

**ГЛАВА 10**  
**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ**  
**ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ**  
**ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК**

**10.1. Особенности проявлений горного давления  
в очистных выработках**

**10.2. Гипотезы горного давления в  
очистных выработках**

**10.3. Основные принципы управления  
горным давлением при ведении очистных работ**

**10.4. Численное моделирование  
геомеханических процессов при отработке  
угольных пластов длинными очистными забоями**

Выработки, образующиеся в результате непосредственной выемки полезного ископаемого при его разработке, называются очистными. По отношению к рассмотренным ранее капитальным и подготовительным выработкам очистные обладают некоторыми существенными особенностями. Наиболее важными из них являются большие размеры поперечных сечений, непрерывное движение забоя, благодаря чему происходит постоянное изменение компонентов поля напряжений в окружающем породном массиве, наличие примыкающего выработанного пространства, а также значительно меньшее время эксплуатации. Все эти особенности способствуют специфическому проявлению горного давления в этой группе выработках.

Большие размеры сечений очистных выработок, находящихся в непосредственной близости от выработанного пространства, определяют наличие столь же больших размеров зоны неупругих деформаций, имеющей сложную конфигурацию. В результате этого повышается влияние на процесс деформирования породного массива различного рода неоднородностей (крупноблоковой трещиноватости, геологических нарушений и т.п.).

### **10.1. Особенности проявлений горного давления в очистных выработках**

Широко распространенным видом проявления горного давления в очистных выработках является обрушение пород кровли при достижении некоторых критических размеров обнажений, которые опять же зависят от уровня действующих напряжений, деформационно-прочностных свойств горных пород и их структурно-текстурных особенностей.

На угольных месторождениях нередко происходит плавное опускание кровли за забоем лавы. Подобные процессы могут происходить и при разработке массивов скальных пород, когда имеет место определенное соотношение между размерами структурных блоков и площадью обнажения пород в очистных выработках [159].

Иногда в очистных выработках может проявляться пучение пород почвы, как результат воздействия опорного давления, обладающих соответствующим составом и специфической структурой. Этот процесс может интенсифицироваться в присутствии воды.

И, наконец, в очистных выработках, как и в подготовительных, возможны динамические и газодинамические проявления горного

давления в форме горных ударов, внезапных выбросов газа и породы, газа и угля.

Задачи управления горным давлением в очистных выработках состоят в разработке и реализации комплекса эффективных и достаточно экономичных способов обеспечения устойчивости как самих выработок, так и выработанного пространства в течении времени их безопасной эксплуатации. При этом специфика управления горным давлением связана, прежде всего, с тем, что очистная выработка непрерывно перемещается в пространстве. Вследствие этого поддерживается либо все выработанное пространство (камерные, камерно-столбовые системы разработки), либо небольшая часть его, примыкающая непосредственно к забою (сплошные системы разработки).

При отработке угольных месторождений чаще всего используют полное обрушение пород над всем очистным пространством, исключая призабойную часть. Вследствие этого в призабойной части уменьшается уровень напряжений в массиве, устраняется опасность возникновения динамических явлений и образования воздушной волны.

В практике разработки пластовых месторождений твердо укоренились понятия непосредственной и основной кровли пластов, отражающие различную способность пород к обрушению над очистным пространством.

**Непосредственной** кровлей называют малопрочный слой пород, легко обрушающийся при отсутствии крепи или целиков.

**Основной** кровлей являются более прочные породы, залегающие над непосредственной кровлей, которые приходят в движение спустя некоторое время после обрушения непосредственной кровли, когда площадь очистной выемки достигает определенной критической величины.

Иногда непосредственно над вынимаемым пластом залегает легко обрушаемый слой пород небольшой мощности (до 0,5 м), который называется **ложной** кровлей. Ложная кровля обрушается, как правило, сразу же после выемки пласта и ее удержание с помощью крепи представляет большие трудности. Обрушение ложной кровли происходит небольшими (до нескольких метров) участками вдоль забоя шириной от 0,5 до 2,0 м.

Мощность непосредственной кровли определяется мощностью систематически обрушающихся в выработанном пространстве пород после переноса посадочной крепи. Шаг самопроизвольного обруше-

ния непосредственной кровли в несколько раз меньше шага обрушения основной кровли.

Между размерами очистных пространств и обрушающихся масс наблюдается достаточно хорошее соответствие, что позволяет в системах разработки с обрушением пород устанавливать рациональный шаг самообрушения пород позади забоя лавы.

А.А. Борисов предлагает различать два режима движения пород кровли [160]:

- режим начального движения, охватывающего период от начала проведения разрезной печи до первого обрушения непосредственной кровли;

- режим установившегося движения, начинающегося, как правило, вслед за первым обрушением и продолжающегося до окончания отработки участка, панели, этажа.

В момент первого обрушения происходит быстрое изменение характера и значений нагрузок на опорные целики, крепь, кровлю и почву выработки. В этот период наблюдается сильная деформация крепи, приводящая иногда к полному разрушению и завалу лав. После первого обрушения пролет зависших пород кровли уменьшается, падает уровень напряжений в призабойной части породного массива, и условия работы крепи улучшаются.

Пролеты обрушений непосредственной и основной кровли по простиранию называют, соответственно, **шагом начального** и **шагом установившегося обрушения**. Первое обрушение основной кровли иногда называют **генеральным**. Пролет предельного обнажения трещиноватой кровли составляет, примерно, 0,6-0,7 величины предельного пролета нетрещиноватой кровли.

Обрушению кровли предшествуют треск разрушающейся породы и стоек крепи, стрельяние мелких кусочков породы.

По аналогии с породами кровли выделяют также непосредственную и основную почву.

**Непосредственной почвой** называют слой пород, залегающих сразу же под пластом. Нередко в пределах непосредственной почвы выделяют верхний ее слой мощностью 0,3-0,4 м, называемый **ложной почвой**. Со свойствами пород непосредственной почвы связаны явления пучения, сползания при крутом падании и т.п.

Толщу пород, залегающих ниже непосредственной почвы, называют **основной почвой**.

Для управления горным давлением в очистных выработках иногда предусматривают полную или частичную закладку выработанного пространства пустой породой или иными материалами, которая поддерживает кровлю или же уменьшает амплитуду смещения залегающих выше пород. Ту же роль выполняет отбитая руда, маганизируемая в блоках при разработке крутопадающих рудных залежей.

Породный массив до извлечения полезного ископаемого находится в равновесном напряженно-деформированном состоянии, которое, как уже отмечалось, принято называть начальным. Компоненты вертикальных и горизонтальных напряжений в произвольной точке на глубине  $H$  в этом случае равны:

$$\sigma_y = \gamma H, \quad \sigma_x = \lambda \gamma H$$

где  $\lambda$  - величина бокового распора. Составляющие напряжений, которые могут быть вызваны неотектоническими процессами, полагают обычно отсутствующими, хотя это и не всегда справедливо.

По мере извлечения полезного ископаемого и перемещения забоя поле напряжений вокруг очистной выработки изменяется. Область породного массива, в пределах которой происходят эти изменения, называется **зоной влияния выработки** (рис. 10.1). В отличие от подготовительных зона влияния очистных выработок имеет намного большие размеры. Нередко процессы деформации затрагивают всю толщу пород кровли вплоть до дневной поверхности, а также породы почвы.

В зависимости от того, в какую сторону отличаются напряжения от начальных ( $\gamma H$ ), в окрестности очистной выработки различают две характерные области. Область, в пределах которой действующие напряжения меньше начальных, называется **зоной разгрузки**.

Область, в пределах которой действующие напряжения превышают начальные, называется **зоной опорного давления** (рис. 10.1).

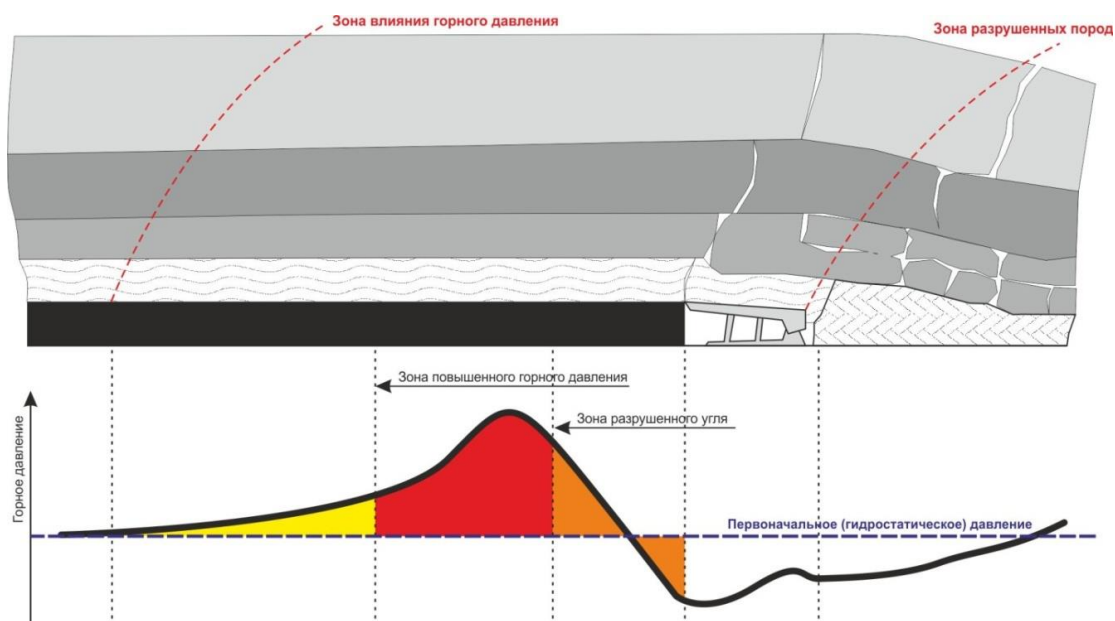


Рис. 10.1. Схема влияния очистной выработки (лавы) на породный массив:

Поскольку забой очистной выработки перемещается в пространстве, выделенные области также перемещаются вместе с ним. При этом вмещающие породы, претерпевая механические изменения, постепенно переходят из одной зоны в другую.

Под влиянием высоких напряжений уголь в краевой части пласта, непосредственно примыкающий к выработке, разрушается, его несущая способность падает, и максимум опорного давления перемещается вглубь массива. Разрушенный уголь интенсивно отжимается в выработку. Это явление используют в практике для снижения усилий на отбойку угля. Подобные же явления имеют место и на рудных месторождениях.

В практике горного дела различают **эксплуатационное** опорное давление, связанное с перемещающимся в пространстве забоем очистной выработки, и **стационарное**, располагающиеся у неподвижной границы очистной выработки.

Параметры зоны опорного давления зависят от многих факторов, определяющими из которых являются глубина ведения очистных работ, соотношение компонентов начального поля напряжений, размеры и конфигурация очистной выработки, деформационно-прочностные свойства горных пород, их структура и текстура.

Многочисленные инструментальные измерения, выполненные на угольных шахтах, позволили сделать некоторые общие выводы относительно параметров зоны опорного давления. Так, например, установлено, что пик напряжений в зоне опорного давления располагает-

ся обычно на расстоянии от забоя, равном 2-5 мощностям вынимаемого пласта и равен обычно  $(1,5-2,0)\gamma H$  [161].

Для рудных месторождений закономерности образования зон опорных давлений имеют свои особенности.

Исследование геомеханических процессов, развивающихся в породном массиве вокруг очистных выработок, сводится в самом общем случае по определению компонентов поля напряжений и деформаций, установлению размеров области разрушенных пород и величины нагрузки на ограждающие конструкции (крепь, щит) в зависимости от комплекса геологических, горнотехнических и технологических факторов. Разнообразие сочетаний различных геологических и технологических условий определяет огромное количество расчетных схем и, соответственно, решений поставленных задач. Практическое приложение результатов решений этих задач, применительно к выемке угольных пластов, сводится к следующему:

- обоснование технологических параметров очистных работ, обеспечивающих безопасную и эффективную добычу угля;
- определение рациональных параметров ограждающих конструкций очистной выработки, взаимодействующих с породами, вмещающими угольный пласт.

Решение задачи о напряженно-деформированном состоянии породного массива в окрестности очистной выработки может быть получено путем применения методов механики сплошной среды, механики дискретной среды, на основе экспериментально-аналитических методов, использующих закономерности, полученные экспериментальным путем в сочетании с аналитическими решениями, а также иных методов. Выбор расчетного метода определяется принятой гипотезой горного давления и соответствующей моделью среды.

## **10.2. Гипотезы горного давления в очистных выработках**

Гипотезы горного давления применительно к очистным выработкам, отличаются от гипотез, которые были рассмотрены ранее для одиночных выработок, находящихся вне зоны влияния выработанного пространства. Анализ этих гипотез достаточно подробно изложен в работах А.А. Борисова [4], К.В. Руппенейта [162], А.М. Ильштейна [163], И.Ф. Лыкова [164].

**Гипотеза свода давления.** Идея образования разрушенных пород над очистной выработкой при разработке пологих угольных пла-

стов была высказана В. Хааком [165] в 1928 году. Она получила развитие в работах Ф. Шпрута [166] и Г. Жиллитцера [167]. Схема образования свода давления над очистной выработкой по представлениям В. Хаака приведена на рис. 10.2, а на рис. 10.3 показаны своды давления, образующиеся в окрестности лавы по Ф. Шпруту.

Согласно гипотезе сводообразования, горное давление в породном массиве концентрируется в некоторой области, примыкающей к призабойной части лавы. При этом по Ф. Шпруту максимальные значения концентрации напряжений располагаются и в угле, и в закладке, примерно, на расстоянии 15 м от границы рабочего пространства. Давление на ограждающую крепь в лаве создается весом пород, находящихся между контуром выработки и контуром свода. Размеры свода обрушения зависят от физико-механических свойств пород кровли. Величина нагрузки на крепь непостоянна. Она зависит от жесткости крепи, от величины шага обрушения, от подвижки пород и угля в сторону выработанного пространства.

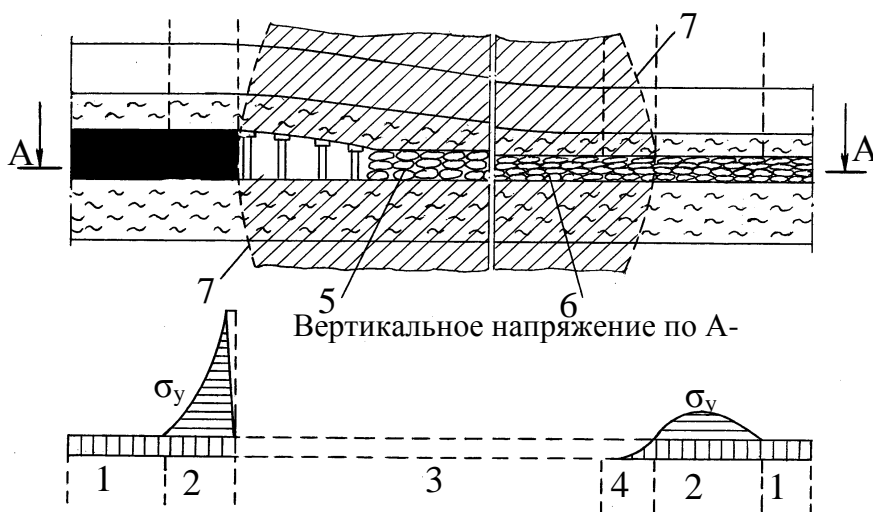


Рис. 10.2. свод давления над очистной выработкой по В.Хааку [165]:  
 1 – область естественного напряженного состояния; 2 – области концентрации напряжений; 3 – область разгрузки от давления; 4 – область начального нагружения на закладку; 5 – рыхлая закладка; 6 – уплотнившаяся закладка;  
 7 – границы свода давления



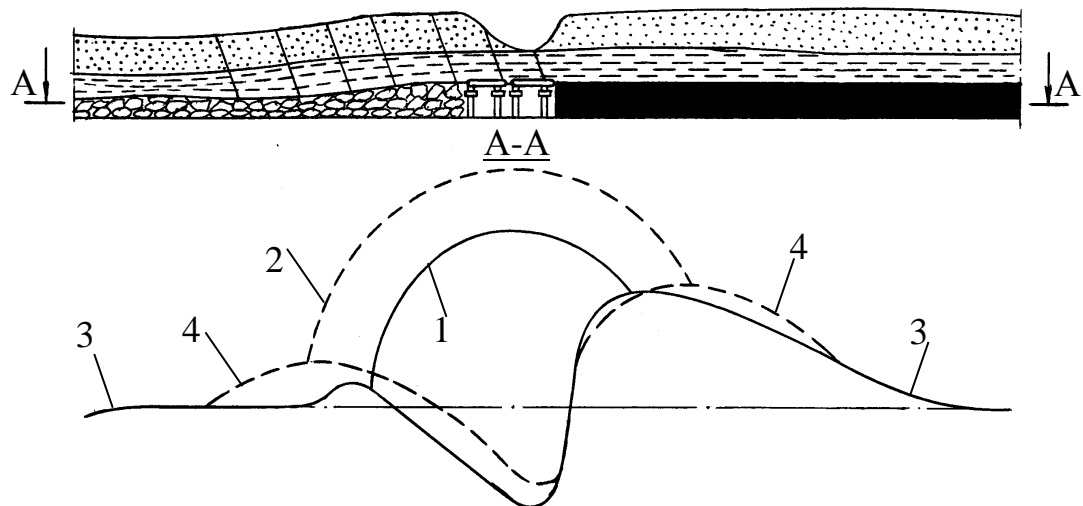


Рис. 10.3. Своды давления над очистной выработкой при разработке [166]: 1 – с полной закладкой; 2- с обрушением; 3 и 4 – нормальное давление при разработке соответственно с полной закладкой и обрушением по линии А-А

Гипотеза сводообразования предполагает рассмотрение механических процессов, протекающих в породном массиве вследствие образования и движения очистной выработки, в некоторой локальной области, примыкающей к забою лавы. Породный массив, расположенный вне этой зоны, не рассматривается. Между тем накопленный опыт показывает, что при образовании очистных выработок в зависимости от мощности вынимаемого пласта механические процессы затрагивают огромные области пород вплоть до земной поверхности. Зона опорного давления распространяется вглубь нетронутого породного массива на расстоянии от 10 до 50 м, а в сторону обрушенных пород – до 100 м [167-170]. Несомненной должна быть также связь глубины разработки угольного пласта с параметрами геомеханических процессов в окрестности очистной выработки.

Приведенные выше несоответствия показывают, что гипотеза свода давления имеет скорее исторический интерес, чем практический.

**Гипотеза консольной балки (плиты).** Сущность гипотезы консольной балки, предложенной независимо И. Шпарре и А. Шульцем в 1867 году, состоит в том, что породные слои над выработанным и поддерживаемым пространством рассматриваются как балки, заделанные одним концом в целик. Другие концы балок могут иметь опору (крепь, закладка) или не иметь ее. В кровле отработываемого пласта, состоящей из нескольких породных слоев, образуется совокуп-

ность таких, налегающих друг на друга и взаимодействующих между собой, консолей.

В зависимости от способа управления кровлей исследовались три основных расчетных схемы, показанные на рис. 10.4.

Рассматривая эти схемы, сторонники гипотезы балок обычно различали непосредственную и основную кровлю. После обрушения непосредственной кровли за органичной крепью оставшаяся часть этой кровли работает как консоль, подкрепленная со стороны свободного конца. За обрушением первого слоя обрушается второй и последующие слои. Обрушившиеся породы разрыхляются, увеличиваются в объеме и наступает момент, когда они подопрут вышележащие слои и обрушение прекратится.

Неразрушенные слои пород кровли будут в дальнейшем работать по схеме неразрезной балки, защемленной в нетронутым массиве с одной стороны и лежащей на податливой опоре (обрушившихся породах) с другой стороны. Реакция податливой опоры является переменной во времени, поскольку обрушенные породы оседают и уплотняются.

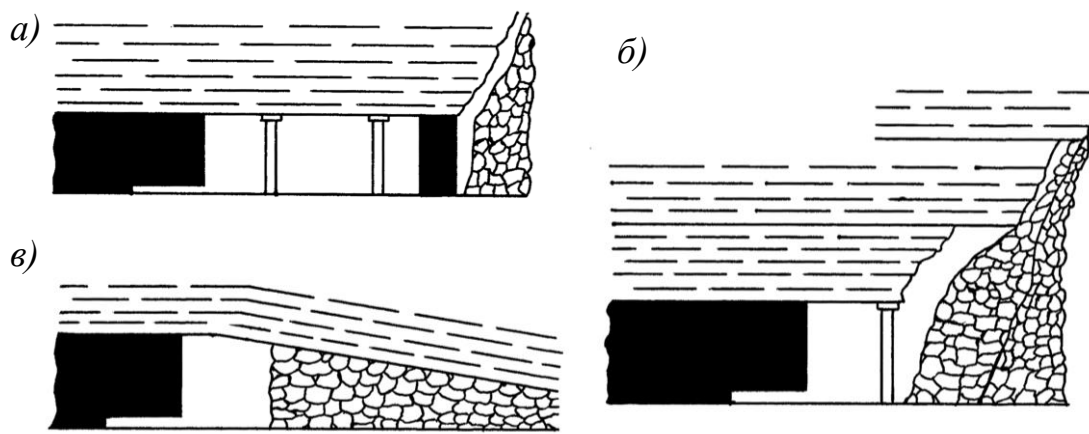


Рис. 10.4. Схемы к гипотезе консольных балок:

- а) непосредственная кровля, рассматривается как балка на двух опорах; б) непосредственная кровля, рассматривается как консольная балка; в) непосредственная кровля, рассматривается как бесконечно длинная консольная балка

Гипотеза консольных балок имела много сторонников. Позднее она получила дальнейшее развитие в трудах Ф.А. Белаенко [171], К. Кегеля [172], А.А. Борисова [4] и др. авторов уже под названием гипотезы консольных плит. От гипотезы консольных балок она отличалась незначительными деталями, позволяющими учесть относитель-

ные размеры изгибающихся пластов, особенности технологии добычи угля, наличие трещин, кливажа.

Так, по Ф.А. Белаенко [171] сложный породный массив, находящейся над выработанным пространством лавы, рассматривается как совокупность налегающих друг на друга плит, характер разрушения и опускания которых существенно зависит от кливажа и тектонических трещин (рис. 10.5).

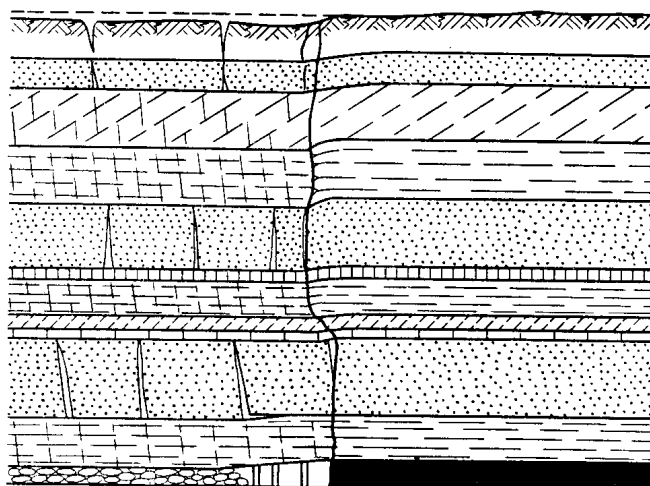


Рис. 10.5. Обрушение слоистых пород по Ф.А. Белаенко

Для математического описания предложенной расчетной схемы использовались соотношения теории упругости.

Гипотеза консольной плиты Г. Кегеля [172] была разработана для случая плавного опускания пород кровли на закладку без разрыва их сплошности (рис. 10.6).

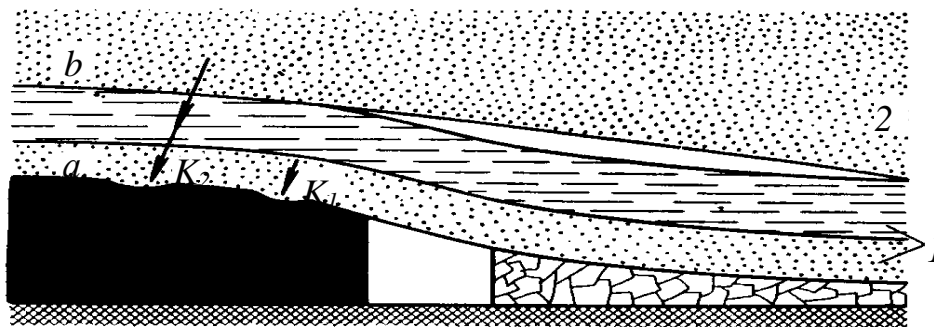


Рис. 10.6. Опускание слоистых пород, склонных к прогибу, без разрыва сплошности по К. Кегелю:

1 – непосредственная кровля; 2 – основная кровля

По линии забоя прогибающаяся кровля формирует давление по широкой поверхности, которая называется опорной. Форма изгиба породных слоев кровли определяется мощностью угольного пласта,

непосредственной и основной кровли, их физико-механическими свойствами, трещиноватостью и скоростью подвигания забоя.

Упрощения, принятые в теории Г. Кегеля, привели, по сути, к рассмотрению отдельно взятого слоя без учета его взаимодействия со всеми остальными породными слоями. Построение же эффективного решения методами теории упругости для многослойной среды чрезвычайно громоздко и, вообще говоря, пригодно лишь для крайне узкого круга геомеханических задач.

Гипотеза стадийного обрушения А.А. Борисова [173] также представляет собой разновидность гипотезы консольных балок.

Суть ее сводится к следующему. Прежде всего, автор существенно различает особенности разрушения пород непосредственной и основной кровли. Непосредственной кровлей является пласт или пачка пластов, шаг обрушения которых в несколько раз меньше шага обрушения основной кровли. Основной кровлей считается первый пласт крепкой породы, мощность которого примерно в 20 раз превышает мощность непосредственной кровли.

Непосредственная кровля взаимодействует с основной кровлей, угольным пластом, крепью и даже почвой пласта. Деформации и разрушение пород непосредственной кровли имеют четко выраженную стадийность. После первичного обрушения кровли, по мере отхода забоя лавы от разрезной печи, породы кровли асимметрично изгибаются. Угол наклона поверхности обрушения к горизонту колеблется в пределах  $65-85^{\circ}$  (рис. 10.7), радиусы изгиба слоев возрастают в восходящем порядке.

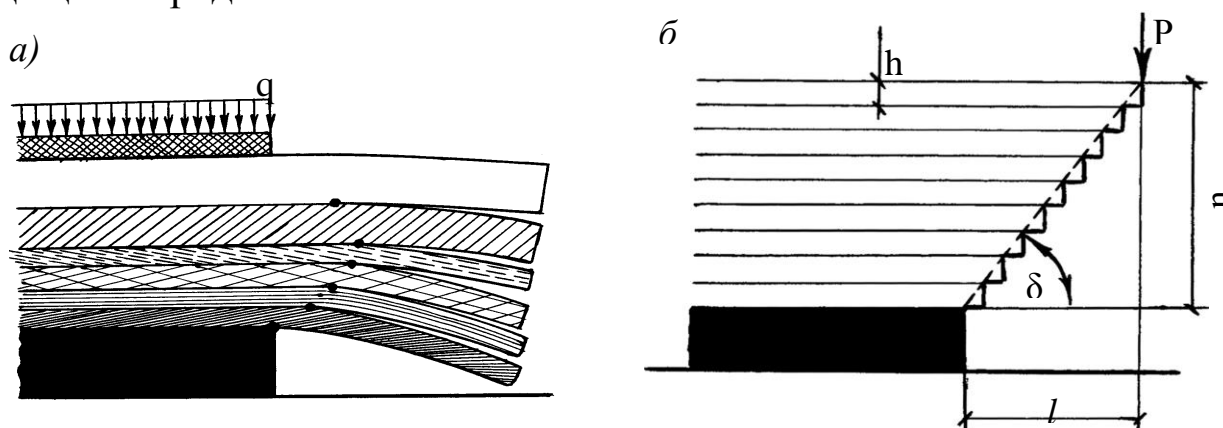


Рис. 10.7. Схемы обрушения по А.А. Борисову:

- а) иллюстрирующая изменение мест заделки консолей слоев пород;
- б) к определению угла обрушения кровли

Расчет параметров обрушения слоистых пород кровли выполняется методами сопротивления материалов. При этом детально расписанная изначально расчетная схема идеализируется, и ценность полученных зависимостей существенно снижается.

**Гипотеза блочного разрушения** Г.Н. Кузнецова [174, 175] была предложена в результате обобщения большого количества натуральных и лабораторных исследований. В результате такого обобщения автор пришел к выводу, «что в результате проведения очистной выработки подработанная толща слоистых пород разделяется на отдельные, взаимодействующие между собой блоки. Размеры этих блоков, даже в наиболее раздробленной части пород, образующих зону беспорядочного обрушения, бывают в большинстве случаев соизмеримы с мощностью вынимаемого пласта.

Что же касается отделившихся блоков породы, расположенных как непосредственно над рабочим пространством, так и в верхней части зоны обрушения, то их размеры не только имеют один порядок с вынимаемой мощностью пласта, но часто превышают эту мощность и имеют один порядок с общей шириной рабочего пространства лавы». Г.Н. Кузнецов считал, что ввиду такого блочного строения породного массива, применение методов механики сплошной среды для исследований взаимодействия крепи с боковыми породами в лавах пологопадающих пластов недопустимо. Решение задачи должно основываться на изучении кинематики взаимодействующих отдельных блоков или групп блоков между собой и с крепью очистной выработки.

По Г.Н. Кузнецову подработанная с обрушением толща слоистых пород делится, как правило, на две зоны - нижнюю и верхнюю.

Нижняя зона обрушения представлена блоками породы, которые принадлежат одному и тому же слою породы, разделены трещинами разлома и могут свободно падать в выработанное пространство.

Верхняя зона – это зона упорядоченного опускания породных слоев, каждый из которых представляет собой некоторую многошарнирную систему, образованную из блоков, разделенных трещинами, но не выпадающих в выработанное пространство, а удерживаемых в пределах изгибающегося слоя силами распора.

Общая высота зоны обрушения  $\sum_{i=1}^n h_i$  является функцией вынимаемой мощности пласта  $m$ , коэффициента разрыхления  $K$  и мощности отдельных слоев обрушающейся кровли  $h_i$ . Коэффициент разрыхле-

ния для нижней зоны обрушения принимается равным  $K_n=1,25-1,40$ , а для верхней зоны –  $K_e=1,05-1,15$ .

Образование нижней зоны обрушения начинается с нижнего пласта и происходит до тех пор, пока высота свободного пространства под очередным  $n$ -ым падающим пластом не станет меньше, чем  $2,0-2,5$  мощности этого же пласта. Как только это условие выполнится, начнется образование верхней зоны обрушения, которая в свою очередь, будет развиваться до тех пор, пока высота свободного пространства под очередным  $k$ -ым слоем не станет меньше его мощности.

Исходя из этих положений, суммарная мощность слоев нижней зоны обрушения определяется из условия

$$m - (K_n - 1) \sum_{i=1}^n h_i \leq (2 - 2,5) \cdot h_n,$$

а суммарная мощность верхней зоны обрушения из условия

$$m - (K_n - 1) \sum_{i=1}^n h_i - (K_e - 1) \sum_{i=1}^k h_i \leq h_{m+1}.$$

Воздействие опускающихся пород кровли на крепь выработки происходит или в режиме заданных нагрузок, когда крепь поддерживает вес части пород кровли, потерявшей связь с вышележащими породами, или в режиме заданных деформаций, когда реакция крепи является функцией величины ограниченного смещения залегающих выше слоев.

Гипотеза Г.Н. Кузнецова по сути является разновидностью гипотезы консольных балок. Не принимая во внимание напряженно-деформированное состояние каждого из слоев, приводящее к их разрушению и дезинтеграции рассматривается кинематика отдельных блоков, взаимодействующих друг с другом и крепью выработки. При такой постановке задачи не принимается во внимание также общее напряженно-деформированное состояние породного массива, возникшее в результате ведения очистных работ и, как следствие, приводящее к разрушению и перемещению углевмещающих породных слоев. Расчетные формулы содержат много данных, получение которых крайне затруднительно, а порой и вовсе не представляется возможным.

**Гипотеза «предварительного разрушения» пород кровли.** Автором гипотезы является А. Лабасс, который основные положения своей теории изложил в 1947-1951 г.г. [176]. В соответствии с представлениями автора очистная выработка рассматривается как штрек, перемещающийся в пространстве параллельно угольному забою.

При этом вокруг этой выработки образуются (рис. 10.8) три зоны:

I – зона пониженного давления, в пределах которой породы разрушены, II – зона повышенных напряжений или зона трещинообразования и III – зона, в которой в силу псевдопластичности горных пород возможны деформации без образования трещин.

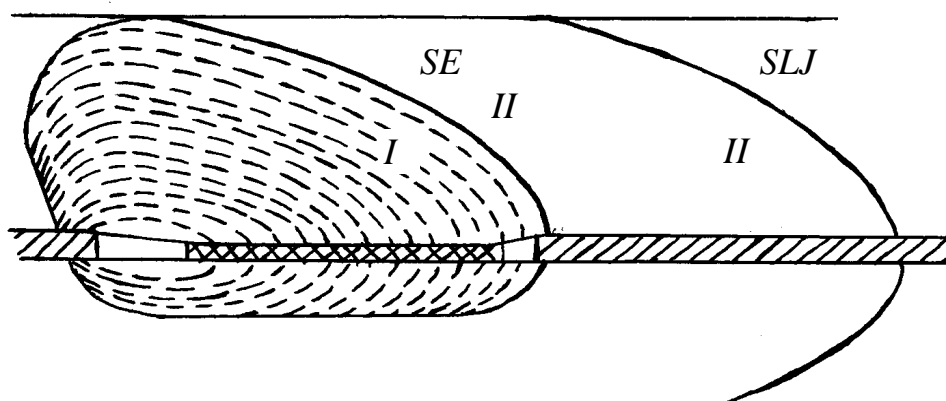


Рис. 10.8. Зоны напряжений вокруг забоя очистной выработки по А. Лабассу: I – область пониженных напряжений; II – область концентрации напряжений; III – область естественного состояния

Под термином «псевдопластичность» А. Лабасс понимает способность слоев горных пород плавно изгибаться без дополнительных разрушений за счет естественной трещиноватости. Третья зона плавно переходит в зону нетронутого породного массива. Подвижная граница раздела зон II и III называется обволакивающей поверхностью SE, а граница между зоной III и нетронутом породным массивом – предельной поверхностью влияния SLJ.

Обволакивающая поверхность представляет собой геометрическое место наиболее удаленных от выработки вновь образующихся трещин. Ее след на плоскости, перпендикулярной к забою, представляет собой замкнутую, выпуклую кверху непрерывную кривую, форма которой зависит от глубины расположения очистной выработки, мощности угольного пласта, длины лавы, угла падения пласта и прочности вмещающих пород.

Породные слои, приобретая в зоне II дополнительную трещиноватость, теряют прочность на растяжение и сопротивляются изгибу только вследствие сил трения, возникающего под действием больших тангенциальных напряжений. Каждый слой конструктивно представляет собой консольную балку, гибкость которой зависит от степени ее трещиноватости: чем меньше трещин, тем более жестким по терминологии А. Лабасса является породный слой. Жесткий пласт прогибается меньше, чем

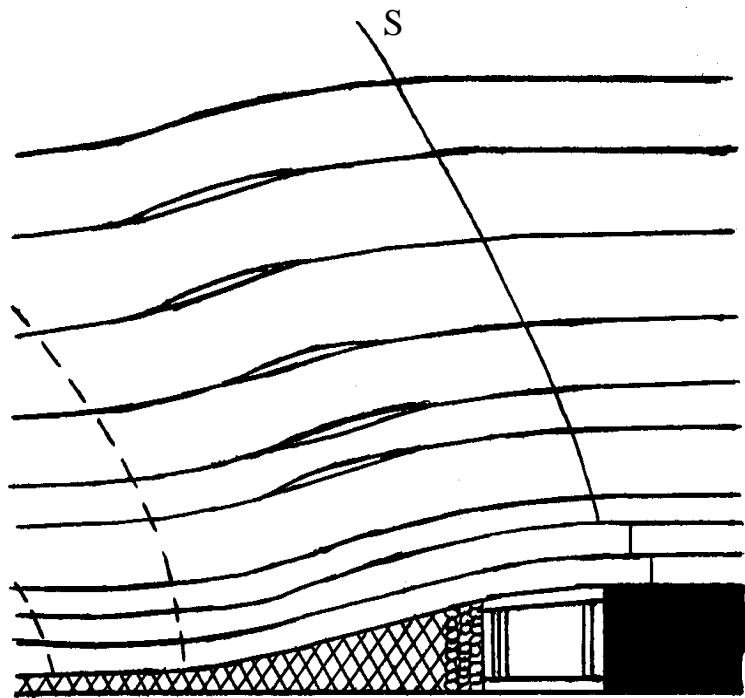


Рис. 10.9. Схема А. Лабасса для определения горного давления в очистных выработках при трактовке породных слоев как балок с псевдопластическими свойствами

гибкий, т.е. более трещиноватый, и несет на себе вес гибких пластов, если они находятся над ним, или отстает от них, если они находятся внизу. Такое различие в способности деформироваться пластов разной жесткости приводит к образованию пустот (рис. 10.9), которые вместе с трещинами создают условия для миграции газа и воды.

Таким образом, основная идея гипотезы А. Лабасса состоит в

том, что породный массив не является сплошным, а состоит из слоев различной жесткости. Эта среда при образовании и перемещении очистной выработки подвергается значительным деформациям, которые являются псевдопластическими. Псевдопластичность слоев возрастает вследствие образования трещин на границе I и II зон.

Для построения математической теории горного давления А. Лабасс предлагает рассматривать слои как балки и в этой части его представления переключаются с представлениями сторонников гипотезы консольных балок. Однако, дать количественную оценку явлениям, происходящим в лаве, ему так и не удалось. Пользуясь расчетной схемой, приведенной на рис. 10.9, А. Лабасс был вынужден вво-



дить в формулы ряд поправочных коэффициентов, определить которые оказалось невозможно.

**Гипотеза сыпучей среды.** Суть гипотезы состоит в том, что горные породы вокруг очистной выработки рассматриваются как сыпучая среда, механические свойства которой определяются углом внутреннего трения. Эта точка зрения исходит из того, что углевмещающие породы изначально разбиты системами естественных трещин, которые в известной степени позволяют рассматривать их как дискретные тела. В этом смысле взгляды сторонников гипотезы сыпучей среды Ф. Ван-Итерсона [177] и Т. Зольденрата в отношении доминирующей роли трещин при формировании горного давления в лавах совпадают со взглядами А. Лабасса. Но если А. Лабасс категорически отрицает возможность применения методов статики сыпучей среды для решения задач взаимодействия крепи с окружающими породами, то Ф. Ван-Итерсон все свои теоретические рассуждения и выкладки основывал на известных решениях задач механики грунтов.

Так, например, рассматривая задачу определения нагрузки на жесткую индивидуальную крепь лавы в случае закладки выработанного пространства, Ф. Ван-Итерсон использовал известное решение Прандтля о давлении штампа на основание, представленное сыпучей средой. Предельное напряженное состояние такой среды описывается следующим уравнением

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sin \rho (\sigma_1 + \sigma_2), \quad (10.1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные наибольшее и наименьшее напряжения,  $\rho$  – угол внутреннего трения.

На рис. 10.10. показана сетка линий скольжения, построенная при  $\rho=50^\circ$  в предположении, что нагрузка на угольный пласт  $P_1$  – опорное давление – распределена равномерно.

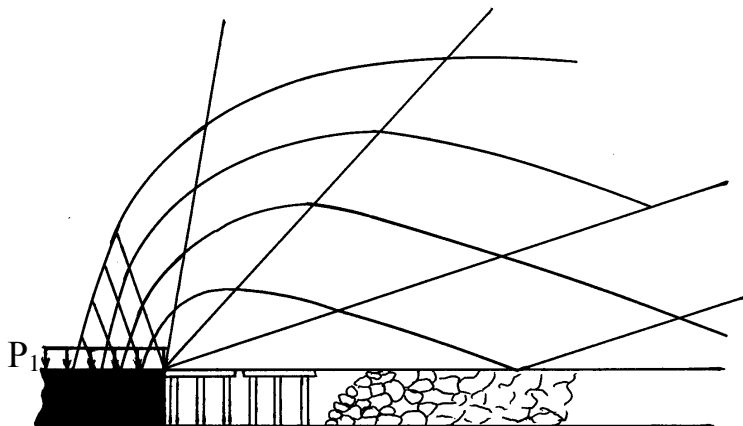


Рис. 10.10. Схема к определению давления на крепь по гипотезе сыпучей среды Ван-Итерсона

При этом нагрузка на  $1\text{ м}^2$  поддерживаемого пространства  $P_2$  определяется по формуле:

$$P_2 = P_1 \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} \exp(-\pi g \rho). \quad (10.2)$$

Поскольку опорное давление на угольный пласт предполагается распределенным равномерно, что не соответствует действительности, то и предлагаемые зависимости носят скорее иллюстративный, чем практический характер.

Для определения нагрузки на податливую стоечную крепь лавы Ф. Ван-Итерсон использовал расчетную схему, приведенную на рис. 10.11.

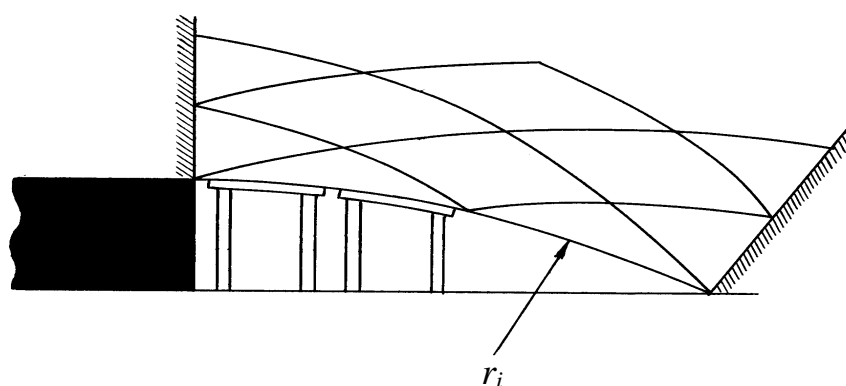


Рис. 10.11. Схема расчета напряжений в массиве над призабойным пространством лавы по аналогии с толстостенной трубой

При этом кровля очистной выработки является некоторой цилиндрической поверхностью с радиусом  $r_i$ , за которой находится сыпучая среда, ограниченная внешней цилиндрической поверхностью с радиусом  $r_n$ , по которой приложена внешняя нагрузка  $P_n$ . Для вычисления нагрузки на поверхности с радиусом  $r_i$  используется известная формула А. Лабасса

$$P_i = P_n (1 - \sin \rho) \left( \frac{r_i}{r_n} \right)^{\frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho}}. \quad (10.3)$$

Как следует из формулы (10.3), давление на податливую крепь выражается через две известные величины –  $r_n$  и  $P_n$ . Автор не указывает на то, каким образом можно определить эти величины. Кроме того, в формулу (10.3) не входит характеристика жесткости крепи, без чего нельзя определить и собственно нагрузку на крепь.

В своей теории Ф. Ван-Итерсон ограничился рассмотрением только области разрушенных пород, находящихся в кровле очистной

выработки. А между тем к пластической области примыкает область упругих деформаций. Границу же раздела этих областей и напряжения, действующие на границе, можно определить только из решения задачи в упругопластической постановке, что существенно изменяет исходные расчетные схемы.

**Гипотеза ступенчатого опускания** была предложена П.М. Цимбаревичем [178] в 1951 г. Гипотеза ступенчатого опускания предназначена для описания геомеханических процессов в окрестности движущегося забоя лавы для горизонтальных или пологих мало-мощных угольных пластов, залегающих на сравнительно небольшой глубине. Как и А. Лабасс, П.М. Цимбаревич в качестве основной идеи использовал представление о существовании зоны пониженных напряжений в окрестности очистной выработки. В границах этой зоны возникает косая трещиноватость, приводящая к сдвигению блоков пород, в то время как А.Лабасс в пределах этой же зоны рассматривает изгибающиеся слои-балки.

Вначале П.М. Цимбаревич рассматривал случай, когда в кровле выработки прямоугольного сечения, проведенной в пределах горизонтально залегающего угольного пласта, образовалась зона пониженных напряжений. Автор полагал, что в разрезе (рис. 10.12) эта зона имеет форму треугольника, основание которого несколько больше ширины выработки.

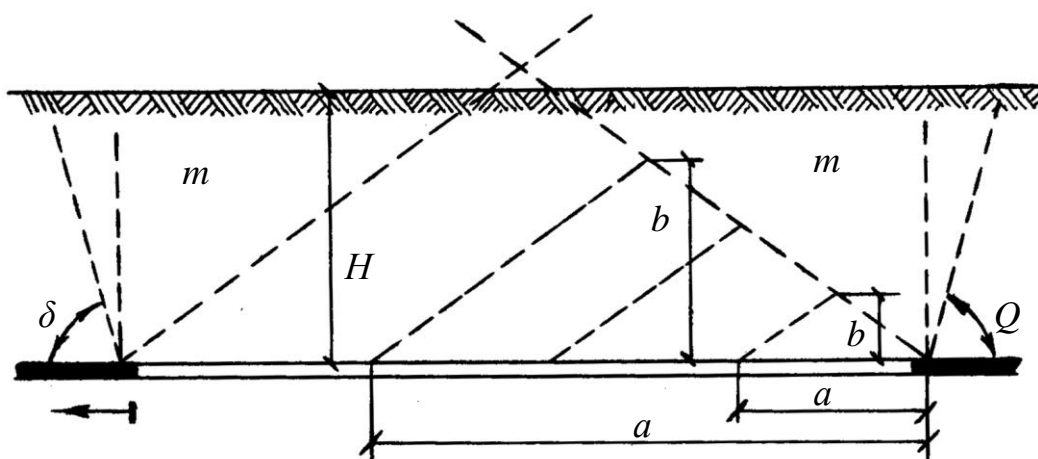


Рис. 10.12. Принципиальная схема распределения областей влияния выработки по П.М. Цимбаревичу

При перемещении угольного забоя в направлении, указанном на рисунке стрелкой, область пониженных напряжений увеличивается.

Если забой перемещается непрерывно, то полагается, что высота вновь образующихся призм  $b$  может быть определена по формуле:

$$b = 0,5a \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (10.4)$$

где  $a$  – расстояние от забоя до разрезной печи,  $\beta$  – так называемый угол внутреннего сопротивления, который представляет собой угол внутреннего трения, увеличенный для учета сцепления в породах кровли. Таким образом, угол  $\beta$  в гипотезе П.М. Цимбаревича имеет тот же смысл, что и завышенный угол внутреннего трения в теориях А. Лабасса и Ф. Ван-Итерсона, хотя никто из авторов не приводит соображений по поводу определения величины этого угла.

При некотором значении  $a$ , область пониженных напряжений достигнет земной поверхности. Нависающие части породного массива  $m$  разбиваются трещинами и теряют связь с ненарушенными породами. Если бы не породы внутри треугольной призмы, то массив  $m$  частично бы обрушался и принял форму треугольной призмы с углами  $\theta_1$  к горизонту. В действительности же обрушение массива пород  $m$  происходит в стесненных условиях при движении забоя лавы. Поэтому со стороны забоя угол откоса будет равен величине  $\delta > \theta_1$ , а с противоположной стороны –  $\theta > \theta_1$ . **Область пород, ограниченная откосами с углами наклона  $\delta$  и  $\theta$  является областью пониженных напряжений.**

Автор гипотезы рассматривает три варианта расчетных схем:

- толщина пород между угольным пластом и земной поверхностью однородна по прочности;
- в толще залегающих выше угольного пласта пород имеется более прочный пласт;
- непосредственная кровля представлена нетрещиноватым пластом, способным пластично прогибаться под своим собственным весом.

Рассматривая первый случай (рис. 10.13) П.М. Цимбаревич вводит следующие ограничения: горизонтальный угольный пласт залегает на сравнительно небольшой глубине  $H$ ; покрывающие породы однородны по физико-механическим свойствам; очистные работы ведутся с обрушением кровли и область пониженных напряжений ограничивается земной поверхностью.

В этих условиях, по предположению автора при каждой посадке кровли опускается полоса породы, имеющая форму параллелепипеда  $АБСД$ . Вес породы в параллелепипеде, приходящийся на 1 м длины лавы, составляет  $G = \gamma b H$ , где  $b$  – наибольшая ширина выработанного

пространства. Крепь очистной выработки воспринимает часть этого веса.

По плоскости, след которой на рис. 10.12 обозначен линией  $CD$ , для сдвигающегося блока имеет место сцепление и трение, учитываемое совместно величиной  $tg\beta$ . Сила  $T$ , сдвигающая полосу  $ABCD$ , равна

$$T = \gamma b H \sin \delta. \quad (10.5)$$

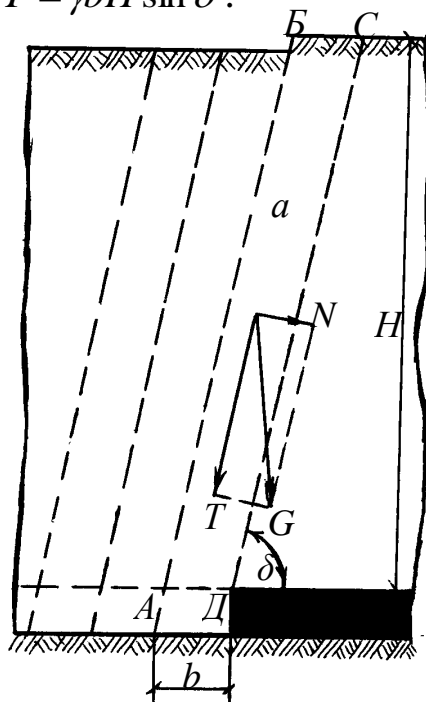


Рис. 10.13. Схема ступенчатого опускания блоков породы в однородной кровле  
Соппротивление сдвигу по линии  $CD$  составляет

$$Ntg\beta = \gamma b H \cos \delta tg\beta, \quad (10.6)$$

где  $N$  – это составляющая веса пород, нормальная к  $CD$ .

Очевидно, что равновесие сил на линии  $CD$  возможно только в том случае, если

$$tg\delta = tg\beta. \quad (10.7)$$

Для того, чтобы это условие выполнялось, необходимо, чтобы часть веса пород опускающегося параллелепипеда воспринималась крепью выработки. Реакция крепи определяется по формуле:

$$Q = \gamma H (1 - tg\beta ctg\delta). \quad (10.8)$$

Формула (10.8) пригодна также для случая закладки выработанного пространства.

Во втором случае, когда среди покрывающей толщи пород имеется пласт более прочной породы, обладающий возможностью не обрушаться при пролете длиной  $L_1$ , создавать нагрузку на крепь будет та же полоса, но высотой  $H_0$ , которая равна расстоянию от угольного пласта до прочного слоя (рис. 10.14).

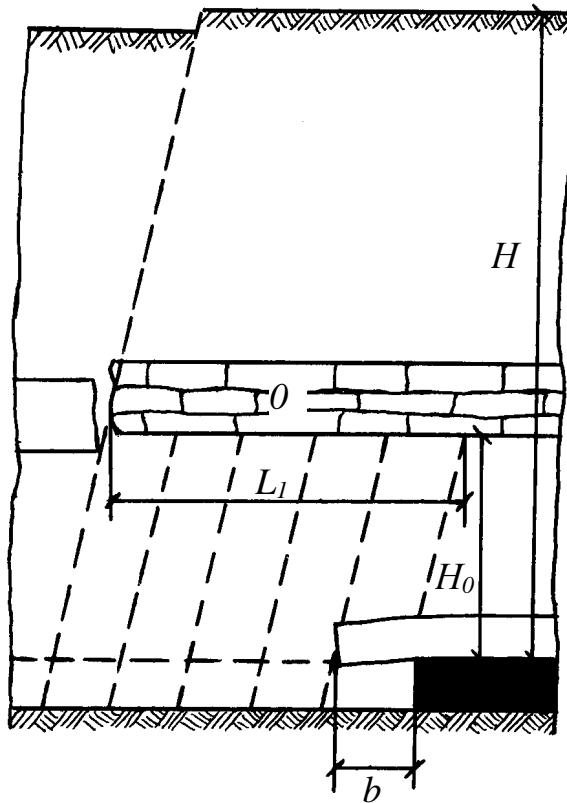


Рис. 10.14. Схема ступенчатого опускания блоков, если в кровле имеется слой прочной породы, образующей мост: О – слой более прочной породы;  $H_0$  – непосредственная кровля

Если в формулу (10.8) подставить вместо  $H$  величину  $H_0$ , то получим искомую расчетную формулу давления на крепь очистной выработки.

По мере подвигания забоя пролет  $L$  увеличивается и при некотором его значении  $L > L_1$  слой обламывается. При этом возможны два варианта: в первом – слой обламывается в выработанном пространстве, и в этом случае давление на крепь не будет возрастать; во втором – слой обламывается прямо над забоем и это вызовет резкое увеличение нагрузки на крепь.

В третьем случае, когда непосредственная кровля представлена пластом, способным под действием собственного веса и веса вышележащих пород допускать большие пластические деформации, крепь должна предотвратить опасные деформации (рис. 10.15). Наибольший свободный прогиб кровли  $h_{max}$  можно ликвидировать, если к кровле в направлении снизу вверх будут приложены некоторые распределенные силы, равные либо весу всей толщи пород до поверхности (первый случай), либо весу толщи пород до прочного слоя (втор-

рой случай). Величину этих распределенных сил на метр длины выработки автор рекомендовал определять по формуле:

$$P_0 = \frac{\gamma H}{h_{\max}}. \quad (10.9)$$

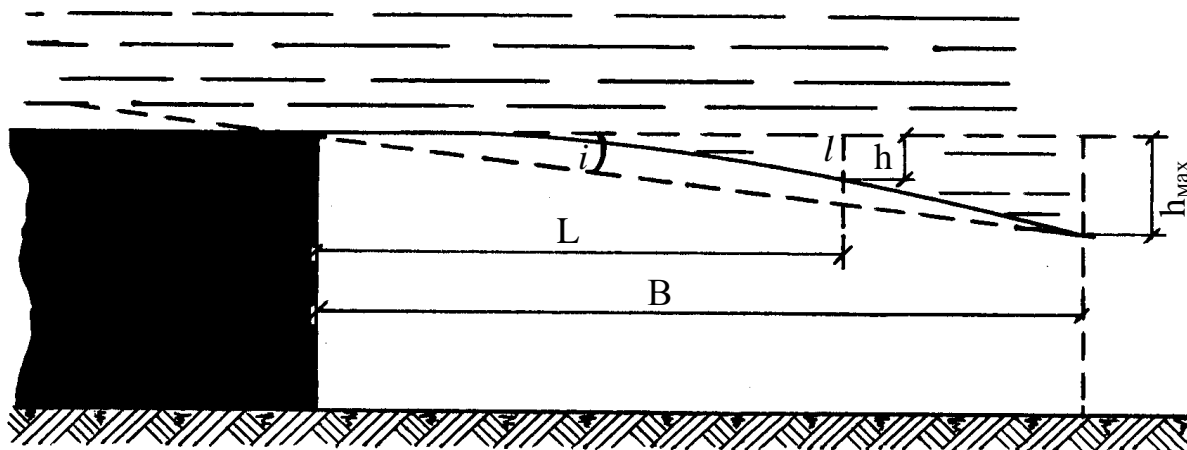


Рис. 10.15. Схема прогиба кровли при глинистых породах

Если допускать, что в некоторой точке, расположенной на расстоянии  $L$  от забоя, податливость крепи составила величину  $l$  и при этом прогиб кровли имеет величину  $h = L \cdot \operatorname{tgi}$  (см. рис. 10.14), то нагрузка на крепь  $P_q$  будет равна

$$P_q = P_0(h-l) = \frac{\gamma H}{h_{\max}}(h-l). \quad (10.10)$$

Следует отметить, что гипотеза ступенчатого опускания имеет ряд совершенно необоснованных допущений: треугольная форма призмы, образование трещин, наклоненных вперед по движению забоя, опускающиеся блоки контактируют только с одной поверхностью  $CD$  и т.д. Основная расчетная формула дает линейную зависимость от глубины и при этом величины  $h$ ,  $h_{\max}$  и  $l$  могут задаваться произвольно. Таким образом, пользуясь рассмотренной гипотезой, нельзя получать достоверные результаты расчета.

**Гипотеза волны давления** была высказана Г. Вебером [179] в 1914 г., исходя из натуральных наблюдений за деформациями крепи и боковых пород в подготовительных выработках (штреках). Эти представления существенно отличаются от гипотез горного давления, рассмотренных выше и, по сути, представляют собой рассмотрение конечных проявлений горного давления в лавах, а не его природу. Г. Вебер предложил различать два вида волнового процесса при очистной выемке угля в лавах: подвижную волну, перемещающуюся

вслед за угольным забоем, и неподвижную – образующуюся при остановке забоя. Немчик и Г. Вебер в работе [179] приводят результаты маркшейдерских измерений в виде затухающей синусоиды с равными длинами волн и затухающими вглубь массива амплитудами колебаний (рис. 10.16).

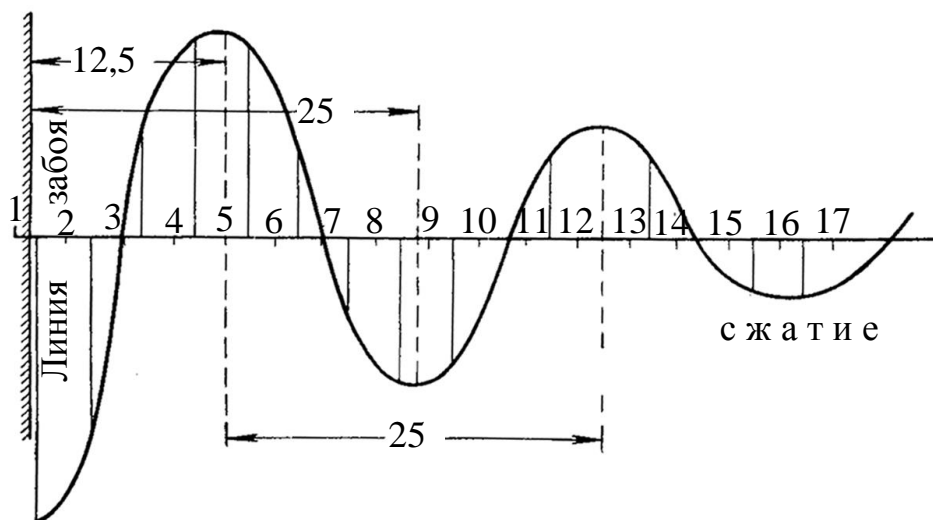


Рис. 10.16. Волна давления по Немчику

При этом измерения проводились не в отношении давлений (напряжений), а в отношении деформаций угольного пласта.

Попытка дать теоретическое обоснование явления волнового давления принадлежит Г. Шпаккелеру [180], в связи с чем эту гипотезу иногда называют его именем.

Многочисленные измерения, выполненные в условиях различных угольных бассейнов, не подтвердили эту гипотезу. Если применительно к смещениям угля, деформациям крепи и почвы штреков при системе разработки с обрушением явление волнообразного проявления горного давления подтверждалось, то в отношении «стоячих» волн подобного сказать нельзя. При плавной же посадке пород кровли волновые процессы, связанные с движением лавы, не наблюдались вовсе.

**Гипотеза радиальных смещений** была предложена К.В. Руппелейтом [162] в 1957 году на основе глубокого анализа всех предшествующих воззрений на природу горного давления в очистных выработках – лавах. Основная расчетная схема к решению задачи приведена на рис. 10.17.



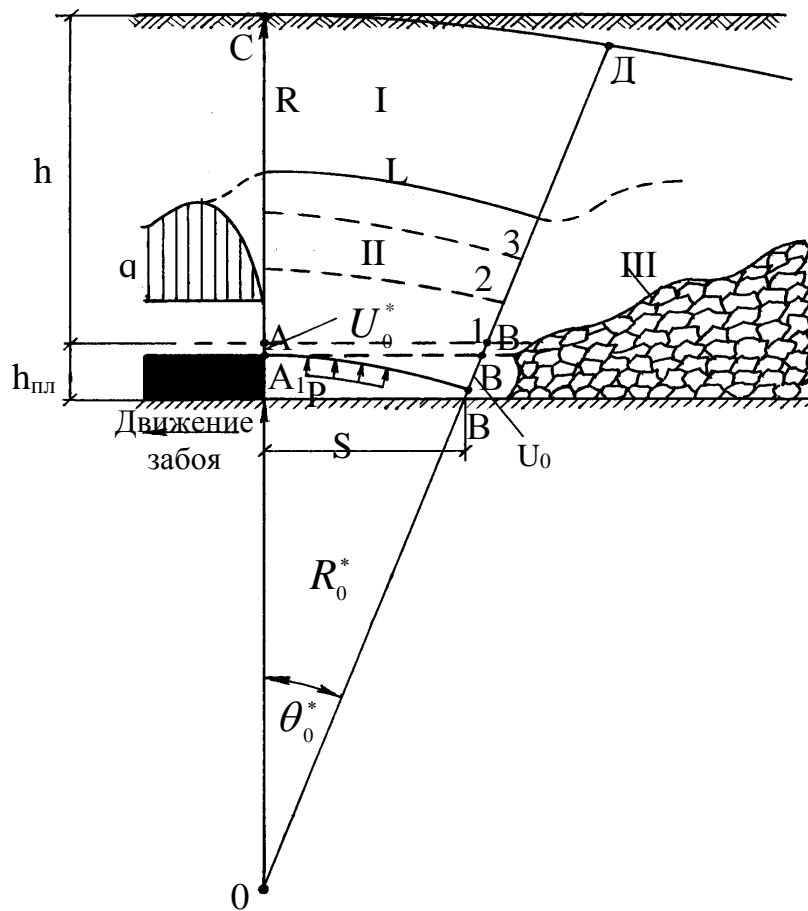


Рис. 10.17. Расчетная схема к решению задачи К.В. Руппенейта:  
 I – зона упругих деформаций; II – зона неупругих деформаций;  
 III – зона обрушенных пород

Решение поставленной автором задачи базируется на следующих предпосылках:

- впереди забоя и в завале образуется опорное давление (зона концентрации напряжений), максимальная величина которого находится на некотором расстоянии от линии забоя по ходу движения лавы;

- опорное давление вызывает разрушение пород кровли, в результате чего они приобретают трещиноватость и практически не способны сопротивляться растягивающим напряжениям;

- в окрестности очистной выработки формируются три основные области напряженных состояний: I – упругих деформаций, II – неупругих деформаций и III – обрушенных пород;

- отдельные слои или группы слоев могут работать как балки с различными опорными условиями;

- крепь выработки может работать в двух основных режимах: заданной нагрузки, когда поддерживаемый крепью объем породы потерял связь с остальным массивом и давит на крепь своим весом, и заданной деформации, когда смещения контура выработки определяются распределением деформаций во всем массиве и мало зависят от реакции крепи, а давление на крепь зависит от величины этих смещений.

Математическое описание процесса смещений кровли и перераспределения напряжений в массиве горных пород при его подработке лавой основано на решении упругопластической задачи (плоская деформация) с применением методов механики сплошной среды, т.е. породы кровли, рассматриваются как сплошная однородная среда.

Основными величинами, характеризующими поведение кровли в пределах рабочего пространства, ширина которого равна  $S$ , являются начальное смещение кровли над забоем  $U_0^*$ , как результат проявления опорного давления в конкретных горногеологических условиях, и конечное смещение  $U_0$  в конце рабочего пространства, величина которого определяется механическими процессами, происходящими в породах кровли и в выработанном пространстве (см. рис.10.17).

Конкретные выражения для определения величин начального и конечного смещений, которые вообще говоря зависят от многих факторов, получены автором на основе теории размерностей с привлечением так называемой  $\pi$ -теоремы. Суть  $\pi$ -теоремы сводится к следующему [181]. Для того, чтобы связь между  $n+1$  размерными величинами

$$a_0 = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$$

имела физической смысл, необходимо, чтобы ее можно было переписать в виде

$$\Pi_0 = \varphi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n),$$

где  $\Pi_i$  – безразмерные комбинации величин  $a_i$ ,  $n$  – число независимых переменных.

Независимость размерностей нескольких величин означает, что ни одна из этих размерностей не может быть выражена через другие размерности при помощи умножения, деления или возведения в степень. Простейшим примером независимых размерностей являются  $L$  (длина),  $M$  (масса) и  $T$  (время), более сложными  $\frac{L}{T}$  (скорость) и  $\frac{ML^2}{T}$

(энергия). Примером зависимых размерностей являются  $L$ ,  $\frac{L}{T}$  и  $\frac{L}{T^2}$ ,

поскольку  $\frac{L}{T^2} = \frac{1}{L} \left( \frac{L}{T} \right)^2$ .

В результате преобразований автором получены следующие формулы для определения основных искомым величин

$$U_0^* = 2h_{nl} \frac{\gamma h}{E_{nl}}, \quad (10.11)$$

$$U_0 = S \sqrt{c \frac{\gamma h}{E} + b_1^2 \left( \frac{\gamma h_{nl}}{E_{nl} S} \right)^2} - b_1 \frac{\gamma h_{nl}}{E_{nl}}. \quad (10.12)$$

Здесь независимыми величинами являются:  $h$  – расстояние от угольного пласта до поверхности земли;  $h_{nl}$  – мощность пласта,  $E$  – модуль упругости пород;  $E_{nl}$  – модуль упругости пласта угля;  $S$  – ширина рабочей зоны;  $\alpha, c, b_1$  – безразмерные коэффициенты, подлежащие определению на основе натуральных измерений (автор приводит методику их определения).

Далее К.В. Руппенейт вводит хорошо обоснованную гипотезу о том, что слои пород над выработкой изгибаются по цилиндрической поверхности с внешним радиусом –  $R_0$  и внутренним –  $R_0^*$ . Рассматривается осесимметричная упругопластическая задача плоской деформации для весомой среды в случае гидростатического начального поля напряжений. Начало полярных координат помещается в т.  $O$  (см. рис. 10.17). Условие прочности для пород кровли в зоне II принимается в форме криволинейной огибающей предельных кругов Мора. При этом полагается, что породы в этой зоне не сопротивляются растягивающим усилиям.

Отпор крепи  $P$  в лаве принят в виде равномерно распределенной нагрузки.

Область разрушенных пород II и область пород, находящихся в упругом состоянии I, разделяет контур  $L$ .

Граничные условия следующие:  $\sigma_r = 0$  при  $R = R_0$  и  $\sigma_r = P$  при  $R = R_0^*$ , на границе  $L$   $\sigma_r^{ynp} = \sigma_r^{nl}$ , где  $\sigma_r$  – радиальные напряжения в полярной системе координат.

В ходе решения задачи определяется напряжения и перемещения в упругой и неупругой областях, смещение кровли в выработке, отпор крепи. При этом рассмотрены случаи одно-, двух – и трехслойной кровли. Сравнение результатов расчетов с данными натуральных наблю-

дений, выполненное автором, показало их достаточно хорошую сходимость.

Из всех гипотез горного давления в очистных выработках, гипотеза К.В. Руппенейта имеет наиболее глубокое обоснование, как с точки зрения теории, так и практического опыта. Правда, и сам автор признает, что разнообразие факторов, влияющих на устойчивость пород кровли настолько велико, что учесть их в пределах рассматриваемой математической модели не представляется возможным. Кроме того, ряд допущений, принятых в ходе построения умозрительной физической модели, вызывает обоснованные возражения.

Так, например, уравнение равновесия, принимаемое автором при условии гидростатического начального поля напряжений, соответствует задаче, симметричной относительно вертикальной оси, а это совсем не соответствует (см. рис. 10.17) расчетной схеме, на которой породный массив справа и слева от выработки существенно отличается по свойствам и геометрическим параметрам. Это обстоятельство могло бы быть учтено дополнительными граничными условиями, но тогда задача вряд ли была бы решена в замкнутом виде.

**Общие выводы.** Главной целью приведенного выше обзора гипотез горного давления и выполненных на их основе теоретических построений было показать, во-первых, каким путем шел поиск решения поставленной задачи на протяжении почти 100 лет и, во-вторых, насколько сложным с точки зрения геомеханики является предмет исследований – очистная выработка, забой которой перемещается в сложноструктурном породном массиве.

Обращает на себя внимание также тот факт, что практически все гипотезы горного давления были предложены, вообще говоря, для частного, а не общего, случая: для лав горизонтальных или пологопадающих месторождений угля. Рассуждение относительно горного давления в лавах крутозалегающих пластов, основанные на предельно простых схемах, приведены у А.А. Борисова [4]. У него же рассматриваются и более сложные задачи наработки и подработки угольных пластов.

Основанием для создания гипотез горного давления послужили натурные наблюдения за поведением породного массива в кровле лав. На основе этих наблюдений разрабатывались умозрительные физические модели, обычно довольно хорошо отражающие действительность. Последующие же попытки описать эти модели математически неизбежно приводили к необходимости такого количества упроще-

ний, что практическая ценность предлагаемых в итоге зависимостей была незначительной.

И, тем не менее, для лав пологозалегающих угольных пластов были установлены некоторые общие положения, отражающие характер и особенности поведения пород кровли при перемещении в пространстве угольного забоя. Наиболее рациональными из них являются следующие:

- в окрестности очистной создается область концентрации напряжений, имеющая значительные размеры;

- эта область перемещается вслед за движущимся забоем лавы, вследствие чего породы кровли приобретают развитую трещиноватость и псевдопластические свойства;

- в породном массиве вокруг выработки образуется три области: неупругих деформаций, упругих деформаций и естественного поля напряжений;

- отдельные слои пород кровли или группы слоев могут быть представлены как балки или плиты с различными условиями опирания;

- крепь очистной выработки может работать в двух режимах: заданной нагрузки и заданной деформации, причем последний случай является более распространенным.

Опираясь на эти положения, К.В Руппенейт предложил гипотезу радиальных смещений пород кровли и разработал соответствующую теорию, применив для этого методы механики сплошной среды. Эта теория, претендуя на общность, описывала опять же некоторые частные случаи проявлений горного давления в лавах пологопадающих пластов.

Видимо следует признать, что получение замкнутых математических решений для такого сложного объекта, каким является очистная выработка, перемещающаяся в породном массиве с неоднородной структурой, невозможно в принципе. Единственный путь, ведущий к эффективному решению поставленной задачи, заключается в разработке и исследовании моделей на основе какого-либо хорошо разработанного численного метода, например, конечных элементов. Разнообразные приложения численных исследований при разработке угольных пластов подземным способом приведены в книгах С.Н. Комиссарова [182], Н.А. Жданкина [183], Л.В. Новиковой [184], Е.А. Сдвижковой и др. [185].

### 10.3. Основные принципы управления горным давлением при ведении очистных работ

При управлении горным давлением в очистных выработках учитывается большое количество разнообразных факторов: состояние пород непосредственной и основной кровли (способность к обрушению, размеры и длительность сохранения устойчивых обнажений), почвы (склонность к пучению), а также особенности применяемой системы разработки, выбросоопасность отрабатываемых пластов, наличие на поверхности охраняемых объектов и т.п.

Степень важности того или иного фактора зависит от конкретных условий: факторы, играющие важную роль в одних условиях, могут оказаться второстепенными в других условиях. В большинстве случаев основным фактором при выборе способа управления горным давлением является способность пород кровли к обрушению. Это обстоятельство положено в основу ряда классификаций, наиболее известной из которых является приведенная ниже классификация, предназначенная для упорядочения выбора способов управления горным давлением в условиях пологих пластов на основных угольных месторождениях Украины, России, Казахстана (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Классификация пород для выбора способа управления горным давлением

<i>Класс пород</i>	<i>Характеристика пород кровли</i>	<i>Характеристика пород почвы</i>
I.	В непосредственной кровле залегает легкообрушаемая порода, состоящая из одного или нескольких слоев мощностью, не меньшей 6-8 кратной мощности разрабатываемого пласта.	Любой устойчивости
II а.	В непосредственной кровле залегает толща легкообрушающихся пород, мощность которых меньше 6-8 кратной мощности разрабатываемого угольного пласта.	Любой устойчивости
II б.	В основной кровле залегает труднообрушающаяся порода или же порода, обрушающаяся спустя некоторое время после подвигания очистного забоя и обнажения значительной площади.	Любой устойчивости
III.	В непосредственной кровле залегает мощный	Любой

<i>Класс пород</i>	<i>Характеристика пород кровли</i>	<i>Характеристика пород почвы</i>
	слой труднообрушающейся породы или же над пластом залегает основная кровля, которая может быть обнажена на значительной площади.	устойчивости
IV.	В непосредственной кровле залегают породы, обладающие способностью плавно опускаться без значительных разрывов и обрушения (при мощности пласта 1м).	Склонные к пучению

Наибольшее распространение при разработке угольных и ряда пластовых рудных месторождений получил способ управления горным давлением путем полного обрушения кровли за пределами охраняемого призабойного пространства.

Осуществляют его периодическим обрушением (посадкой) кровли путем передвижки призабойной крепи. Для регулирования обрушения непосредственной кровли применяют специальную крепь, способную выдержать большие нагрузки, чем обычная крепь. В качестве специальной крепи используют органические стенки, металлические костры, кусты из деревянных или металлических стоек, посадочные элементы механизированных крепей и т.п.

Применение полного обрушения эффективно на тонких и средних пластах полого и наклонного падения при наличии пород I, II, III, IV классов (табл.10.1). Способ частичного обрушения менее эффективен. Его применяют достаточно редко при вмещающих породах II класса. При этом способе управления горным давлением обрушения непосредственной кровли производят между бутовыми полосами, выложенными в выработанном пространстве параллельно простиранию пласта.

Эффективным способом управления горным давлением в очистных выработках является частичная и полная закладка выработанного пространства.

Частичная закладка применяется преимущественно в условиях, когда процесс обрушения пород кровли является труднорегулируемым. Это достигается возведением бутовых полос по простиранию пласта.

Полная закладка выработанного пространства является одним из самых дорогостоящих способов управления горным давлением, по-

этому его применяют крайне редко в тех случаях, когда иные способы являются по определенным причинам неприемлемыми. Такие требования могут возникнуть при послойной отработке пластов и рудных тел, сближенных мощных пластов в восходящем порядке, при необходимости сохранить вышележащие выработки, здания и сооружения на поверхности и в других подобных случаях. Способ закладки выработанного пространства выбирают в зависимости от конкретных условий и поставленных задач.

При разработке пластов мощностью до 1 м и тонких жил, в непосредственной кровле и почве которых залегают породы, отнесенные к IV классу, целесообразно применение способа плавного опускания кровли. Это один из наиболее простых и экономичных приемов управления горным давлением.

В этих же условиях можно применять способ удерживания призабойного пространства на кострах, тогда при пластичных вмещающих породах происходит плавное опускание, а при хрупких и прочных породах - обрушение пород кровли.

При разработке крутых пластов и рудных тел средней мощности основным способом управления горным давлением является полное обрушение с перепуском обрушенных пород с вышележащего горизонта на нижележащий.

#### **10.4. Численное моделирование геомеханических процессов при отработке угольных пластов длинными очистными забоями**

Рассмотренные выше гипотезы горного давления в очистных выработках при отработке пластовых месторождений, в частности месторождений каменного угля, обладают тем недостатком, что расчетные схемы являются плоскими и, следовательно, далеко не в полной мере учитывают сложный трехмерный характер изучаемого объекта. На этом этапе развития геомеханики стало понятным то, что аналитические методы, применяемые в чистом виде, исчерпали свои возможности. На смену им пришли, как было показано ранее, более гибкие и универсальные численные методы, позволяющие исследовать объекты с существенно более сложной геометрией и структурой, в максимальной степени приближенные к реальности. Ниже, на примере отработки полого залегающего угольного пласта, показано решение сложной задачи о взаимном влиянии подготовительных вырабо-



ток и лавы с целью определения нагрузки на крепь штрека в районе сопряжения его с очистной выработкой.

Рассмотрена нестандартная технологическая схема, когда по ряду причин невозможно повторное использование конвейерного штрека одной лавы в качестве вентиляционного штрека следующей лавы. В этом случае вблизи конвейерного штрека с оставлением целика шириной 3-4 м проводят дополнительную выработку для осуществления функций вентиляционного штрека. Такое проведение выработки называют проведением «вприсечку» и саму вновь проведенную выработку называют «присечной». В крайних случаях, при необходимости ускорить подготовку нового выемочного участка, «присечную» выработку проходят двумя встречными забоями, причем так, что один из забоев штрека движется навстречу забою лавы и попадает в зону опорного давления. При этом следует ожидать повышения нагрузки на крепь штрека и разработать соответствующие мероприятия по ее компенсации.

С точки зрения механики горных пород оценка напряженно-деформированного состояния в области породного массива, где имеет место взаимное влияние двух движущихся забоев (лавы и штрека), представляет собой очень сложную задачу. Ее решение осуществляется методом конечных элементов в несколько этапов путем сочетания нескольких расчетных схем и деформационных моделей.

На первом этапе решение осуществляется для трехмерной области, включающей: протяженную выработку – ранее пройденный конвейерный штрек, очистную выработку с учетом образовавшейся зоны обрушенных пород позади забоя лавы, а также забой «присечной» выработки. Расчетная схема исследуемой области и ее конечно-элементная аппроксимация представлены на рис. 10.18 и 10.19.

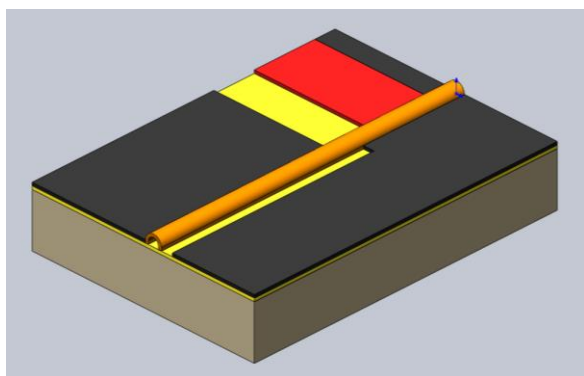


Рис. 10.18. Принципиальная расчетная схема 3D-задачи

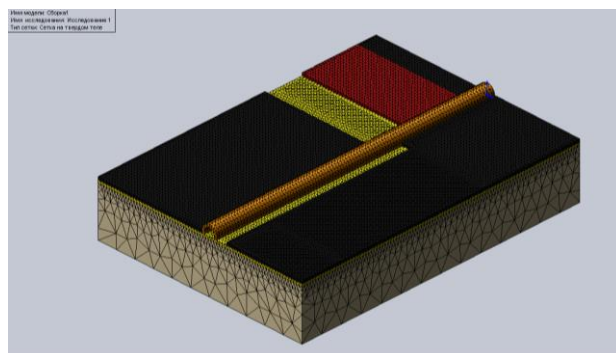


Рис. 10.19. Конечно-элементная аппроксимация исследуемой области

Поскольку моделируется область очень больших размеров (используется более миллиона конечных элементов) решение в 3-D постановке осуществляется на первом этапе в рамках упругой модели среды с помощью программной среды Solid Works. В качестве основного показателя горного давления впереди движущихся навстречу друг другу забоев лавы и штрека, использованы вертикальные нормальные напряжения. На рис. 10.20 и 10.21 показаны в цветовой гамме распределения вертикальных напряжений в различных сечениях 3D-модели.

Анализ напряжений в сечении, перпендикулярном продольной оси штрека (рис.10.20), показал, что наибольшие сжимающие напряжения имеют место в борте «присечного» вентиляционного штрека. В кровле и почве выработки имеют место растягивающие напряжения. В ситуации, когда забой штрека продвинулся за окно лавы, в целике со стороны присечной выработки реализуются растягивающие нормальные напряжения, свидетельствующие об активизации трещинообразования и разрушения. Со стороны ранее проведенной выработки имеют место высокие сжимающие напряжения, достигающие величины  $\sigma_y = 2,5\gamma H$ .

Распределение напряжений в сечении, показанном на рис. 10.20, может быть определено и на основе двумерной модели (рис. 10.22).

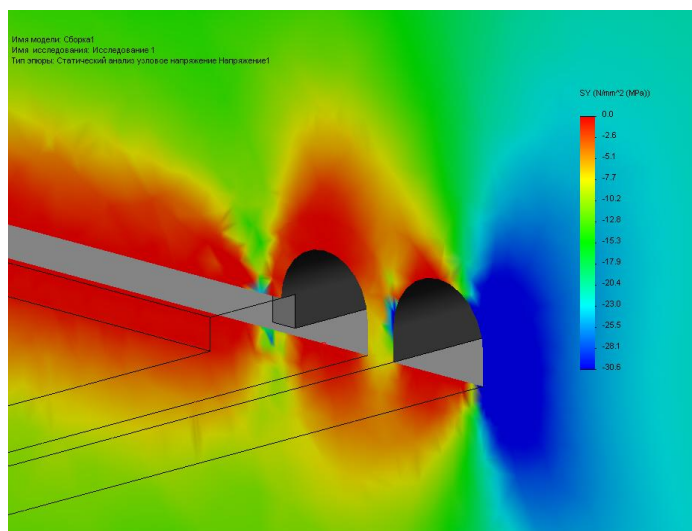


Рис. 10.20. Распределение вертикальных напряжений в зоне взаимного влияния лавы и штрека (поперечное сечение; красная гамма – растягивающие напряжения, темно-синий – высокие сжимающие)

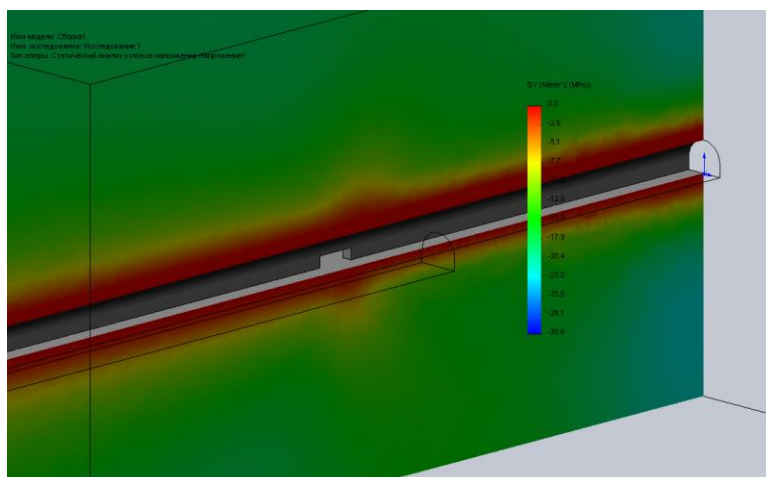


Рис. 10.21. Распределение вертикальных напряжений в продольном сечении области в момент, когда забой штрека прошел за окно лавы

Однако такая расчетная схема не отражает влияние забоев лавы и штрека. Поэтому концентрация напряжений в характерных точках массива (в частности, в целике) меньше, чем полученная в объемной модели и составляет  $\sigma_y = 1,9 \text{ МПа}$ . Таким образом, напряжения, полученные из решения трехмерной и двумерной задачи, в данном случае отличаются в 1,3 раза.

Полученное отличие напряжений использовалось далее в качестве дополнительного граничного условия при решении двумерной задачи, но уже на основе упруго-пластической модели среды. Для этого начальное поле напряжений (19 МПа) увеличено в 1,3 раза. Таким образом, учтено влияние забоя лавы.

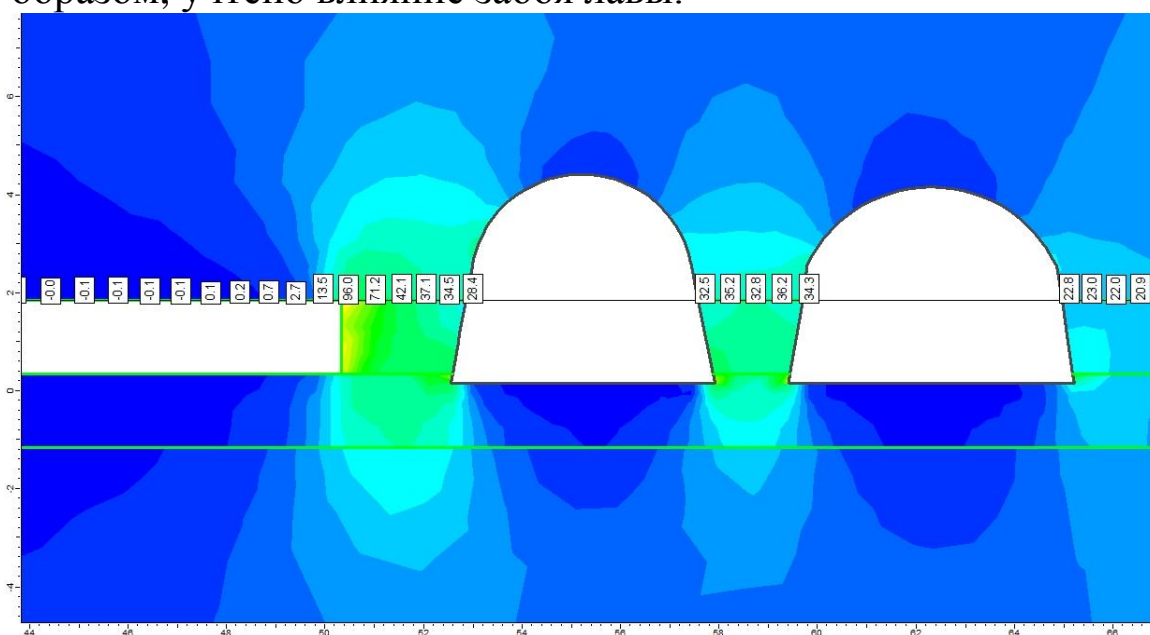


Рис. 10.22. Распределение вертикальных напряжений вокруг выработок в случае, когда окно лавы находится в створе с забоем вентиляционного штрека (двумерная расчетная схема)

Переход к двумерной расчетной схеме позволяет в данной задаче более детально рассмотреть интересующее нас сечение трехмерной области (используется более густая сетка конечных элементов вблизи контуров выработок) и определить напряженно-деформированное состояние приконтурного массиве с учетом образования зоны неупругих деформаций. Напомним, что решение упруго-пластической задачи методом конечных элементов предполагает организацию итерационной процедуры, и для достижения заданной точности предпочтительнее снизить размерность задачи. Этим и вызвана необходимость использования двух расчетных схем – объемной, учитывающей реальную геометрию области, и плоской, позволяющей использование более сложной деформационной модели среды.

В результате решения упруго-пластической задачи с использованием лицензионного программного продукта PHASE-2 на основе критерия прочности Хока-Брауна (см. главу 3) получены зоны неупругих деформаций в окрестности выработок.

На рис. 10.23-10.25 эти зоны показаны в цветовой гамме на разных стадиях формирования во времени выработок при ширине целика между ними 1,5 м.

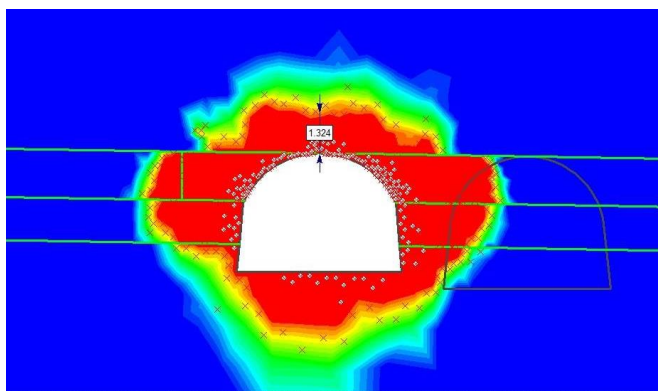


Рис.10.23. Зона неупругих деформаций: стадия 1 – образованный конвейерный штрек

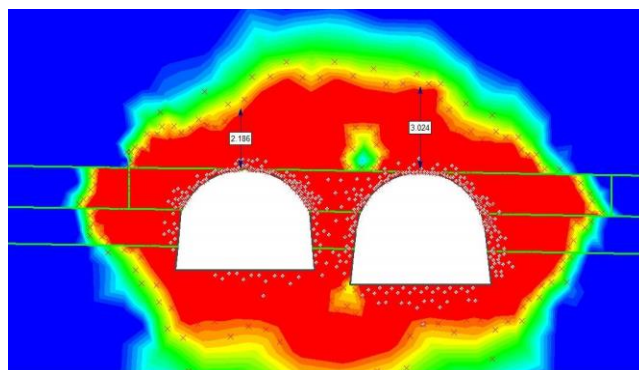


Рис. 10.24. Зона неупругих деформаций: стадия 2 – вприсечку пройден вентиляционный штрек (целик 1,5 м)

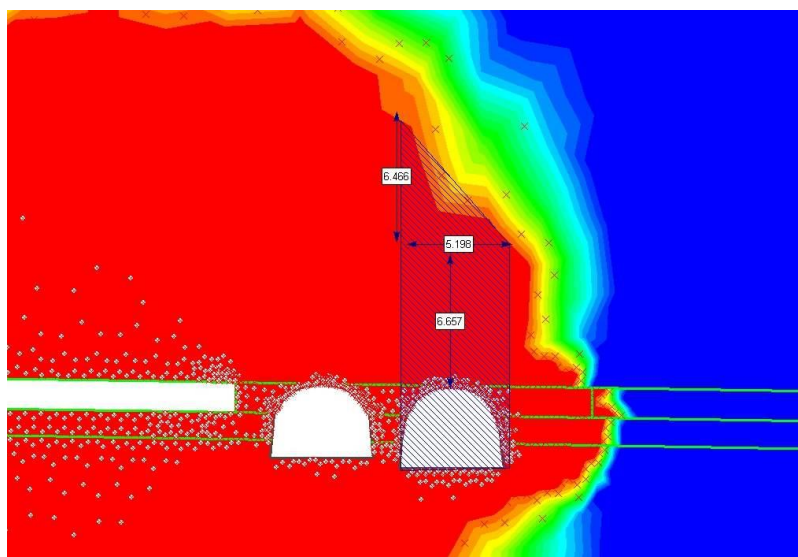


Рис. 10.25. Зона неупругих деформаций: стадия 3 – вентиляционный штрек («присечная» выработка) попадает в створ лавы.

Штриховкой на рис. 10.25 показана площадь зоны неупругих деформаций, которая принимается к расчету для определения нагрузки на крепь.

Нагрузка на крепь штрека определяется как вес пород в пределах зоны неупругих деформаций с учетом коэффициента динамичности, т.е.

$$P = \gamma \cdot S \cdot k_n, \quad (10.13)$$

де  $S$  - площадь зоны разрушения;  $\gamma$  - объемный вес пород;  $k_n$  - коэффициент динамичности. В данном случае нагрузка на крепь составит  $51,3\text{ м}^2 \cdot 22\text{ кН/м}^3 = 1130\text{ кН/м}$ . С учетом коэффициента динамичности  $k_n = 2,0$ , получим  $2260\text{ кН/м}$ .

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. В чем состоит задача управления горным давлением в очистных выработках?
2. Что называют непосредственной, основной и ложной кровлей в лавах?
3. Что такое шаг начального и установившегося обрушения?
4. Что такое непосредственная, основная и ложная почва?
5. Что называют зоной влияния выработки, зоной опорного давления и зоной разгрузки?
6. Изложите суть гипотезы свода давления по представлениям В. Хаака и Ф. Шпрута.

7. Изложите основные положения гипотезы консольных балок в представлениях И. Шпарре и А. Шульца.
8. Изложите основные положения гипотезы консольных плит Ф.А. Белаенко.
9. Изложите основные положения гипотезы консольной плиты Г. Кегеля.
10. Изложите основные положения гипотезы стадийного обрушения А.А. Борисова.
11. Изложите основные положения гипотезы балочного разрушения Г.Н. Кузнецова.
12. Изложите основные положения гипотезы предварительного разрушения пород кровли А.Лабасса.
13. Изложите основные положения гипотезы сыпучей среды Ф. Ван-Итерсона.
14. Изложите основные положения гипотезы ступенчатого опускания П.М. Цимбаревича.
15. Изложите основные положения гипотезы волны давления Г. Вебера-Г. Шпаккелера.
16. Изложите основные положения гипотезы радиальных смещений К.В. Руппенейта.
17. Какие факторы влияют на размеры зоны опорного давления?
18. Какими методами оценивается напряженно-деформированное состояние вокруг очистных выработок?
19. Какие существуют способы управления горным давлением при разработке пластовых месторождений с помощью лав?
20. Как осуществляется управление горным давлением в лавах с помощью закладки выработанного пространства?
21. Какими возможностями располагают современные программные комплексы при решении задач геомеханики?
22. Каким образом при исследовании плоских численных моделей можно учесть фактическую трёхмерность задачи?