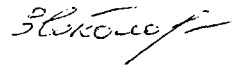


На правах рукописи



СОКОЛОВ Василий Владимирович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
ГОРНЫХ ПОРОД ПО ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ЛИНИИ
КОНТУРА ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК**

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

Научный руководитель –	доктор технических наук, профессор Латышев Олег Георгиевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Зотев Олег Вадимович кандидат технических наук, Аксенов Анатолий Аркадьевич
Ведущая организация –	ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится 17 июня 2010 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.280.02 при Уральском государственном горном университете по адресу : 620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Уральского государственного горного университета

Автореферат диссертации разослан «16» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.К. Багазеев

2010А
16248

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Важнейшей задачей проектирования разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом является обеспечение устойчивости горных выработок. Решению данной задачи посвящены многочисленные научные исследования, основные результаты которых нашли отражение в Строительных нормах и правилах (СНиП). Однако, по общему признанию, единой работоспособной теории устойчивости пород в выработках до настоящего времени не создано, что обусловлено неисчерпаемым многообразием как инженерно-геологических особенностей породных массивов, так и технологии строительства подземных выработок. Рекомендации СНиП носят лишь самый общий характер, и в них прямо указывается на необходимость дополнительных исследований факторов, определяющих устойчивость пород в выработке.

Критерии устойчивости горных пород основаны, как правило, на сопоставлении прочности породного массива и напряжений на контуре выработки. Для обоснованного использования результатов лабораторного изучения прочностных характеристик пород необходимо учитывать влияние влажности, горного давления, масштабного эффекта и трещиноватости породного массива на его прочность. Величина действующих напряжений определяется их концентрацией на контуре горной выработки. Действие данных факторов имеет вероятностную природу, что необходимо учитывать при оценке устойчивости горных пород в выработке.

Таким образом, тема представленной диссертации, направленной на изучение указанных вопросов, является актуальной.

Работа выполнена в рамках исследований по следующей тематике: «Изучение последствий и теоретические основы прогноза изменения геологической среды при подземных техногенных воздействиях» (задание Федерального агентства по образованию 1.13.05, 2005-2007 гг.); «Исследование физико-механических свойств скальных грунтов на шахтах «Северная вентиляционная», «Южная вентиляционная», «Скиповая», «Клетевая» подземного рудника Юбилейного месторождения» (хоздоговорная НИР № 36-214-07).

Объект исследований – горные породы и породные массивы месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых подземным способом.

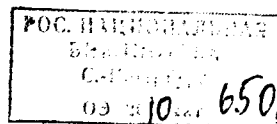
Предмет исследований – закономерности изменчивости прочности и устойчивости горных пород в подземных выработках.

Цель работы – повышение оперативности и достоверности прогноза устойчивости горных пород в подземных выработках.

Основная идея работы заключается в использовании паспорта прочности как меры нарушения прочности пород и фрактальной размерности линии контура горных выработок для оценки устойчивости горных пород.

Задачи исследований:

1. Исследование комплекса свойств и трещиноватости горных пород Юбилейного месторождения.



2. Анализ паспорта прочности как характеристики нарушенности горных пород.

3. Изучение влияния горного давления, влажности, масштабного эффекта и трещиноватости горных пород на прочность породных массивов.

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

5. Совершенствование методики прогнозирования устойчивости горных пород в выработке с вероятностных позиций.

Методы исследований: современные стандартные методики лабораторного определения свойств горных пород; оценка результатов с позиций математической статистики и теории вероятностей; аналитические исследования закономерностей разрушения пород в выработке на основе классических представлений физики горных пород, геомеханики и фрактальной геометрии.

Защищаемые научные положения:

1. Положение касательной к огибающей предельных кругов напряжений Мора с абсциссой равной 70 % от прочности при сжатии служит характеристикой изменения нарушенности пород под нагрузкой и определяет параметры паспорта прочности, соответствующие непосредственно измеряемым величинам сцепления и угла внутреннего трения горных пород.

2. Прочностные характеристики породного массива определяются паспортом прочности, метод построения которого основывается на комплексной оценке влияния влажности, горного давления, масштабного эффекта и трещиноватости пород на их свойства.

3. Фрактальная размерность линии контура горной выработки достоверно описывает степень его технологических неровностей и в этом качестве служит надежной оценкой коэффициента концентрации напряжений.

4. Методика прогнозирования устойчивости горных пород в выработке, основанная на комплексном учете влияния физических полей, масштабного эффекта и трещиноватости породного массива на его прочность, позволяет оценивать вероятность разрушения пород при коэффициенте концентрации напряжений, определяемом фрактальной размерностью линии контура выработки.

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 характеристик горных пород и масштабного эффекта; использованием результатов шахтных наблюдений по оценке неровностей контура горных выработок и коэффициента концентрации напряжений.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

- Разработана процедура анализа паспортов прочности, отличающаяся тем, что в качестве меры нарушенности горных пород при изменении нагруз-

ки используется уравнение касательной к огибающей предельных кругов напряжений в точке с абсциссой $0,7 \sigma_{сж}$.

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

- Впервые предложен и обоснован метод оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности линии контура горной выработки.

Практическая значимость работы заключается в обосновании методов и компьютерных программ анализа паспорта прочности, позволяющих определить значения сцепления и угла внутреннего трения, соответствующих результатам их непосредственного измерения и учитывающих влияние горного давления, влажности, масштабного эффекта и трещиноватости пород; в разработке метода определения коэффициента концентрации напряжений на контуре горной выработки по его фрактальной размерности; в разработке методики прогнозирования устойчивости горных пород в выработке, позволяющей с вероятностных позиций оценить соотношение прочности породного массива и действующих напряжений.

Личный вклад состоит в непосредственном участии автора в лабораторных исследованиях свойств пород Юбилейного месторождения, в интерпретации шахтных наблюдений для оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальным характеристикам линии контура горных выработок, в постановке и проведении опытных и аналитических исследований влияния различных факторов на прочностные характеристики горных пород, в получении основных выводов и результатов работы.

Реализация результатов работы. Методика прогнозирования устойчивости и разрушения горных пород в подземных выработках, включающая методы анализа паспортов прочности и оценки коэффициента концентрации напряжений на контуре горной выработки, переданы для использования в организации: Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Уралгипротранс», ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет», ООО «Научно-производственное объединение УГТУ».

Теоретические результаты по анализу паспортов прочности горных пород, масштабному эффекту и вероятностной оценке устойчивости пород в выработке используются при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсам: «Геомеханика», «Исследование процессов подземного строительства», «Физика горных пород». Автор непосредственно участвует в проведении данных занятий и в их методическом обеспечении.

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 при-

менения природного камня» - г. Магнитогорск, МГТУ, 2010 г.; на ежегодных молодежных научно-практических конференциях Уральского государственного горного университета – Екатеринбург (2008-2010 гг.).

Публикации.

Основные положения диссертации опубликованы в 10 научных работах. Из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Объем и структура работы.

Объем диссертации составляет 138 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков и 18 таблиц. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 112 наименований и приложений.

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

В главе 2 приводятся результаты изучения свойств горных пород Юбилейного медноколчеданного месторождения, их статистический анализ и классификация; на основе изучения влияния трещиноватости на свойства пород обосновывается метод анализа и построения паспорта прочности пород.

В главе 3 дается анализ влияния на свойства пород горного давления, влажности, масштабного фактора, блочного строения и трещиноватости породного массива; обосновываются рекомендации по оценке коэффициента структурного ослабления горных пород в массиве.

В главе 4 обсуждаются критерии устойчивости горных пород в выработке, обосновывается метод оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальным характеристикам линии контура горной выработки; формулируется методика прогнозирования устойчивости горных пород.

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

Решение вопроса устойчивости горных пород в выработках является неотъемлемой частью проектирования строительства шахт и подземной разработки месторождений полезных ископаемых. Рекомендации в этой части Строительных норм и правил (СНиП) основаны на многочисленных исследованиях (И. В. Баклашов, Н. С. Булычев, В. Т. Глушко, Б. А. Картозия, Ю. М. Либерман, Г. Г. Литвинский, И. М. Петухов, М. М. Протодьяконов, А. Г. Протосеня, К. В. Руппeneйт, А. Н. Ставрогин, И. А. Турчанинов, П. М. Цимбаревич, А. Н. Шашенко и др.) и являются регламентирующим документом для проектирования. Анализ состояния вопроса позволяет заключить, что при всем многообразии подходов к решению проблемы общепризнанным критерием устойчивости является допустимое соотношение прочности породного массива и действующих напряжений.

Представленные в работе результаты базируются на обширной базе данных кафедры шахтного строительства УГТУ по свойствам горных пород и инженерно-геологическим условиям различных месторождений Урала, а также на собственных исследованиях автора по изучению свойств и состояния пород Юбилейного месторождения.

Для получения обобщенных выводов разработана процедура и выполнена классификация изученных пород Юбилейного месторождения (более 100 литотипов) на основе анализа законов распределения характеристик пород и использования инструментов дисперсионного анализа и статистической проверки гипотез. Выполнен тренд-анализ распределения свойств горных пород по глубине их залегания.

Комплексной характеристикой разрушаемости скальных пород служит их паспорт прочности, представляющий собой нелинейную огибающую предельных кругов напряжений Мора. Положение огибающей определяет такие важные для проектирования параметры, как сцепление и угол внутреннего трения горных пород. Анализ применяемых в настоящее время уравнений огибающей, основанных на экспериментально измеренных значениях прочности пород при растяжении σ_p и сжатии $\sigma_{сж}$, показывает, что они дают явно завышенные значения угла внутреннего трения φ . Так, широко используемое уравнение гиперболы $\tau = \tau_{\max}[(\sigma_{сж} + \sigma)/((\sigma_{сж} + \sigma)^2 + a^2)]^{3/8}$ (М. М. Протодьяконов), при $\sigma_{сж}/\sigma_p > 3$ (а это справедливо практически для всех скальных пород) дает угол φ всегда больше 45 градусов. Если воспринимать коэффициент трения пород как $f_{тр} = \operatorname{tg} \varphi$, то углы $\varphi > 45^\circ$ вообще недопустимы, поскольку при этом $f_{тр} > 1$.

В этой связи представляется плодотворной концепция Г. Г. Литвинского, названная им «аналитической (дифференциальной) теорией прочности». Она основывается на гипотезе о том, что разрушение сдвигом определяется наличием двух видов трения – сухого и когезионного (жидкостного). Аналитическое представление огибающей в этом случае описывается уравнением:

$$\tau = \tau_0 (\sigma/\sigma_0 + 1)^a, \quad (1)$$

где $\tau_0 = \sigma_0 f$ – сцепление, которое интерпретируется автором как произведение когезии разрыва σ_0 (т. е. удельной силы взаимодействия атомов горной породы), на коэффициент трения $f = \operatorname{tg} \varphi_c$ (где φ_c – угол внутреннего трения при сжатии). Показатель степени a ($0 < a < 1$), названный коэффициентом хрупкости, характеризует долю сухого трения. При $a = 0$ сухое трение полностью отсутствует и материал идеально пластичен; при $a = 1$ трение полностью сухое и наблюдается идеально хрупкое разрушение. Предлагаемая методика построения паспорта прочности опирается на априори известное значение угла внутреннего трения φ_c горной породы. Однако величина φ_c достаточно изменчива и нуждается в непосредственном определении для конкретной породы.

Анализ теории и многочисленных экспериментальных данных позволяет нам сформулировать следующий подход. По сути вышеуказанной концепции показатель φ_c , который назван углом внутреннего трения при сжатии,

должен определяться в точке огибающей, соответствующей некоторому сжимающему усилию. В общем виде уравнение огибающей можно представить в виде: $\tau = [K(\sigma_p + \sigma)]^{1/2}$, где показатель формы кривой в соответствии с уравнением Рихтера $K = 2\sigma_p - 2[\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})]^{1/2} + \sigma_{сж}$. Уравнение касательной к огибающей в точке с абсциссой $\sigma_i = X$ запишется в виде:

$$\tau = \sqrt{K(\sigma_p + X)} \left[\frac{\sigma - X}{2(\sigma_p + X)} + 1 \right]. \quad (2)$$

Для определения координаты X выполнена серия испытаний пород Юбилейного месторождения на срез со сжатием. Установлено, что экспериментальные значения угла внутреннего трения достаточно точно (в пределах доверительного интервала) соответствуют расчетным значениям $\varphi_0 =$

$$= \text{arctg}(K/2\tau_0) \text{ в точке с абсциссой } \sigma_i = X = 0,7\sigma_{сж}.$$

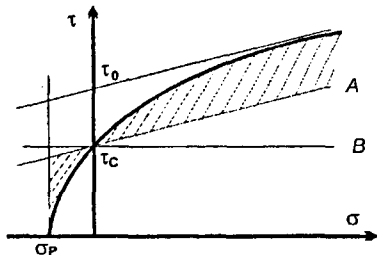


Рис. 1. Огибающая кругов напряжений Мора

Установлено (А. Н. Ставрогин и др.), что для скальных пород при $\sigma > 1/2 \sigma_{сж}$ график нелинейной огибающей практически вырождается в прямую линию, т. е. ее угол наклона остается постоянным. В этой связи выражение (2) при $\sigma_i = X = 0,7\sigma_{сж}$ можно рассматривать как уравнение наклонной асимптоты огибающей предельных кругов напряжений. Ее положение определяет нарушенность горных пород и ее изменение при различных нагрузках. Если перенести асимптоту в точку с ординатой τ_c , то разность ординат огибающей и линии A (заштрихованные участки на рис. 1) будет соответствовать изменению прочности породы за счет смыкания или раскрытия трещин. Действительно, в правой части графика по мере роста сжимающих напряжений происходит все большее закрытие трещин, и в пределе при полностью закрытых трещинах огибающая сливается с асимптотой. В левой части графика, напротив, происходит раскрытие трещин, и при некотором растягивающем напряжении происходит разрушение породы. Это напряжение соответствует прочности при одноосном растяжении σ_p . Разница в ординатах прямых A и B соответствует изменению предельных касательных напряжений за счет сближения (при сжатии) или удаления (при растяжении) атомов в узлах кристаллической решетки. Таким образом, график огибающей кругов напряжений Мора в координатах $[\tau - \sigma]$ можно интерпретировать как характеристику трещиноватости пород в зависимости от величины действующих напряжений.

Параметр α в уравнении паспорта прочности (1) зависит от степени трещиноватости (дефектности) горной породы, которую предлагается (Л. М. Качанов) учитывать показателем сплошности горных пород ψ . Данный показатель ($0 < \psi < 1$) можно трактовать как отношение истинной площади сечения минерального скелета горной породы (т. е. за исключением площади

сечения трещин и пор) S_0 к общей площади образца S . В соответствии с предложенной выше интерпретацией асимптоты огибающей, мерой нарушенности и оценкой параметров α и ψ может служить отношение:

$$k_c = S/S_0 = \tau_0/\tau_c. \quad (3)$$

Опытная величина сцепления τ_c определится точкой пересечения огибающей предельных кругов напряжений с осью ординат. Истинное значение τ_0 как предельной величины прочности на срез при полностью сомкнутых трещинах может быть найдено по асимптоте огибающей (см. рис. 1, уравнение (2)). Корреляционный анализ, выполненный для базальтов Юбилейного месторождения, показал существование надежной зависимости, которую можно описать уравнением:

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

Близкий к единице коэффициент корреляции линеаризованного уравнения связи ($R = 0,997$) позволяет надежно использовать данную зависимость при анализе и построении паспортов прочности горных пород.

Таким образом, *положение касательной к огибающей предельных кругов напряжений Мора с абсциссой $0,7\sigma_{сж}$ служит характеристикой изменения нарушенности пород под нагрузкой и определяет параметры паспорта прочности, соответствующие непосредственно измеряемым величинам сцепления и угла внутреннего трения горных пород.*

Для перехода от прочности в образцах к прочности породного массива необходимо учитывать влияние влажности и горного давления, масштабный фактор и реальное строение массива.

Сжимающие напряжения, обусловленные горным давлением на данной глубине разработки, приводят к смыканию трещин и пор, увеличивая сплошность породы. Количественно этот эффект можно оценить по изменению разности ординат между огибающей предельных кругов напряжений и ее асимптотой (см. рис. 1). При отсутствии горного давления ($\sigma = 0$) мера трещиноватости породы определится отношением $k_{c(0)} = \tau_0/\tau_c$. При напряжениях σ_i , соответствующих горному давлению на данной глубине, это отношение, т. е. мера трещиноватости, снизится до величины $k_{c(\sigma)} = \tau_{0(\sigma)}/\tau_{c(\sigma)}$, где $\tau_{0(\sigma)}$ и $\tau_{c(\sigma)}$ определятся по уравнениям огибающей и касательной при $\sigma = \sigma_i$. Тогда коэффициент хрупкости α в соответствии с уравнением (4) определится соотношением: $\alpha(\sigma) = 0,63 + 0,16 \ln (1/k_{c(\sigma)})$. Для построения нового паспорта прочности используем уравнение (1) в виде: $\tau = \tau_{0(\sigma)} (\sigma/\sigma_{0(\sigma)} + 1)^{\alpha(\sigma)}$, где параметры уравнения определятся как: $\tau_{0(\sigma)} = \tau_0 (k_{c(0)}/k_{c(\sigma)})$ и $\sigma_{0(\sigma)} = \sigma_p (k_{c(0)}/k_{c(\sigma)})$.

Для реализации данного подхода разработана компьютерная программа, позволяющая производить построение паспортов прочности пород с учетом глубины их залегания. Например, для хлорит-кварцевой породы установленные прочностные характеристики образцов составляют: $\sigma_p = 10,6$ МПа; $\sigma_{сж} = 76,6$ МПа; $\tau_c = 19,3$ МПа; $\varphi = 30,6$ град. Коэффициент хрупкости имеет значение $\alpha = 0,527$, мера трещиноватости $k_{c(0)} = 1,43$. При глубине залегания данной породы (370 – 380 м) и действующем давлении $\sigma = 8$ МПа ее величина снизится до $k_{c(\sigma)} = 1,19$. В соответствии с уравнением (4) коэффициент хрупкости напряженной породы $\alpha(\sigma) = 0,602$. Тогда с поправкой на величину

горного давления прочность при растяжении породы увеличится до $\sigma_{p(\sigma)} = 12,8$ МПа, при сжатии $\sigma_{ок(\sigma)} = 80,7$ МПа и величина сцепления $\tau_{c(\sigma)} = 23,2$ МПа.

Степень снижения прочности пород при увлажнении оценивается коэффициентом размокания. Исследование более сотни различных пород Юбилейного месторождения дает самый широкий спектр воздействия увлажнения на прочность – от совершенно не размокаемых пород до таких литотипов, которые самопроизвольно диспергируют в воде без всякой внешней нагрузки. Установлено, что водопоглощение нелинейно возрастает с увеличением общей пористости пород $\Delta W = 0,031 P^{2,4}$. Однако степень снижения прочности пород не зависит напрямую от количества проникшей влаги, а, в первую очередь, определяется минеральным составом горных пород. Наиболее значимым фактором является степень хлоритизации пород. Типичным представителем таких литотипов являются хлорит-кварцевые породы Юбилейного месторождения. На рис. 2 представлен паспорт прочности, где показано совместное влияние горного давления и влажности на прочность данной породы.

Масштабный эффект проявляется в снижении прочности горных пород при увеличении их объема. В классическом представлении уменьшение прочности с увеличением размеров образца обусловлено большей вероятностью присутствия в нем крупного (определяющего) дефекта. Поэтому представляется наиболее приемлемым использовать вероятностно-статистический подход к оценке влияния масштабного эффекта на прочность пород.

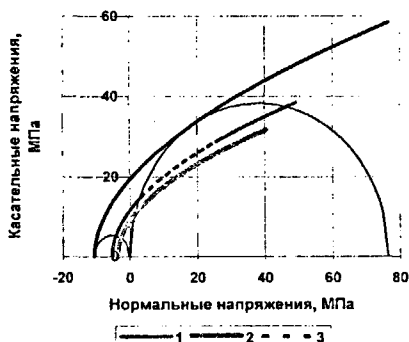


Рис. 2. Паспорта прочности хлорит-кварцевой породы: в исходном состоянии (1), увлажненной (2), с поправкой на горное давление (3).

Как правило, данный подход сводится к статистике экстремальных значений, которая основывается на оценке вероятности разрушения наиболее слабого звена в общей цепи структурных элементов. В. Т. Глушко на основе распределения Вейбулла получено общее выражение масштабного эффекта: $\sigma_V = \sigma_{\min} + \beta/V^{1/k}$. Применительно к оценке

устойчивости обнажений горных пород целесообразно вместо объема V использовать площадь S_0 обнажений. Тогда предыдущее уравнение запишется в виде:

$$\sigma_S = \sigma_{\min} + \beta/S_0^{3/2k}, \quad (5)$$

где σ_{\min} – показатель, характеризующий минимальное статистически вероятное значение частного результата прочности при $S_0 \rightarrow \infty$, соответствующее прочности неограниченного массива; β – параметр масштабного фактора; k – коэффициент однородности горной породы.

Используя вероятностно-статистический подход, а также результаты изучения распределения микротрещин в горных породах (О. Г. Латышев), предлагается оценка асимптоты масштабного эффекта в виде:

$$\sigma_{\min} = \sigma_c [\mu_0 + \beta_0 (-\ln P)^{1/k}], \quad (6)$$

где σ_c – среднее значение прочности образцов; μ_0 и β_0 – нормированные значения параметров распределения прочности; P – принятый уровень надежности. Для проверки применимости данных расчетных формул оценки масштабного эффекта была выполнена серия экспериментов по определению прочности при растяжении пород Юбилейного месторождения различных размеров.

Анализ результатов показал, что полученные теоретическим расчетом результаты достаточно точно соответствуют опытным данным. Точность аппроксимации не ниже естественного разброса данных в единичных определениях прочности пород. Коэффициенты корреляции линеаризованных уравнений масштабного эффекта колеблются от 0,72 до 0,96.

На рис. 3 представлены типичные графики масштабного эффекта для миндалекаменных базальтов (глубина залегания 274,0-275,5 м) и лавобрекчий базальтов (глубина 405,5-407,0 м). Исследование закономерностей распределения величин прочности изученных пород Юбилейного месторождения позволило получить усредненные параметры уравнения (6), которые представлены в таблице.

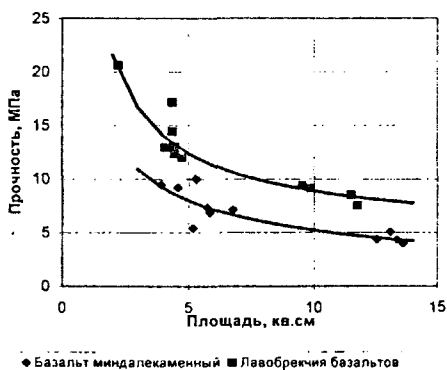


Рис. 3. Графики масштабного эффекта

Параметры масштабного эффекта горных пород

Горные породы	μ_0	β_0	k	λ (при $P = 0,95$)
Базальты	0,09	0,98	2,62	0,40
Дациты	-0,22	0,96	3,76	0,22
Матасоматиты	0,018	1,07	2,47	0,34

В соответствии с рекомендациями СНиП, коэффициент структурного ослабления массива макротрещинами $k_{стр}$ предлагается оценивать модулем трещиноватости J_r . Анализ результатов исследований Института горного дела УрО РАН различных месторождений Урала и Казахстана позволил установить зависимость этих величин: $k_{стр} = 1,08 J_r^{-0,94}$. Однако в силу большого разброса данных, обусловленного специфическими условиями различных месторождений, это уравнение можно использовать лишь как ориентировоч-

ную оценку. Более точный прогноз возможен на основе исследований конкретных горных пород и месторождений.

Для оценки влияния природной трещиноватости на прочность массива А. Н. Шашенко предложена следующая модель. Породный массив рассматривается как система плотно прилегающих друг к другу микроблоков, имеющих размеры и форму образцов, которые используются в стандартных испытаниях прочности. Те микроблоки, через которые проходит природная трещина массива, заведомо в лабораторных испытаниях не представлены и имеют нулевую прочность. Однако они содержатся в массиве и, следовательно, формируют генеральную совокупность. Тогда при организации классической выборки в статистике испытаний появятся нулевые величины. Это изменит величину дисперсии (коэффициента вариации) результатов, что и отразит влияние природной трещиноватости массива на его прочность. Вероятностный анализ данной модели позволил ему получить выражение коэффициента вариации прочности:

$$v = \sqrt{\frac{l_m + l_0}{l_m} (v_0^2 + 1)} - 1, \quad (7)$$

где l_0 и v_0 – размер образцов и коэффициент вариации определения их прочности; l_m – среднее расстояние между трещинами отдельности массива.

Данный совокупный коэффициент вариации v отражает как неоднородность массива, обусловленную микротрещиноватостью пород, так и его ослабление системами макротрещин, т. е. совместное влияние масштабного фактора и реального строения массива. На основе изложенной выше процедуры анализа паспорта прочности пород и уравнениях (5, 6) нами получено выражение коэффициента структурного ослабления в виде:

$$k_{стр} = \sigma_{мин} / \sigma_c = [1 - C(K) \cdot v + B(K) \cdot v \cdot (-\ln P)^{1/k}], \quad (8)$$

где $C(K)$ и $B(K)$ – характеристики распределения прочности горных пород: $1 - C(K) \cdot v = \mu_0$; $B(K) \cdot v = \beta_0$. Величины K , $B(K)$ и $C(K)$ определяются асимметрией распределения прочности и вычисляются методом моментов (методика В. Т. Глушко).

Адекватность данного уравнения подтверждается экспериментальными данными. Однако его использование требует достоверного установления закона распределения прочности для конкретной породы, что связано с необходимостью большого числа испытаний. Упрощение процедуры возможно следующим образом. Исследованиями ИГД УрО РАН (Ю. П. Шуплецов) установлено, что наиболее адекватной оценкой коэффициента структурного ослабления массива, учитывающей как трещиноватость, так и масштабный эффект, может служить уравнение:

$$k_{стр} = \frac{a + b (1 - V_0)}{c (0,2J_T + 1)}, \quad (9)$$

где a , b , c – эмпирические коэффициенты; V_0 – рассматривается здесь как непосредственный коэффициент вариации прочности, полученный в лабораторных исследованиях образцов. Сопоставление данного выражения с ре-

зультатами расчетов коэффициента структурного ослабления по формуле (8) на основе анализа законов распределения прочности изученных горных пород Юбилейного месторождения позволило получить следующие значения коэффициентов: $a = 0,7$; $b = 0,8$; $c = 1,25$.

Таким образом, *прочностные характеристики породного массива определяются паспортом прочности, метод построения которого основывается на комплексной оценке влияния влажности, горного давления, масштабного эффекта и трещиноватости пород на их свойства.*

Обобщенным критерием устойчивости выработок является превышение прочности горных пород над действующими напряжениями. На стадии проектирования величина напряжений принимается как гидростатическое давление γH с учетом коэффициента концентрации напряжений K_σ на контуре горной выработки: $\sigma = K_\sigma \gamma H$. Наиболее распространенная методика оценки величины K_σ 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 ($\Sigma C_\sigma = 0$). С учетом вероятностной природы отклонений контура выработки от проектного коэффициент концентрации напряжений вычисляется по формуле:

$$K_\sigma = \sigma_0 / \gamma H = 2[1 + q(P) 2\pi m D^{1/2}], \quad (10)$$

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_σ , 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 (10), величина коэффициента концентрации напряжений определяется двумя характеристиками – дисперсией отклонений D и общим числом пересечения профилем выработки ее проектного (конформного) контура $N = 2\pi m$. Эти показатели косвенно характеризуют степень изломанности линии контура выработки. В настоящее время существует возможность прямой количественной оценки неровностей контура, основанная на определении его фрактальной размерности. Основное положение фрактальной геометрии (Б. Мандельброт) состоит в том, что если бесконечно изломанные и, следовательно, нигде не дифференцируемые кривые инвариантны к масштабным преобразованиям, т. е. самоподобны, то они обладают дробной размерностью, строго большей топологической размерности. Величина этой фрактальной размерности (размерности Ф. Хаусдорфа) характеризует степень изломанности кривой. Доказано, что такие кривые, как береговые линии, рельеф местности, очертания облаков, являются фрактальными объектами. К этому же классу объектов, очевидно, относятся линии контура горных выработок. Следовательно, их фрактальная размерность d_f может служить количественной мерой технологических неровностей контура

и в этом качестве – оценкой величины коэффициента концентрации напряжений на горной выработке.

Коэффициент концентрации напряжений в выражении (10) при постоянном уровне надежности $q(P)$ однозначно определяется числом точек пересечения m и дисперсией отклонений D . Фрактальная размерность, характеризующая степень изломанности линии, должна надежно оценивать и вышеуказанные показатели. Для проверки этого была разработана компьютерная программа (имитационная модель) генерации контура горной выработки, основанная на теории итерационных функций и ее случайных реализациях. На вход программы задаются проектные параметры сечения выработки. При различных величинах дисперсии отклонения линии контура от проектного сечения в каждой реализации программы вычисляются координаты точек контура, фактическая дисперсия, фрактальная размерность линии контура, число точек пересечения m , коэффициент концентрации напряжений по формуле (10).

При пяти различных уровнях заданной дисперсии ($S = 3, 5, 8, 10, 15 \text{ м}^2$) получено достаточное для надежной статистической оценки параметров число реализаций контура выработки (не менее 100 на каждом уровне дисперсии). Полученная фрактальная размерность сопоставлялась с определяющими переменными уравнения (10) – $m D^{1/2}$. Корреляционный анализ данных показал, что фрактальная размерность практически точно соответствует данным характеристикам выработок. Полученное уравнение связи:

$$d_f = 0,42 \ln(mD^{1/2}) \quad (11)$$

характеризуется коэффициентом достоверности аппроксимации, близким к единице ($R^2 = 0,985$). Причем наличие нелинейной (логарифмической) зависимости совершенно понятно, поскольку d_f как показатель размерности находится в степени числа.

В соответствии с полученными результатами, коэффициент концентрации напряжений можно оценивать по фрактальной размерности линии контура горной выработки. В расчетную формулу должен входить эквивалентный радиус выработки R_* , который в уравнении (10) в неявном виде учитывается показателями m и D . Для учета вероятностного характера реализации конкретного контура выработки также необходимо вводить требуемый уровень надежности $q(P)$. Однако в уравнении (10) его величина умножается на дисперсию, а в предлагаемом варианте он возводится в степень d_f , поэтому для его корректировки следует вводить поправочный множитель β , который можно в более широком контексте представить как коэффициент условий проходки выработки. С учетом всего этого уравнение оценки коэффициента концентрации напряжений можно представить в следующем виде:

$$K_\sigma = 1 + [\beta q(P) R_*]^{d_f - 1} \quad (12)$$

Для проверки применимости (адекватности) данного уравнения использованы результаты реальных обмеров горных выработок СУБРа, выполненные на кафедре шахтного строительства УГТУ при исследовании и совершенствовании контурного взрывания. По результатам шахтных замеров произведено вычисление коэффициентов концентрации напряжений по клас-

сической формуле (10) и по предлагаемому уравнению (12), основанному на определении фрактальной размерности линии контура выработки. Результаты сравнения и анализа показали следующее (рис. 4). Фрактальная размерность d_f достаточно точно соответствует коэффициенту концентрации напряжений K_σ на контуре горных выработок. На рис. 4 точками отмечены значения K_σ , вычисленные традиционным способом по формуле (10); линия соответствует уравнению (12) при $q(0,95) = 1,96$, и $\beta = 0,8$. Коэффициент вариации составил 1,6 %. Необходимо отметить следующее. Обмеры контура производились при проходке выработки по традиционной технологии (сечение 1) и при контурном взрывании по усовершенствованному паспорту БВР (сечение 2). В итоге было отмечено, что переборы в среднем снизились до 16,8 %, контур выработки стал более гладким. График наглядно иллюстрирует эффективность предложенных мероприятий по совершенствованию контурного взрывания – в среднем фрактальная размерность контура выработки d_f снизилась с 1,68 до 1,49, коэффициент концентрации напряжений – с 3,08 до 2,70.

Предлагаемая методика оценки коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности контура выработки дает результаты, соответствующие общепринятому способу расчета (уравнение 10), 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.

Таким образом, *фрактальная размерность линии контура горной выработки достоверно описывает степень его технологических неровностей и в этом качестве служит надежной оценкой коэффициента концентрации напряжений.*

Представленные результаты создают необходимую базу для прогнозирования устойчивости горных пород в выработках. То есть имеется основа для оценки как напряженного состояния на контуре горной выработки, так и прочности породного массива. При этом необходимо учитывать, что и тот, и другой показатели имеют вероятностную природу, поскольку зависят от множества случайных независимых факторов.

Для учета этого следует определять вероятность разрушения пород на контуре горной выработки, методика оценки которой достаточно отработана

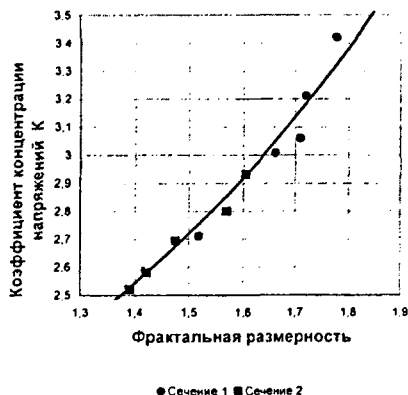


Рис. 4. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от фрактальной размерности линии контура горной выработки

и основана на вычислении коэффициента запаса прочности (резерв прочности) и характеристике безопасности (А. Р. Ржаницин):

$$\Delta = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 v_m^2 + v_b^2}}, \quad (13)$$

где $n = \sigma_m / \sigma_b$ – коэффициент запаса прочности; σ_m и σ_b – прочность массива и напряжения на контуре выработки; v_m и v_b – соответствующие коэффициенты вариации прочности и напряжения.

Данные показатели учитывают вероятностные законы распределения свойств горных пород и напряженного состояния массива. Однако если для свойств горных пород нашими исследованиями такая информация получена, то для НДС массива на стадии проектирования ее нет. В этом случае обычно используют два подхода. Первый – напряжения считаются неизменными с нулевым коэффициентом вариации. Тогда формула (13) преобразуется к виду: $\Delta_1 = (n-1) / v_m$. Второй подход – вариация напряжений принимается равной изменчивости прочности пород и $\Delta_2 = (n-1) / [v_m (n^2 + 1)^{1/2}]$. Нами предлагается использовать оба подхода как предельные случаи. Тогда разницу между Δ_1 и Δ_2 можно рассматривать как доверительный интервал характеристики безопасности горной выработки.

На основании всех выполненных исследований разработаны методика и компьютерная программа прогноза устойчивости горных пород в выработке. Алгоритм прогнозирования можно представить следующим образом. На основании результатов скважинного каротажа определяют интервалы глубин с одинаковым модулем трещиноватости (средним расстоянием между трещинами), выделяют зоны тектонических нарушений (зоны дробления) и водоносные горизонты. Каждому интервалу сопоставляется горная порода с известным комплексом ее свойств.

На каждом интервале по вышеприведенным процедурам определяют прочность горных пород с учетом влияния влажности, горного давления, масштабного фактора и трещиноватости породного массива. Рассчитывают напряжения на контуре горной выработки с учетом глубины заложения и коэффициента концентрации напряжений. Определяют коэффициент запаса прочности, функцию безопасности и вероятность разрушения.

По полученным данным строится прогнозная диаграмма устойчивости выработок по глубине залегания пород.

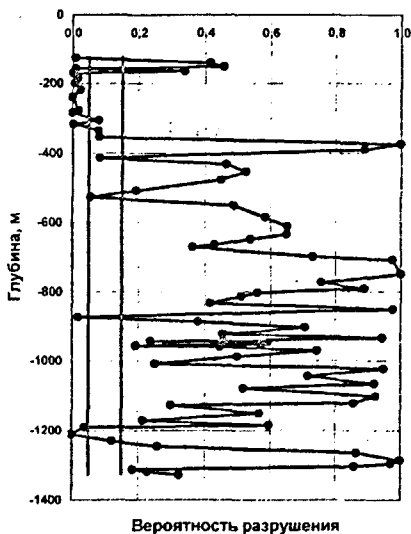


Рис. 5. Диаграмма устойчивости горных пород по скважине I С Юбилейного месторождения

Реализация данного алгоритма в компьютерной программе позволила получить прогнозные диаграммы по всем разведочным скважинам. На рис. 5 представлена такая диаграмма по скважине 1С. Здесь вертикальными линиями отмечены уровни надежности 95 и 85 %. Таким образом, *методика прогнозирования устойчивости горных пород в выработке, основанная на комплексном учете влияния физических полей, масштабного эффекта и трещиноватости породного массива на его прочность, позволяет оценивать вероятность разрушения пород при коэффициенте концентрации напряжений, определяемом фрактальной размерностью линии контура выработки.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано решение научно-практической задачи прогнозирования прочности горных пород с учетом нарушенности массива по характеристикам паспорта прочности и коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности контура выработки, имеющей существенное значение для оценки устойчивости подземных горных выработок.

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

1. Выполнена классификация горных пород Юбилейного месторождения по закономерностям распределения их свойств.

2. Обоснован метод и разработана компьютерная процедура анализа паспорта прочности горных пород, где касательная к огибающей предельных кругов напряжений определяет закономерности изменения трещиноватости горных пород под нагрузкой. Мерой нарушенности пород служит отношение величины сцепления при полностью закрытых трещинах и в исходном состоянии, определенной в эксперименте. Угол внутреннего трения пород, соответствующий непосредственным измерениям, определяется при напряжениях, равных $0,7 \sigma_{сж}$.

3. Установленные закономерности изменения прочностных характеристик пород под действием горного давления и увлажнения выражаются соответствующими соотношениями, которые используются в методе построения паспорта прочности породного массива.

4. Разработан метод оценки совместного действия масштабного фактора и ослабления массива трещинами, использующий соотношения, полученные на основе статистики экстремальных значений. Критерием масштабного эффекта является коэффициент вариации экспериментальных измерений прочности. Реальное строение массива оценивается модулем трещиноватости. Использование полученных расчетных формул позволяет определять коэффициент структурного ослабления породного массива.

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

6. Совокупность полученных результатов позволила обосновать методику прогноза прочности и устойчивости горных пород в выработке, включающую алгоритм и компьютерную программу прогнозирования. На основании этой методики оценивается вероятность разрушения пород в выработке и осуществляется построение прогнозных диаграмм.

7. Методика прогнозирования устойчивости и разрушения горных пород в подземных выработках, включающая методы анализа паспортов прочности и оценки коэффициента концентрации напряжений на контуре горной выработки, передана для использования в организации: Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Уралгипротранс», ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет», ООО «Научно-производственное объединение УГТУ». Результаты исследований используются в учебном процессе.

Опубликованные работы по теме диссертации.

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. **Латышев О.Г., Соколов В.В., Матвеев А.А.** Оценка коэффициента концентрации напряжений по фрактальной размерности контура горной выработки // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2009. №3. С. 47-52.

2. **Соколов В.В.** Оценка масштабного эффекта при прогнозе устойчивости пород в подземной выработке // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2009. №8. С. 84-87.

3. Прогноз устойчивости вертикальных горных выработок по материалам инженерно-геологических изысканий / **Гуман О.М., Латышев О.Г., Ворожеев А.В., Соколов В.В.** // Геориск. 2009. №4. С. 46-49.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

4. **Сынбулатов В.В., Соколов В.В., Карасев К.А.** Прогнозирование влияния горного давления на свойства и состояние горных пород // Проблемы недропользования: материалы III Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 10 – 13 февраля 2009 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. С. 364-369.

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. **Соколов В.В.** Влияние влажности на свойства и состояние горных пород // Известия УГТУ: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, 24 – 29 апреля, 2009 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург: УГТУ, 2009. С. 140-142.

7. *Соколов В.В., Карасев К.А.* Оценка акустического сопротивления горных пород по паспорту прочности // Известия УГГУ: материалы Уральской горнопромышленной декады, 14–23 апреля, 2008 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург: УГГУ, 2008. С. 108.

8. *Соколов В.В., Карасев К.А., Каинов Р.Г.* Использование паспортов прочности для оценки степени нарушенности горных пород // Известия УГГУ: материалы Уральской горнопромышленной декады, 14–23 апреля, 2008 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург: УГГУ, 2008. С. 112-113.

9. *Латышев О.Г. Соколов В. В. Матвеев А.А.* Оценка структурного ослабления горных пород в массиве // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. трудов МГТУ им. Носова. Магнитогорск, 2010. С. 279-284.

10. *Соколов В.В.* Оценка эффективности контурного взрывания по фрактальным характеристикам профиля горной выработки // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. Екатеринбург, 2009. С. 216-221.

Подписано в печать 13.05.2010 г.
Бумага писчая
Печ. Л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 105.

Формат 60x80 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

2010A

16248

10 - 16248