

ГЛАВА 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

6.1. Гипотеза свода естественного равновесия

**6.2. Гипотеза взаимодействия крепи и
породного массива**

**6.3. Гипотеза сводообразования в условиях
взаимодействия крепи с породным контуром**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Основным элементом, обеспечивающим безопасность работающих под землей людей, является горная крепь. Расчет крепи сводится, как правило, к определению либо ее толщины, либо типоразмера прокатного профиля и количества рам, устанавливаемых на 1 м выработки. В любом случае предполагается известной величина нагрузки на крепь, которую нередко называют горным давлением в узком понимании этого термина. Задача определения нагрузки на крепь горных выработок является одной из основных в механике горных пород.

Известно большое количество гипотез, на основе которых выполняются исследования, конечным итогом которых являются теории горного давления и, как следствие, методики оценки давления горных пород на крепь протяженных выработок. Каждая гипотеза претендует на универсальность решения, однако практика показывает, что в лучшем случае можно говорить лишь о некотором диапазоне горно-геологических условий, в пределах которого оправдывается та или иная исходная предпосылка. Это связано с большой сложностью и многообразием факторов, влияющих на характер проявлений горного давления.

В настоящее время все известные теории горного давления в зависимости от методов, лежащих в их основе, можно разделить на три группы.

Первая группа характеризуется тем, что давление на крепь рассматривается как внешняя нагрузка, величина которой не зависит от конструкции крепи, режима ее работы, глубины заложения, а является лишь функцией механических свойств горных пород и размеров выработки. Методы расчета крепей в такой постановке называют **методами расчета по заданной нагрузке**.

Вторая группа характеризуется тем, что давление на крепь рассматривается не как внешняя нагрузка, а как результат взаимодействия крепи и боковых пород. Величина нагрузки на крепь является функцией величины конструктивной податливости (деформируемости) крепи. Эти методы называют **методами расчета по заданным деформациям**.

Первая группа гипотез и расчетных методов базируется на положениях и соотношениях строительной механики. В ее основе лежат

достаточно простые модели. Теоретические исследования, относящиеся к первой группе гипотез нашли отражение в работах М.М. Протодяконова, П.М. Цимбаревича, В.Д. Слесарева, Р. Квапила и др.

Вторая группа теории горного давления исторически сложилась позднее, она основывается на методах механики сплошной среды, в том числе и реологии. Расчетные схемы и исходные соотношения, на которых они базируются, значительно ближе отражает природу и механизм процессов, происходящих в окрестности горных выработок. Наиболее полно это направление представлено в работах: Р. Феннера, А. Лабасса, К.В. Руппенейта, Ж.С. Ержанова и др.

Третья группа гипотез горного давления объединила достоинства двух первых подходов. В соответствии с последними представлениями деформируемость, или конструктивная податливость, крепи является функцией перемещений контура выработки, зависящих от глубины расположения выработки, прочности и структуры вмещающих пород, а нагрузка на крепь определяется размерами зоны неупругих деформаций, зависящими от тех же факторов. Впервые такой подход был предложен Ю.М. Либерманом [9]. Расчеты величины нагрузки на крепь, выполненные на основе методов третьей группы, достаточно близко совпадают с натурными измерениями.

По аналогии со сказанным выше, методы третьей группы можно назвать **методами расчета по заданным деформациям и нагрузкам.**

6.1. Гипотеза свода естественного равновесия

Первые аналитические методы определения нагрузки на крепь горизонтальных групп выработок основывались на так называемой гипотезе свода естественного равновесия. В соответствии с гипотезой полагалось, что в кровле выработки образуется свод естественного равновесия в пределах которого горные породы полностью разрушены, обладают свойствами сыпучей среды, а их вес создает нагрузку на крепь.

Образование сводов при обрушении кровли выработок, наблюдаемое на практике, послужило основой для теоретических разработок с целью определения нагрузки на крепь. Большие исследования в этом направлении были выполнены М.М. Протодяконовым, П.М. Цимбаревичем, Н.П. Покровским, В.Д. Слесаревым,

В.В. Орловым, Р. Квапилом, В. Риттером и другими учеными. Они отличались подходами к оценке формы свода, свойств вмещающих пород, различным учетом горно-геологических условий. Наиболее представительными из этой группы являются теории горного давления М.М. Протодяконова и П.М. Цимбаревича.

Теория М.М. Протодяконова [121]. На глубине H от поверхности рассматривается горизонтальная длинная выработка с сечением прямоугольной формы шириной $2a$ (рис. 6.1,а). Над выработкой в соответствии с гипотезой образуется свод естественного равновесия высотой b . Породы в пределах свода полностью разрушены, не имеют сцепления, но обладают внутренним трением. Возведение крепи в выработке не препятствует образованию свода естественного равновесия.

Задача состоит из двух частей:

- определение формы кривой свода;
- определение его высоты.

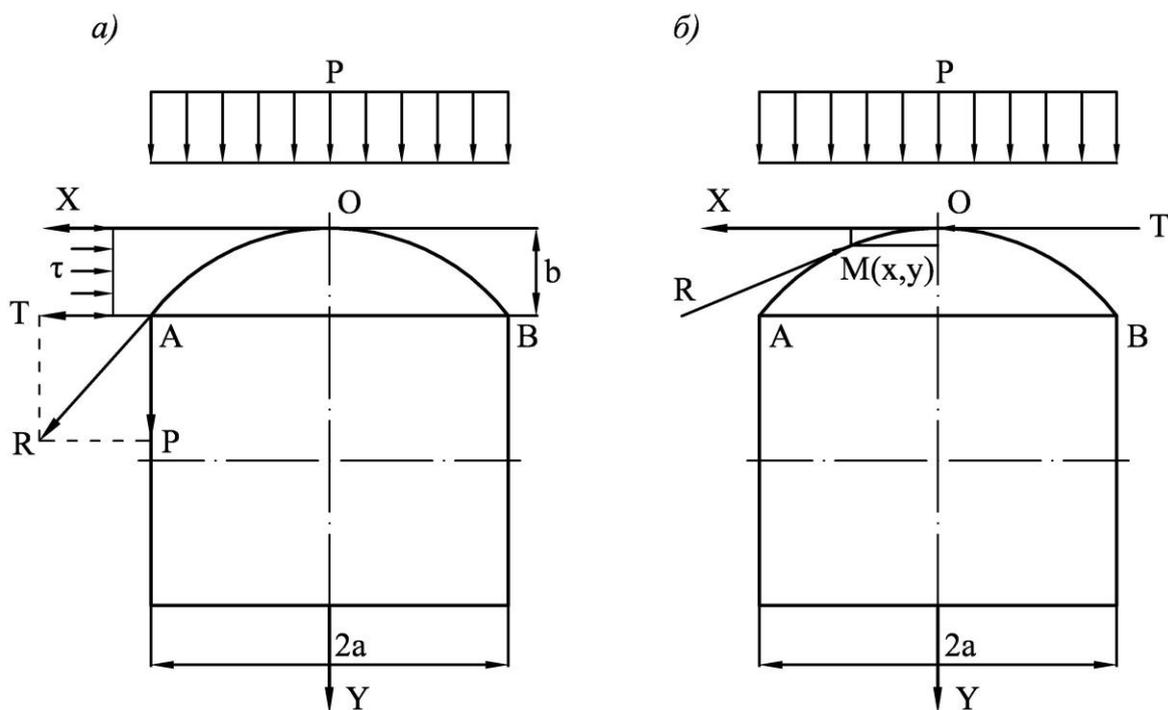


Рис. 6.1. Схема к расчету нагрузки на крепь по М.М. Протодяконову

Для решения первой части задачи поместим начало координат в ключ свода и рассмотрим равновесие дуги OM . Отброшенные части свода OB и AM заменим реактивными силами T и R . Поскольку рассматривается среда без сцепления, силы T и R направлены по касательным к кривой свода равновесия.

Беря сумму моментов относительно точки M , получим

$$Ty - \frac{px^2}{2} = 0, \quad (6.1)$$

откуда вытекает уравнение кривой

$$y = \frac{px^2}{2T}. \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) является уравнением параболы.

Для решения второй части задачи рассмотрим условие равновесия в точке A пяты свода (рис.6.1,б).

Горизонтальная составляющая опорного давления T (распор) вызывает перемещение точки A влево. Препятствует этой силе – трение, величина которого равна fP , где f – коэффициент внутреннего трения. По условию симметрии задачи $P=pa$. Устойчивое равновесие пяты свода (точка A) будем иметь место в том случае, если

$$T + k = fpa, \quad (6.3)$$

где k – некоторая сила, характеризующая запас устойчивости.

Сила k рассматривается М.М. Протодьяконовым в виде распределенной нагрузки τ , направленной в сторону свода (см. рис. 6.1,б).

$$k = \tau b. \quad (6.4)$$

Сила T с учетом зависимости (6.2) равна

$$T = \frac{pa^2}{2b}. \quad (6.5)$$

Подставляя выражения (6.5) и (6.4) в (6.3), получим

$$\frac{pa^2}{2b} + \tau b = fpa. \quad (6.6)$$

По М.М. Протодяконову запас устойчивости будет наибольшим, если τ будет иметь максимальное значение. Поэтому, решая уравнение (6.6) относительно τ и исследуя его на максимум, получим

$$b = \frac{a}{f}. \quad (6.7)$$

Таким образом, высота свода естественного равновесия равна частному от деления полупролета выработки на коэффициент трения. Это основной вывод теории М.М. Протодяконова. Для использования полученных зависимостей в связных породах, по М.М. Протодяконову, достаточно заменить в формулах величину f коэффициентом крепости той или иной породы.

Вес пород, оказывающих давление на крепь на длине 1 м выработки, определяется из условия

$$Q = \frac{2}{3} 2ab\gamma = \frac{4}{3} \gamma \frac{a^2}{f}, \text{ кН.} \quad (6.8)$$

Давление на одну раму при шаге установки крепи равном l

$$Q_1 = \frac{4}{3} \gamma \frac{a^2}{f} l, \text{ кН.} \quad (6.9)$$

Как следует из формул (6.8) и (6.9), давление на крепь выработки не зависит от глубины расположения ее от поверхности земли. Фактические же измерения величины давления на крепь выработок показывают, что с глубиной давление на крепь возрастает по некоторому нелинейному закону. Кроме того, разрушение вмещающих пород имеет место не только в кровле, но и в боках выработки и даже в почве. В этой связи теория горного давления М.М. Протодяконова пригодна для расчетов нагрузки на крепь при небольших (до 70 – 100 м) глубинах разработки.

Теория П.М. Цимбаревича. Очевидное несоответствие представлений М.М. Протодяконова реально происходящим процессам формирования нагрузки на крепь горных выработок побудило П.М. Цимбаревича предложить новую, более современную на то время, теорию горного давления.

В соответствии с его представлениями в кровле выработки образуется свод естественного разрушения, размеры которого выходят за пределы выработки на величину $2c$ (рис. 6.2). При этом пролет нового свода равняется $2a+2c$.

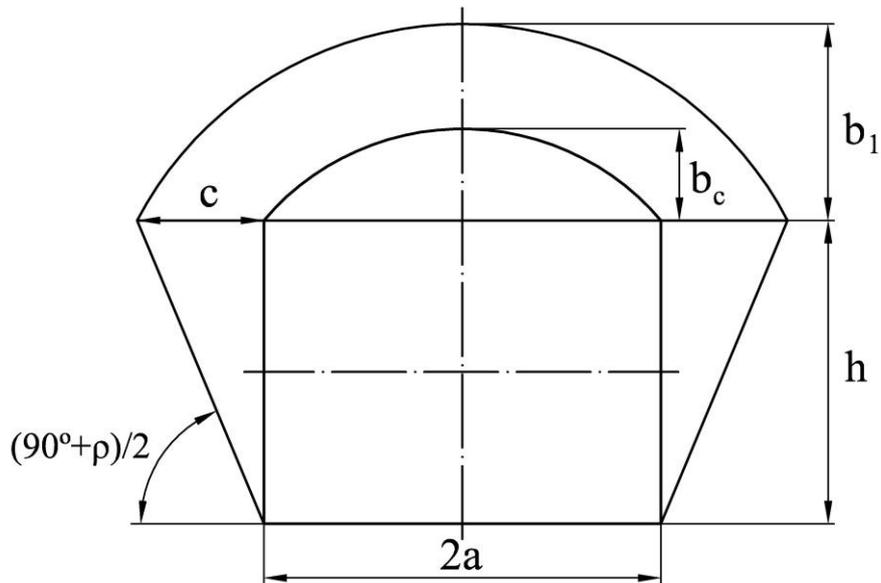


Рис. 6.2. Расчетная схема к задаче П.М. Цимбаревича

Породы под опорами свода разрушаются, в боках выработки образуются призмы сползания, создающие боковое давление на стойки крепи. Высота призм сползания равна высоте выработки h , а угол наклона плоскостей

сползания равен $\frac{90^0 + \rho}{2}$, где ρ – угол внутреннего трения вмещающих пород. В соответствии со схемой получим:

$$c = h \operatorname{ctg} \frac{90^0 + \rho}{2}, \quad (6.10)$$

тогда

$$b_1 = \frac{a + c}{f} = \frac{a + h \operatorname{ctg} \frac{90^0 + \rho}{2}}{f}. \quad (6.11)$$

При расчете верхняка крепи вертикальную нагрузку принимают равномерно распределенной, определяемой высотой свода b_1 , т.е.

$$Q = 2ab_1\gamma. \quad (6.12)$$

Как видно из формулы (6.12), давление на крепь также не зависит от глубины заложения выработки, хотя исходные предпосылки теории основаны на том, что приконтурный породный массив разрушен вследствие превышения его прочности уровнем действующим напряжений, т.е. $k\gamma H > R_c k_c$. Здесь k – коэффициент концентрации напряжений.

Областью применения зависимостей, предложенных П.М. Цимбаревичем, являются глубины от 100 до 250 м с коэффициентом крепости пород по М.М. Протодяконову, равным 3-6.

6.2. Гипотеза взаимодействия крепи и породного массива

П.М. Цимбаревич одним из первых обратил внимание на взаимосвязь между нагрузкой на крепь горных выработок и величиной ее податливости. В 1948 году им опубликована работа [122], в которой впервые были сформулированы положения так называемой энергетической теории горного давления. Сущность теории, основанной на законах термодинамики, сводится к следующему. После того как в выработке установлена крепь, возникает замкнутая система «крепь-обнажение», обладающая определенной внутренней энергией. С течением времени происходит перераспределение энергии в системе, которое может привести как к равновесию, так и к разрушению крепи.

Другие, более поздние исследования, развивающие идею взаимодействия крепи и боковых пород, основывались на том, что нагрузка на крепь является функцией ее податливости и пластических перемещений породного массива в области неупругих деформаций.

Наиболее известные исследования в этом направлении принадлежат А. Лабассу, Р. Феннеру, позднее К.В. Руппенейту и многим другим ученым.

Теория А. Лабасса [123]. В работе А. Лабасса рассматривается длинная горизонтальная выработка, имеющая круговое очертание поперечного сечения с радиусом R_0 , и расположенная на глубине H от земной поверхности в изотропном однородном породном массиве с объемным весом γ . К контуру выработки приложена равномерно распределенная нагрузка интенсивностью p_0 , равной отпору крепи. Уровень напряжений, действующих в окрестности выработки, таков, что вокруг нее образуется замкнутая область разрушенных пород, которые рассматриваются как среда, лишенная сцепления и обладающая внутренним трением. Начальное поле напряжений полагается гидростатическим. Расчетная схема задачи полностью соответствует рис. 4.11.

Уравнения равновесия и условие прочности для области неупругих деформаций имеют вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0, \quad (6.13)$$

$$\sigma_\theta = A\sigma_r, \quad (6.14)$$

где $A = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}$.

Здесь и далее все величины, имеющие размерность длины, отнесены к радиусу выработки R_0 . Подставив значение σ_θ из (6.14) в (6.13), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - (A - 1)\frac{\sigma_r}{r} = 0, \quad (6.15)$$

решение которого имеет вид:

$$\sigma_r = C \cdot r^{A-1}. \quad (6.16)$$

Здесь C – произвольная постоянная интегрирования, которую найдем из граничного условия на контуре выработки:

$$\sigma_r = p_0 \text{ при } r=1, \text{ т.е. } C = p_0 \quad (6.17)$$

Окончательно имеем:

$$\sigma_r = p_0 r^{A-1}, \quad (6.18)$$

$$\sigma_\theta = A p_0 r^{A-1}. \quad (6.19)$$

Условие совместности деформаций для рассматриваемой полярно-симметричной задачи следующее:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = 2\gamma H. \quad (6.20)$$

Подставляя значения компонентов напряжений (6.18) и (6.19) в выражение (6.20), получим при $r=r_L$ расчетную формулу для определения нагрузки на крепь выработки

$$p_0 = (1 - \sin \rho)\gamma H \left(\frac{R_0}{R_L} \right)^{\frac{2\sin \rho}{1 - \sin \rho}}. \quad (6.21)$$

В результате неупругого расширения пород в пластической области площадь поперечного сечения уменьшается на величину ΔS , которая по А. Лабассу может быть определена по формуле

$$\Delta S = \pi(R_L^2 - R_0^2) \cdot (k_p - 1). \quad (6.22)$$

Из (6.22) получим выражение для определения радиуса зоны неупругих деформаций

$$R_L = \sqrt{\frac{\pi R_0^2 (k_p - 1) + \Delta S}{\pi (k_p - 1)}}. \quad (6.23)$$

Величина податливости ΔS по конструктивным соображениям принимается равной $(0,16-0,26)S_{св}$ ($S_{св}$ – площадь поперечного сечения выработки в свету), коэффициент разрыхления k_p – равным 1,1 [84].

На рис 6.3. приведены кривые, построенные по формуле (6.21) для кваршлага диаметром 4 м, пройденного на глубине 1000 м, показывающие изменение величины нагрузки на крепь в зависимости от размера зоны неупругих деформаций.

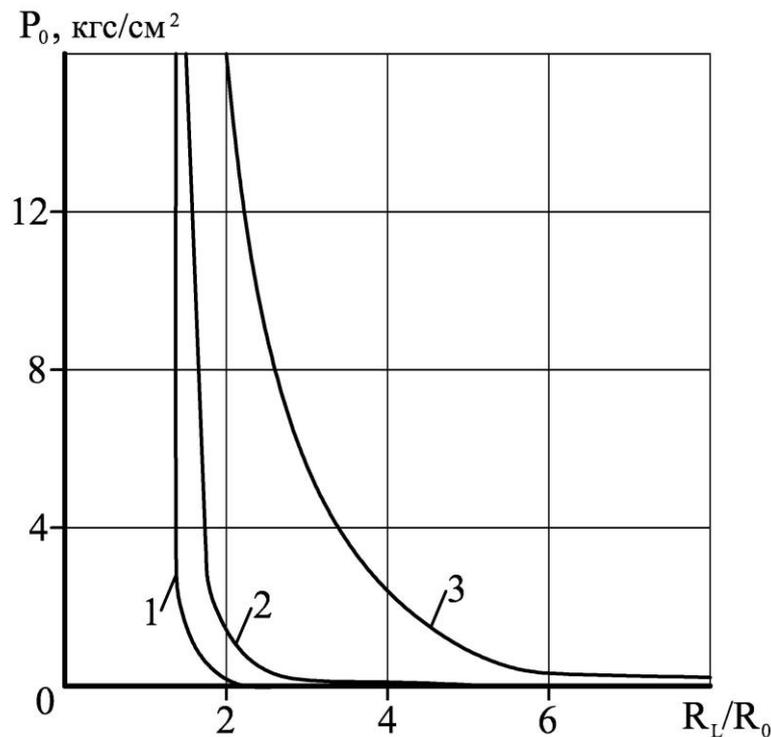


Рис. 6.3. График зависимости давления на крепь от размера зоны неупругих деформаций по А. Лабассу: 1 - песчаник $\rho=54^0$; 2 - крепкий сланец $\rho=46^0$; 3 - сланец средней крепости $\rho=37^0$

Из рисунка следует весьма спорный вывод о том, что нагрузка на крепь падает с увеличением зоны неупругих деформаций. По мнению А. Лабасса, это происходит в результате того, что разрушенные породы в пределах области неупругих деформаций образуют вокруг выработки своеобразный щит, оказывающий сопротивление нагрузки со стороны деформированной части массива. Причем, действие его тем эффективнее, чем больше размер области разрушенных пород.

6.3. Гипотеза сводообразования в условиях взаимодействия крепи с породным контуром

Несмотря на ряд необоснованных допущений, трактовка механизма возникновения и условия существования равновесия в системе «крепь-породный массив», изложенная А. Лабассом свыше 60 лет назад, представляла собой крупный шаг в области теории горного давления. Это, по сути дела, было первое, ставшее широко известным, теоретическое обоснование целесообразности применения податливых конструкций крепи.

Позднее появились решения, учитывающие статическое начальное поле напряжений (К.В. Руппенейт [124]), возможность применения иных условий разрушения среды, наличие переменного коэффициента разрыхления пород в пластической области (В.В. Виноградов, А.Г. Протосеня и др.) и т.д.

Общим для всех задач этого класса являлось то, что исходная физическая модель представляла, по сути, невесомую пластинку с вырезом, нагруженную внешним и внутренним давлением. Допущение о невесомости среды было вполне оправдано при решении упругих задач подобного рода, когда напряжения, действующие в породном массиве, не превышают его прочности. При образовании же пластической области напряжения внутри ее становятся сравнимыми с собственным весом пород. Задача перестает удовлетворять исходным предпосылкам и нужны новые гипотезы и допущения, позволяющие получить достаточно точное ее решение. Такой подход впервые был предложен и реализован Ю.М. Либерманом [9].

Суть его заключается в том, что из решения упругопластической задачи определяются перемещения на контуре выработки U_0 , величина которых зависит от размера зоны неупругих деформаций R_L . Крепь должна иметь конструктивную податливость не меньше U_0 . После образования зоны неупругих деформаций полуразрушенные породы над выработкой обрушаются и создают нагрузку p_0 на крепь. Обрушение пород по Ю.М. Либерману происходит по вертикальным поверхностям и ограничивается контуром, разделяющим упругую и неупругую области (рис. 6.4.). Это очень похоже на образование свода естественного равновесия. В этой связи излагаемый поход и получил название по заданным деформациям и нагрузкам.

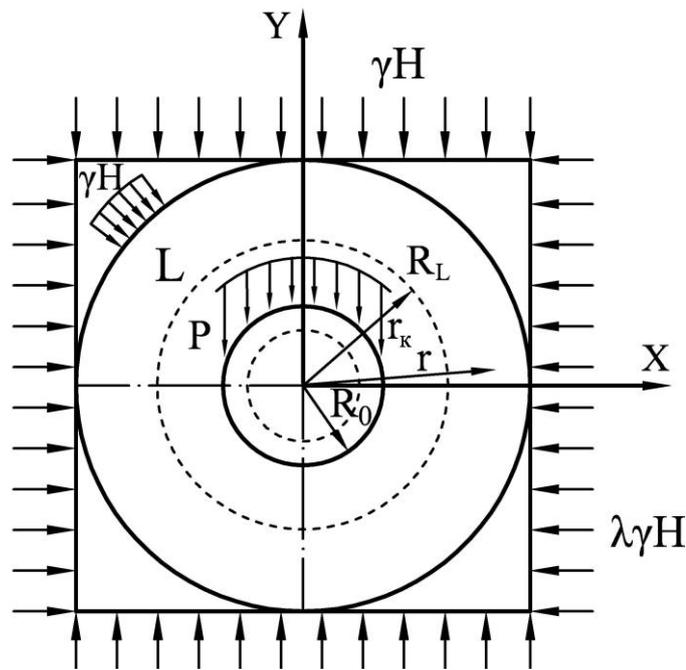


Рис. 6.4. К определению нагрузки на податливую крепь горизонтальной выработки (по Ю.М. Либерману)

Зависимость $U_0=f(p_0)$ имеет следующий вид

$$U_0 = a \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{\beta_1 \gamma H + R_c}{\beta_2 + 2} \cdot \left[\frac{2\gamma H - R_c}{(\beta_1 + 2)p_0} \right]^{\beta_2} \cdot R_0 \quad (6.24)$$

где U_0 – радиальные смещения контура выработки, a – реологический параметр, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга.

$$\beta_1 = \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho_1}; \beta_2 = \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho_2} \quad (6.25)$$

ρ_1 и ρ_2 – угол внутреннего трения соответственно упругой и неупругой областей породного массива, p_0 – реакция крепи, R_0 – радиус выработки. Графически зависимость (6.24) представлена кривой 1 на рис. 6.5.

Анализ ее показывает, что рост смещений при уменьшении отпора крепи неограниченно возрастает. Однако, при значительной податливости крепи смещения пород могут закончиться отрывом некоторой части пород кровли, т.е. образованием свода обрушения, который имеет вертикальные плоскости ограничения. Нагрузка на крепь при этом будет равна весу пород, которые заключены в объеме свода обрушения, шириной, равной ширине выработки, и высотой – от кровли выработки до границы, разделяющей упругую и неупругую области.

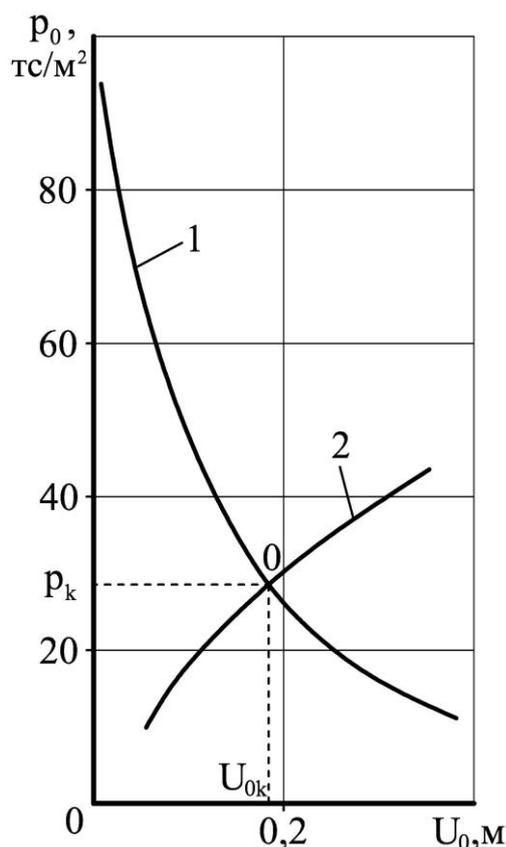


Рис. 6.5. График к определению характеристики крепи

Вес пород в своде обрушения пропорционален величине смещения пород на контуре выработки и выражается кривой 2 рис. 6.6. Точка O пересечения кривых 1 и 2 по Ю.М. Либерману [9] обеспечивает оптимальные параметры крепи: ее грузонесущую способность p_k и податливость U_{0k} . Расчеты, выполняемые по изложенной методике, дают результаты достаточно близкие к измеряемым в натуральных условиях, хотя исходные предпосылки, такие, как представление разрушенных пород в окрестности выработки в виде сыпучей без сцепления среды, условие ее несжимаемости в процессе деформирования явно не соответствуют действительности.

На основе предпосылок, сформулированных Ю.М. Либерманом, аналогичная задача была решена в работе [104]. Породный массив в окрестности выработки рассматривался, как среда, разупрочняющаяся в процессе «жесткого» деформирования по нелинейному закону

$$f(r) = \frac{A}{r^2} - B, \quad (6.26)$$

где $f(r)$ – функция изменения прочности породного массива на одноосное сжатие от контура выработки до контура L , разделяющего упругую и пластическую области; A и B – коэффициенты, равные:

$$A = \frac{r_L^2}{1 - r_L^2} (1 - k_{ост});$$

$$B = \frac{r_L^2 - k_{ост}}{1 - r_L^2}.$$
(6.27)

Здесь r_L – безразмерный радиус области пластических деформаций ($r_L = \frac{R_L}{R_0}$), $k_{ост}$ – коэффициент остаточной прочности, равный отношению предела прочности на одноосное сжатие пород на контуре выработки $R_c^{ост}$ к пределу прочности на одноосное сжатие пород в упругой области R_c . Величина $k_{ост}$ получается на основе диаграмм « R_c - ε », получаемых в процессе испытания породных образцов на так называемых «жестких» испытательных устройствах. Изменение предела прочности на одноосное сжатие в окрестности выработки в соответствии с формулой (6.26) приведено на рис. 6.6.

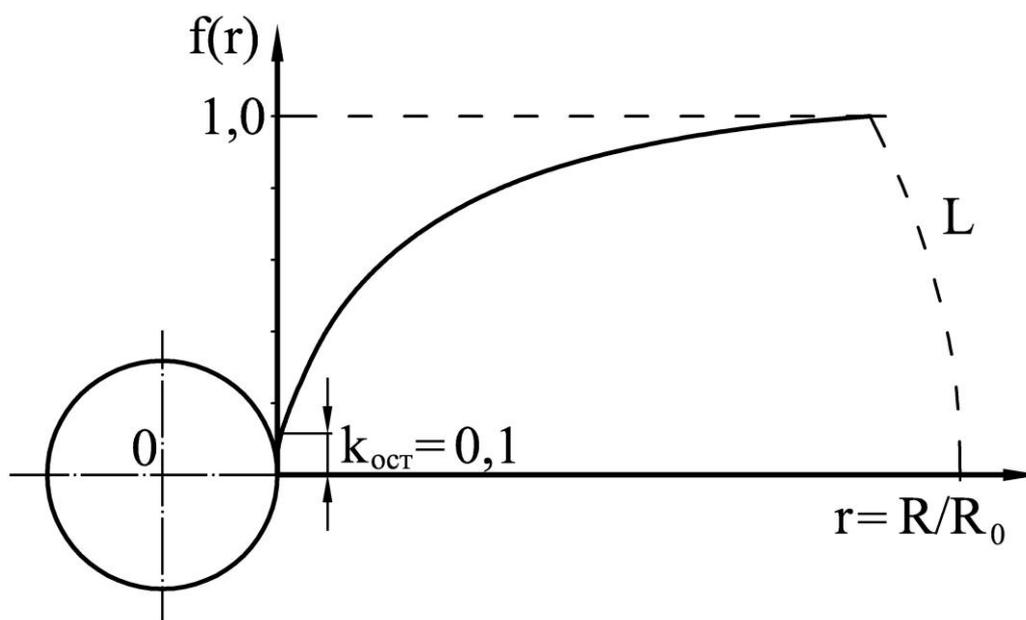


Рис. 6.6. Изменение прочности горных пород на одноосное сжатие в окрестности выработки

Натурные исследования, выполненные Б.А. Картозией [2] и В.В. Виноградовым [43] подтвердили справедливость зависимости (6.24). Следует отметить также, что в расчетах для углевмещающих пород величину $k_{ост}$ с достаточной точностью можно принимать равной 0,1.

В своем решении Ю.М. Либерман [9] полагал, что породная среда в пластической области несжимаема. Математически для задачи плоской деформации это отражается следующим уравнением:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0, \quad (6.28)$$

где ε_r , ε_θ – соответственно компоненты радиальных и тангенциальных относительных деформаций.

Реальные же горные породы следует рассматривать как среду, разрыхляющуюся (дилатирующую) в процессе «жесткого» нагружения. Это обстоятельство учитывается тем, что уравнение (6.28) записывается в следующем виде:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \varepsilon_v(\bar{\varepsilon}_v, r), \quad (6.29)$$

где $\bar{\varepsilon}_v$ – максимальная величина относительного объемного разрыхления, определяемая в ходе испытания породных образцов на специальных прессах, r – координата.

С учетом отмеченных выше особенностей в [38] получены следующие выражения для определения радиуса области неупругих деформаций

$$\frac{r_L^2 \ell n r_L}{r_L^2 - 1} = \sqrt{\frac{\gamma H}{2R_c k_c}} - \frac{1}{2}, \quad (6.30)$$

радиальных смещений контура выработки (податливости крепи)

$$U_0 = \bar{\varepsilon}_v \left(\frac{r_L^2 \ell n r_L}{r_L^2 - 1} - \frac{1}{2} \right) \quad (6.31)$$

или

$$U_0 = \bar{\varepsilon}_v \left(\sqrt{\frac{\gamma H}{2R_c k_c}} - \frac{1}{2} \right)$$

и нагрузки на крепь выработки

$$p_0 = \gamma R_0 (r_L - 1) l \quad (6.32)$$

где l – шаг крепи.

Формулы (6.30-6.32) получены при условии, что отношение $\frac{\gamma H}{R_c k_c} \geq \frac{1}{2}$ и $\bar{\varepsilon}_v \approx 0,08 - 0,016$.

Расчеты, выполненные на основе зависимостей (6.30) – (6.32), показали достаточно хорошее их соответствие результатам натуральных измерений.

6.4. Определение нагрузки на крепь по результатам численного моделирования

Задачи по определению нагрузки на крепь горизонтальных выработок, рассмотренные выше, были поставлены и решены применительно к однородному породному массиву. Реальная же породная среда чаще всего обладает слоистостью, неоднородностью структуры, а выработка, пройденная в ней – более сложным, чем в проекте, контуром. В этом случае более адекватные решения могут быть получены путём исследования численных моделей.

На рис.6.7 показана схема к решению такой задачи и конечно-элементная сетка исследуемой области применительно к горно-геологическим условиям проходки 167-го сборного штрека «Степная» ПАО «ДТЭК- Павлоградуголь» до попадания его в зону влияния очистных работ. Начальное поле напряжений принято гидростатическим и составляет $\sigma_y = \sigma_x = \gamma H_p = 15 \text{ МПа}$

На рис. 6.8 приведены результаты вычисления перемещений контура выработки, а на рис.6.9 – конфигурация зоны неупругих деформаций. Заштрихованная часть этой зоны над выработкой образует нагрузку на крепь на 1 м выработки, которая определяется по формуле

$$Q = \gamma * S, \quad (6.33)$$

где S , м² площадь зоны неупругих деформаций над выработкой, создающая нагрузку, γ - удельный вес пород, кН/м³.

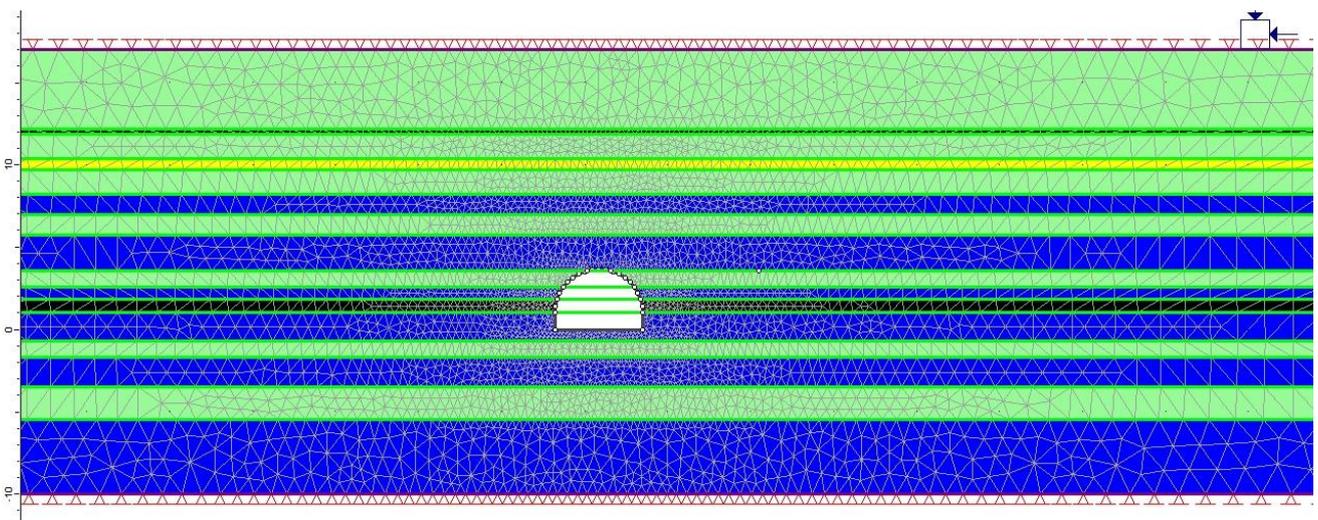


Рис. 6.7. Расчетная схема и конечноэлементная аппроксимация области для решения задачи об необходимой жёсткости крепи выработки

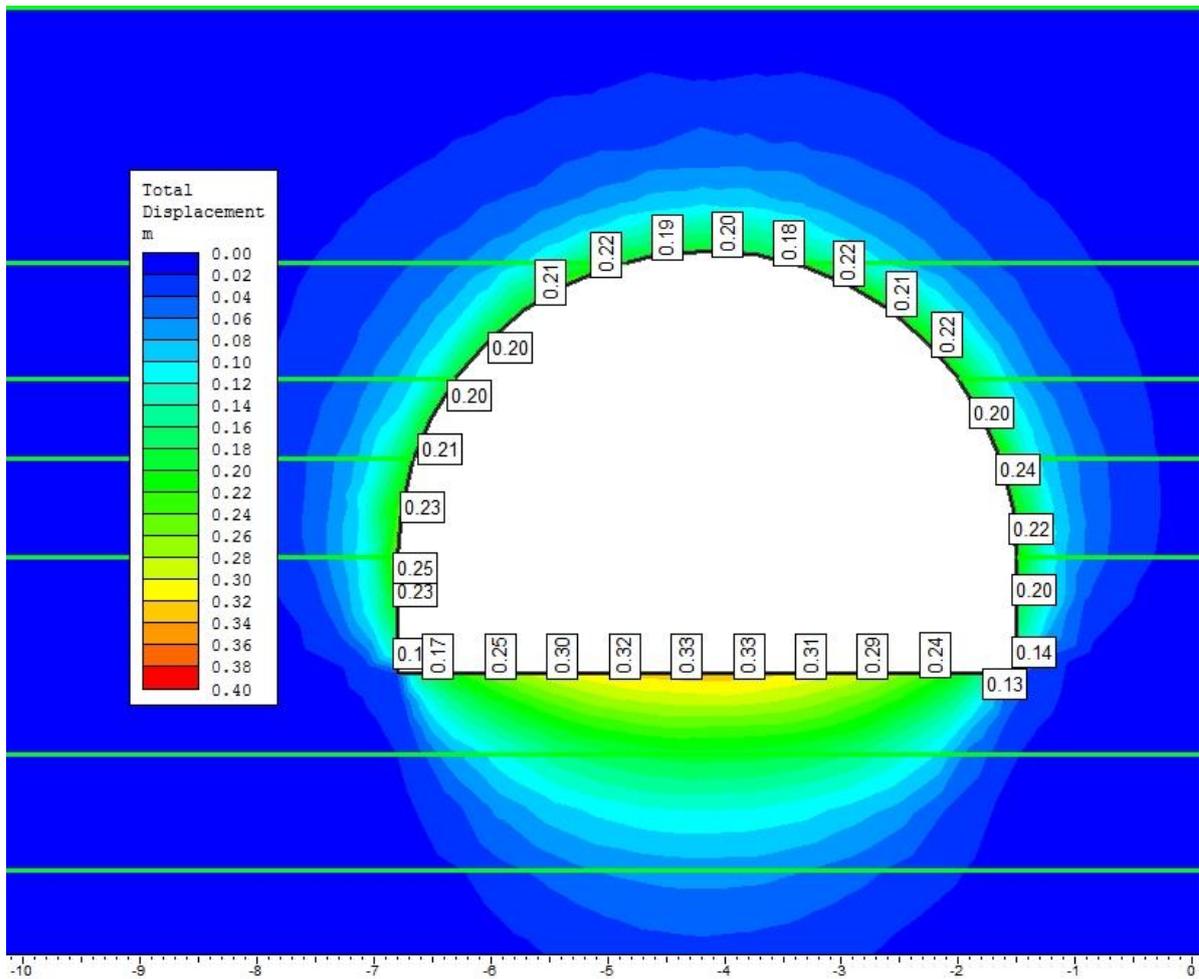


Рис. 6.8. Перемещения контура выработки.

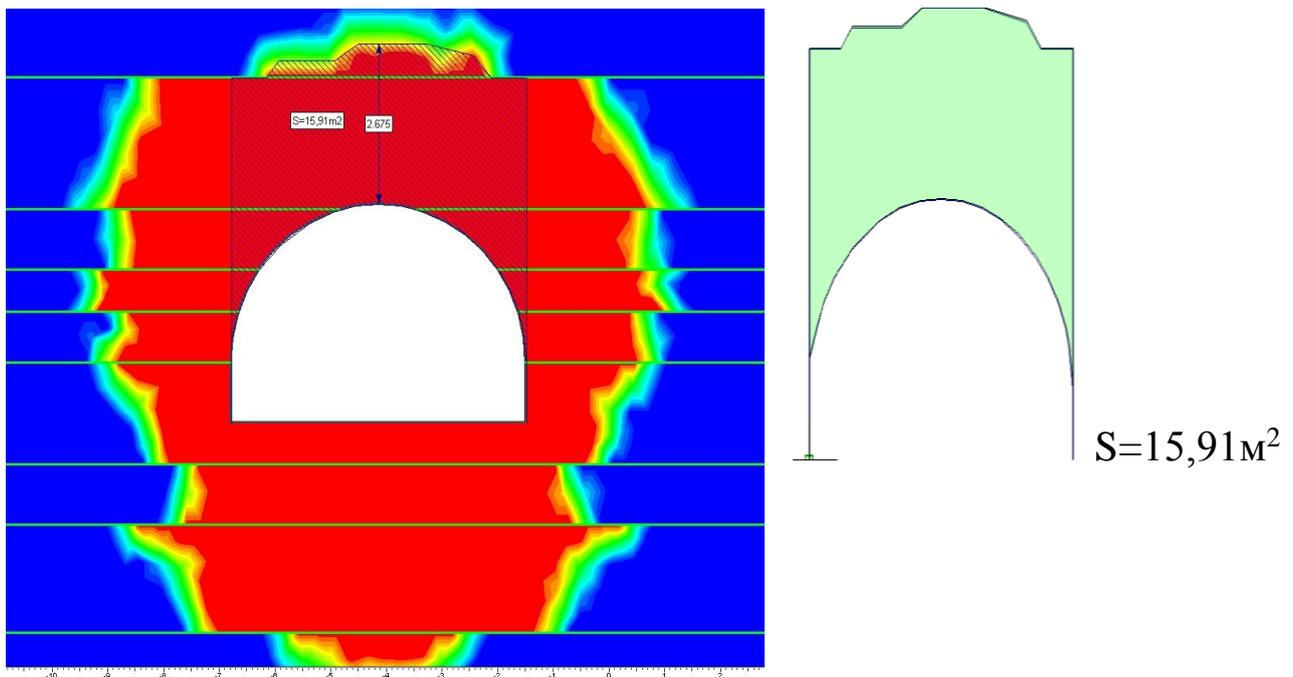


Рис. 6.9. Конфигурация зоны неупругих деформаций и определение нагрузки на крепь выработки

Для данного примера площадь зоны неупругих деформаций составляет $15,91 \text{ м}^2$. Следовательно, при удельном весе пород 25 кН/м^3 нагрузка на крепь составит $397,5 \text{ кН/м}$. Иногда в сложных условиях эту нагрузку увеличивают с учетом коэффициента динамичности, который составляет $2,0 - 2,5$.

Смещения контура выработки определяют допустимую податливость крепи, а отношение величины нагрузки к величине смещений – жёсткость крепи.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем характеризуется группа методов расчета нагрузки на крепь, именуемая «по заданным нагрузкам»? «по заданным деформациям»?
2. Что такое свод естественного равновесия?
3. Чему равняется высота свода естественного равновесия по М.М. Протодьяконову?
4. Чем отличается теория горного давления П.М. Цимбаревича от теории М.М. Протодьяконова?
5. Какая среда рассматривается в задаче А. Лабасса?
6. От каких факторов зависит нагрузка на крепь горизонтальной выработки в задаче А. Лабасса?
7. В чем состоит особенность метода Ю.М. Либермана при определении основных параметров крепи?
8. В чем состоит особенность упругопластических задач, в которых учитывается разрыхление пород в пластической области?
9. Какова последовательность вычислений нагрузки на крепь и её податливости с применением численных моделей?