

*На правах рукописи*

**Матвеев Алексей Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И МАССИВОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА  
УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК  
С УЧЕТОМ ИХ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО  
«Уральский государственный горный университет»

*Научный руководитель* – доктор технических наук, профессор  
**Латышев Олег Георгиевич.**

*Официальные оппоненты:*

доктор технических наук, профессор **Зотеев Олег Вадимович**, Институт горного дела Уральского отделения РАН, заведующий лабораторией геомеханики; кандидат технических наук **Аксенов Анатолий Аркадьевич**, Уральский филиал научно – исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ), заведующий лабораторией.

*Ведущая организация* – ОАО «Научно – исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых» (ОАО «Уралмеханобр»).

Защита состоится 10 мая 2012 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.280.02 при ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Автореферат разослан 05 апреля 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

В. К. Багазеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Проектирование горной технологии базируется на информации о комплексе свойств горных пород и породных массивов. При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом важнейшей задачей является обеспечение устойчивости горных пород в выработке. Решению данной задачи посвящены многочисленные научные исследования. Однако, по общему признанию, единой работоспособной теории устойчивости пород в выработке до настоящего времени не создано. Поэтому основным инструментом проектировщиков являются рекомендации Строительных норм и правил (СНиП), которые изобилуют многочисленными и нередко весьма неопределенными коэффициентами. В этой связи составители СНиП прямо указывают на необходимость дополнительных исследований факторов, определяющих устойчивость, и прежде всего свойств и состояния породных массивов.

Расчет устойчивости и нагрузки на крепь выработок в зависимости от горно-геологических условий производится по одной из схем – заданной нагрузки и заданной деформации. В первом случае определяющим фактором является соотношение действующих напряжений и прочности массива; во втором - главную роль играют деформационные и реологические характеристики пород. Указанные свойства определяются, как правило, в лабораторных условиях на образцах. В этом случае необходимой задачей является прогноз свойств и состояния породного массива на основе учета влияния влажности, горного давления, масштабного эффекта, трещинной структуры массива. Достоверность прогноза обеспечивается сопоставлением лабораторных исследований с результатами непосредственных (натурных) испытаний породного массива.

В этой связи тема представленной диссертации, направленной на изучение указанных вопросов, является актуальной.

Работа выполнена в рамках исследований по следующей тематике: «Направленное изменение фрактальных характеристик, свойств и состояния пород поверхностно-активными веществами в процессах горного производства», в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы; «Теоретические основы прогноза прочности и устойчивости горных пород в подземных выработках с учетом фрактальных характеристик трещинной структуры» (задание Федерального агентства по образованию, 2011-2013 гг.).

**Объект исследований** – горные породы и породные массивы, разрабатываемые подземным способом.

**Предмет исследований** – закономерности изменчивости прочностных и реологических характеристик массивов при оценке устойчивости горных пород в подземных выработках.

**Цель работы** – повышение надежности прогноза свойств и состояния породных массивов при решении вопросов устойчивости подземных выработок.

**Основная идея работы** заключается в использовании закономерностей формирования механических свойств породного массива для оценки устойчивости подземных выработок с учетом фрактальной размерности линии их контура.

Тема исследования соответствует паспорту специальности 25.00.20 (пп. 3, 5).

**Задачи исследований:**

1. Изучение комплекса свойств и состояния горных пород применительно к условиям Екатеринбургского метрополитена и Юбилейного месторождения.

2. Установление закономерностей влияния физических полей, масштабного эффекта и трещинной структуры горных пород на их прочностные, деформационные и реологические характеристики.

3. Анализ и разработка методики оценки деформационных характеристик породного массива по результатам скважинных исследований дилатометром.

4. Разработка метода оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности линии контура горной выработки.

5. Совершенствование методики прогнозирования устойчивости горных пород в выработке с учетом деформации и реологии массива.

**Методы исследований:** современные стандартные методики лабораторного определения свойств горных пород; анализ результатов натурных исследований деформации массива; статистическая оценка результатов с позиций теории вероятностей и теории информации; аналитические исследования устойчивости пород в выработке на основе классических представлений физики горных пород, геомеханики и фрактальной геометрии.

**Защищаемые научные положения:**

1. Фрактальная кластерная размерность является надежной оценкой динамики развития трещин, определяющих прочностные и деформационные свойства горных пород.

2. Методика анализа механических свойств породного массива основана на скважинных исследованиях дилатометром и использовании в качестве прогнозного критерия линии разгрузки массива.

3. Прогноз устойчивости подземных выработок по схеме с заданной деформацией основывается на определении фрактальных характеристик контура выработок и трещиноватости породного массива.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы** обеспечивается достаточным (для принятой надежности 95 %) объемом экспериментальных исследований; удовлетворительным (в пределах естественного разброса данных) соответствием аналитических и экспериментальных результатов оценки прочностных, деформационных и реологических характеристик горных пород; использованием результатов скважинных исследований массива, шахтных наблюдений по оценке неровностей контура горных выработок и коэффициента концентрации напряжений.

**Научная новизна результатов исследований** заключается в следующем:

- Установлены закономерности формирования деформационных и реологических характеристик пород, обусловленные динамикой развития трещин, в качестве критерия оценки которой впервые обоснована фрактальная кластерная размерность.

- Разработана методика анализа результатов скважинных исследований породного массива с помощью дилатометра, отличающаяся выделением стадий деформирования по результатам дисперсионного анализа и использованием в качестве прогнозной оценки линии разгрузки массива.

- Обоснована процедура прогнозирования прочности породного массива, отличительной особенностью которой является комплексный учет влияния влажности, горного давления, масштабного эффекта и трещиноватости на характеристики паспорта прочности пород.

- Обоснована методика оценки коэффициента концентрации напряжений на контуре горной выработки, где в качестве прогнозной оценки используется фрактальная размерность линии ее контура.

- Разработана математическая модель и установлена зависимость площади контактов берегов трещины при деформировании массива от ее фрактальной размерности.

**Практическая значимость работы** заключается в обосновании методов и компьютерных программ анализа лабораторных и натуральных экспериментов, позволяющих определить прочностные, деформационные и реологические характеристики породного массива; в разработке методики прогнозирования устойчивости горных пород в выработке с учетом фрактальных характеристик трещиноватости массива и подземных выработок.

**Личный вклад** состоит в непосредственном участии автора в лабораторных исследованиях свойств горных пород, в разработке методики анализа результатов скважинных исследований деформаций массива; в компьютерном моделировании процесса деформации трещин, в исследовании фрактальных характеристик трещиновой структуры пород, в получении основных выводов и результатов работы.

**Реализация результатов работы.** Методика прогнозирования устойчивости и разрушения горных пород в подземных выработках, включающая методы анализа лабораторных и скважинных исследований деформационных свойств массива, определения фрактальных характеристик трещин и подземных выработок, передана для использования в организации: Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Уралгипротранс», ООО «Научно-производственное объединение УГГУ».

Теоретические результаты по анализу прочностных, деформационных и реологических свойств горных пород и массивов, оценке устойчивости пород в выработке используются при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсам: «Геомеханика», «Исследование процессов подземного строительства», «Физика горных пород».

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на III Всероссийской молодежной научно-практической конференции по проблемам

недропользования – г. Екатеринбург, УрО РАН, 2009 г.; на III Уральском горнопромышленном форуме – г. Екатеринбург, УрО РАН, 2009 г.; на научно-технической конференции «Теория и практика добычи, обработки и применения природного камня» - г. Магнитогорск, МГТУ, 2010 г.; на III Международной конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений» - г. Екатеринбург, УГГУ, 2010 г.; на ежегодных молодежных научно-практических конференциях Уральского государственного горного университета – Екатеринбург (2009-2012 гг.).

### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 7 научных работах, из них 4 статьи – в ведущих рецензируемых научных изданиях.

### **Объем и структура работы**

Объем диссертации составляет 179 страниц машинописного текста, включая 82 рисунка и 24 таблицы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 115 наименований и приложений.

В *главе 1* на основе анализа современных методов и средств исследований свойств и состояния горных пород, прогнозирования устойчивости пород в подземной выработке поставлена цель и обоснованы задачи исследований.

*Глава 2* посвящена исследованию свойств горных пород Юбилейного месторождения и участков строящегося Екатеринбургского метрополитена в связи с характеристиками их трещиноватости.

*Глава 3* содержит результаты исследований массива по скважинам с помощью дилатометра и методики прогнозирования свойств породного массива на основе анализа и обобщения лабораторных и натуральных испытаний.

*Глава 4* посвящена прогнозу устойчивости горных выработок на основе расчета по схемам с заданной нагрузкой и заданной деформацией.

Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.; госбюджетной НИР «Теоретические основы прогноза прочности и устойчивости горных пород в подземных выработках с учетом фрактальных характеристик трещинной структуры», выполняемой по заданию Минобрнауки РФ (2011-2013 гг.).

Автор выражает благодарность и признательность научному руководителю, а также И. С. Осипову и В. В. Сынбулатову за дружеское участие и помощь в проведении исследований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Проблема разрушения и устойчивости горных пород в подземных выработках является ключевой при проектировании строительства и эксплуатации шахт и подземных сооружений. Базовыми параметрами, определяющими устойчивость выработок, являются свойства и состояние горных пород и породных массивов. Обширные исследования в области физики горных пород (Л. И. Барон, Ж. С. Ержанов, О. Г. Латышев, Н. В. Мельников, Г. Я. Новик, М. М.

Протоdjаконов, В. В. Ржевский, И. А. Турчанинов и др.) создают фундамент для установления закономерностей, формирующих прочностные, деформационные и реологические характеристики пород.

Представленные в работе результаты базируются на исследованиях автора по изучению свойств и состояния пород Юбилейного месторождения и Екатеринбургского метрополитена. Для получения обоснованных выводов произведена статистическая оценка распределения плотностных, прочностных, упругих, деформационных и реологических свойств указанных пород. Выполнен тренд-анализ их изменчивости по глубине.

Важнейшей характеристикой разрушаемости горных пород является паспорт прочности, выраженный огибающей предельных кругов напряжений. Используемые в настоящее время уравнения огибающей дают явно завышенные значения угла внутреннего трения  $\varphi$ . Так, рекомендуемое ГОСТ 21153.4-85 уравнение М. М. Протоdjаконова (младшего) дает величину коэффициента внутреннего трения  $\operatorname{tg} \varphi > 1$  практически для всех скальных пород, что противоречит самой сути данного показателя. Свободной от указанного недостатка является концепция Г. Г. Литвинского, названная им «аналитической (дифференциальной) теорией прочности». Она описывает прочность структурно неоднородных и трещиноватых материалов, к которым в первую очередь относятся горные породы и их массивы. В соответствии с этой теорией уравнение огибающей принимается в виде:

$$\tau = \tau_0 \left[ \frac{\sigma}{\sigma_0} + 1 \right]^\alpha, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – когезия сдвига, в классической интерпретации понимаемая как величина сцепления;  $\sigma_0$  – соответствует прочности пород на растяжение. Неопределенной величиной здесь является показатель степени  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ), который (по Г. Г. Литвинскому) оценивает долю сухого трения и зависит от площади истинного контакта минеральных зерен.

Относительную площадь истинного контакта минеральных зерен  $S_0$  (по отношению к площади разрушаемого образца  $S$ ) может характеризовать показатель (О. Г. Латышев)

$$k_c = S/S_0 = \tau_0/\tau_c, \quad (2)$$

где  $\tau_c$  – сцепление, определенное в опыте;  $\tau_0$  – та же величина для горной породы с полностью сомкнутыми трещинами и порами. Последнее значение ( $\tau_0$ ) определится как предельный случай положением асимптоты огибающей. Для изученных скальных пород ее уравнение может быть записано в виде:

$$\tau = \sqrt{K(\sigma_p + 0,7\sigma_{сж})} \left[ \frac{\sigma - 0,7\sigma_{сж}}{2(\sigma_p + 0,7\sigma_{сж})} + 1 \right], \quad (3)$$

где  $K = 2\sigma_p - 2[\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})]^{1/2} + \sigma_{сж}$ ;  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  – прочность породы на одноосное растяжение и сжатие.

Непосредственными испытаниями горных пород установлена надежная зависимость ( $R^2 = 0,98$ ) между коэффициентом  $\alpha$  в формуле (1) и показателем  $k_c$ :

$$\alpha = 0,63 + 0,16 \ln (1/k_c). \quad (4)$$

Таким образом, по описанной выше методике произведено построение паспортов прочности более 100 литотипов и определены статистические характеристики прочности принятых к изучению горных пород.

Анализ графиков деформации этих пород показывает следующее. В общем случае характер деформирования пород определяется тремя механизмами (стадиями). В начальной стадии нагружения наблюдается смыкание трещин и пор, что определяет отрицательную кривизну графика деформации (снижения темпа деформирования за счет уплотнения породы). После закрытия всех трещин наступает стадия чисто упругого деформирования, соответствующего закону Гука, – линейный участок графика деформации. Наконец, при достижении предела упругости наступает стадия пластической деформации, выраженная в положительной кривизне графиков деформации (опережающий рост деформации). Однако для многих пород надежное выделение этих стадий не представляется возможным в силу того, что эти механизмы действуют параллельно, и еще до достижения напряжениями предела упругости происходит развитие трещин, т. е. возникают необратимые изменения в горной породе.

Общий характер деформирования может быть описан уравнением

$$E = E_0 / [1 + F(l, \sigma)], \quad (5)$$

где  $E_0$  – начальный модуль упругости;  $F(l, \sigma)$  – некоторая функция трещиноватости, определяемая характеристиками трещинной структуры горных пород ( $l$ ) при данном напряжении ( $\sigma$ ). Зависимость этой функции от напряжения для широкой гаммы пород описывается квадратичным уравнением

$$F(l, \sigma) = k (\sigma^2 - m\sigma), \quad (6)$$

где  $k$  и  $m$  – параметры, определяемые характером трещиноватости горных пород. Для малотрещиноватых однородных пород установлено:  $k = 9 \cdot 10^{-4} 1/\text{МПа}$ ;  $m = 5,8$ .

Для установления общих закономерностей зависимость модуля деформации от нагрузки целесообразно привести к виду:  $E/E_0 = f(\sigma/\sigma_{сж})$ , где  $\sigma_{сж}$  – прочность породы при сжатии. Для изученных скальных пород получено уравнение

$$E = E_0 [a + b (\sigma/\sigma_{сж})], \quad (7)$$

где  $a$  и  $b$  – безразмерные эмпирические коэффициенты, зависящие от строения горных пород. Для указанных известняков  $a = 0,95$ ;  $b = 0,3$  с коэффициентом корреляции  $r = 0,981 \pm 0,012$ , что свидетельствует о достаточной статистической надежности данной зависимости.

Характер зависимости существенно меняется при увлажнении горных пород:

$$E = E_0 [A + c/(\sigma/\sigma_{сж})], \quad (8)$$

где  $A$  – безразмерный коэффициент, характеризующий асимптоту графика, т. е. предельно возможное увеличение  $E$  относительно модуля деформации;  $c$  – безразмерный параметр, характеризующий скорость роста  $E$  с нагрузкой. Для изученных пород  $A = 1,72$  и  $a = 0,12$ .

Для принятых к изучению пород определены их реологические характеристики: ползучесть, релаксация напряжений, длительная прочность. Для гор-



ных пород наиболее широко применяется теория наследственной ползучести (Ж. С. Ержанов). Центральная идея данной теории состоит в предположении, что ползучесть материала характеризуется определенной зависимостью деформации в данный момент времени от всей предыдущей истории его деформирования. Обобщенное уравнение реологии определяется видом ядра ползучести. На первом этапе производилось сравнение различных выражений ядра ползучести. Установлено, что наилучшее приближение к опытным данным обеспечивает степенное ядро ползучести (функция Абеля) в виде:  $L(T, \tau) = \delta (t - \tau)^{-\alpha}$ , где  $\delta$  и  $\alpha$  – определяемые в эксперименте параметры ядра ползучести.

Результаты исследований горных пород в воздушно-сухом и увлажненном состоянии показали следующее. В зависимости от уровня приложенных напряжений горные породы проявляют затухающую или незатухающую ползучесть. Причем с увлажнением пород переход к незатухающей ползучести происходит при меньших по величине напряжениях. Количественно рост деформации во времени достаточно точно описывается уравнением Больцмана-Вольтерра со степенным ядром ползучести:  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 [\delta/(1 - \alpha)] t^{1-\alpha}$ , где  $\varepsilon_0$  – мгновенная деформация (упругий прогиб балки). Однако финишные участки кривых затухающей ползучести данное уравнение заведомо не описывает. Эта стадия может быть описана гиперболической зависимостью

$$\varepsilon = t / (at + b) \quad (9)$$

с пределом  $\varepsilon_{\max} = 1/a$ . Для изученных пород  $a = (5 - 6) \cdot 10^3$ .

По результатам экспериментального изучения параметров ползучести определены функции релаксации напряжений:  $\sigma(t) = E\varepsilon_0 + \eta(d\varepsilon/dt)$  – для затухающей и  $\sigma(t) = E\varepsilon_0 \exp(-E/\eta \cdot t)$  – для незатухающей ползучести, где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости ( $\eta = E t_0$ ), Па·с;  $t_0$  – период релаксации.

Анализ результатов исследования ползучести показывает, что в ходе деформирования пород происходит перестройка их структуры, проявляющаяся в развитии трещин и подвижках минеральных зерен. В этой связи такие параметры как модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  уже не являются константами породы, что затрудняет расчеты напряженно-деформированного состояния горных пород и массивов. Ю. М. Работнов показал, что при установлении и использовании временных функций данных показателей:  $E(t) = E_0/[1 + F(t)]$  и  $\nu(t) = 0,5 - (0,5-\nu)/[1+F(t)]$  задачу линейной наследственности можно рассматривать как задачу теории упругости. Тогда задача сводится к определению функции  $F(t)$ . В результате исследований нами определены параметры данной функции для всех принятых к изучению горных пород:

$$F(t) = \frac{\delta}{1 - \alpha} \cdot t^{1-\alpha}. \quad (10)$$

Процессы упругого деформирования и ползучести сопровождаются и определяются изменением трещинной структуры горных пород. Для изучения данного вопроса выполнена серия экспериментальных исследований. Образцы горных пород ступенчато нагружались на прессе с параллельным замером их деформации. После каждой ступени нагружения методом люминесцентной дефektоскопии получали цифровые фотографии трещинной структуры пород и по разработанной методике (О. Г. Латышев, И. С. Осипов, А. Н. Еремизин) опре-

деляли координаты нарушений. Анализ результатов показал, что деформирование образцов сопровождается зарождением и развитием (ветвление, слияние и т. п.) трещин. Взаимодействующие трещины образуют очаги нарушений – кластеры. Динамику этого процесса можно рассматривать как саморазвитие под действием нагрузки кластерной структуры горных пород. Процесс может быть представлен как последовательный ряд этапов развития трещинных кластеров и присоединения их друг к другу. Эти этапы представляют собой различные уровни иерархии структуры горных пород. При этом по мере роста кластеров рост единичных трещин ограничивается их силовым полем и на последних стадиях нагрузки практически прекращается – растут кластеры.

Для изучения данного процесса использован аппарат фрактального кластерного анализа (Б. Мандельброт). Количественной мерой кластеров служит фрактальная размерность поверхности образца. Для ее определения использован метод покрытия. На изображение поверхности (фотоснимок) накладывается сетка с изменяющимся размером квадратной ячейки  $\delta_i$ . Для каждого типоразмера сетки определяется количество ячеек  $N_i$ , занятых изображением объекта (кластером). Фрактальная кластерная размерность трещинной структуры определяется по углу наклона графика данной зависимости, построенного в двойных логарифмических координатах:

$$d_f = \frac{\ln N}{\ln(1/\delta)} + 1. \quad (11)$$

Данная процедура реализована в совокупности компьютерных программ, разработанных на кафедре шахтного строительства с участием автора. В результате определены фрактальные кластерные размерности образцов на каждой стадии нагружения. Анализ полученных результатов показывает устойчивый нелинейный рост фрактальной размерности дефектов поверхности по мере нагружения образцов (рис. 1).

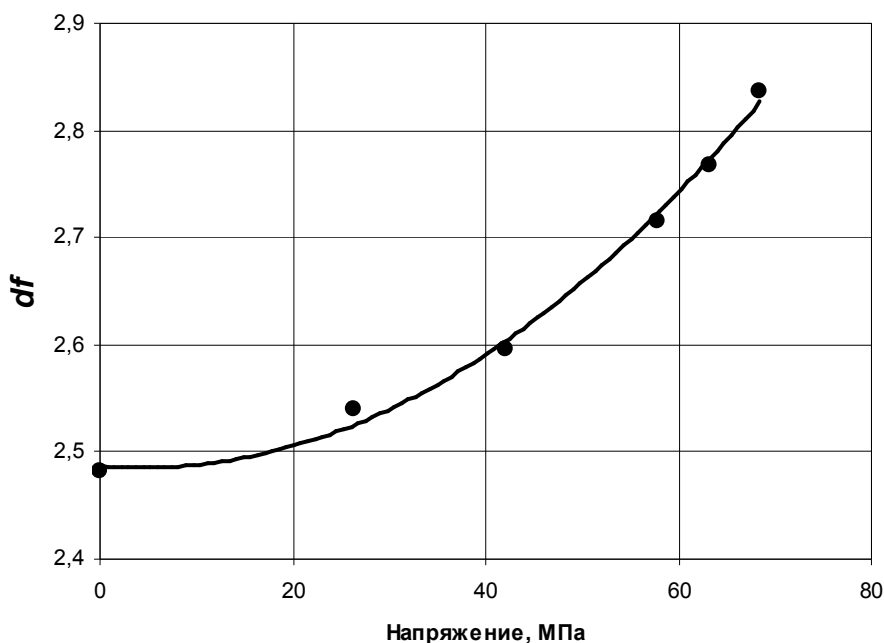


Рис. 1. Рост фрактальной размерности кластеров с увеличением нагрузки

Данную зависимость можно описать уравнением параболы вида:

$$d_f = d_{f0} + k_\sigma (\sigma^2 - m_\sigma \sigma), \quad (12)$$

где  $d_{f0}$  – фрактальная кластерная размерность поверхности исходной горной породы;  $k_\sigma$ ,  $m_\sigma$  – эмпирические коэффициенты, отражающие темп роста фрактальной размерности по мере нагружения породы ( $k_\sigma$ ) и кривизну графика зависимости ( $m_\sigma$ ). Для изученных образцов туфа  $d_{f0} = 2,48$ ;  $k_\sigma = 8 \cdot 10^{-5} / \text{МПа}$  и  $m_\sigma = 8,75$  (при измерении напряжений  $\sigma$  в МПа). Коэффициент достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации)  $R^2 = 0,995$  свидетельствует о статистической надежности данной зависимости. Положительная кривизна графика отражает ускоряющийся рост дефектности пород с нагрузкой, что соответствует современным представлениям о накоплении повреждений в ходе разрушения горных пород.

Обращает на себя внимание сходство структур данного уравнения с ранее полученным нами выражением функции трещиноватости (6). Это свидетельствует о единстве данных процессов – функция трещиноватости определяется кластерной структурой трещиноватости горных пород. Действительно, корреляционный анализ показывает надежную зависимость между этими характеристиками (рис. 2).

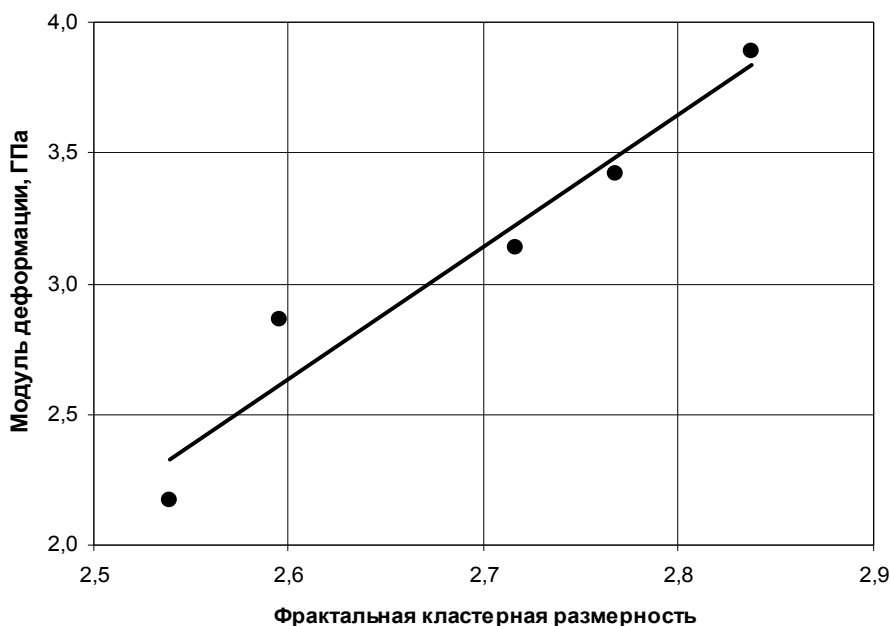


Рис. 2. Зависимость модуля деформации от фрактальной размерности кластеров горных пород

Данная зависимость описывается уравнением

$$E = k (d_f - 2). \quad (13)$$

Для указанной породы (туфа)  $k = 5,1$  ГПа. Близкий к единице ( $r = 0,968$ ) коэффициент корреляции свидетельствует о статистической значимости данной закономерности. Следует отметить важное обстоятельство. Полученные соотношения справедливы до момента начала разрушения горной породы, когда лавинообразный рост трещин сопровождается прогрессирующим пластическим течением. Здесь действуют другие закономерности.

Таким образом, *фрактальная кластерная размерность является надежной оценкой динамики развития трещин, определяющих прочностные и деформационные свойства горных пород.*

Полученные результаты являются базой для прогноза устойчивости и разрушаемости горных пород в подземной выработке. Однако для обеспечения достоверности прогноза требуется оценка свойств и состояния породного массива. Из современных методов натуральных испытаний породного массива наиболее разработанными в техническом и методическом плане являются скважинные исследования. Такие исследования проведены в массиве строящегося Екатеринбургского метрополитена с помощью прессиометра (дилатометр IF 096 швейцарской фирмы Solexpert AG). Произведены измерения 25 интервалов длиной по 1 м в пяти скважинах. Для построения графиков деформации и их анализа разработана соответствующая компьютерная процедура.

Полученные результаты скважинных испытаний отличаются большим многообразием, которое обусловлено как различием в свойствах и трещиноватости исследуемых массивов, так и погрешностями самого эксперимента. Поэтому на первом этапе для получения достоверных результатов выполнен дисперсионный анализ различных участков графиков деформации, обозначенных на рис. 3.

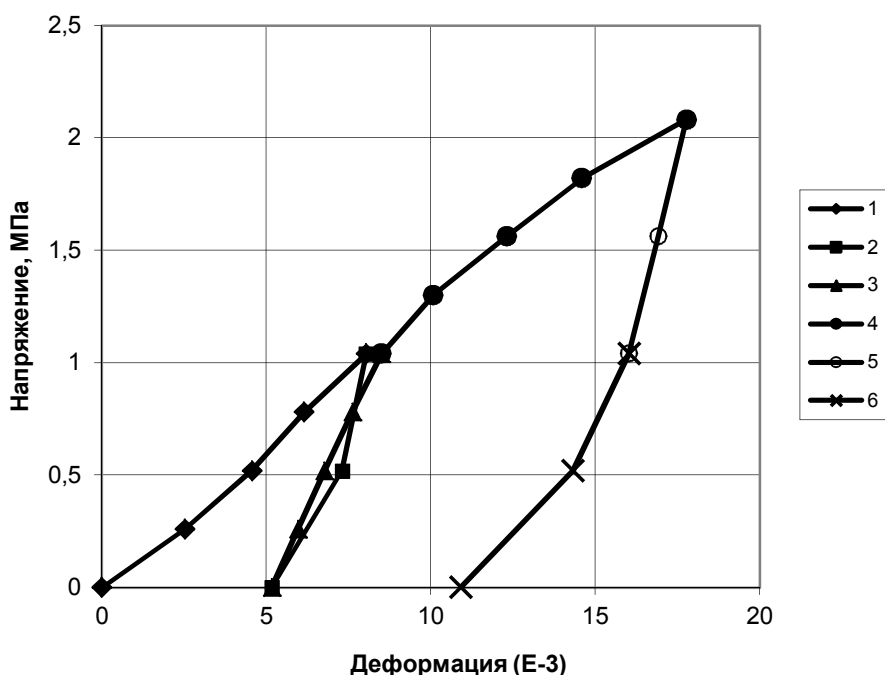


Рис. 3. Выделяемые стадии деформирования породного массива

Анализ и обобщение графиков деформации породного массива позволили надежно выделить три стадии деформирования (аналогично таким же стадиям деформирования образцов пород в лабораторных исследованиях): смыкание трещин и уплотнение массива; упругое деформирование; необратимые (пластические) подвижки массива. Последней стадии деформирования соответствует наибольшая дисперсия, связанная с начинающимися процессами разрушения

цементирующего материала трещин отдельности. Поэтому надежная информация о поведении пород до разрушения может быть получена путем анализа первых двух стадий деформирования массива. Для количественной оценки деформационных характеристик породного массива разработана методика анализа графиков деформации (рис. 4).

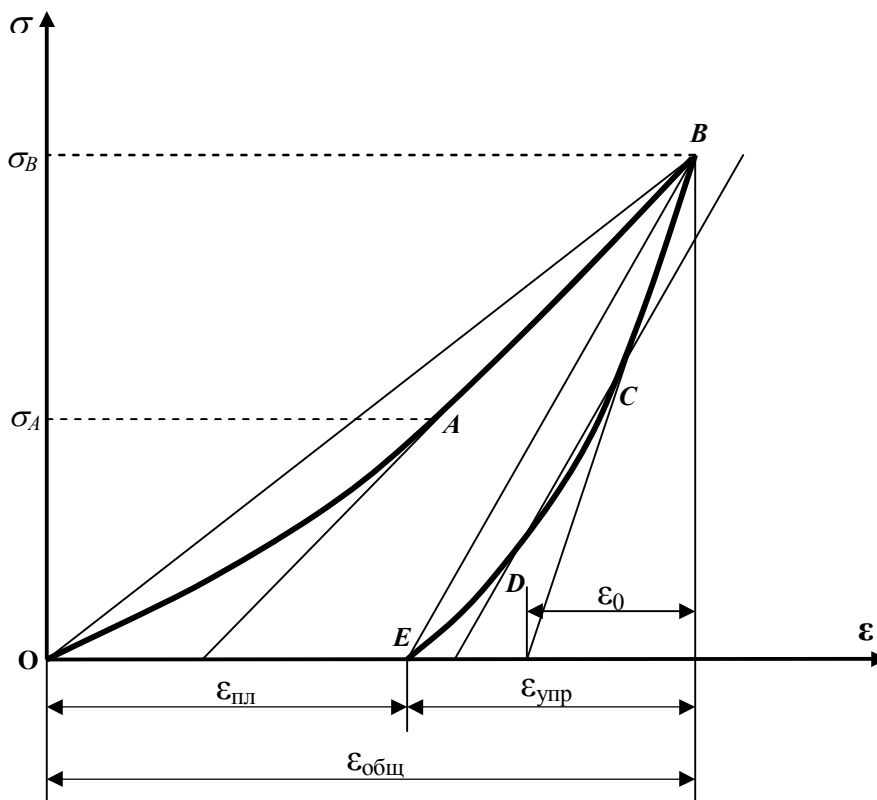


Рис. 4. Типичный график деформации породного массива

Линию разгрузки  $BCDE$ , как правило, представляемую непрерывной кривой, разделяем на примерно равные участки таким образом, чтобы наклонная линия  $CD$  была параллельна линии  $BE$ . В этом случае модуль упругости слагающих массив пород определится выражением

$$E_0 = \sigma_B / \varepsilon_0. \quad (14)$$

Следующим шагом является выделение необратимых (пластических) деформаций массива. Для этого на каждом шаге нагружения из общей деформации  $\varepsilon_{\text{общ}}$  вычитается ее упругая составляющая, определяемая модулем упругости  $E_M$ :

$$\varepsilon_{\text{пл}(i)} = \varepsilon_{\text{общ}(i)} - \sigma_i / E_M. \quad (15)$$

По вычисленным значениям  $\varepsilon_{\text{пл}(i)}$  производится построение графика необратимых деформаций массива и оценивается величина модуля пластичности  $E_{\text{пл}}$  как тангенса угла наклона линии тренда данного графика. Аналогично методике исследования деформации образцов для породного массива определяется уравнение функции трещиноватости (6). Для различных участков массива величина  $m = 0,2$ , а коэффициент темпа закрытия трещин изменяется в пределах  $k = 0,5 - 1,5$ . По мере смыкания трещин (изменения функции трещиноватости) закономерно увеличивается модуль деформации массива. Его относительное

изменение может быть, как и для образцов, описано линейным уравнением (7). Однако коэффициенты  $a$  и  $b$  имеют существенно меньшую величину и значительно изменяются для различных участков исследованного массива.

Обобщение и анализ исследований позволили установить надежные зависимости модулей общей деформации  $E_{\text{деф}}$  породного массива от модуля упругости слагающих его пород  $E_0$ :

$$E_{\text{деф}} = 0,17 E_0 \quad (16)$$

с коэффициентом корреляции  $r = 0,91$ .

Полученные зависимости позволяют оценивать деформационные характеристики породного массива при разных уровнях нагрузки. В частности, предложенная методика использована для оценки качества цементации трещиноватых пород в массиве станции «Чкаловская» Екатеринбургского метрополитена.

Паспорт прочности горных пород в массиве в соответствии с концепцией Г. Г. Литвинского определится на основе зависимости (1):  $\tau = \tau_0 \psi [\sigma / \psi \sigma_0 + 1]^{\alpha \psi}$ , где показатель сплошности  $\psi$  может быть оценен соотношением:

$$\psi = E_{0(\text{гп})} / E_{0(\text{м})}, \quad (17)$$

где  $E_{0(\text{гп})}$  – модуль упругости горных пород, измеренный на образце;  $E_{0(\text{м})}$  – модуль упругости слагающих массив горных пород. Первый показатель определяется лабораторными испытаниями в начальной стадии нагружения образцов, методика которых изложена выше. Модуль упругости слагающих массив пород ( $E_{0(\text{м})}$ ) определяется по результатам скважинных испытаний (формула (14)).

Для достоверной оценки свойств породного массива установлено влияния на прочностные и деформационные характеристики пород горного давления, влажности, масштабного фактора, трещинной структуры (блочности) массива. Основой такой оценки служат установленные закономерности изменения функции трещиноватости пород под нагрузкой.

На основе изучения законов распределения прочности горных пород и статистики его экстремальных (минимальных) значений установлено уравнение масштабного эффекта:  $\sigma_S = \sigma_{\min} + \beta / S_0^{3/2k}$ . Здесь  $S_0$  – площадь обнажения пород (площадь горной выработки);  $\sigma_{\min} = \mu + \beta \cdot (-\ln P)^{1/k}$  – показатель, характеризующий минимальное статистически вероятное значение частного результата прочности при  $S \rightarrow \infty$ , соответствующее прочности неограниченного массива;  $\mu$  – крайняя левая граница прочности, т. е. асимптота кривой масштабного эффекта;  $\beta$  – параметр масштабного фактора, имеющий размерность напряжения;  $k$  – коэффициент однородности горной породы;  $P$  – принятый уровень значимости.

Паспорт прочности трещиноватого (блочного) массива описывается уравнением:

$$\tau = \tau_0 f(k_{\text{стр}}) \left[ \frac{\sigma}{f(k_{\text{стр}}) \sigma_0} + 1 \right]^{\alpha f(k_{\text{стр}})}. \quad (18)$$

Здесь функция коэффициента структурного ослабления оценивается модулем трещиноватости породного массива  $J_T$  как  $f(k_{\text{стр}}) = 1,08 J_T^{-0,94}$ .

Совместный учет масштабного эффекта и блочного строения массива позволил получить выражение для коэффициента структурного ослабления пород:

$$k_{\text{стр}} = \frac{a + b (1 - V_{\sigma})}{c (0,2J_T + 1)}, \quad (19)$$

где  $V_{\sigma}$  – коэффициент вариации прочности пород;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты. Для условий Юбилейного месторождения  $a = 0,7$ ,  $b = 0,8$ ,  $c = -1,25$ . По результатам исследований составлены прогнозные диаграммы прочности породного массива Юбилейного месторождения по глубине.

Таким образом, *методика анализа механических свойств породного массива основана на скважинных исследованиях дилатометром и использовании в качестве прогнозного критерия линии разгрузки массива.*

Все методы прогноза устойчивости и нагрузки на крепь подземных выработок разделяют на две группы: расчет по схеме заданной нагрузки и расчет по схеме заданной деформации. В первом случае при критических напряжениях предполагается разрушение пород на контуре выработки с образованием свода естественного равновесия (М. М. Протоdjаконов, П. М. Цимбаревич, В. Д. Слесарев, Н. М. Покровский и др.). Второй подход (расчет по заданным деформациям) основан на оценке образования вокруг выработки зоны неупругих (запредельных) деформаций и использовании методов механики сплошной среды (А. Лабасс, К. В. Руппенейт, Ю. М. Либерман, А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня и др.). При переходе к содержательному расчету неизбежно возникает задача выбора той или иной концептуальной схемы. Из постановки задачи и самой сути различных гипотез горного давления следует, что концепцию образования свода естественного равновесия следует применять при «малых» глубинах заложения выработки, а концепцию заданных деформаций – при «больших» глубинах. Однако конкретных (количественных) признаков «малых» и «больших» глубин в литературе не приводится. Это совершенно понятно, поскольку никакие жесткие рекомендации не могут учесть всего многообразия особенностей реальных массивов. Но для конкретных горно-геологических условий такие рекомендации могут быть получены.

В принципе эта задача так или иначе решается в любых исследованиях устойчивости. Анализ позволяет выделить следующие основные подходы. В соответствии с одним из них (А. П. Максимов) разрушение массива определяется чистым сдвигом, и выбор критической глубины основывается на критерии Кулона-Мора. Другой подход основан на критерии нормальных напряжений с учетом комплексной деформационной характеристики массива (Н. С. Булычев). В исследованиях И. В. Баклашова и О. В. Тимофеева учитывается технология проведения подземной выработки, в частности влияние буровзрывных работ. Общий подход к решению данной задачи предложен Г. Г. Литвинским. В качестве критерия им вводится безразмерный параметр – «локальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР)»:

$$W = F_1(\sigma_{ij})/F_2(\sigma_{ij}; C_{ij}), \quad (20)$$

где  $F_1(\sigma_{ij})$  – функция действующего тензора напряжений в данной точке массива;  $F_2(\sigma_{ij}, C_{ij})$  – функция прочности пород с учетом действующих напряжений. Однако конкретного выражения критерия Г. Г. Литвинским  $W$  не приводится. Это вполне объяснимо, так как учесть все особенности разнообразных реальных горно-геологических условий в единой модели не представляется возможным. Поэтому для прогноза устойчивости горных пород в выработке необходима разработка конкретной формулы критерия, отражающей реальные условия проходки выработки. На основе функции (20) и методических подходов Н. С. Булычева и И. В. Баклашова нами предлагается следующая формула критерия:

$$W = \frac{K_\lambda K_\sigma \gamma H}{K_H K_C K_S K_Q \sigma_{сж}}. \quad (21)$$

Конкретное наполнение данного расчетного соотношения производится по результатам проведенных в диссертации исследований. Здесь  $K_\lambda$  – коэффициент, учитывающий отличие реального напряжения массива от гидростатического ( $\gamma H$ ), может быть достоверно определен только натурными измерениями НДС в конкретной точке массива. При отсутствии такой информации следует использовать рекомендации СНиП. Величина  $K_H = K_W K_P$  учитывает возможное разупрочнение пород при увлажнении ( $K_W$ ) и влияние горного давления ( $K_P$ ). Коэффициент  $K_C$  учитывает влияние масштабного фактора и трещинной структуры массива. Приведенные выше результаты исследований позволяют определить величину данных коэффициентов. В дополнительной оценке нуждаются показатели, отражающие деформационные характеристики массива ( $K_S$ ), особенности технологии проходки выработки ( $K_Q$ ) и концентрацию напряжений на ее контуре ( $K_\sigma$ ).

Коэффициент Н. С. Булычевым  $K_S$  предлагается определять по формуле:  $K_S = 1 + 1/\sin \varphi (P_\varepsilon^{\sin \varphi} - 1)$ , где  $P_\varepsilon = \varepsilon_{сж}/\varepsilon_y$  – характеристика пластичности горных пород, представляющая собой отношение предельной деформации при разрушении пород сжатием ( $\varepsilon_{сж}$ ) и ее упругой составляющей ( $\varepsilon_y$ ). Величина  $P_\varepsilon$  определится по деформационным характеристикам горных пород (уравнения (5) – (8)) или результатами скважинных исследований (см. рис. 4). Угол внутреннего трения  $\varphi$  при данном напряжении  $\sigma = \gamma H$  определится анализом паспорта прочности по изложенной выше методике.

В работах И. В. Баклашова и О. В. Тимофеева установлено, что изменение модуля деформации массива  $E$  по мере удаления от контура выработки  $r$  за счет разгрузки массива и нарушения пород взрывными работами (образования зоны трещиноватости) можно учесть коэффициентом  $K_Q = (1 - a r^{-n})$ , где  $n = 1/\lg(1 + \xi)$ ;  $a = 0,98^n$ . Параметр  $\xi$ , зависящий от глубины зоны нарушения породного массива взрывными работами, определяется шахтными наблюдениями. На стадии проектирования величину  $\xi$  рекомендуется определять по таблицам в зависимости от коэффициента крепости пород и глубины заложения выработки.

Показатель  $K_\sigma$  можно сопоставить с коэффициентом концентрации напряжений на контуре выработки, величина которого определяется размерами



обнажения и характером неровностей ее контура. Наиболее распространенная методика оценки величины  $K_{\sigma}$  заключается в следующем (И. В. Баклашов, К. В. Руппенейт). Контур выработки описывается системой параметрических уравнений, решение которой находится в комплексном виде (метод Колосова-Мухелишвили). Для упрощения решения задачи строится конформное отображение выработки, т. е. такой линии контура, для которого математическое ожидание отклонений равно нулю ( $\Sigma C_{\theta} = 0$ ). С учетом вероятностной природы отклонений контура выработки от проектного коэффициент концентрации напряжений вычисляется по формуле

$$K_{\sigma} = \sigma_{\theta}/\gamma H = 2[1 + q(P) 2\pi m D^{1/2}], \quad (22)$$

где  $m$  – среднее число пересечений линии реального контура выработки с ее проектным профилем на участках  $r$ , равных по длине эквивалентному радиусу выработки  $R_B$ ;  $D$  – дисперсия величин отклонения контура выработки от проектного сечения  $C_{\theta}$ , выраженная в долях  $R_B^2$ . Величина множителя  $q(P)$  зависит от принимаемого уровня надежности расчетов  $P$ : при  $P = 85\%$   $q(0,85) = 1,44$ ; при  $P = 95\%$   $q(0,95) = 1,96$ ; при  $P = 99\%$   $q(0,99) = 2,66$ .

В соответствии с формулой (22), величина коэффициента концентрации напряжений определяется двумя характеристиками: дисперсией отклонений  $D$  и общим числом пересечения профилем выработки ее проектного (конформного) контура  $m$ . Эти показатели косвенно характеризуют степень изломанности линии контура выработки, но если дисперсия  $D$  является объективным показателем геометрии выработки, то величина  $m$  представляется малоинформативной. Более объективной характеристикой степени изломанности линии контура выработки является ее фрактальная размерность  $d_f$ . Для изучения данного вопроса разработана математическая имитационная модель (метод Монте-Карло) генерации контура горной выработки, основанная на теории итерационных функций и ее случайных реализациях. Корреляционный анализ результатов реализации модели показал, что фрактальная размерность практически точно соответствует данным характеристикам выработок. Полученное уравнение связи

$$d_f = 0,42 \ln(mD^{1/2}) \quad (23)$$

характеризуется коэффициентом достоверности аппроксимации, близким к единице ( $R^2 = 0,985$ ). С учетом этого уравнение оценки коэффициента концентрации напряжений можно представить в следующем виде:

$$K_{\sigma} = 1 + [\beta q(P) R_B]^{d_f - 1}. \quad (24)$$

Для проверки применимости (адекватности) данного уравнения исследованы 65 сечений горизонтальных выработок СУБРа. По результатам шахтных замеров произведено вычисление коэффициентов концентрации напряжений по классической формуле (22) и по предлагаемому уравнению (24), основанному на определении фрактальной размерности линии контура выработки. Результаты сравнения и анализа показали следующее (рис. 5). Фрактальная размерность  $d_f$  достаточно точно соответствует коэффициенту концентрации напряжений  $K_{\sigma}$  на контуре горных выработок. На рис. 5 точками отмечены значения  $K_{\sigma}$ , вычисленные традиционным способом по формуле (22); линия соответствует уравнению (24) при  $q(0,95) = 1,96$  и  $\beta = 0,8$ . Коэффициент вариации составил 1,6 %.

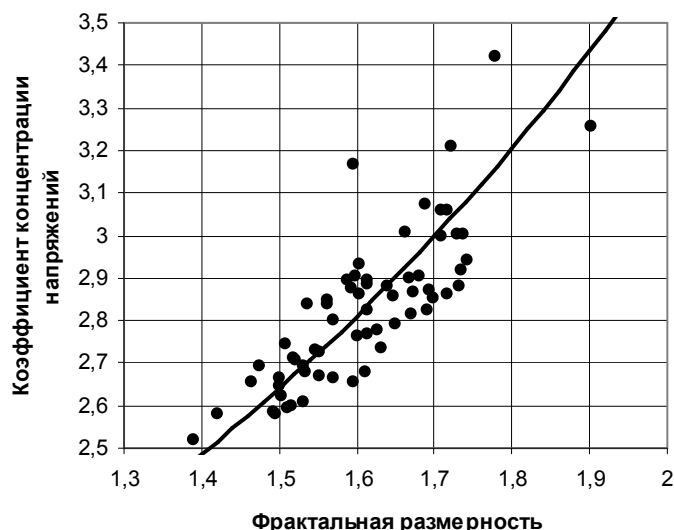


Рис. 5. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от фрактальной размерности линии контура горных выработок

Предлагаемая методика оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности контура выработки дает результаты, соответствующие общепринятому способу расчета (уравнение (22)), но обладает рядом преимуществ. В частности, отпадает необходимость в построении конформного отображения контура выработки и подсчете числа пересечений  $m$  линии реального контура проектного сечения, величина которого во многом носит случайный характер и значительно (в несколько раз) меняется при проходке выработки с одним и тем же паспортом БВР.

Определенные по результатам исследований параметры уравнения (21) позволили составить прогнозную диаграмму устойчивости горных пород в выработках по глубине Юбилейного месторождения (рис. 6). Сопоставление ее с результатами расчетов по критериям Н. С. Булычева и И. В. Баклашова показало их качественное соответствие.

По полученной диаграмме определены интервалы глубин, где породы устойчивы и выработки можно не крепить; крепление необходимо, и расчет следует производить по схеме заданной нагрузки; расчет крепи требуется производить с учетом реологии массива (расчет по схеме заданной деформации). По схеме с заданной нагрузкой на основании рекомендаций СНиП II-94-80 определены значения критерия устойчивости  $C$  и нагрузки на крепь ствола по условиям Юбилейного месторождения. При этом приведенные выше результаты исследований позволили конкретизировать многие коэффициенты СНиП, что повысило надежность прогноза.

Аналогичные расчеты выполнены с учетом изученных деформационных и реологических свойств горных пород. Определено давление на крепь выработок по методике К. В. Руппенейта. В соответствии с этой методикой упругие свойства трещиноватого породного массива зависят от геометрической характеристики систем трещин:

$$\eta_i = \delta_i / l_i \zeta_i, \quad (25)$$

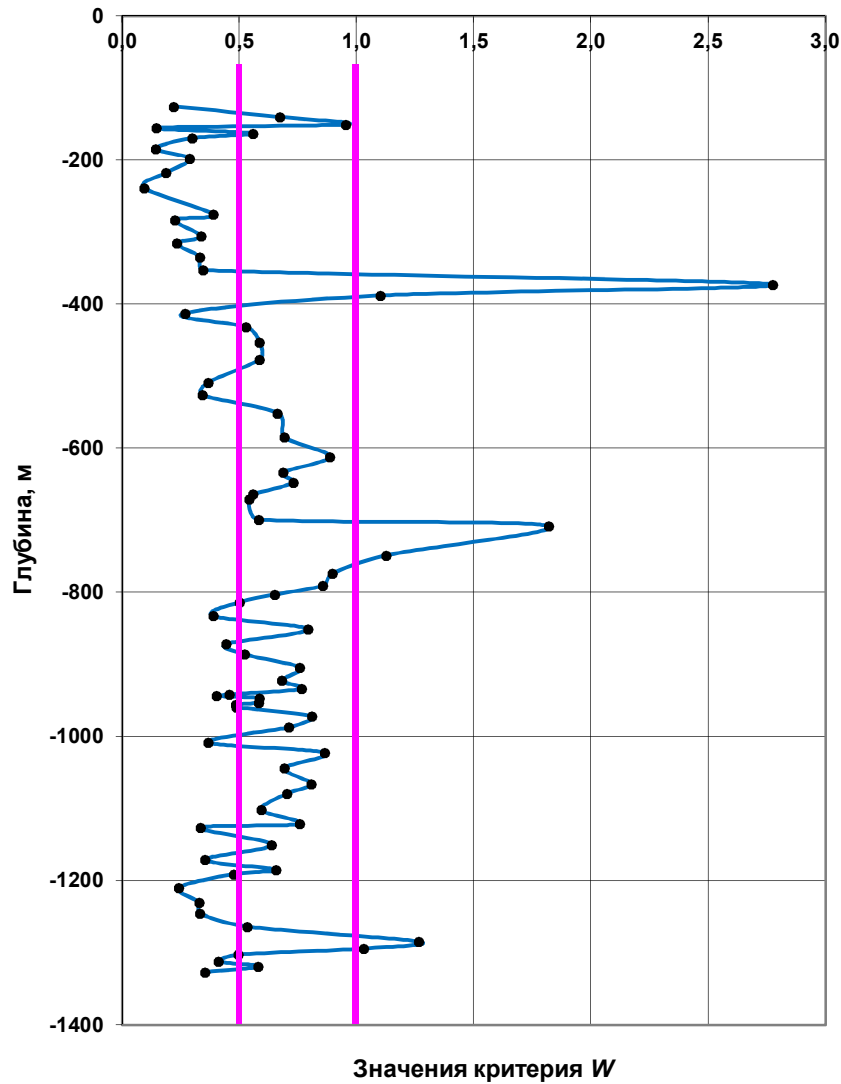


Рис. 6. Прогнозная диаграмма устойчивости горных пород в выработках по глубине Юбилейного месторождения

где  $\delta_i$  – средняя ширина раскрытия трещин  $i$ -й системы;  $l_i$  – среднее расстояние между трещинами;  $\zeta_i$  – относительная площадь скальных контактов берегов трещин. Расстояние между трещинами отдельностей  $l_i$  и ширину их зияния  $\delta_i$  можно получить усреднением натуральных замеров. Более сложной в определении является относительная площадь скальных контактов берегов трещин  $\zeta_i$ . К. В. Рупнейтом рекомендуется принимать  $\zeta_i = 3 \cdot 10^{-4}$  как некоторую константу. Однако совершенно очевидно, что эта величина будет существенно различной для реальных трещин массива. Более того, она будет меняться в ходе деформирования массива. Следовательно, данный вопрос нуждается в специальных исследованиях.

Для этого нами разработана математическая модель деформации трещины под действием нормальных (к линии трещины) и сдвигающих усилий. По мере сближения и деформации берегов трещины ее профиль выполаживается и становится менее изломанным, что отражается в изменении фрактальной раз-

мерности средней линии трещины  $d_f$ . Реализация модели позволила установить зависимость относительной площади контактов берегов трещины  $\zeta_i$  от ее фрактальной размерности (рис. 7).

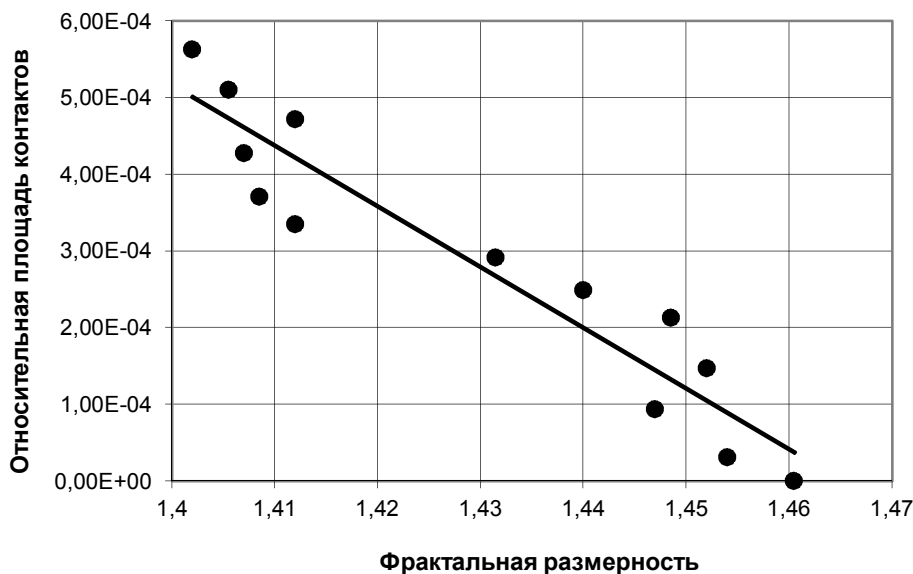


Рис. 7. Зависимость площади контактов берегов трещины от ее фрактальной размерности

В общем виде уравнение данной зависимости запишется в виде:

$$\zeta_i = k d_{f0} (1 - b d_{fi}), \quad (26)$$

где  $d_{f0}$  – фрактальная размерность средней линии исходной трещины;  $k$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от геометрии трещины и соотношения нормальных и сдвигающих деформаций. Изучение реальных трещин массива показало, что по порядку величин:  $k = (5-15) \cdot 10^{-3}$ ,  $b = 0,5-0,8$ .

В методике К. В. Руппенейта не учитывается фактор времени, что не позволяет установить деформацию пород до возведения крепи и ее совместную работу с массивом. Основываясь на исследованиях И. Н. Кацаурова, получим уравнение для прогноза смещения пород до момента установки крепи:

$$U = Ar_0 \left[ \exp\left(\frac{K_\sigma \gamma H}{k_c \sigma_{сж}}\right) - 1 \right], \quad (27)$$

где  $r_0$  – эквивалентный радиус выработки;  $k_c$  – коэффициент структурного ослабления пород. При  $A = 26$  данное уравнение точно соответствует номограмме для определения типовых смещений СНиП II-94-80 (рис. 8), но имеет то преимущество, что здесь в явном виде учитываются размеры выработки, коэффициенты концентрации напряжений и структурного ослабления.

Результаты исследования реологических характеристик горных пород позволяют определить функцию ползучести  $\Phi = \delta t^{1-\alpha}/(1-\alpha)$ , где  $\alpha$  и  $\delta$  – параметры ядра ползучести, и длительную прочность пород  $\sigma_{дл}$ , которые являются основой прогнозирования устойчивости выработок по схеме заданной деформации (Ж. С. Ержанов). Методика расчета базируется на известном решении А. Н. Динника о НДС идеально упругого изотропного массива с заменой (в соот-

ветствии с идеей Ю. Н. Работного) упругих констант горных пород их временными операторами.

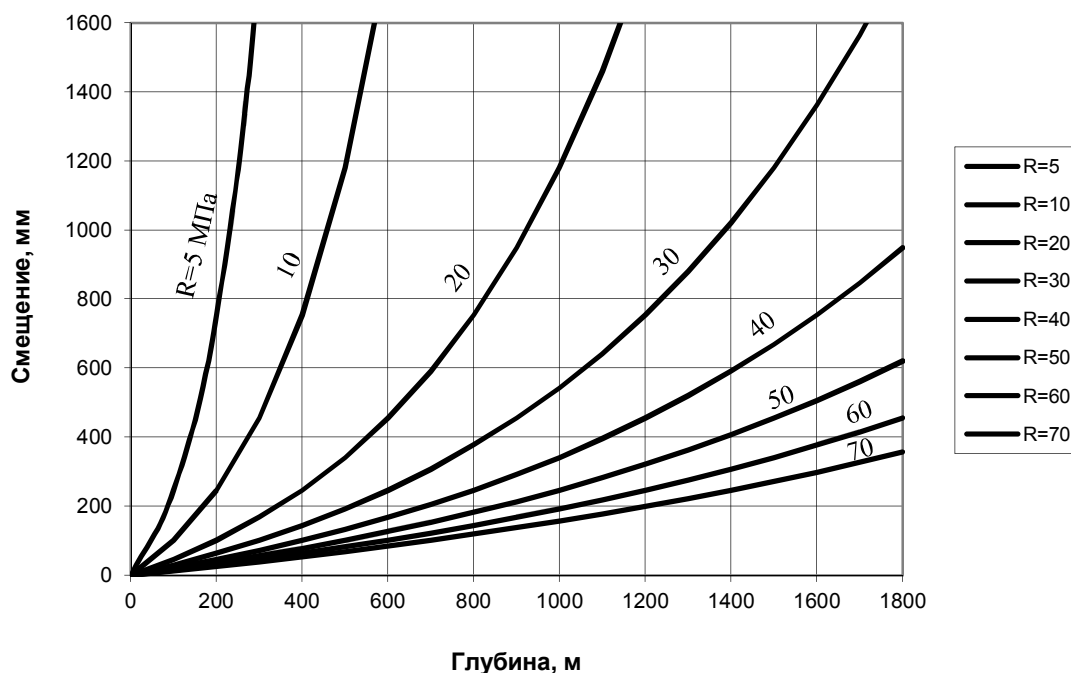


Рис. 8. Номограмма к определению типовых смещений

В частности, временная функция модуля упругости:  $E(t) = E_0 \cdot \exp[-\omega \delta \Gamma(1 - \alpha) t^{1-\alpha}]$ , где  $\omega = (1 - \alpha)^{1-\alpha}$ ;  $\Gamma()$  – гамма-функция. По аналогичным формулам определены зависящие от реологических свойств пород коэффициент Пуассона  $\nu(t)$ , коэффициент горизонтального распора  $\lambda(t)$  и произведен расчет напряженно-деформированного состояния пород вокруг выработки применительно к изученным горным породам: радиальные напряжения -  $\sigma_r = \lambda(t) (1 - R^2/r^2) \gamma H$ , тангенциальные напряжения -  $\sigma_\theta = \lambda(t) (1 + R^2/r^2) \gamma H$  и перемещения -  $U_r = \{ \lambda(t) [1 + \nu(t)] / [1 - \nu(t)] E(t) \} (R^2/r) \gamma H$ , где  $R$  – радиус выработки,  $r$  – расстояние от ее оси.

Таким образом, *прогноз устойчивости подземных выработок по схеме с заданной деформацией основывается на определении фрактальных характеристик контура выработок и трещиноватости породного массива.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации в результате проведенных исследований дано решение актуальной научно-практической задачи прогноза устойчивости подземных выработок на основе установленных закономерностей формирования деформационных и реологических свойств горных пород и массивов с учетом их фрактальных характеристик, имеющее существенное значение для проектирования технологии строительства шахт.

При достижении поставленной цели и решении задач диссертационного исследования автором получены следующие научные и практические результаты:

1. Исследованы статистические характеристики комплекса плотностных и механических свойств горных пород Юбилейного месторождения; выполнен тренд-анализ их изменчивости по глубине месторождения.

2. Установлены закономерности формирования прочностных, деформационных и реологических свойств горных пород, учитывающие динамику изменения функции трещиноватости горных пород при их нагружении и фрактальную кластерную размерность трещинной структуры горных пород.

3. Разработана методика и компьютерная программа анализа результатов скважинных испытаний породного массива дилатометром, позволяющие прогнозировать основные характеристики массива: модули упругости породного массива и слагающих его горных пород, модулей пластичности и общей деформации.

4. Для оценки устойчивости подземных выработок произведен прогноз прочностных и деформационных характеристик массива путем учета влияния горного давления, влажности, масштабного эффекта и коэффициента структурного ослабления пород трещинами. По результатам произведены построения прогнозных диаграмм прочности породного массива по глубине.

5. Обоснована формула критерия напряженно-деформированного состояния породного массива, позволяющего оценить условия применимости расчетных схем определения устойчивости подземных выработок и нагрузки на крепь – по заданной нагрузке и заданной деформации.

6. Предложен и обоснован математическим моделированием и шахтными наблюдениями метод оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности линии контура горной выработки.

7. По схеме с заданной нагрузкой на основании рекомендаций СНиП II-94-80 определены значения критерия устойчивости  $C$  и нагрузки на крепь ствола по условиям Юбилейного месторождения. При этом приведенные выше результаты исследований позволили конкретизировать многие коэффициенты СНиП, что повысило надежность прогноза.

8. На основе разработанной математической модели деформации трещины определены закономерности формирования упругих и реологических характеристик породного массива; выполнены расчеты устойчивости подземных выработок по схеме заданной деформации.

9. Методика прогнозирования устойчивости и разрушения горных пород в подземных выработках, включающая методы анализа лабораторных и скважинных исследований деформационных свойств массива, определения фрактальных характеристик трещин и подземных выработок, передана для использования в организации: Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Уралгипротранс», ООО «Научно-производственное объединение УГГУ». Теоретические результаты по анализу прочностных, деформационных и реологических свойств горных пород и массивов, оценке устойчивости пород в выработке используются при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсам: «Геомеханика», «Исследование процессов подземного строительства», «Физика горных пород».

## Опубликованные работы по теме диссертации.

### *Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией:*

1. *Латышев О. Г., Соколов В. В., Матвеев А. А.* Оценка коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности контура горной выработки // Изв. вузов. Горный журнал. - 2009. - №3. – С. 47-52.
2. *Латышев О.Г., Сынбулатов В.В., Матвеев А.А.* Анализ деформационных характеристик трещиноватого массива при строительстве Екатеринбургского метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. Вып. 6. – М.: Горная книга, 2010. – С. 97-103.
3. Прогноз деформационных характеристик трещиноватых горных пород и массивов / *Латышев О. Г., Матвеев А. А., Мартюшов К. С., Еремизин А. Н.* // Изв. вузов. Горный журнал. - 2011. –№ 7. – С. 92-97.
4. *Матвеев А. А.* Исследование параметров трещинной структуры горных пород и породных массивов // Изв. вузов. Горный журнал. - 2012. – № 2. – С. 64-67.

### *Статьи, опубликованные в других изданиях:*

5. *Латышев О.Г., Соколов В.В., Матвеев А.А.* Анализ паспорта прочности скальных горных пород // Проблемы недропользования: материалы III Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 10 – 13 февраля 2009 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. – С. 287-296.
6. *Латышев О.Г., Соколов В.В., Матвеев А.А.* Оценка структурного ослабления горных пород в массиве // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – С. 279-285.
7. Оценка деформационных характеристик породного массива для прогноза устойчивости горных выработок / *Латышев О.Г., Матвеев А.А., Сынбулатов В.В., Строев Ю.М.* // Труды III Международной конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений», 19-21 мая 2010 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: УГГУ, 2010. –С. 223-228.

Подписано в печать  
Бумага писчая.  
Печ. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ

Формат 60x84 1/16  
Печать на ризографе

Издательство Уральского государственного горного университета  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30  
Отпечатано с оригинал-макета в лаборатории множительной техники УГГУ