в последней. Оно моделируется распределением напряжений в бесконечной плоскости с круговым отверстием, которое сжимается на бесконечности усилиями

<sup>1</sup> Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1979.

$$\sigma_x = \lambda\gamma H; \quad \sigma_y = \gamma H; \quad \tau_{xy} = 0, \quad (4)$$

где  $H$  – глубина заложения выработки;  $\gamma$  – средний удельный вес горных пород;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора.

На контуре кругового отверстия приложено нормальное усилие  $p$ , моделирующее работу крепи,

$$\sigma_r = p; \quad \tau_{r\theta} = 0.$$

Массив горных пород представляется однородным и изотропным.

В области предельного состояния компоненты напряжений удовлетворяют условию Кулона – Мора. Область полностью охватывает контур выработок.

Область предельного состояния вокруг выработки при  $\lambda < 1$  имеет форму эллипса, вытянутого в горизонтальном направлении,

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (5)$$

Здесь  $a = c_0 + c_1$ ;  $b = c_0 - c_1$ ;

$$\begin{aligned} c_0^\alpha &= \frac{0,5(1+\lambda)\gamma H + k \operatorname{ctg} \rho}{p + k \operatorname{ctg} \rho} (1 - \sin \rho); \\ c_1 &= \frac{(1-\lambda)\gamma H c_0^{1-\alpha}}{\alpha(p + k \operatorname{ctg} \rho)}; \\ \alpha &= \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho}. \end{aligned} \quad (6)$$

Приведенное решение имеет смысл при  $b \geq 1$ .

Решение приведенной выше упругопластической задачи для условия предельного состояния А.Н.Ставрогина удалось получить А.Г.Протосене только приближенным путем.

Уравнение области предельного состояния  $R_L$  находится в виде разложения по малому параметру  $\varepsilon$ :

$$R_L = r_0 + \varepsilon r_1 \cos 2\theta. \quad (7)$$

Здесь  $\varepsilon = 0,5(1-\lambda)$ ;  $\theta$  – угловая координата;

$$r_0 = \frac{\sqrt{\tau_0 c_1 \exp d \left( \frac{2A}{A - \ln dc} \right)}}{\lambda_1 \gamma H d (A - \ln dc)^A}; \quad (8)$$

$$r_1 = \frac{2r_0 (A - \ln dc)^2 - A(1 + A - \ln dc)}{\lambda_1 d (A - \ln dc)^2 - 2A(1 + A - \ln dc)}; \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{\tau_1^2}{\tau_0} \left( A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_0} \right)^{2A} \exp \left( - \frac{2A}{A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_0}} \right); \quad (10)$$

$$c = \frac{\lambda_1 \gamma H}{\tau_0}; \quad \lambda_1 = 0,5(1+\lambda).$$

Значение постоянной  $d$  находят из уравнения

$$A - \ln dc = d(A + \ln dc). \quad (11)$$

Наибольшее касательное напряжение  $\tau_1$  на контуре выработки – является решением уравнения

$$p = 2\tau_1 \ln \frac{\tau_1}{\tau_0} / (A - \ln \frac{\tau_1}{\tau_0}). \quad (12)$$

Приведенные зависимости позволяют получить размер области предельного состояния вокруг выработки кругового очертания.

#### **Раздел IV. Напряженно-деформируемое состояние массивов и горных выработок при сейсмических воздействиях и динамических проявлениях горного давления**

При действии сейсмических волн на горные выработки вокруг последних формируются динамические поля напряжений при одновременном действии статических нагрузок.

Распределение напряжений вокруг выработок различного очертания при статических нагрузках в настоящее время достаточно изучено. Решения построены с учетом упругих, пластических и вязких свойств пород, анизотропии горного массива и многих других факторов. Поэтому ограничимся в дальнейшем рассмотрением динамических напряжений и перемещений вокруг выработок, считая статическое поле напряжений известным. На первом этапе исследований целесообразно ограничиться изучением полей напряжений и перемещений от цилиндрических зарядов, что позволяет рассматривать задачу как плоскую. Для получения обозримых результатов массив пород целесообразно моделировать изотропной однородной средой, пренебрегая искажениями, которые будут вносить неоднородности. Горные породы значительно хуже сопротивляются действию растягивающих напряжений по сравнению с напряжениями сдвига. Поэтому в первую очередь необходимо оценить напряженное состояние возле выработки при действии продольных волн.

С удалением от эпицентра промышленного взрыва параметры продольной волны, как указывалось выше, изменяются. В общем случае необходимо рассматривать взаимодействие нестационарной продольной волны с горной выработкой.

Решение динамической задачи теории упругости о воздействии нестационарной сейсмической волны на горную выработку представляет значительные математические трудности. Для упрощения задачи аппроксимируем нестационарную волну сжатия в окрестности горной выработки стационарной с переменным усилием  $\sigma_x^0$  (рис.5). Рассмотрим выработку круглой формы поперечного сечения.

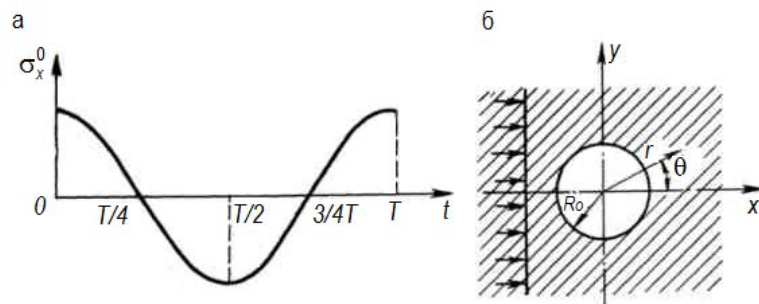


Рис.5. Расчетные параметры для определения динамического поля напряжений при промышленных взрывах: а - аппроксимация сейсмической волны; б - расчетная схема

Задача сводится к исследованию напряженно-деформированного состояния в плоскости с круговым отверстием, подверженной на бесконечности воздействию плоской продольной волны. Материал плоскости является изотропным и деформируется по закону Гука.

К моменту ведения очистных работ в окружающем выработку массиве пород обычно сформировано статическое поле напряжений и перемещений без образования и с образованием зон разрушения. В таких условиях крепь уже испытывает действие статической нагрузки, поэтому даже небольшая по величине динамическая нагрузка может привести к разрушению крепи.

Перейдем к обоснованию постановки задачи об определении динамических нагрузок на крепь и напряжений в ней при действии сейсмических волн от промышленных взрывов. Взаимодействие сейсмических волн с комплексами закрепленных выработок представляет собой достаточно сложную задачу геомеханики, которая еще до настоящего времени не нашла своего решения. Поэтому необходимо развитие модельных представлений механики взаимодействия системы «закрепленная выработка - массив» при сейсмических воздействиях, как это принято в физике взрыва.

При решении задачи ограничимся рассмотрением плоских сейсмических волн на протяженные участки горных выработок. Будем предполагать, что к моменту воздействия сейсмических волн выработка закреплена постоянной набрызгбетонной, монолитной бетонной, железобетонной и другой сцепленной с породами крепью, и сформирован режим статического или квазистатического взаимодействия системы «крепь - порода». Для определения величины и характера распределения динамического давления на крепь рассмотрим две возможные схемы, которые соответствуют упругому и упруго-пластическому режиму взаимодействия крепи и массива пород.

Как указывалось ранее, наибольший интерес для практических целей представляет взаимодействие длинных сейсмических волн с крепью горных выработок, для которых может быть использовано квазистатическое решение. Тогда определение динамических нагрузок на крепь при длинных сейсмических волнах сводится к построению решения в бесконечной плоскости с впаянным кольцом и усилиями на бесконечности.

## **Раздел V. Сдвигание породных массивов при ведении подземных и открытых горных и горностроительных работ**

Для прогноза осадок земной поверхности и сдвигания горных пород под влиянием подземных и открытых горных работ в настоящее время наиболее

эффективны методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива.

## РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Основная:

1. Горшков Л.К. Основы теории упругости и расчет стрессовых систем [Текст]: учеб. пособие/ Л.К. Горшков, А.Г. Протосеня. – СПб. : Горн. Ун-т, 2013. – 118 с. – Библиогр.: с. 116 (7 назв.). – ISBN 978-5-94211-600-2 : 46.00 р.
2. Протосеня А.Г. Геомеханика [Текст] : учеб. Пособие / А.Г. Протосеня. – СПб. : ЛЕМА, 2017. – 117 с. – Библиогр.: с. 116 (9 назв.). – ISBN 978-5-00101-163-3 : 50.00 р.
3. Протосеня А.Г. Механика подземных сооружений [Текст] : учеб. Пособие / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев – СПб. : Горн. Ун-т, 2013. – 113 с. – Библиогр.: с. 111 (14 назв.). – ISBN 978-5-94211-648-4 : 39.00 р.
4. Ставрогин А.Н. [текст]: Пластичность горных пород — М.: Недра, 1979 г.
5. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг [текст]/ Протосеня А.Г., Огородников Ю.Н., Деменков П.А., Карасев М.А. [и др.] — СПб.: СПГГУ-МНЭБ. – 2011. – 355с. сил.
6. Ставрогин А.Н. Экспериментальная физика и механика горных пород [текст]/ Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. – СПб.: Наука. — 2001. – 343 с.:288 ил.
7. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах [текст]/ Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. – М.: Недра. – 1985. – 271 с.
8. Ставрогин А.Н. Механика деформирования и разрушение горных пород [текст]/ Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. – М.: Недра – 1992. – 224с.: ил.
9. Трушко В.Л. Геомеханика массивов и динамика глубоких рудников [текст]/ В.Л. Трушко, А.Г. Протосеня, П.Ф. Матвеев, Х.М. Совмен – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт. – 2000. – 396с.
10. Родионов В.Н. Основы геомеханики [текст]/ Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. – М.: Недра. – 1986. – 301с.
11. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород [текст]/ Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. – М. Недра. – 1989. – 488с.: ил.
12. Stavrogin A.N. Experimental physics and rock mechanics (Results of Laboratory Studies). 1<sup>st</sup> Edition [text]/ Stavrogin A.N., Tarasov V.G. CRC Press. – 2011. – 356 p.
13. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ. М.: из ММГУ. 2003, 480 с.
14. Руководство по проектированию открытых горных работ. Ре. Дж. Рид. И П. Стейси. Екатеринбург.: Правовед, 2015. – 544 с.
15. Методы и средства контроля состояния свойств горных пород в массиве / Е.С. Ватолин, А.Б. Черняков, А.Д. Рубан. А.М, Потапов/, М.: Недра, 1989, 179 с.

### Дополнительная:

1. Баклашов, И.В. Геомеханика: Учебник в 2-х томах.Т.2. Геомеханические процессы [Электронный ресурс] : учеб. – Электрон. дан. – Москва : Горная книга, 2004. – 249 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3287>.
2. Макаров, А.Б. Практическая геомеханика: (Пособие для горных инжене-

ров) [Электронный ресурс] : учеб. – Электрон. дан. – Москва : Горная книга, 2006. – 391 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3290>.

3. Политов, А.П. Проектирование городских подземных сооружений [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.П. Политов. – Электрон. дан. – Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2012. – 266 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/69504>.

Загл. с экрана

### **Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспиранта**

- Методические указания для самостоятельной работы аспирантов;
- Индивидуальное задание по дисциплине.

### **Ресурсы сети «Интернет»**

1. Информационная справочная система «Консультант плюс».
2. Библиотека ГОСТов [www.gostrf.com](http://www.gostrf.com).
3. Сайт Российской государственной библиотеки. <http://www.rsl.ru/>
4. Сайт Государственной публичной научно-технической библиотеки России. <http://www.gpntb.ru/>
5. Электронные библиотеки: <http://www.pravoteka.ru/>, <http://www.zodchii.ws/>, <http://www.tehlit.ru/>.

### **Электронно-библиотечные системы:**

- ЭБС издательства «Лань» <https://e.lanbook.com/>
- ЭБС издательства «Юрайт» <https://biblio-online.ru/>
- ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <https://biblioclub.ru/>
- ЭБС «ZNANIUM.COM» <https://znanium.com>
- ЭБС «IPRbooks» <https://iprbookshop.ru>
- ЭБС «Elibrary» <https://elibrary.ru>
- Автоматизированная информационно-библиотечная система «Mark - SQL» <https://informsystema.ru>
- Система автоматизации библиотек «ИРБИС 64» <https://elnit.org>

### **Современные профессиональные базы данных:**

- Электронная база данных Scopus <https://scopus.com>
- «Clarivate Analytics» <https://Clarivate.com>
- «Springer Nature» <http://100k20.ru/products/journals/>

### **Информационные справочные системы:**

1. Справочно-правовая информационная система Консультант Плюс <http://www.consultant.ru/>.
2. Электронно-периодический справочник «Система Гарант» <http://www.garant.ru/>.
- 3.ООО «Современные медиа технологии в образовании и культуре». <http://www.informio.ru/>.

Программное обеспечение Норма CS «Горное дело и полезные ископаемые» <https://softmap.ru/normacs/normacs-gornoe-delo-i-poleznye-iskopaemye/>

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Предмет изучения науки геомеханики. Ее основные цели и задачи.
2. Понятие о массивах горных пород. Прочность массива по сравнению с образцом. Масштабный эффект и масштабные уровни.
3. Деформируемость, прочность и разрушение горных пород. Методы и средства лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород.
4. Механические модели горных пород: упругие, жесткопластические, упруго-пластические, реологические.
5. Теории прочности и критерии разрушения пород. Паспорт прочности горных пород, методы и технические средства его построения.
6. Особенности деформирования и разрушения горных пород и массивов в условиях трехосного напряженного состояния, включая область запредельного деформирования.
7. Начальное гравитационное поле напряжений в нетронутом массиве. Тензор и девиатор напряжений.
8. Методы и средства исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород.
9. Тектоническая поле напряжений в массивах горных пород. Методы его прогноза и изучения.
10. Напряженно-деформированное состояние вокруг горных выработок в упругом породном массиве.
11. Методы исследований геомеханических процессов в лабораторных и натуральных условиях.
12. Сейсмические воздействия на горных выработки.
13. Осадки земной поверхности и сдвигание породных массивов под влиянием подземных и открытых горных работ.
14. Применение методов численного моделирования для решения задач геомеханики.