



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Б. К. Норель, Ю. В. Петров, Н. С. Селютина

Энергетические и временные характеристики *предельного состояния горных пород*



УДК 539.424

ББК 22.251

Н82

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Атрошенко (ИПМаш РАН);

д-р физ.-мат наук А. А. Груздков (С.-Петербург. гос. технолог. ин-т (техн. ун-т))

Авторы: Б. К. Норель (гл. 1–3), Ю. В. Петров (гл. 4–6), Н. С. Селютина (гл. 4–6)

*Рекомендовано к публикации Научной комиссией
в области математики и механики
Санкт-Петербургского государственного университета*

Норель Б. К., Петров Ю. В., Селютина Н. С.

**Н82 Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород, 2 изд. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2019. — 132 с.
ISBN 978-5-288-05918-6**

Первое издание вышло в 2018 г. при финансовой поддержке РФФИ. В монографии рассмотрены критерии прочности горных пород, испытывающих действие статического и динамического нагружения, в том числе с учетом различных видов объемных напряженных состояний. Предложен метод использования установок трехосного сжатия при выполнении необходимого комплекса механических испытаний образцов пород для определения параметров критериев квазистатического разрушения. Он основан на анализе результатов, полученных путем математического моделирования механического состояния горных пород в массиве. Также представлен активно разрабатываемый в последние годы структурно-временной подход, применяемый для прогноза динамической прочности горных пород в широком диапазоне скоростей деформации, основанный на понятии инкубационного времени. Расчет временных зависимостей динамической прочности с соответствующей оценкой инкубационного времени разрушения горных пород позволяет объяснить природу многих принципиальных эффектов динамического разрушения пород. Хорошее соответствие результатов расчета с экспериментальными данными и удобная расчетная схема показывают высокую эффективность предложенного подхода.

Издание предназначено научным и инженерно-техническим работникам горнодобывающей промышленности, а также широкому кругу специалистов, решающих задачи в области вопросов прочности, разрушения и надежности горных пород и неметаллических твердых тел; может быть рекомендовано в качестве учебного пособия преподавателям и студентам соответствующего направления.

УДК 539.424

ББК 22.251

Научное издание

НОРЕЛЬ Бронислав Константинович, ПЕТРОВ Юрий Викторович, СЕЛЮТИНА Нина Сергеевна
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор А. Б. Иванова Корректор Е. В. Величина Компьютерная верстка Ю. Ю. Тауриной Обложка Е. Р. Куныгин

Подписано в печать 30.10.2018. Формат 70×100 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 10,9.

Плановый тираж 500 экз. (1-й завод 100 экз.). Заказ № .

Издательство Санкт-Петербургского университета. 199004, С.-Петербург, В.О., 6-я линия, 11.

Типография Издательства СПбГУ. 199034, С.-Петербург, Менделеевская линия, д. 5.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

ISBN 978-5-288-05918-6

© Б. К. Норель, Ю. В. Петров, Н. С. Селютина, 2018

Оглавление

Предисловие	5
Глава 1. Обзор аналитических подходов механики горных пород при статическом нагружении.....	7
1.1. Экспериментальные наблюдения разрушения горных пород вблизи выработок	7
1.2. Экспериментально-аналитические методы анализа механического состояния массива в ходе горных работ	15
1.3. Развитие теории механических моделей на основе данных лабораторных экспериментов по трехосному нагружению	17
Глава 2. Анализ изменения деформаций и прочностных характеристик горных пород при действии объемных нагрузок	23
2.1. Механические испытания горных пород.....	23
2.2. Условия проведения испытаний.....	25
2.3. Особенности нагружения деформируемых неоднородных твердых тел и горных пород при различных объемных напряженных состояниях и вблизи горных выработок	29
2.4. Инварианты объемного напряженного состояния равновесной среды как основные характеристики механического состояния деформируемого твердого тела	31
2.5. Инварианты и девиаторы объемного напряженного состояния как механические характеристики соотношений связи между напряжениями и деформациями твердого тела	36
2.6. Механические свойства дополнительного физического параметра μ_σ , характеризующего объемное напряженное состояние горных пород в массиве.....	37
2.7. Результаты механических испытаний образцов горных пород...	39

2.8. Определение двух предельных состояний: обобщенный сдвиг и обобщенное растяжение.....	59
2.9. Паспорт распределения параметров механического состояния горных пород для различных видов объемного напряженного состояния.....	64
Глава 3. Механическая модель анизотропных горных пород	67
3.1. Задача исследования.....	67
3.2. Физические показатели механического состояния горных пород вблизи выработок	69
3.3. Изменение объемных характеристик горных пород при действии объемных нагрузок (согласно теории разрушения твердых тел Надаи).....	71
3.4. Формирование зон различных видов объемных нагрузок горных пород вблизи выработок.....	74
Глава 4. Общая формулировка структурно-временного подхода к расчету прочности горных пород и бетона при их хрупком разрушении из-за высокоскоростного воздействия.....	81
4.1. Расчетная схема прочности в широком диапазоне скоростей деформаций	85
4.2. Примеры.....	87
Глава 5. Динамические эффекты прочности при хрупком разрушении под влиянием гетерогенности структуры.....	91
5.1. Эффект инверсии прочности как следствие скоростной чувствительности материала.....	91
5.2. Доминирующее значение водонасыщенности и влияние воды в целом на динамическую прочность бетона при раскалывании	98
5.3. Прочность армированного бетона под действием динамических нагрузок.....	105
Глава 6. Определение прочности на различных масштабных уровнях. Различие размерного и масштабного эффектов	110
6.1. Определение масштабного уровня разрушения.....	110
6.2. Различия размерного и масштабного эффектов прочности.....	115
6.3. Изменение прочности бетона в зависимости от поперечного сечения образца	117
6.4. Изменение прочности образца горной породы в зависимости от его поперечного сечения	120
Список литературы	124

Предисловие

Чтобы совершенствовать способы ведения подземных и открытых горных работ при добыче полезных ископаемых и создавать строительные конструкции в породном массиве, особенно в сложных горно-геологических условиях, необходимы фундаментальные исследования физических процессов, протекающих при объемном (реальном) нагружении горных пород. К таким процессам относятся динамические и газодинамические явления, вывалы и обрушения пород, провалы и смещения, отрывы (по терминологии горных понятий — отжимы) и пучения, а также другие проявления горного давления и динамических воздействий.

Мы представили в настоящей монографии ряд аналитических исследований (например, [Феннер, 1961; Борисов, 1977; Надаи, 1969; Турчанинов и др., 1977; Freudenthal and Geiringer, 1958]), авторы которых вносят определенные изменения в возможности использования математических зависимостей общей теории напряженного и деформированного состояния в элементе сплошной среды. Однако существующие аналитические подходы совместно с экспериментальными исследованиями не позволяют спрогнозировать большой класс протекающих в массиве процессов, характерная черта которых — значительные деформации и различные виды разрушений в породах кровли и пластах горного массива. Подобные процессы специфичны при формировании газодинамических и динамических ситуаций, при разрушениях пород на сопряжениях различных выработок, при отрывах и т. д.

Развитие теоретических методов направлено на получение новых технологий ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях и на разработку средств борьбы с нежелательными проявлениями горного давления и разрушения породного массива.

Анализ механических процессов в горных породах и горных явлений предусматривает применение современных теорий физики и механики деформируемых сред. Разрабатываемые теории апробируют, используя экспериментальные данные, полученные в лабораторных исследованиях горных пород и при натурных испытаниях в шахтных условиях.

Исследования изменений механического состояния горных пород и массивов позволяют сформировать представления об их прочности. В свою очередь,

широкий набор данных о прочности используется в технических и геофизических расчетах при моделировании строительных конструкций, в том числе связанных с проведением горных работ.

Развитие теорий прочности и механики разрушения позволяет объяснять механические эффекты, наблюдаемые в экспериментах с горными породами, а также прогнозировать начало динамических и газодинамических явлений в породном массиве.

В первых трех главах настоящей монографии мы рассматриваем критерии прочности горных пород при статическом нагружении в условиях различных видов объемного напряженного состояния (обобщенное сжатие, чистый сдвиг, обобщенное растяжение). На основе этих критериев мы предлагаем новую методику аналитического исследования механического состояния и прочности горных пород и массивов. Она учитывает пространственное нагружение на среду в массиве при разрушении и представления энергетического критерия горных пород. В рамках разработанной нами методики были установлены новые параметры и критерии закономерного изменения механического состояния горных пород в массиве вблизи выработок.

Кроме того, мы предлагаем метод использования установок трехосного сжатия, на которых выполняется необходимый комплекс механических испытаний образцов горных пород, а также метод анализа полученных экспериментальных результатов при разработке математических моделей, описывающих механическое состояние горных пород в массиве (далее — механических моделей).

В трех последних главах монографии мы представляем активно разрабатываемый последние годы структурно-временной подход к прогнозированию динамической прочности деформируемых сред (в частности, горных пород) для широкого диапазона скоростей деформации. Он основан на введении специального параметра — инкубационного времени, который рассматривается как свойство материала, определяющее его реакцию на скоростное динамическое воздействие, и может считаться мерой его динамической прочности. Содержащие данный параметр структурно-временные критерии (предельные условия) позволяют интегрально учесть предшествующие макроскопическому разрыву материала релаксационные процессы, в ходе которых развиваются дефекты его структуры на микро- и мезоуровнях.

В качестве иллюстрации нашей теории мы приводим недавние результаты обработки экспериментальных данных для горных пород, полученные при помощи структурно-временного подхода. Моделирование с оценкой инкубационного времени разрушения материала позволяет объяснить ряд принципиально важных динамических явлений, которые становятся следствием структурно-временной природы динамического разрыва пород. Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных для рассмотренных пород, а также удобная схема расчета показывают высокую эффективность разработанного нами структурно-временного подхода.

Глава 1

ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

1.1. Экспериментальные наблюдения разрушения горных пород вблизи выработок

Чтобы обосновать физические положения разрушения горных пород, рассмотрим общие черты деформирования и разрушения пластов и вмещающих пород вблизи выработок, подтвержденные натурными наблюдениями и фотографиями характерных участков обнажений. Особенно интересно выделить различия в этапах механических процессов нагружения, деформирования и разрушения пластов вблизи очистных и подготовительных выработок. О них речь идет в гл. 1 и 2 настоящей монографии.

Отметим, что не только чисто теоретически, но и по многочисленным результатам натурных наблюдений в лавах и подготовительных выработках были установлены зоны опорного давления (зоны влияния выработок) и зоны предельных состояний (зоны частично разрушенных пластов и вмещающих пород) в массиве. При разработке неоднородных и малопрочных пластов также можно наблюдать общие закономерности влияния механических свойств и внешних нагрузок на размеры зон опорного давления. Например, эти закономерности прослеживаются в данных натурных исследований, проведенных с целью установить размеры зон опорного давления и их зависимость от глубины залегания и прочности горных пород, слагающих более чем 30 пологих пластов в шахтах производственных объединений «Донецкуголь», «Макеевуголь» и «Красноармейскуголь» [Пиховкин, 1974]. С увеличением прочности горных пород и глубины залегания и разработки пластов размеры этих зон (в соответствии с общими законами механики сплошных сред) изменяются.

Более тонкие эксперименты позволяют обнаружить и границы зон предельных состояний, на которых реализуются максимальные сжимающие напряжения. Результатами этих экспериментов подтверждаются теоретические расчеты зон предельных состояний в породном массиве при формировании и реализации в нем динамических и газодинамических явлений, проведенные

отечественными и зарубежными учеными [Динник, 1937; Холланд и Томас, 1956; Баренблатт и Христианович, 1955; Авершин, 1963].

Часть исследователей [Eckart, et al., 1966; Баклашов и Картозия, 1975; Христианович и Салганик, 1960; Марков, 1974] принимают положение о разрушении пласта и пород по всей зоне предельных состояний путем сдвига по площадкам скольжения в условиях значительного всестороннего сжатия и поэтому оценивают размеры зон предельных состояний, сравнивая значения максимального касательного напряжения, как компонента матрицы напряжения

$$\tau_{13} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3),$$

и значения $\tau_{\text{макс}}$, выбираемые по паспорту прочности горных пород и углей. Однако в ходе натурных экспериментов и визуальных наблюдений выяснилось [Айзаксон, 1961], что кроме плоскостей скольжения реализуются трещины отрыва, а разность между главными напряжениями не соответствует теоретическим расчетам. Довольно часто отрыв происходит путем выдавливания некоторой части пласта, разделенной плоскостями, параллельными обнажению забоя (особенно на малопрочных пластах полезного ископаемого).

В различных публикациях приведены фотографии реальных трещин в породах массива, форма которых соответствует форме выработок или различных каверн. Характерный пример таких трещин приведен в работе [Айзаксон, 1961]. В ней отмечено, что напряжения вокруг выработки способны совершенно изменить первоначальную слоистость (складчатость) массива. Вторичную слоистость можно часто наблюдать в глубоких рудниках. Так, по данным той же работе [Айзаксон, 1961], в штреке, пересекающем дайку долерита на глубине около 2900 м, совершенно изменилась горная порода, первоначально не имевшая ясно выраженного преимущественного направления кливажа (рис. 1.1). Примечательно, что изгиб поверхности вторичной складчатости точно следует форме поперечного сечения штрека. Конечно, довольно трудно объяснить такую форму складчатости с позиции разрушения пород путем сдвига. Но если предположить, что вблизи выработки реализуется такой вид напряженного состояния, как обобщенное растяжение, то все становится на свои места. Далее мы рассматриваем примеры таких состояний.

Экспериментальные замеры напряжений, результаты которых приведены в работах [Петухов и др., 1968; Марков, 1974], позволяют заключить, что в глубоких рудниках района Талнах (п-ов Таймыр) и вблизи горных выработок на месторождениях Кольского п-ова могут формироваться три различающихся по направлениям главных напряжения:

- два значительных сжимающих напряжения, причем в ряде случаев они примерно равны;
- одно незначительное напряжение, направленное в сторону свободного пространства выработки.

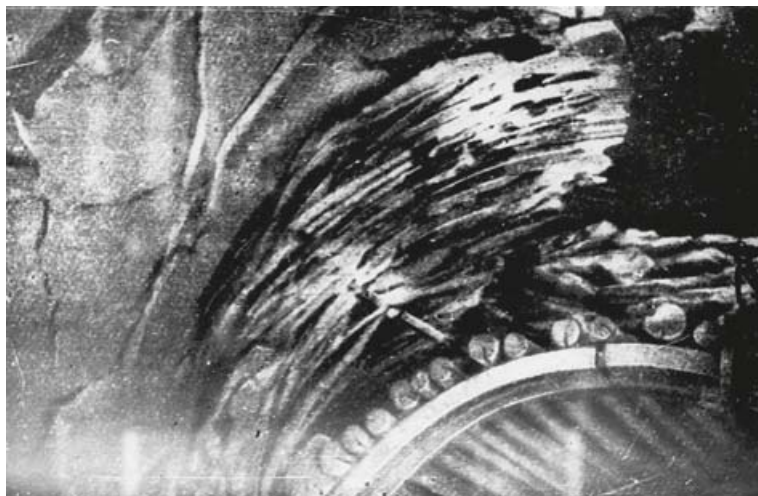


Рис. 1.1. Вторичная складчатость (расслоение, вызванное напряжениями) пород кровли вблизи крепи [Айзаксон, 1961]

Мы предполагаем, что напряженное состояние в этих случаях соответствует обобщенному растяжению, которое оценивается по значению параметра А. Надаи μ_σ , приблизительно равному -1 [Надаи, 1969] (данный параметр подробно рассмотрен в гл. 2). Здесь же отметим, что механическое состояние образцов деформируемых твердых тел и горных пород определяется по результатам испытаний для трех классических видов напряженных состояний, а по классификации Надаи — с формированием трех значений параметра μ_σ , которые соответствуют трем известным напряженным состояниям:

- 1) обобщенному сжатию ($\mu_\sigma = 1$),
- 2) чистому сдвигу ($\mu_\sigma = 0$),
- 3) обобщенному растяжению ($\mu_\sigma = -1$).

Результаты замеров напряжений на опасных по динамическим проявлениям пластах Воркутинского месторождения приведены в работе [Гусельников, 1978]. Напряжения замерялись методами разгрузки и возмущений поля напряжений в охранных целиках, расположенных в угольном массиве, прилегающем к оконтуривающим выемочный столб выработкам. Прочность угля на одноосное сжатие составляла $\sigma_{сж} = 20,3$ МПа, модуль упругости $E = 1,4$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,44$. Глубина залегания участков замеров от поверхности $H = 650 \dots 670$ м. Из полученных Л. М. Гусельниковым экспериментальных данных и результатов вычислений следует, что размер зоны предельных состояний равен примерно 10 м, а вертикальное и горизонтальное напряжения в зоне максимальных сжимающих напряжений различаются. Важным результатом этих исследований представляется тот факт, что осевое

напряжение, характеризующее несущую способность (прочность) угольного пласта на кромке забоя, больше прочности угля на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и намного больше показателя прочности R_p , соответствующего обобщенному растяжению пород. Данные Л. М. Гусельникова не противоречат общей схеме оценки механического состояния пласта.

Существуют также и другие исследования отечественных и зарубежных ученых [Зорин, 1978; Христианович и Салганик, 1960; Eckart, et al., 1966], подтверждающие положение о том, что вблизи горных выработок может реализоваться обобщенное растяжение пород.

Особенно четко прослеживается направление плоскостей разрушения горных пород в массиве после выброса пород и газа [Зорин, 1978], которое параллельно свободной поверхности выработки (рис. 1.2). Например, на фотографии каверны, образовавшейся после выброса горных пород на шахте им. А. А. Скочинского в Донецком бассейне (Донецко-Макеевский район), обращает на себя внимание факт, что плоскости разрушения параллельны плоскости обнажения выработки. Из этого можно заключить, что и в данном случае разрушение пород путем отрыва вблизи свободной поверхности выработки в определенном смысле соответствует обобщенному растяжению ($\mu_\sigma = -1$).



Рис. 1.2. Форма полости при выбросе породы в выработку [Зорин, 1978]

При расчетах механического состояния массива учитываются характерные параметры разрабатываемых малопрочных угольных пластов, насыщенных газом. Например, в работе [Христианович и Салганик, 1960] показано, что одна из наиболее существенных особенностей опасных зон по выбросам — наличие участков, в которых трещины направлены перпендикулярно линии движения забоя.

Характерные формы вторичной складчатости боковых стенок полостей выбросов отмечены на рудниках Германии и Польши. Интересны фотографии систем трещин, возникших в ходе выброса породы после отслоения полости (рис. 1.3–1.5): линии трещин точно следуют форме полостей [Eckart, et al., 1966]. Определенная система трещин, параллельных контуру полости, прослеживается и на других выработках. Подобная форма слоистости зафиксирована на участке месторождения меднистых сланцев «Мансфельд» (рис. 1.4). Четкая слоистость горных пород прослеживается в сильно нагруженном целике одного из калийных рудников в Германии: здесь линии трещин точно следуют форме полости (рис. 1.5).



Рис. 1.3. Слоистость боковой стенки полости в забое шахты Южного горного бассейна (Германия) [Eckart, et al., 1966]

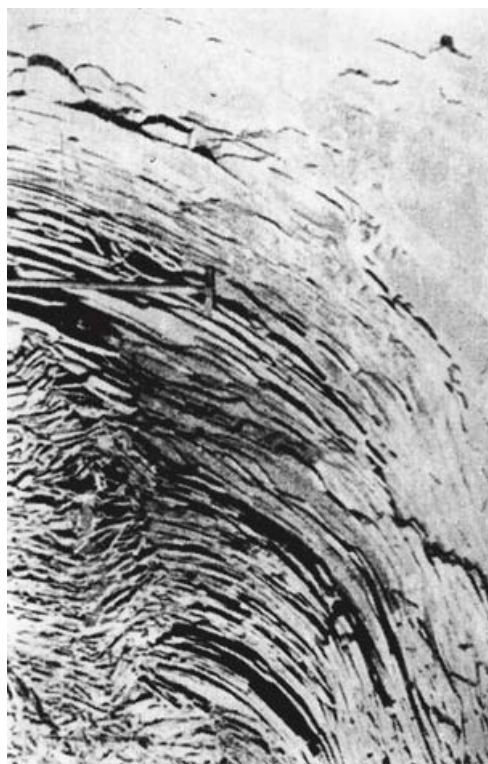


Рис. 1.4. Слоистость в выработках месторождения медистых сланцев «Мансфельд» (Германия) [Eckart, et al., 1966]

Обращает на себя внимание положение о том, что форма глобальной трещины должна соответствовать форме поверхности, обнажающейся в ходе разрушения породного массива.

Так называемым шлотмановским трещинам, т. е. трещинам разломов, уделяется большое место в работе [Слесарев, 1935], посвященной теории горного

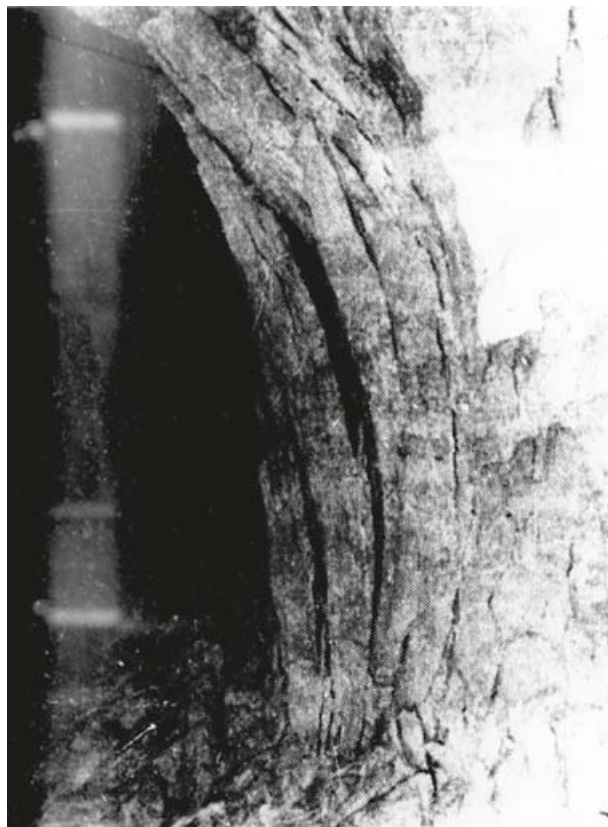


Рис. 1.5. Слоистость в сильно нагруженном целике одного из калийных рудников в Германии [Eckart, et al., 1966]

давления. В ней отмечается, что трещины впереди очистного забоя появляются под действием напряжений, которые возникают в массиве горных пород из-за нарушения их равновесия в ходе выработок. Ряд схематично изображенных наклонных и вертикальных трещин в пласте забоя (рис. 1.6) обосновывает эти положения в указанной работе.

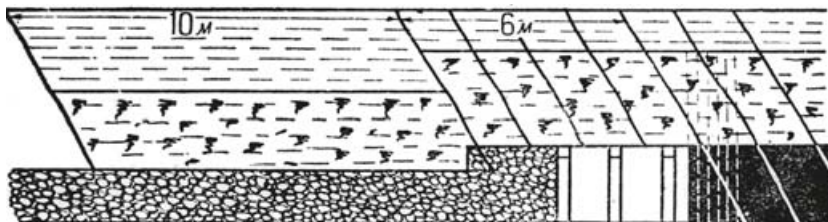


Рис. 1.6. Трещины в призабойной зоне пласта и породах кровли, направленные «с наклоном назад» [Слесарев, 1935]

На основании результатов натурных наблюдений и шахтных экспериментов мы проанализировали общую черту процессов разрушения горных пород и пластов вблизи выработок — вертикальные трещины, которые имеют место при разработке пластовых месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях. Считается, что вертикальные трещины в пласте не характерны для высокопрочных пластов, расположенных на средних глубинах [Петросян и др., 1983]. Однако в настоящее время наличие таких трещин представляется закономерным, если работы ведутся на пластах полезного ископаемого, залегающих на больших глубинах, т.е. в условиях, близких к предельным для изменения механического состояния пород.

Теоретический вывод о закономерном изменении главных напряжений в соответствии с направлением трещин в пластах полезного ископаемого могут подтвердить результаты шахтных исследований, выполненных при промышленной апробации методов локального, текущего и сейсмоакустического прогноза опасных выбросов газа в угольных пластах на шахтах Донецкого, Кузнецкого, Карагандинского бассейнов, Воркутинского и Сучанского месторождений [Петросян и др., 1983].

При прогнозе вероятности выбросов газа в качестве параметров состояния пласта полезного ископаемого обычно выбирают показатели механических, сорбционных и фильтрационных свойств среды. Также для этого определяют следующее [Пиховкин, 1974]:

- характерные точки на кривых опорного¹ давления и выделения объемов газа;
- размеры зоны предельно-напряженного состояния,
- максимум напряжений зоны опорного давления,
- максимальное и минимальное значение скорости выделения газа из массива g — соответственно $g_{\max}$ и $g_{\min}$,
- расстояние от кромки забоя до характерных точек (рис. 1.7).

Совмещение графиков зависимости опорного давления (σ_j) и скорости выделения газа (g) в призабойной зоне массива горных пород от расстояния до кромки массива (рис. 1.7) не позволяет установить соответствие между расстоянием l_2 и l_n . Однако совмещение кривых изменения всех трех главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 и кривой скорости выделения газа показывает соответствие между расстояниями до кромки забоя $g_{\max}$ и l_2 .

Факт того, что вторичная слоистость (вызванная разрушением в условиях определенного объемного напряженного состояния) повторяет форму забоя или выработки (т.е. соответствует обобщенному растяжению), стал су-

¹ Опорное горное давление — нормальные к пласту сжимающие напряжения, действующие вблизи опорного контура.

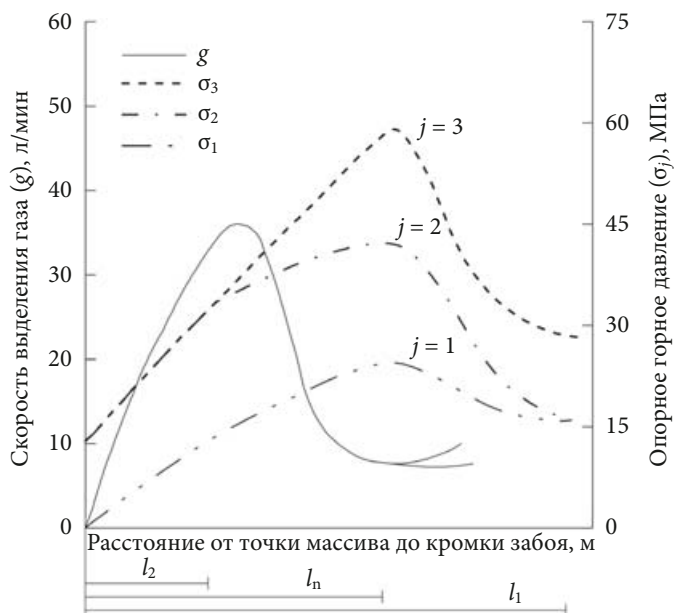


Рис. 1.7. Зависимости скорости выделения газа и опорного давления от расстояния между характерной точкой массива и кромкой забоя [Пиховкин, 1974]:

l_1 — расстояние до точки массива; l_2 — расстояние до точки, в которой наблюдается максимальная скорость выделения газа; l_n — расстояние до точки, в которой наблюдается максимальное опорное горное давление; σ_j (где $j = 1, 2, 3$) — главные напряжения ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$)

щественным при решении задач в следующих областях [Петросян и др., 1983; Бойко, 1969; Ходот, 1961]:

- в теории нагружения, деформирования и изменения механической прочности угольных пластов, находящихся в объемном напряженном состоянии;
- в прикладных исследованиях проблемы внезапных выбросов;
- при описании процессов нагружения и изменения механической прочности угольных пластов впереди забоев очистных и подготовительных выработок в ходе добычи полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях.

Далее в гл. 3 и 4 мы рассмотрели составление новых физических соотношений, описывающих изменение механического состояния пород от начала нагружения до их разрушения в зоне предельных состояний, на основе классических схем накопления поврежденности в моделях прочности пород и суммирования их повреждений.