МИНУГЛЕПРОМ СССР
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬСТВА УГОЛЬНЫХ И ГОРНОРУДНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ КУЗНИЦШАХТОСТРОЙ

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ КРЕПЕЙ

Кемерово, 1975

gost.e-ecolog.ru

Минуглепром СССР

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬСТВА УГОЛЬНЫХ И ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

КУЗНИИШАХТОСТРОЙ

М Е Т О Д И К А

ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ КРЕПЕЙ

Кемерово 1975

А Н Н О Т А Ц И Я

В методике на основе натурных наблюдений и лабораторных исследований, а также существующих теоретических предпосылок систематизируются условия работы крепей капитальных горизонтальных горных выработок в зависимости от характера проявлений горного давления и характеристики системы крепь-забутовка-массив.

Предложенная классификация условий работы крепей позволила автору разработать основные принципы проектирования крепей.

Методика предназначена для проектировщиков, инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами крепления горных выработок и горного давления.

Автором работы является кандидат технических наук Ерофеев Л.М.

Отзывы и замечания направлять по адресу: 650002, г.Кемерово-2, институт КузНИИшахтострой.

В В Е Д Е Н И Е

Термин "горное давление" имел много различных толкований. В последнее время под горным давлением принято понимать совокупность силовых полей (напряженных состояний), формирующихся в массиве горных пород в результате естественных и производственных воздействий [I]. Следовательно, на практике мы наблюдаем не само "горное давление", а лишь различные формы его проявлений, выражающиеся в смещениях и разрушении горных пород и крепи, горных ударах, внезапных выбросах и т.д.

Для прогнозирования горного давления и его проявлений необходимо знать напряженное состояние нетронутого массива, физические свойства горных пород (прочность, упругость, трещиноватость, реологические параметры и т.д.), форму, размер и взаимное расположение горных выработок.

Определение закономерностей проявлений горного давления в конечном счете необходимо для определения устойчивости горных выработок, расчета несущей способности и конструкций крепей.

§ I. Напряженное состояние массива горных пород

Напряженное состояние массива горных пород до проведения в нем выработки, по предложению Динника А.Н. [2], определяется выражениями:

$$\sigma_z^0 = \gamma H, \qquad \sigma_y^0 = \lambda \gamma H, \tag{I}$$

где γ – средний объемный вес массива;
H – расстояние до поверхности земли;
λ – коэффициент бокового распора;
σ_z^0 – вертикальная составляющая напряжений;
σ_y^0 – горизонтальная составляющая напряжений.

Современные исследования подтвердили правильность предложенной Динником А.Н. методики, однако следует считать установленным, что напряженное состояние земной коры формируется не только в результате действия сил тяжести, но и под влиянием тектоничес-

ких перемещений отдельных блоков земной коры в активных зонах [3,4] .

Например, в районе Таштагола,где наблюдается активная тектоническая деятельность,по данным,помещенным в работе [5] , горизонтальные напряжения в 2-3 раза превышают вертикальные.

Следует также иметь в виду,что в непосредственной близости от крупных разломов коры (надвиги,сбросы) наблюдается значительная концентрация напряжений.

В настоящее время накоплены количественные данные, свидетельствующие о значительной неоднородности естественного поля напряжений массива горных пород, и составлены карты скоростей тектонических движений, происходящих как в течение новейшего времени (30 млн.лет), так и современного (50-100 лет). По мнению Гзовского М.В., величина градиента скорости современных тектонических движений дает возможность судить о величине касательных напряжений в данной части земной коры.

Исследования Николаева Н.И. и Шенкаревой Г.А. [6] показали,что тектонические движения в пределах каждой зоны могут быть дифференцированы, следовательно,и тектонические напряжения в отдельно взятой зоне могут изменяться от места к месту. По мнению Люстих Е.Н. и Магницкого В.А. [7] , из всех движений земной коры главными считаются вертикальные, так как они проявляются повсеместно и постоянно, тогда как горизонтальные движения, складчатость и вулканизм ограничены локально и проявляются в основном только в определенные периоды. Исследованиями Балакиной Л.М., Введенской А.В., Мишариной Л.А., Широковой Е.И. [8] установлено,что в очагах землетрясений наибольшие напряжения близки к горизонтальной оси и ориентированы вкрест простирания структур, причем для одних районов таким напряжением является сжимающее, для других - растягивающее. Этот факт свидетельствует о том,что действительное поле напряжений в нетронутом массиве горных пород сложно и разнообразно. Некоторые данные измерений напряжений в массиве приведены в приложении I.

При выполнении практических расчетов по прогнозированию проявлений горного давления необходимо иметь в виду изложенные выше соображения.

§ 2. Физико-механические свойства горных пород

Физические свойства горных пород весьма многообразны, и правильное использование этих свойств имеет большое практическое значение. Поэтому в последние годы физика горных пород выделена в самостоятельную отрасль горной науки [I4].

К числу наиболее важных для практического использования можно отнести такие свойства горных пород, как объемный и удельный веса, пористость, трещиноватость, петрографический состав, прочность, упругость, пластичность, твердость, теплопроводность, теплоемкость.

Твердые горные породы подразделяются на пластичные и хрупкие. Хрупкие горные породы при нагружении их вплоть до разрушающих нагрузок практически не имеют остаточных деформаций.

Пластичные горные породы после их разгрузки имеют остаточные (необратимые) или пластические деформации.

Строго говоря, все горные породы обладают хрупко-пластическими свойствами и их подразделение на хрупкие и пластичные зависит от того, какое свойство (пластичность или хрупкость) является преобладающим.

Фактическая природа пластичности на молекулярном уровне объясняется развитием дислокаций кристаллической решетки, которые, распространяясь, образуют плоскости скольжения, не нарушая кристаллической структуры образца.

Однако практически при пластических деформациях в горных породах происходят деформации микроразрушений структурных элементов, т.е. горные породы более правильно относить к квазипластичным телам. Одна и та же порода при различных напряженных состояниях, скорости приложения и времени действия может быть либо хрупкой, либо пластичной.

Общий вид зависимости между напряжениями и деформациями при одноосном сжатии изображен на рис.I. На участке ОА деформация прямо пропорциональна приложенному напряжению. Точка А называется пределом пропорциональности. На участке А-А′ деформации еще упругие, однако линейной зависимости между напряжениями и деформациями нет.

Точка А′ называется пределом упругости. На этом участке

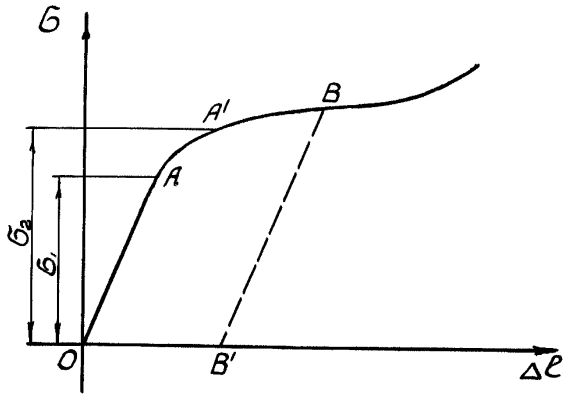


Рис.I. График зависимости между напряжениями и деформациями при одноосном сжатии

модуль упругости E – величина переменная (увеличивается с увеличением напряжений). При напряжениях, больших, чем σ_2, после снятия нагрузки порода не возвратится в первоначальное положение на величину остаточной (пластической) деформации OB'. При возрастании напряжений деформации растут более интенсивно.

Подробные сведения о физических свойствах горных пород содержатся в специальной литературе [I4,I5,I6,I7,I8].

В настоящей же работе остановимся только на прочностных, упругих и реологических свойствах горных пород, которые могут быть использованы для прогнозирования проявлений горного давления.

2.I. Прочностные свойства изотропных и анизотропных горных пород

Прочность – свойство материала сопротивляться воздействию внешних сил. Многочисленными исследованиями [I9,20,2I,22] установлено, что прочность горных пород наиболее точно описывается

теорией прочности Мора [23]. Согласно этой теории предельная прочность горных пород на срез при различных напряженных состояниях может быть выражена в виде некоторой кривой, которая является огибающей предельных кругов напряжений. Графическое изображение прочностных свойств материала в виде некоторой зависимости, представляющей собой огибающую предельных кругов напряжений в прямоугольных координатах τ, σ, называется паспортом прочности.

Прочность горных пород определяется на сжатие, растяжение и срез.

Для установления формы огибающей предельных кругов напряжений различными исследованиями в СССР и за рубежом [22,24,25] были проведены многочисленные исследования по определению прочностных свойств различных горных пород в условиях объемного сжатия с помощью специальных приборов-стабилометров.

На основании этих исследований следует считать установленным, что огибающая для хрупких скальных пород может быть аппроксимирована параболой [21,26], гиперболой и комбинированной кривой (циклоида, переходящая в прямую) [27].

В некоторых случаях в целях упрощения огибающая может быть принята в виде прямой линии (рис.2). Для сыпучих материалов, не имеющих сцепления, огибающая идет из начала координат, а для идеально пластичных - представляет собой прямую линию, параллельную оси σ.

Исследованиями Кузнецова Г.Н. [21,26] показано, что с наибольшей точностью огибающая предельных кругов напряжений может быть представлена параболой, имеющей уравнение:

$$(\tau_{nt})^m = \lambda(\sigma + R_p) \qquad (2)$$

при этом $1 < m \leq 2$

Кузнецовым Г.Н. предложено также уравнение параболической огибающей вида:

$$\tau_{nt} = \sqrt{(R_p + \sigma_n)\left[2R_p - 2\sqrt{R_p(R_p + R_{сж})} + R_{сж}\right]} \qquad (3)$$

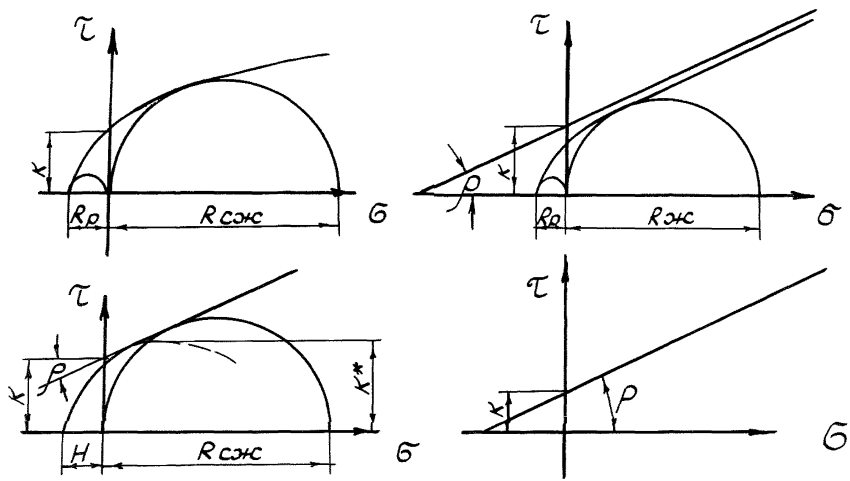


Рис.2. Прямолинейная (а), гиперболическая (б), комбинированная (в) и параболическая (г) огибающие предельных кругов напряжений

или $$\tau_{nt} = \sqrt{(\sigma_n + R_p)A}\ ,$$

где

$$A = 2R_p - 2\sqrt{R_p(R_p + R_{сж})} + R_{сж}\ . \qquad (4)$$

В ряде случаев для упрощения дальнейших расчетов уравнение огибающей может быть записано предложенным нами уравнением вида:

$$\tau_{nt} = K\sqrt{\frac{\sigma_n + R_p}{R_p}}\ , \qquad (5)$$

где R_p – прочность пород на растяжение;
$R_{сж}$ – прочность пород на одноосное сжатие;
K – сцепление.

Для огибающей в виде квадратной параболы между этими параметрами может быть установлена следующая простая связь:

$$K = \sqrt{R_p A} \qquad (6)$$

Построение паспорта прочности по уравнениям (3) и (5) может быть выполнено, если известны прочности пород на одноосное сжатие $R_{сж}$ и растяжение R_p .

Это обстоятельство позволяет вычислить паспорт по результатам испытаний образцов на одноосное растяжение и сжатие. Широко применяется способ построения паспортов по результатам испытаний на одноосный срез [28,29] . Следует заметить, что проведение испытаний на срез требует большого количества образцов и дает большие ошибки при построении огибающей для $\alpha > 45^0$ (рис.3).

Исследованиями [30,31,32,26] было установлено, что прочность пород на сжатие зависит как от формы, так и от размеров испытуемого образца. В частности для призматических образцов была установлена зависимость (рис.4) прочности на сжатие от отношения $\frac{h}{d}$, где h – высота образца, d – сторона квадрата основания. На основании этих исследований можно считать установленным, что при отношении $\frac{h}{d} \geqslant 2{,}0 \div 2{,}5$ образец выдерживает

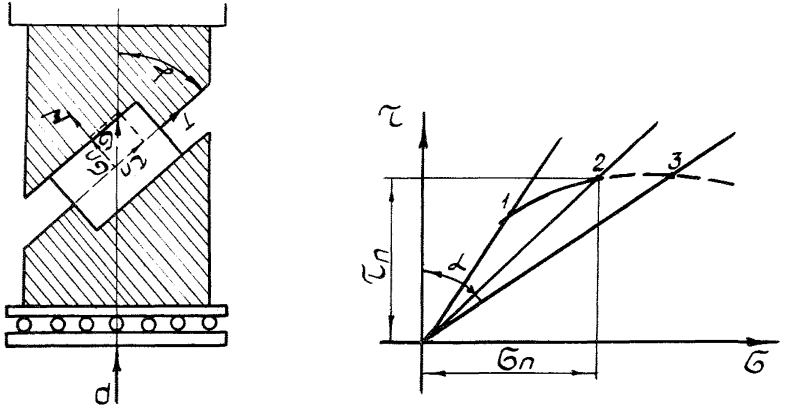


Рис.3. Схема прибора для испытаний породных образцов на одноосный срез (а) и пример построения огибающей (б)

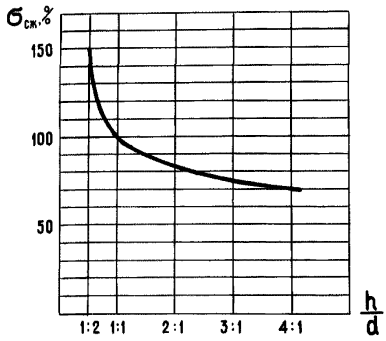


Рис. 4. Изменение предела прочности образцов в зависимости от отношения $\frac{h}{d}$

минимальную нагрузку.

Предположим, что одноосному сжатию подвергается призматический образец высотой h, основание которого квадрат со стороной d (рис.5).

Рассмотрим напряжения на площадке MN, нормаль к которой составляет с направлением действия силы угол α. Известно, что в этом случае

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2\alpha, \qquad (7)$$

$$\tau_{nt} = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha$$

В качестве условия прочности примем параболическую огибающую предельных кругов напряжений (рис.6) и запишем ее уравнение в виде:

$$\tau_{nt}^2 = \frac{(\sigma_n + R_p)K^2}{R_p}. \qquad (8)$$

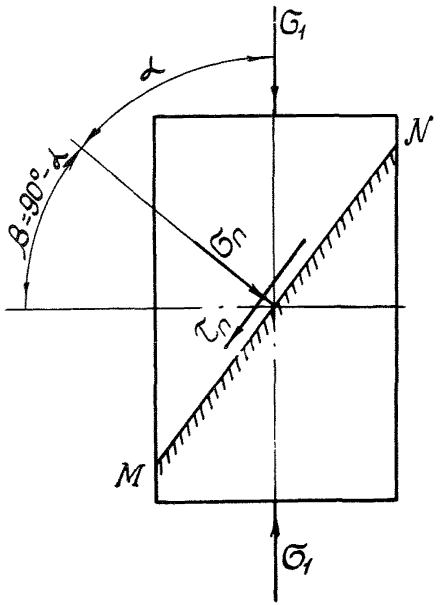


Рис.5. Расчетная схема к определению угла сдвижения при разрушении образцов

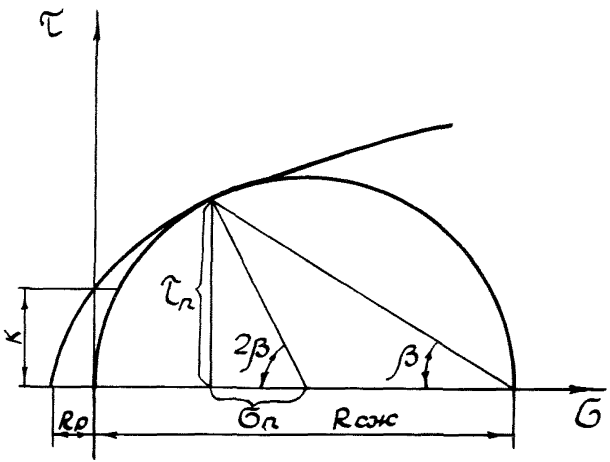


Рис.6.Параболическая огибающая предельных кругов напряжений

Подставив в формулу (8) значение выражений для напряжений σ_n и τ_{nt} получим

$$\frac{\sigma_1^2}{4}\sin^2 2\alpha = \frac{(\sigma_1\cos^2\alpha + R_p)\,K^2}{R_p}. \qquad (9)$$

Отсюда

$$\sigma_1 = \frac{2K^2\cos^2\alpha \pm 2K\sqrt{K^2\cos^4\alpha + R_p^2\sin^2 2\alpha}}{R_p\sin^2 2\alpha}. \qquad (10)$$

Из выражения (10) найдем значение угла α, при котором несущая способность образца будет минимальной, т.е. найдем σ_{min}, для чего возьмем первую производную $\frac{d\sigma_1}{d\alpha}$ и приравняем ее нулю:

$$\frac{d\sigma_1}{d\alpha} = \frac{\left[-4K^2\cos\alpha\sin\alpha \pm \frac{K(-4K^2\cos^3\alpha\sin\alpha + 4R_p^2\sin 2\alpha\cdot\cos 2\alpha)}{\sqrt{K^2\cos^4\alpha + R_p^2\sin^2 2\alpha}}\right]\sin^2 2\alpha}{R_p\sin^4 2\alpha}$$

$$- \frac{(2K^2\cos^2\alpha \pm 2K\sqrt{K^2\cos^4\alpha + R_p^2\sin^2 2\alpha})\cdot 4\sin 2\alpha\cdot\cos 2\alpha}{R_p\sin^4 2\alpha} = 0. \qquad (11)$$

Решая уравнение, получим

$$\alpha = \arccos\pm\sqrt{\frac{R_p}{2R_p + K}}. \qquad (12)$$

Следовательно, для определения прочности материала на сжатие, которая с наибольшей точностью отражает ее истинное значение, необходимо иметь такую высоту образца, которая позволила бы свободно формировать плоскость сдвига под углом $\beta = 90° - \alpha$.

Например, для песчаника со следующими параметрами:

$E = 2{,}5\cdot 10^5$ кг/см^2; $\nu = 0{,}1$; $R_p = 40$ кг/см^2; $K = 140$ кг/см^2

$$\alpha = \arccos\sqrt{\frac{40}{80+140}} \cong 66°.$$

В данном случае необходимо, чтобы высота призматического образца была не меньше, чем

$$h = \frac{4}{ctg(90^\circ - \alpha)} = \frac{4}{0{,}44} \cong 9\ см, \qquad (I3)$$

а отношение $\frac{h}{d} = 2{,}25.$

Для экспериментальной проверки полученных зависимостей нами были испытаны на сжатие призмы из указанного выше песчаника размерами 4x4xI2 и кубики размером 4x4x4 см.

Средние пределы прочности на сжатие по результатам испытаний I6 призм и кубиков составили соответственно 943 и IIIЗ кг/см^2.

Средний угол скола по призмам составил 66°. Характер разрушения образцов призм и кубиков приведен на рис.7.

Как правило, развитие трещин начинается с верхней грани образцов, что вызвано, очевидно, концентрацией напряжений по кромке нагруженной грани образца. Это обстоятельство отмечено в работе [33] .

В том случае, если высота образца по каким-либо причинам отличается от ее значения, определяемого формулой (I3), при определении "истинной" прочности необходимо пользоваться эмпирической формулой

$$R_{сж.} = \frac{8}{7 + 2(d:h)} \cdot \frac{4P}{\pi d^2}, \qquad (I4)$$

приведенной в работе [36] . Формула справедлива при отношении $\frac{h}{d}$ в пределах 0,8–2,2.

Определение прочности пород на растяжение можно проводить различными методами [I5] , однако, по нашему мнению, наилучшие результаты дает метод раздавливания кернов, изложенный в работах [34,35] .

Для построения паспортов прочности анизотропных слоистых пород были проведены эксперименты на одноосное сжатие на образцах-призмах размерами 40x40xI20 мм. Сжатию подвергались образцы-призмы, у которых угол, отсчитанный от нормали к направлению действия сжимающей силы ψ , составил соответственно 0; I5; 30; 45; 60; 90°.

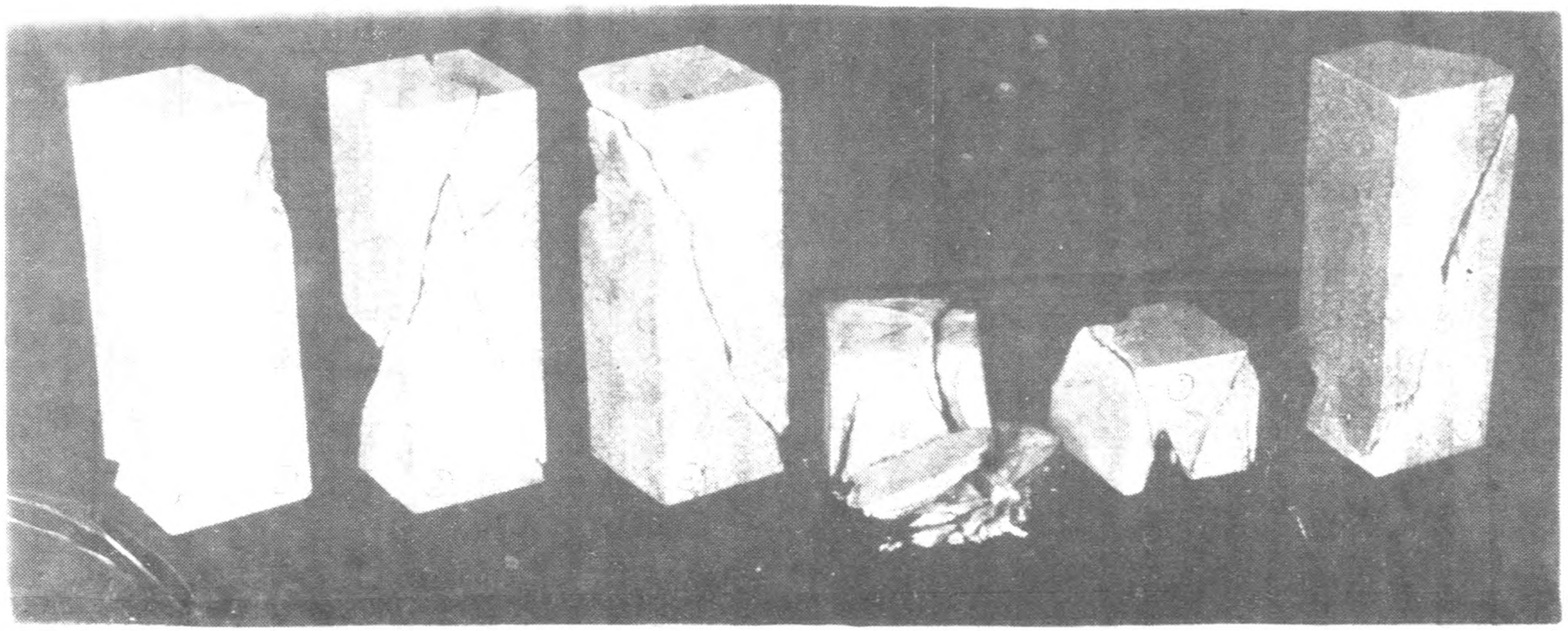


Рис. 7. Характер разрушения образцов призм и кубиков

Испытаниям подвергались образцы, имеющие слоевую анизотропию двух типов. К первому типу отнесены горные породы с ясно выраженными контактами. Ко второму - породы слоистые с нечеткими извилистыми и выклинивающимися контактами.

Заметим сразу, что слоистая анизотропная порода второго типа практически не вызывает прочностной анизотропии.

Поэтому дальнейшие рассуждения и выводы будут относиться к породам, обладающим слоевой анизотропией первого типа.

Результаты испытаний 300 образцов призм и кубиков на одноосное сжатие и кернов на растяжение в зависимости от ориентировки слоев представлены в виде графиков на рис.8 и 9.

Для большинства испытанных образцов горных пород $R_{см}^{\parallel} < R_{см}^{\perp}$ в I,2-I,5 раза, а $R_р^{\parallel} > R_р^{\perp}$ в I,5-3 раза. Отношение $\frac{R_{см}^{\perp}}{R_р^{\parallel}} = 18\text{-}20$, т.е. в I,5-2 раза больше, чем для монолитных горных пород.

Анализ результатов испытания образцов на сжатие показал, что с изменением угла между σ_1 и направлением слоев от 0 до 90° величина предела прочности изменяется по параболическому закону.

$$R_{см}^{\psi} = a\psi^2 + b\psi + c, \qquad (I5)$$

что в общих чертах согласуется с аналитическими исследованиями, выполненными В.Ю.Изаксоном [II4].

Для определения коэффициентов a, b и c найдем координаты вершины параболы, т.е. угол α между нормалью к направлению слоев и линией действия сжимающей нагрузки при условии, что величина предельного напряжения при этом будет иметь наименьшее значение.

Предполагается, что прочность контакта между слоями на сдвиг и разрыв (K и $R_р^{\perp}$) поперек слоев значительно меньше, чем эти же показатели для материала слоев, количество которых в испытуемом образце должно быть достаточно большим.

В работе Г.Н.Кузнецова [II5] показано, что если паспорт прочности основного материала изобразить некоторой огибающей, то прочность по поверхностям ослабления одинаковой ориентировки может быть представлена секущей.

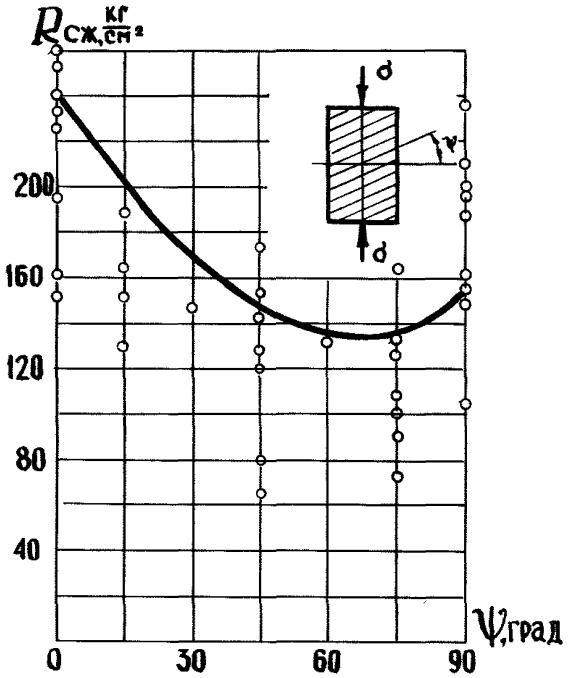


Рис.8. График зависимости прочности слоистых образцов на сжатие от угла между направлением приложенных напряжений и направлением слоев

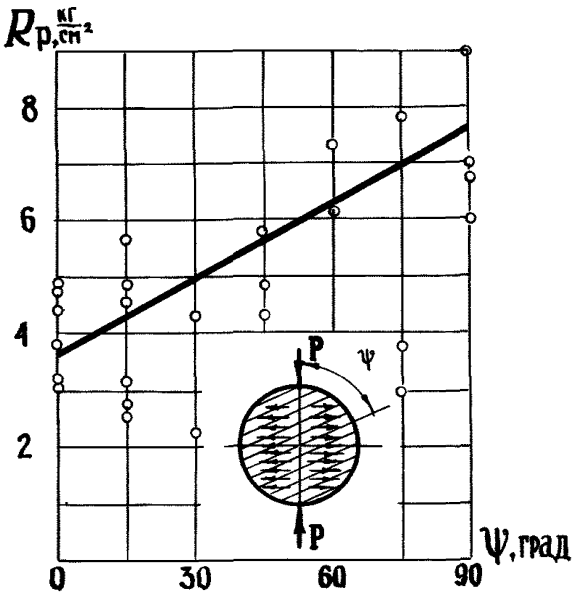


Рис.9. График зависимости прочности слоистых образцов на растяжение от угла между направлением приложенных напряжений и направлением слоев

Поскольку для экспериментов были выбраны образцы не с одной, а с несколькими одинаково ориентированными слоями, прочность которых может быть различной, то при построении паспорта прочности основного материала за пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение принимается прочность образцов на сжатие поперек волокон $R_{см}^{\perp}$, на растяжение – вдоль волокна R_p''

Паспорт прочности, как уже отмечалось выше, может быть представлен квадратной параболой [26].

Для построения паспорта по этому уравнению необходимо знать R_p и $R_{см.}$. В нашем случае $R_p = R_p''$; $R_{см} = R_{см}^{\perp}$. Прочность контакта между слоями оценивается прочностью на растяжение поперек слоя $R_p^{\perp}$ и сцеплением K.

Как показали испытания, для хрупких слоистых пород отношение $\frac{R_{см}^{\perp}}{R_{см}^{\parallel}} = 18$, т.е. несколько выше обычного. Поэтому для основного материала $K = 3{,}36\ R_p^{\perp}$. Примем для контакта по аналогии $K' = 3{,}36 R_p^{\perp}$. Зная по результатам испытаний $R_p^{\perp}$, R_p'', K и K' и приняв огибающую в виде квадратной параболы, можно построить паспорт прочности основного материала и секущую, определяющие условия специального равновесия.

Для определения K' (сцепления слоев) воспользуемся следующими соображениями. По аналогии с вычислениями, изложенными выше, примем $K' = 3{,}36\ R_p^{\perp}$.
Тогда по формуле

$$\alpha = arc\cos \pm \sqrt{\frac{R_p}{2R_p + 3{,}36 R_p}}$$

угол наклона слоев, при котором разрушение образца произойдет при наименьшем значении сжимающих напряжений, равен $\alpha \cong 64°30'$.

Значение угла α' для $R_{см.}^{min}$, полученное по формуле (I2), хорошо совпадает с экспериментальными данными, изображенными на рис.8.

Зная K' и α', найдем значение $R_{см}^{min}$ по формуле:

$$R_{см.}^{min} = \frac{2K^2\cos^2\alpha \pm 2K\sqrt{K^2\cos^4\alpha + R_p^2 \sin^2 2\alpha}}{R_p \sin^2 2\alpha} =$$

$$= \frac{2\cdot(3{,}36\,R_p)^2\cdot(0{,}43)^2 \pm 2\cdot 3{,}36\,R_p\sqrt{(3{,}36\,R_p)^2(0{,}43)^4 + R_p^2(0{,}777)^2}}{R_p(0{,}777)^2} = 17{,}9$$

Таким образом, возвращаясь к формуле квадратной параболы

$$R_{cm}^{\psi} = a\psi^2 + b\psi + c,$$

можно сказать, что теперь в нашем распоряжении есть все данные для определения постоянных. Координаты центра параболы:

$$a = \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} + R_{cm}^{\perp}}{4096}; \qquad b = \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} + R_{cm}^{\perp}}{32}. \tag{I6}$$

Подставив полученные значения постоянных, получим

$$R_{cm}^{\psi} = \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} + R_{cm}^{\perp}}{4096}\,\psi^2 - \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} + R_{cm}^{\perp}}{32}\,\psi + R_{cm}^{\perp} \tag{I7}$$

Для получения аналогичных зависимостей при определении предела прочности слоистых горных пород на растяжение использовался метод раскалывания кернов. Угол наклона слоев к нормали по отношению к направлению растягивающего усилия ψ .

Результаты экспериментов изображены в виде графика на рис.9.

Рассматривая зависимость прочности образца на одноосное растяжение от ориентации плоскости анизотропии, можно считать установленным, что прочность образца на растяжение будет иметь наибольшее значение при ψ =0 (рис.9) и наименьшее - при $\psi = 90^{\circ}$.

В промежуточных точках значения прочности изменяются по закону, близкому к прямолинейному.

Тогда

$$R_p^{\psi} = \frac{R_p^{\parallel} - R_p^{\perp}}{90}\,\psi + R_p^{\perp}. \tag{I8}$$

Для каждого значения угла ψ будет, очевидно, свой паспорт прочности.

Исследованиями Г.Н.Кузнецова и других установлено, что наиболее точно экспериментальная зависимость может быть аппроксимирована параболой вида:

$$(\tau_{nt})^m = \lambda(\sigma_n + R_p),$$

при этом

$$1 < m \leq 2.$$

К сожалению, при решении различных задач механики горных пород для упрощения выкладок чаще всего используется прямолинейная наклонная огибающая, которая задается уравнением вида:

$$\tau_{nt} = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + K, \tag{19}$$

причем

$$K = \frac{(1-\sin\varphi)\,R_{cm}}{2\cos\varphi}. \tag{20}$$

Следовательно, для того, чтобы применить полученные нами уравнения прочностной анизотропии в известных решениях, когда речь идет о плоском напряженном состоянии, необходимо установить зависимость между величинами, входящими в уравнения (6) и (19).

Очевидно, что величина K для определенного типа пород должна быть постоянной независимо от способа ее определения. Угол же внутреннего трения определяется углом наклона касательной к огибающей и меняется от точки к точке. Примем условно, что угол внутреннего трения при параболической огибающей определяется углом наклона прямой, проходящей через точку пересечения огибающей с кругом одноосного сжатия и точку с координатами (0, К).

Тогда величина условного угла внутреннего трения определится из уравнения (20).

Непосредственное определение сцепления K из экспериментов весьма затруднительно, но его можно легко определить из уравнения (6).

На основании изложенного можно рекомендовать следующий метод определения угла внутреннего трения φ^{Ψ} и коэффициента сцепления K^{Ψ} с учетом прочностной анизотропии при известных величинах R^{Ψ}_{cm} и R^{Ψ}_{p}:

$$K^{\Psi} = \sqrt{R^{\Psi}_{p} A^{\Psi}}, \tag{21}$$

где (22)

$$A^{\psi} = 2R_p^{\psi} - 2\sqrt{R_p^{\psi}(R_p^{\psi} + R_{cm}^{\psi})} + R_{cm}^{\psi}.$$

Из выражения (20) путем несложных преобразований получим:

$$\operatorname{tg}\frac{\varphi^{\psi}}{2} = \frac{1 - \frac{2K^{\psi}}{R_{cm}^{\psi}}}{1 + \frac{2K^{\psi}}{R_{cm}^{\psi}}}. \qquad (23)$$

Поясним использование полученных зависимостей на примере. Пусть имеется образец слоистой горной породы в виде призмы, для которого

$$R_{cm}^{\perp} = 240 \text{ кг/см}^2; \quad R_p'' = 7{,}5 \text{ кг/см}^2; \quad R_p^{\perp} = 4 \text{ кг/см}^2.$$

Найдем R_{cm}^{ψ}, R_p^{ψ}, K^{ψ} и φ^{ψ}, т.е. прочность породы на сжатие, растяжение и срез, а также сцепление и угол среза при $\psi = 30^{\circ}$:

$$R_{cm}^{\psi} = \frac{R_{cm}^{\perp} - 17{,}9R_p''}{4096}\psi^2 + \frac{17{,}9R_p'' - R_{cm}^{\perp}}{32}\psi + R_{cm}^{\perp} =$$

$$= \frac{240 - 17{,}9 \cdot 7{,}5}{4096}30^2 + \frac{17{,}9 \cdot 7{,}5 - 240}{32}30 + 240 = 164 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2};$$

$$R_p^{\psi} = \frac{R_p'' - R_p^{\perp}}{90}\psi + R_p^{\perp} = \frac{7{,}5 - 4}{90} \cdot 30 + 4 = 5{,}17 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2};$$

$$A^{\psi} = 2R_p^{\psi} - 2\sqrt{R_p^{\psi}(R_p^{\psi} + R_{cm}^{\psi})} + R_{cm}^{\psi} =$$

$$= 2 \cdot 5{,}17 - 2\sqrt{5{,}17(5{,}17 + 164)} + 164 = 115{,}19 \text{ кг/см}^2;$$

$$K^{\psi} = \sqrt{5{,}17 \cdot 115{,}19} = 24{,}4 \text{ кг/см}^2; \quad \varphi^{\psi} = 57^{\circ}.$$

Угол сдвига

$$\alpha^{\circ} = \arccos\sqrt{\frac{R_p''}{2R_p''+3{,}36\,R_p''}} = \arccos\sqrt{\frac{7{,}5}{2\cdot 7{,}5+3{,}36\cdot 7{,}5}} = 64^{\circ}30'$$

2.2. Реологические свойства

К числу важнейших свойств горных пород, имеющих большое практическое значение, относятся реологические свойства.

Термин "реология" происходит от греческого слова "rheo", что значит "течь", однако в современном его толковании под реологическими процессами понимают не только развитие деформаций, но и изменения свойств и состояния горных пород. Под реологическими процессами понимают процессы, связанные с изменением деформаций, напряжений и прочности горных пород со временем.

Ползучестью называют явление роста деформаций при постоянной нагрузке, а релаксацией - падение напряжений при неизменной деформации.

По характеру проявлений ползучести горные породы подразделяются на два типа [49] . К первому типу отнесены породы, деформации ползучести которых со временем затухают. Ко второму - породы, у которых ползучесть со временем прогрессирует (рис.10).

Явления ползучести и релаксации не могут быть объяснены только упругими свойствами, и для описания поведения реальных горных пород под нагрузкой приходится прибегать к понятиям упруговязкого, упругопластического или упруговязкопластического тела.

В зависимости от скорости приложения, величины и длительности действия силы преобладающее значение могут иметь либо упругие свойства, либо свойства вязкой текучести и пластичности. Эксперименты над различными горными породами показали, что наиболее полно и гибко реологические процессы могут быть выражены наследственной теорией ползучести, в основе которой лежит уравнение Больцмана-Вольтерра, которое для случая линейного деформирования имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E}\int_0^t K(t-\tau)\,\sigma(\tau)\,d\tau, \qquad (24)$$

где $\varepsilon(t)$ - деформация, вызванная действующими в разные промежутки времени напряжениями σ к моменту времени t ;

$\frac{\sigma(t)}{E}$ - мгновенные упругие деформации;

$\frac{1}{E}\int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau$ - сумма временных деформаций, вызванных единичным напряжением, возникшим к моменту τ и действовавшим в течение промежутка $d\tau$.

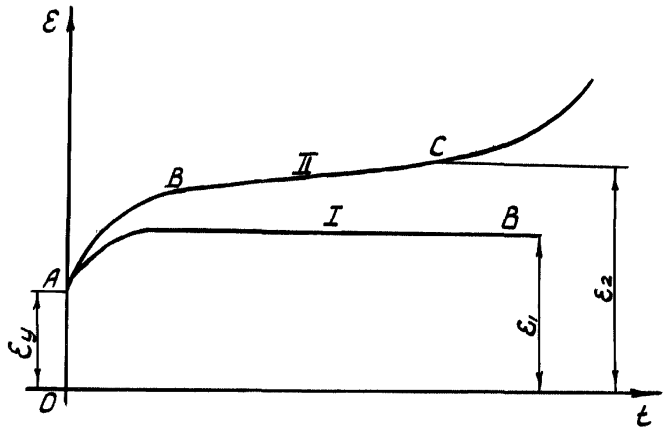


Рис.10. Общий вид зависимости деформаций ползучести от времени для горных пород

I - затухающие во времени деформации;
II - незатухающие во времени деформации

Эксперименты показали, что ядро оператора наследственности $K(t-\tau)$ может быть выражено дробно-экспоненциальной функцией Работнова Ю.И.

$$\Im_\alpha(-\beta, t-\tau) = (t-\tau)^{-\alpha}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{-\beta^n(t-\tau)^{n(1-\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1-\alpha)]}, \quad (25)$$

где t - время; α и β - физические параметры,

причем $0 < \alpha < 1$ и $\beta = \tau_1^{(\alpha-1)}$;

τ_1 - время релаксации; Γ - гамма-функция; τ - единичный промежуток времени или более простое ядро типа Абеля

$$K(t-\tau) = \delta (t-\tau)^{-\alpha}, \qquad (26)$$

которое было использовано для обработки экспериментальных данных Ержановым Ж.С. [38].

Время релаксации для данной горной породы - это то время, в течение которого напряжения, возникшие от заранее заданной и неизменной во времени деформации, уменьшаются в e =2,73 раз.

Использование наследственной теории ползучести значительно упрощается введением принципа Вольтерра. Согласно этому принципу свойства ползучести материала при решении различных задач будут учтены, если вначале эти задачи решить в упругой форме, а затем упругие константы заменить соответствующими временными операторами вида:

$$\bar{E} = E \exp.(-\omega \beta t^{1-\alpha});$$

$$\bar{C} = C \exp.\left[-\frac{3\omega\beta}{2(1+\nu)} t^{1-\alpha}\right]; \qquad (27)$$

$$\frac{1}{\bar{\nu}} = 2 + \frac{1-2\nu}{\nu} \exp\left(-\frac{\omega\beta}{2\nu} t^{1-\alpha}\right),$$

где $\beta = \delta \Gamma(1-\alpha)$, $\omega = (1-\alpha)^{1-\alpha}$;

α, β - постоянные;

Γ - табулированная гамма-функция.

При использовании ядра (21) параметры ползучести α и δ могут быть получены по результатам испытаний образцов-балочек. Относительный прогиб образцов определяется по формуле

$$\frac{y - y_0}{y_0} = \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha}.$$

Для определения параметров α и δ выражение (23) представляется в логарифмическом виде и полученная зависимость используется в качестве выравнивающей. Выравнивание осуществляется с привлечением опытных данных методом наименьших квадратов. В качестве примера ниже приводится определение параметров ползучести для условий Кузбасса. Для исследований были взяты следующие горные породы:

I. Проба А-57-I. Алевролит - из 2-го южного полевого штрека на реконструкции шахты "Судженская", с глубины 500 м.

2. Проба ОК-I. Среднезернистый алевролит - из выработок околоствольного двора на реконструкции шахты "Капитальная", с глубины 500 м.

3. Проба С-I. Среднезернистый полимиктовый песчаник - из северного полевого штрека шахты "Северная",с глубины 260 м.

4. Пробы ЛЯ-I и ЛЯ-2. Крупнозернистый алевролит и мелкозернистый слоистый алевролит - из полевого штрека шахты им. Ярославского,с глубины I80 м.

5. Проба СМ. Две разновидности аргиллитов - из квершлага реконструируемой шахты "Северный Маганак",с глубины 260 м.

Из отобранных образцов выпиливались балки поперечным сечением 20х20, длиной I60-200 мм и испытывались по схеме поперечного изгиба с приложением сосредоточенной силы в середине пролета. Испытания образцов проводились на специальном стенде, изготовленном из балок двутаврового профиля № 20. На каждой из II секций одновременно испытывалось по 3 образца. Прогибы породного образца в середине пролета измерялись с помощью индикатора типа I ИГМ с ценой деления шкалы 0,00I мм. С перечисленными образцами проводились предварительные и основные опыты по исследованию их ползучести при изгибе.

Основные задачи в постановке предварительных опытов заключались в определении прочности породы, необходимой для последующего назначения соответствующих уровней нагрузок при изучении ползучести, и величины модуля упругости при изгибе. Модуль упругости E определялся зависимостью:

$$E = \frac{K_1 P}{y},$$

где P – сосредоточенная сила, приложенная в середине пролета балки;

y – упругий прогиб балки;

K_1 – коэффициент влияния касательных напряжений в балке, зависящий от ее геометрических параметров.

$$K_1 = \frac{c^3}{4ba^3}\left(1+2{,}95\frac{a^2}{c^2}-0{,}02\frac{a}{c}\right),$$

где a, b, c – высота, ширина и пролет балки.

Для нахождения параметров прямой и обратной ползучести ставились основные опыты в режиме циклически возрастающей нагрузки, длительного действия нагрузки и последующей разгрузки. В каждом из режимов испытано по 3÷8 образцов каждого типа вышеперечисленных пород Кузбасса.

При испытаниях в режиме циклически возрастающей нагрузки образцы загружались постоянными, но разными по величине нагрузками, под действием которых они находились в течение 48 часов. Затем образцы разгружались и в разгруженном состоянии находились также 48 часов. Количество циклов нагрузок-разгрузок составляло 5÷8 в зависимости от прочности породы и величины ступени нагружения. График деформирования алевролита (А-57-I) в режиме циклически возрастающего нагружения представлен на рис.II.

Соотношение величин упругих прогибов при нагружении y_o и разгрузках y_o' в подавляющем большинстве случаев независимо от величины нагрузки в цикле составило 0,9–I,0, т.е. упругие деформации породных образцов в таком режиме нагружения вполне обратимы. Вопрос о линейности или нелинейности закона деформирования горных пород решается опытным путем по изохронным кривым ползучести, которые представляют собой графики зависимости деформаций от напряжений при фиксированных моментах времени. Для испытанных типов горных пород изохронные кривые прямой и обратной ползучести мало отличаются от прямолинейных зависимостей, а отклонения от линейности не превышают 5–I3%, т.е. прямой и обратный процессы деформирования вышеперечисленных горных пород подчиняются линейному закону. Графики изохронных

линий образца А-57-I при прямой и обратной ползучести приведены на рис.I2.

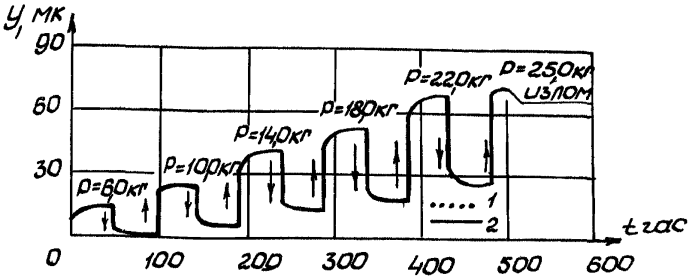


Рис.II. График деформирования алевролита в режиме циклически возрастающего нагружения

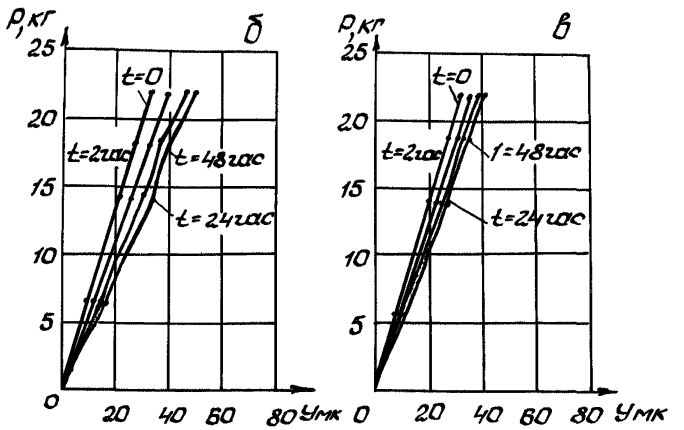


Рис.I2. График изохронных линий образца при прямой и обратной ползучести

Средние значения параметров прямой (α, δ) и обратной (α', δ') ползучести, значения модуля упругости E и средней разрушаю -

щей нагрузки по данным опытам при циклически возрастающем нагружении образцов-балок приведены в табл.I.

Таблица I

Общее количество образцов	пиков	Разрушающая нагрузка P,кг	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$,кг/см^2	Параметры прямой полузчести α	δ_1 (сек)$^{\alpha-1}$	обратной полузчести α'	δ'_1 (сек)$^{\alpha-1}$
Среднекрупнозернистый алевролит (проба А-57-I)							
2	33	27,2	2,27	0,660	0,0028	0,705	0,0025
Среднезернистый алевролит (проба ОК-I)							
5	33	50,I	2,45	0,682	0,0027	0,723	0,0024
Среднезернистый полимиктовый песчаник (проба С-I)							
6	46	26,4	I,29	0,676	0,0023	0,726	0,00I8
Крупнозернистый алевролит (проба ЛЯ-I)							
5	32	36,0	I,29	0,652	0,0027	0,7I2	0,0030
Мелкозернистый слоистый алевролит (проба ЛЯ-2)							
4	23	29,7	I,30	0,636	0,002I	0,7I0	0,0030
Аргиллит (проба СМ-2)							
3	I8	I7,3	I,50	0,639	0,0040	0,666	0,0042
Аргиллит (проба СМ-3)							
2	I2	I6,5	I,40	0,636	0,0036	0,689	0,0042

Из данных таблицы следует, что у всех приведенных горных пород Кузбасса безразмерный параметр ползучести α близок к 0,7 как в прямом, так и в обратном процессах. Значения параметра δ колеблются в пределах $0{,}0018 \leq \delta \leq 0{,}0042$.

Средние соотношения деформаций обратной и прямой ползучести по этим типам пород колеблются в пределах 0,58÷0,78.

При испытаниях пород в режиме длительного действия нагрузки и последующей разгрузки первоначальные нагрузки на образцы составляли 70-20% средних разрушающих. Длительность нагружения составляла от 1500 до 5000 часов, длительность разгрузки - от 600 до 3000 часов. За время стабилизации процесса принимался тот момент времени, при котором условно-предельное значение скорости прогиба образца было равно 0,2 мкм в сутки.

Время стабилизации прямой ползучести в зависимости от типа пород составило 3700-2300 час , а время обратной ползучести — 1920-612 час .

Значения параметров ползучести α и δ , модуля упругости E в режимах нагружения и разгрузки для семи типов испытанных пород приведены в табл.2.

Таблица 2

Количество образцов	Уровень нагрузок, %	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, кг/см^2		Параметры			
				прямой ползучести		обратной ползучести	
		E	E'	α	δ_1 (сек)$^{\alpha-1}$	α'	δ_1' (сек)$^{\alpha-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8
	Среднекрупнозернистый алевролит (проба А-57-I)						
8	28,0-93,0	2,27	2,94	0,692	0,0044	0,758	0,038
	Среднезернистый алевролит (проба ОК-I)						
8	30,0-89,0	2,35	3,14	0,705	0,0037	0,761	0,0030
	Среднезернистый полимиктовый песчаник (проба С-I)						
7	30,0-90,0	1,26	1,56	0,708	0,0030	0,762	0,0020

: I	: 2	: 3	: 4	: 5	: 6	: 7	: 8
	Крупнозернистый алевролит (проба ЛЯ-I)						
6	45,0-89,0	I,2I	I,69	0,65I	0,0024	0,709	0,0033
	Мелкозернистый слоистый алевролит (проба ЛЯ-2)						
8	39,0-87,0	I,28	I,I7	0,679	0,0034	0,739	0,0048
	Аргиллит (проба СМ-2)						
3	39,0-56	I,49	2,08	0,696	0,0074	0,726	0,0034
	Аргиллит (проба СМ-3)						
4	47,0-82,5	I,36	I,89	0,68I	0,0054	0,72I	0,0037

Из таблицы следует, что значения параметра α лежат в интервале

$$0{,}651 \leq \alpha \leq 0{,}762, \qquad \text{а}$$

δ - в интервале

$$0{,}002 \leq \delta \leq 0{,}038\ (\text{сек})^{\alpha-1}.$$

Графики ползучести в режиме длительного нагружения и разгрузки образца алевролита (проба А-57-I) приведены на рис.I3. Отклонения опытных данных для всех типов пород от вычисленных по вышеприведенным формулам не превышали 5-8%. В этом режиме испытаний соотношения упругих деформаций при нагрузке и разгрузке $\frac{y_0}{y_0'}$ для алевролитов составили 0,73- 0,74; для песчаника -0,82; для аргиллитов - 0,72.

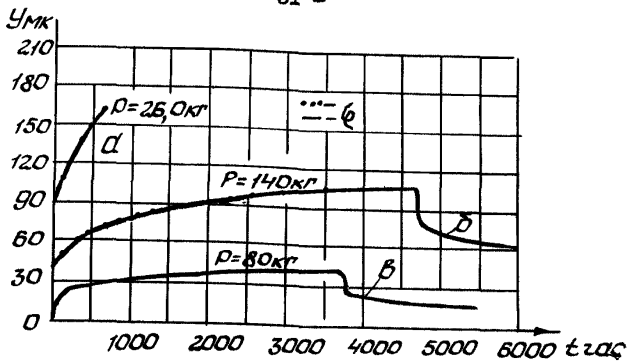


Рис.13. Графики ползучести в режиме длительного нагружения и разгрузки образца алевролита

Длительная прочность горных пород изучена сравнительно мало. Из работ, посвященных этому направлению, можно отметить работы Карташова Ю.М., Вялова С.С., Городецкого С.Э., Бич Я.А., Ставрогина А.Н., Фисенко Г.Л., Буслик Ф.П., Иванова Г.А. и др. [39,40,41,42].

Для определения прочности в любой заданный момент времени можно рекомендовать формулу, приведенную в работе [43]:

$$R(t) = \frac{\beta}{\ln \frac{t+1}{B}}, \qquad (28)$$

где β (кг/см^2) и B (часы или минуты) - параметры, определяемые из опытных данных; t и $t+1$ (часы или минуты) -время.

В работе [43] приведены значения параметров β и B для некоторых пород. Так например, для глин значения β и B составляют соответственно 1186 и 6,92 х 10^{-6}; для угля - 8900 и 3,16 х 10^{-22}; для алевролита - 16800 и 2,24 х 10^{-10}; для известняка - 20900 кг/см^2 и 6,30 х 10^{-17} час.

2.3. Прочностные свойства горных пород в массиве

Для практического использования существующих в настоящее время методов прогнозирования проявлений горного давления необходимо знать механические свойства горных пород не только в образцах, но и в массиве.

Непосредственное определение прочностных характеристик горных пород в массиве представляет собой довольно сложную как в методическом, так и в практическом отношении задачу, т.к. это связано с отделением от массива и разрушением крупных блоков горных пород. На прочность пород в массиве значительное влияние оказывает трещиноватость и масштабный эффект. Масштабный эффект заключается в том, что величина прочности горных пород зависит от размеров испытуемых образцов, а также от размеров элементарных блоков, на которые образец разбит трещинами.

Параметры трещиноватости и их влияние на прочностные показатели пород в массиве исследованы в работах М.М.Протодьяконова, С.Е. Чиркова, Г.Л. Фисенко [38,44], Д.Н. Ким [46], в работах ВНИМИ и др. [45,47]. Данные этих исследований устанавливают эмпирическую связь между параметрами выработки, трещиноватостью горных пород и видом напряженного состояния.

В частности, по данным, изложенным в работах [41,42], коэффициент ослабления

$$K = \frac{\bar{R}_{сж}}{R_{сж}}$$

для трещиноватых пород может быть принят равным 0,5÷0,25.

В работе [44] дана зависимость между сцеплением пород в массиве ($\bar{K}$) и сцеплением в куске (K) для поверхностей, не совпадающих с плоскостями ослабления.

$$\bar{K} = \frac{K}{1 + a \ln \frac{H}{\ell}},$$

где a - коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце (берется из таблиц) и характера трещиноватости. Значение коэффициента a для различных пород изменяется от 0,5 - для слабых малотрещиноватых пород до 10 - для крепких сильнотрещиноватых пород;

$\frac{H}{\ell}$ - отношение наибольшего размера выработки к среднему размеру элементарного образца.

Существует также ряд других методов [48] оценки свойств массива. Табличные значения коэффициентов ослабления приводятся в работах [38,48].

Вопрос о построении огибающей для трещиноватого массива экспериментально изучается мало. К числу немногих работ, посвященных этому вопросу, относится монография [49].

На рис.I4 изображены паспорта прочности для монолитных и трещиноватых образцов из меломергеля, известняка и песчаника.

Эксперименты показали,что огибающая для трещиноватых пород может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирована параболой такого же вида,как и для монолитных образцов.

На основании изложенного паспорт прочности массива горных пород, очевидно, может быть построен аналогично тому,как это делается по результатам испытаний образцов с учетом коэффициентов ослабления.

Например, пусть прочность на растяжение определится на образцах R_p =40 кг/см^2, а на сжатие $R_{сж}$ =500 кг/см^2. Паспорт прочности такой породы изображен на рис.I5 (кривая I). Примем коэффициенты ослабления на сжатие $K_{сж}$=0,5, а для растяжения сильно трещиноватого массива K_p =0,0I. Тогда паспорт прочности этой же породы в массиве с учетом трещиноватости будет изображаться кривой 2.

Горные породы и состоящие из них массивы в общем случае следует рассматривать как анизотропные тела. При этом необходимость учета анизотропии массива связана с размерами рассматриваемой области.

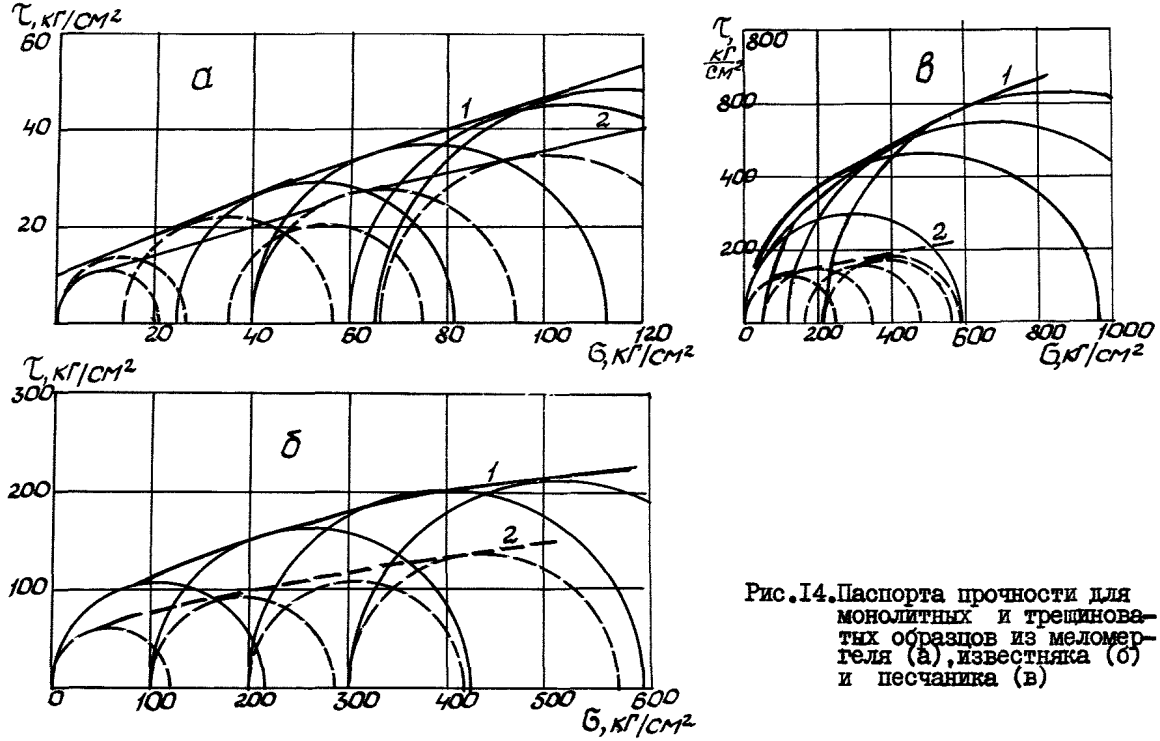


Рис.I4.Паспорта прочности для монолитных и трещиноватых образцов из меломергеля (а), известняка (б) и песчаника (в)

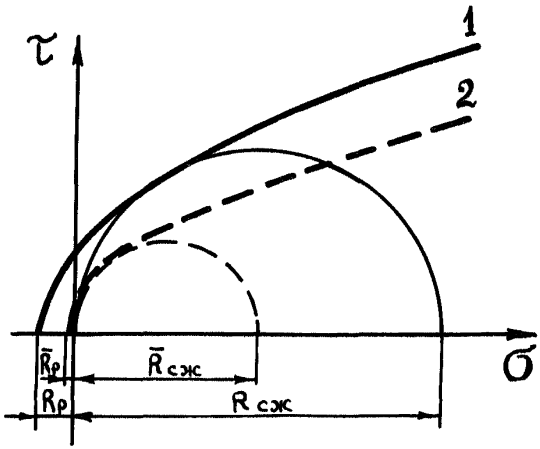


Рис.I5. Построение паспортов прочности для монолитных образцов и массива для одной и той же разновидности горных пород

§ 3. Условия работы крепей

Условия работы крепи определяются совокупностью действующих на нее внешних факторов,к которым можно отнести характер проявлений горного давления, обводненность и химический состав шахтных вод, температуру, вентиляционный режим, нагрузку от подвесных коммуникаций и оборудования.

Наиболее существенным фактором, определяющим расчетную нагрузку и конструктивные размеры крепи, является фактор горного давления. Поэтому в данной работе под условиями работы крепи будем понимать характер внешних силовых воздействий, определяющийся формами проявлений горного давления и конструкцией крепи.

Формы проявлений горного давления зависят от очень большого числа горно-геологических и горнотехнических факторов,что затрудняет создание единой теории, которая бы позволила прогнози-

ровать проявления горного давления для различных условий [54].

При разработке теоретических методов прогнозирования проявлений горного давления приходится прибегать к различным упрощениям, представляя горный массив в виде некоторой идеальной модели. Следовательно, правомерность и область применения того или иного теоретического метода должна быть экспериментально обоснована и подтверждена практикой поддержания горных выработок.

Протодьяконов М.М. (1933г.) по этому поводу писал: "В горном деле, где имеют дело с породами в массиве и где масштабы грандиозны, поставить опыты, меняя обстановку по усмотрению, очень трудно и никто их не делал. Но зато такие опыты делала в течение столетий практика. Она ощупью искала размеры, соответствующие давлению, и грубость своих методов возмещала огромным количеством наблюдений. Поэтому практические размеры крепления есть пока единственное средство проверки теорий, и средство надежное, ибо это есть факт".

В настоящее время определение нагрузок на крепь по ее практическим размерам не является конечно единственным методом, однако, в сочетании с методом инструментальных наблюдений путем установки комплексных замерных станций метод определения нагрузок по результатам обследования горных выработок может дать надежную основу для изучения и классификации условий работы крепей в производственных условиях и создания на этой основе экспериментально-теоретических методов прогнозирования.

3.I. Определение нагрузок на крепь по результатам обследования горных выработок

Обследование горных выработок в сочетании с простейшими измерениями дает возможность определить несущую способность крепи, которая, как указывалось выше, при обработке больших массивов данных может быть приравнена к фактически действующим нагрузкам.

Для того, чтобы определить несущую способность крепи, необходимо знать расчетную схему, конструктивные размеры крепи и плотность ее установки. Наиболее просто определяются нагрузки для крепей, имеющих статически определимую схему работы (трапециевидные и прямоугольные сборные крепи). Для статически неопределимых схем (арочные, полигональные и многошарнирные крепи) определение несущей способности представляется возможным только

в том случае, если будет известна заранее форма эпюры активного давления и пассивного отпора или их алгебраическая сумма.

Для сборных крепей трапециевидного и прямоугольного очертаний, расчетные схемы которых приведены на рис.16, момент в верхняке крепи может быть найден из выражения:

$$M = M_1 + M_2 ,$$

где M_1 - момент от вертикальной нагрузки $q_в$;

M_2 - момент от горизонтальной реакции стойки H_i , приложенной с некоторым эксцентриситетом e по отношению к центру тяжести сечения верхняка.

Покажем, что напряжения, возникающие в верхняке крепи, зависят главным образом от вертикального давления пород $q_в$.

Для доказательства определим напряжения в верхняке без учета влияния сжимающей боковой нагрузки от стоек

$$\sigma_1 = \frac{q_в l_в^2}{8W} \qquad (29)$$

и дополнительные напряжения, возникающие за счет эксцентриситета приложения реакции стойки,

$$\sigma_2 = \frac{q_г h_c e}{2W} \pm \frac{q_г h_c}{2F} . \qquad (30)$$

Затем найдем суммарное напряжение с учетом действия боковой нагрузки и влияния эксцентриситета ее приложения

$$\sigma = \frac{\frac{q_в l_в^2}{8} - \frac{q_г h l}{2}}{W} \pm \frac{q_г h}{2F} , \qquad (31)$$

где $q_г$ и $q_в$ - вертикальная и горизонтальная равномерно распределенные нагрузки;

l - пролет верхняка;

h - высота выработки;

e - эксцентриситет приложения реакции стойки по отношению к центру тяжести сечения верхняка;

W и F - момент сопротивления и площадь поперечного сечения верхняка.

В качестве примера рассчитаем напряжения в верхняке из дерева при следующих данных:

$$q_в = 5\ т/м ;\ q_г = 3\ т/м ;\ l_в = 3\ м ;\ h = 2{,}5\ м ;\ d = 25\ см ;$$

$$e \cong 6\ см .$$

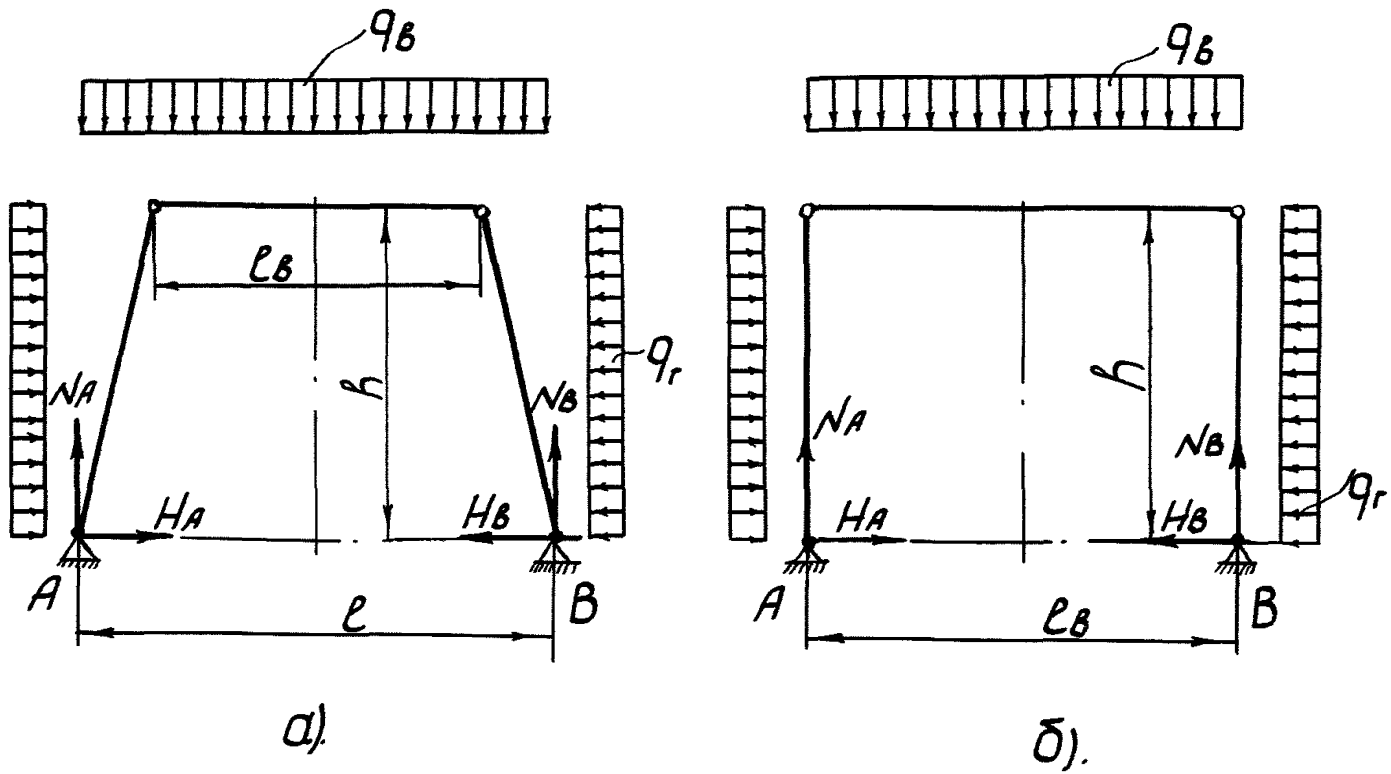


Рис.I6. Расчетные схемы для сборных крепей
- трапециевидного очертания;
- прямоугольного очертания

Тогда

$$\sigma_1 = \frac{50 \cdot 400^2 \cdot 32}{8 \cdot 3{,}14 \cdot 25^3} = 366 \text{ кг/см}^2 ;$$

$$\sigma_2 = \frac{30 \cdot 250 \cdot 25 \cdot 32}{2 \cdot 4 \cdot 3{,}14 \cdot 25^3} \pm \frac{20 \cdot 250 \cdot 4}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 25^2} = 30 \pm 7 \text{ кг/см}^2.$$

Аналогично можно показать, что дополнительные напряжения, возникающие в верхняке от реакции стойки, составляют в среднем 8–10% и могут не учитываться.

При расчете крепи по несущей способности (первое предельное состояние) условие прочности для изгибающих моментов записывается в следующем виде [55] :

$$M_p \leq m K^o R^н W_{нт} , \qquad (32)$$

где $M_p = M \cdot n$ – расчетный изгибающий момент от нормативных нагрузок, умноженный на соответствующий коэффициент перегрузки;

m – коэффициент условий работы;

K^o – коэффициент однородности материала;

$R^н$ – нормативное сопротивление (предел прочности) материала;

$W_{нт}$ – момент сопротивления поперечного сечения (нетто) элемента крепи.

Учитывая изложенные выше соображения, условие прочности (32) может быть представлено в виде

$$\frac{q l^2}{8} n \leq m K^o R^н W_{нт} , \qquad (33)$$

где q – нормальная (фактическая) нагрузка;

$q \cdot n$ – расчетная нагрузка;

$K^o R^н$ – расчетное сопротивление материала.

Если для сосны нормативное сопротивление на изгиб $R^н$ равно 736 кг/см^2, а расчетное R равно 130 кг/см^2, то коэффициент однородности $K^o = \frac{130}{736} = 0{,}177$.

Приняв по нормам коэффициент перегрузки в обычных условиях $n = 1{,}2$, а $m = 0{,}9$, получим следующее значение общего нормативного коэффициента запаса:

$$K = \frac{1{,}2}{0{,}9 \times 0{,}177} = 7{,}5$$

Протодьяконов М.М. рекомендует принимать коэффициент запаса для крепи от 2 до 4. Следуя этому, примем $K = 3{,}5$, коэффициент перегрузки n возьмем по СНиП II-М.4-62 равным 1,2, коэффициент

условий работы m -равным 0,9, тогда коэффициент однородности для материала крепи окажется следующим:

$$K^{o} = \frac{1,2}{0,9 \times 3,5} = 0,381$$

Окончательная формула для определения расчетной нагрузки при стандартной влажности древесины и $K = 0,381$ будет иметь вид:

$$q_n = \frac{3,05\, m R^{H} W}{L \ell^{2}} \ \frac{т}{м^{2}}, \qquad (34)$$

где L - расстояние между рамами крепи, м;

ℓ - пролет верхняка, м;

R^{H} - нормативное сопротивление материала, $т/м^{2}$.

Нормативное сопротивление (предел прочности) лучше всего определять экспериментальным путем в шахтных условиях, а в случае, если это затруднено по существующим нормативам [56], с поправкой на влажность по формуле:

$$R^{w} = \frac{R^{15}}{1 + 0,04(w - 15)}, \qquad (35)$$

где R^{w} - предел прочности древесины при влажности w ;

R^{15} - предел прочности при стандартной влажности 15%, определенной при испытаниях;

w - влажность,%.

Для определения несущей способности металлической арочной крепи была разработана методика расчета [57], в основу которой были положены результаты экспериментального определения эпюры давления на крепь с помощью динамометрических станций.

При этом было установлено, что отношение интенсивности боковой нагрузки к вертикальной может быть ориентировочно принято равным 0,75 (рис.17).

Пользуясь работой [57], можно построить графики зависимости максимального момента в крепи от нагрузки для различных сечений горных выработок (рис.18).

В том случае, когда требуется в течение сжатого срока дать рекомендации по определению расчетных нагрузок с точностью, достаточной для обоснования области применения крепей, можно воспользоваться косвенным методом.

Практически определение нагрузок по данному методу для различных горно-геологических условий состоит из следующих операций:

- обследование горных выработок с целью определения характеристик применяемых крепей (размер и форма поперечного сечения

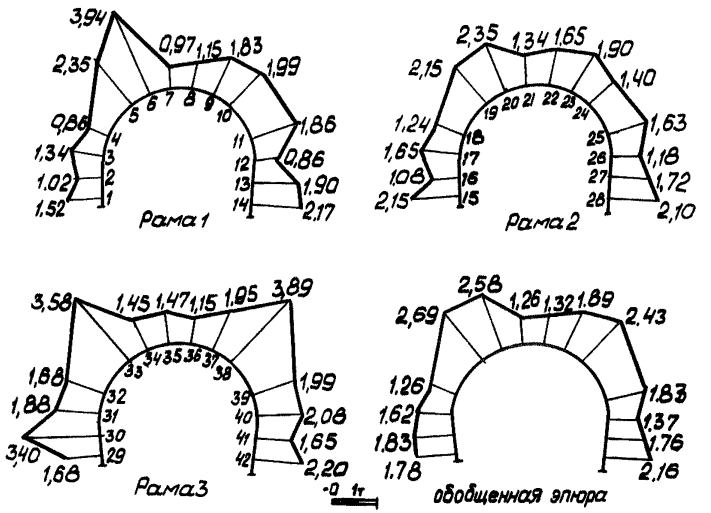


Рис.17. Эпюры нагрузок на динамометрическую арочную крепь

элементов крепи, высота, ширина и форма выработки, расстояние между рамами) и их связь с горно-геологическими условиями;

- сбор горно-геологических данных (планы горных работ, разрезы по разведочным линиям и т.д.);
- сбор данных по нарушениям крепи;
- обработка результатов.

Институтом КузНИИшахтострой в течение ряда лет проводится систематическое обследование состояния горных выработок шахт Кузбасса. Обследованию подвергаются квершлаги, полевые штреки и выработки околоствольного двора.

Всего было обследовано свыше 100 км горных выработок. По результатам обследования определялась несущая способность и, следовательно, возможная величина давления пород на крепь. На основании обработки большого числа данных сделаны следующие выводы:

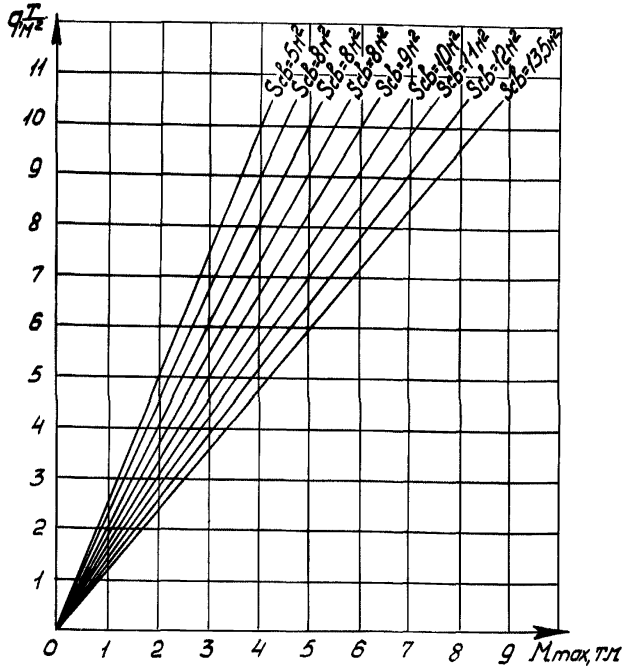


Рис.I8. Графики зависимости максимального момента в крепи от интенсивности нагрузки для различных сечений горных выработок

I. При проведении горных выработок в умеренно трещиноватых породах крепостью f =4–6 по шкале Протодьяконова М.М. нагрузка на крепь в пределах глубин I00–300 м мало зависит от глубины и составляет 3–5 т/м^2. Полевые штреки и квершлаги сечением в свету I2+I5 м^2 в этих условиях обычно крепят спецпрофилем СВП–27 через 0,8 м (рис.I9).

Используя номограмму (рис.I8), найдем несущую способность крепи при

$S = 12\ м^2$; $W = 100{,}2\ см^3$; $m = 1{,}2$; $K^0 = 1$;

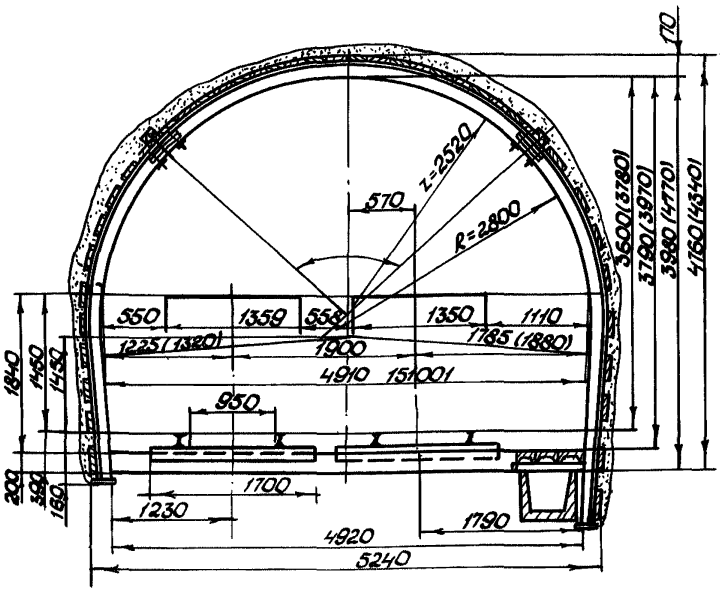


Рис.19. Паспорт крепления двухпутевой выработки металлической арочной крепью из спецпрофиля СВП-27

$$q_n = 4{,}25\ т/м^2 \qquad (36)$$

$$M_{max} = \frac{WRmK}{L} = \frac{0{,}0001 \cdot 2600}{0{,}8} = 3{,}25\ т \cdot м.$$

В этих же условиях деревянная крепь из сосновых бревен $d = 20-22$см для выработок с пролетом верхняка $\ell = 4$ м (рис.20) имеет плотность крепления 4 рамы на 1 м ($L = 0{,}25$ м). Несущая способность такой крепи определяется по формуле (34):

$$q_n = \frac{3{,}05\, m R^H W}{L \ell^2};\quad q = 5{,}8\ т/м^2;$$

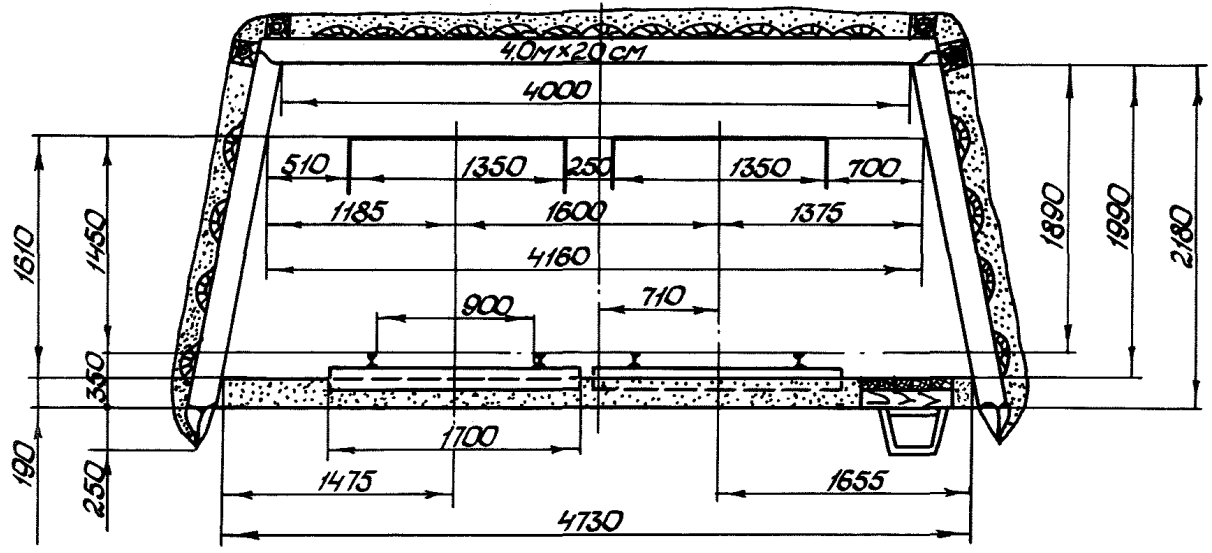


Рис.20. Паспорт крепления двухпутевой выработки деревянной крепью трапециевидного очертания

(при $R^{н}=130$ кг/см^2; $W=\frac{\pi d^3}{32}$).

Таким образом были обработаны большие массивы наблюдений, которые позволили установить, что для данных условий средняя расчетная нагрузка на крепь равна 4 т/м^2. Коэффициент вариации при этом составил 40%.

2. При проведении выработок в сильно трещиноватых породах крепостью f =4–6 нагрузка на крепь в значительной степени зависит от глубины и по результатам обработки данных по Прокопьевско-Киселевскому району Кузбасса на глубине 100 м составляет 4–5 т/м^2, на глубине 200 м – 5–7 т/м^2, на глубине 300 м – 8–12 т/м^2.

В районах крупных геологических нарушений, сопровождающихся зонами дробления мощностью 20–30 м, нагрузки на крепь могут быть еще более значительными и на глубине 200–400 м, по данным обследования шахт "Физкультурник" (Анжерский район), им. Калинина и "Северный Маганак" (Прокопьевский район), достигают 20–30 т/м^2.

На рис.21 показано разрушение металлической крепи и пород в забое в зоне геологических нарушений на шахте им. Калинина, а на рис.22 – разрушение бетонной крепи при пересечении геологического нарушения квершлагом на шахте "Судженская".

3. При проведении выработок в слабых увлажненных породах глинистого типа нагрузки на крепь, по результатам обследования шахт им. Ярославского (Ленинский район) и "Листвянская" (Новосибирский район), на глубине 100–200 м достигают 30–40 т/м^2, причем разрушение крепи сопровождается полным заполнением выработки разрушенной породой, т.е. наблюдается процесс течения окружающего выработку горного массива. На рис.23 показано разрушение металлической крепи и отдельных ее элементов в полевом штреке шахты "Листвянская".

3.2. Измерение нагрузок на крепь с помощью динамометрических станций

Измерение нагрузок в зависимости от конструкции крепи производится при помощи стоечных динамометров, измерительных площадок, битумных баллонов и специальных динамометрических крепей [59,60].

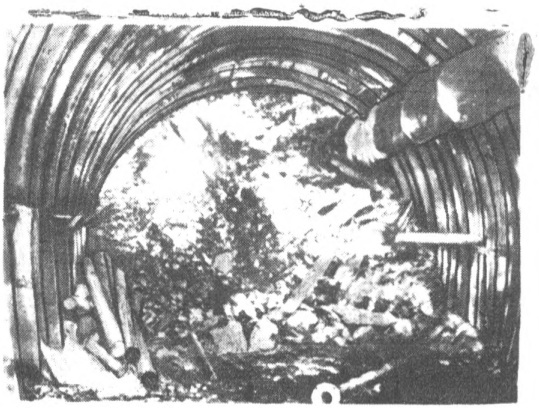


Рис.21. Разрушение металлической крепи и пород в забое в зоне геологических нарушений полевого штрека шахты им.Калинина

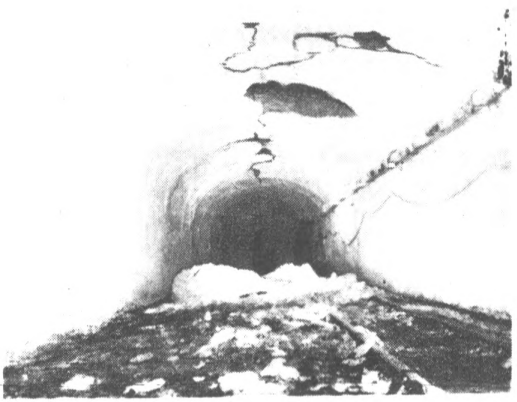


Рис.22. Разрушение бетонной крепи при пересечении геологического нарушения квершлагом на шахте "Судженская"

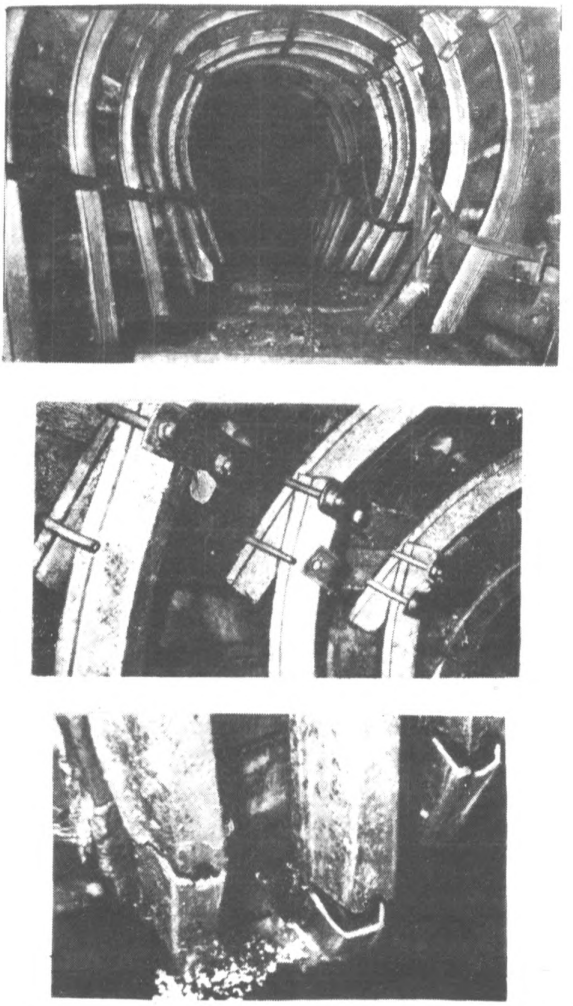


Рис.23. Разрушение металлической крепи и отдельных ее элементов в полевом штреке шахты "Лиственская"

На основании многолетнего опыта измерения нагрузок на крепь в условиях Кузбасса автором разработан ряд динамометрических крепей (а.с.№ 310052 от 2 марта 1963 года) [55, 61] , которые были использованы при установке 23 станций на различных шахтах Кузбасса. Некоторые станции находятся в работе более 10 лет, что говорит об их высоких эксплуатационных качествах.

Конструкции сборной железобетонной тюбинговой и металлической динамометрических крепей представлены на рис.24, 25.

Динамометрическая крепь типа ДТК состоит из динамометрических тюбингов, отличающихся от обычных железобетонных тюбингов тем, что на них с помощью закладных деталей и натяжных болтов укреплены сварные металлические площадки. Площадки опираются на винтовые пружины сжатия.

Давление горных пород воспринимается площадками и передается на пружины, осадка которых прямо пропорциональна воспринимаемой нагрузке и определяется индикаторами часового типа с точностью $\pm 0{,}01$ мм.

Нагрузка на отдельную пружину определяется по тарировочному графику, а на весь тюбинг-по формуле:

$$P = K\sum_{1}^{n}(m_2 - m_1) + P_1, \qquad (37)$$

где K – средний тарировочный коэффициент, т/мм;

m_1 – первоначальный отсчет по индикатору в момент установки тюбинга, мм;

m_2 – вторичный отсчет по индикатору, мм;

n – количество пружин, поддерживающих площадку;

P_1 – суммарное усилие предварительного сжатия всех пружин динамометрического тюбинга перед установкой, т.

Техническая характеристика динамометрического тюбинга крепи ДТК

Площадь тюбинга, $м^2$	– 1,36
Предельная нагрузка, $т/м^2$	– 10,0
Осадка площадки под предельной нагрузкой, мм	– 8,0
Радиус крепи в свету, мм	– 2600
Радиус крепи вчерне, мм	– 2885
Количество рабочих пружин, шт.	– 4
Вес тюбинга, кг	– 336

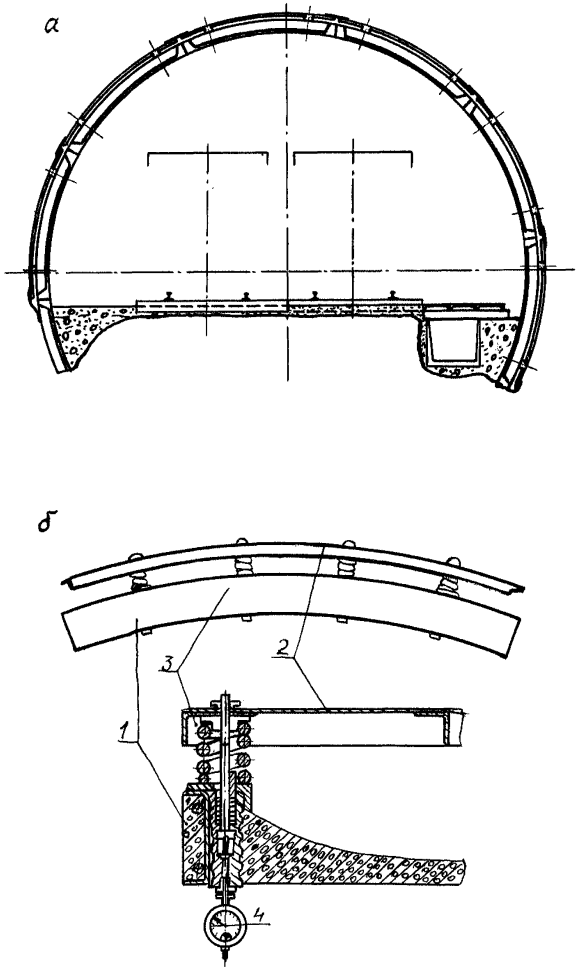


Рис.24. Динамометрическая крепь для измерений нагрузок на сборные железобетонные тюбинговые крепи:
а - общий вид;
б - динамометрический тюбинг

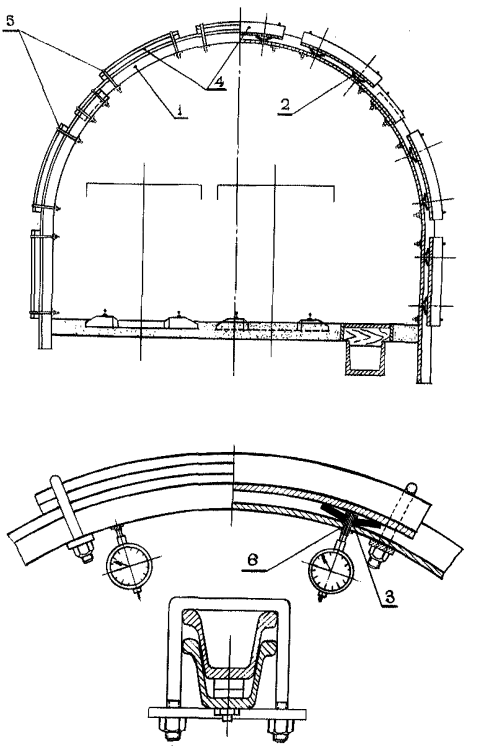


Рис.25. Динамометрическая крепь для измерений нагрузок на металлические арочные крепи

Перед монтажом динамометрических тюбингов крепи ДТК пружины предварительно тарировались на прессе, при этом коэффициент вариации оказался равным 7%, что свидетельствует о достаточной однородности пружин.

Среднее значение прироста деформации пружины при увеличении нагрузки на 250 кг заключено в интервале I,23÷I,30 мм.

СТАНЦИЯ № 1, 2	БАССЕЙН КУЗБАСС	МЕСТОРОЖДЕНИЕ БЕЛОВСКОЕ	ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Геологическая колонка и механические свойства пород

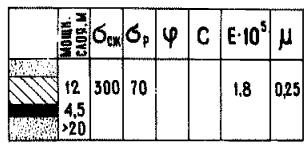


Схема расположения выработок в районе замерной станции

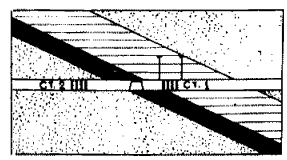
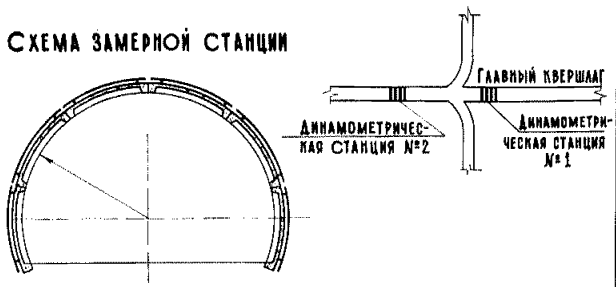


Схема замерной станции



Обобщенные эпюры нагрузок

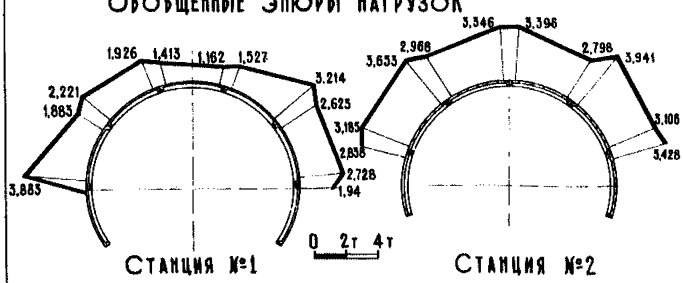
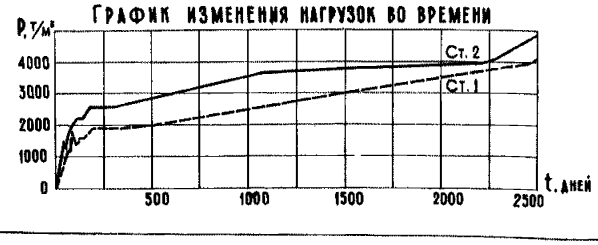


График изменения нагрузок во времени



Комбинат	Кузбасс-уголь
Свита пород	Ерунаковская P_2^{er}
Наименование выработки	Главный квершлаг
Глубина, м	180
Угол падения, град.	25
Способ проходки	Б.В.Р. полным сечением
Тип крепи и ее характеристика	Ребристая тюбинговая R = 2,5 (Кузниишахтострой)
Площадь выработки, м² в свету / вчерне	10,8 / 13,1
Применяемая аппаратура	Динамометрическая крепь ДТК-3 (Кузниишахтострой)
Состояние крепи	Удовлетворительное, перекрепления не производилось
Коэффициент вариации нагрузок	Ст.1 - 0,41 Ст.2 - 0,21
Отчет или статья, содержащие подробные сведения	Отчеты Кузниишахтострой за 1962 - -1972 гг.

Рис.26. Паспорт наблюдений по станциям № I, 2

Установка динамометрических тюбингов в выработке может производиться с помощью крепеукладчиков типа УТ-1м конструкции института ЦНИИподземмаш или К-1000 конструкции ВНИИОМШСа. Швы между изгибами соседних тюбингов перекрываются отрезками транспортерной ленты для того, чтобы между тюбингами и щитом не попадали куски породы. По длине выработки устанавливаются рядом не менее трех колец, что обеспечивает возможность определения закономерности распределения нагрузки по периметру крепи, несмотря на влияние случайных факторов.

Забутовка закрепного пространства на участке динамометрической станции производится обычно мелкой породой для того, чтобы не изменять режим работы крепи.

Динамометрическая крепь АДК-1 предназначается для измерения нагрузок на металлические рамные крепи и состоит из типовой грузонесущей арки (1), выполненной из спецпрофиля. Внутри спецпрофиля этой же арки на дне желоба в необходимых точках по периметру установлены пружины рессорного типа (2), упругодеформирующиеся под воздействием приложенных нагрузок. Пружины закреплены на дне желоба спецпрофиля с помощью специальных болтов (3) с гайками и попарно накрыты отрезками спецпрофиля (4) для восприятия действующей нагрузки. Отрезки спецпрофиля для предотвращения сползания их во время работы закреплены на грузонесущей арке стандартными хомутами (5). Болты выполнены полыми для ввода удлиненной ножки съемного индикатора 6. Крепь АДК может монтироваться как на поверхности, так и в шахте.

Нагрузка со стороны окружающих выработку пород воспринимается отрезками спецпрофиля и передается пружинам (2). При деформации пружин отрезки спецпрофиля смещаются внутрь, в результате чего изменяется расстояние от опорных площадок на концах специальных болтов до внешней стороны дна отрезков спецпрофиля.

Периодические замеры этого расстояния осуществляются переносным индикатором с удлиненной ножкой. Сопоставление результатов с первоначальными замерами, произведенными сразу после установки крепи, дает возможность определить величину деформации пружин за определенный промежуток времени.

Нагрузку на крепь в измеряемой точке определяют из тарировочного графика, построенного по данным тарировки пружин в лабора-

торных условиях. Перетяжка бортов и кровли выработки после установки динамометрических арок производится в обычном порядке.

Техническая характеристика арочной динамометрической крепи АДК-I

Количество пружин на раму, шт.	I0-30
Точность измерения, т/м^2	0,02-0,04
Рабочая нагрузка, т/м^2	5-I0
Осадка пружин под рабочей нагрузкой, т/мм	2,2I-4,42

Преимущества этих видов крепей перед известными конструкциями заключаются в том, что измерительные средства монтируются на базе исследуемых крепей, составляя с ними единое целое. Все это позволяет значительно уменьшить их стоимость, не нарушается статическая схема работы крепи и обеспечивается высокая точность и надежность при длительной эксплуатации.

3.3. Анализ результатов натурных измерений

На основании данных, приведенных в настоящей работе (табл.3), и обобщения результатов измерений, выполненных различными авторами (приложение 2) и собранных по литературным источникам [93-II2], сделана попытка установить некоторые экспериментальные зависимости для сборных крепей.

Так, на рис.27 изображены графики роста нагрузок на крепь со временем для пород с различными физико-механическими свойствами. Путем обработки данных методами математической статистики с применением вычислительной машины "Наири-2" удалось установить, что уравнение для всех кривых на рис.27 имеет вид:

$$P(t) = \frac{\ln \frac{t+1}{b_n}}{a_n}, \qquad (38)$$

где t - время, сутки;

a_n, b_n - постоянные коэффициенты, определенные по данным натурных замеров.

Анализ графиков показал, что по характеру проявлений горного давления все горные породы могут быть разделены на два типа. К первому типу относятся крепкие и средней крепости трещиноватые скальные породы вне зон геологических нарушений. Нагрузки на крепь выработок, пройденных по таким породам на глубинах до 500 м, колеблются в пределах 3-5 т/м^2 (кривые 2,I).

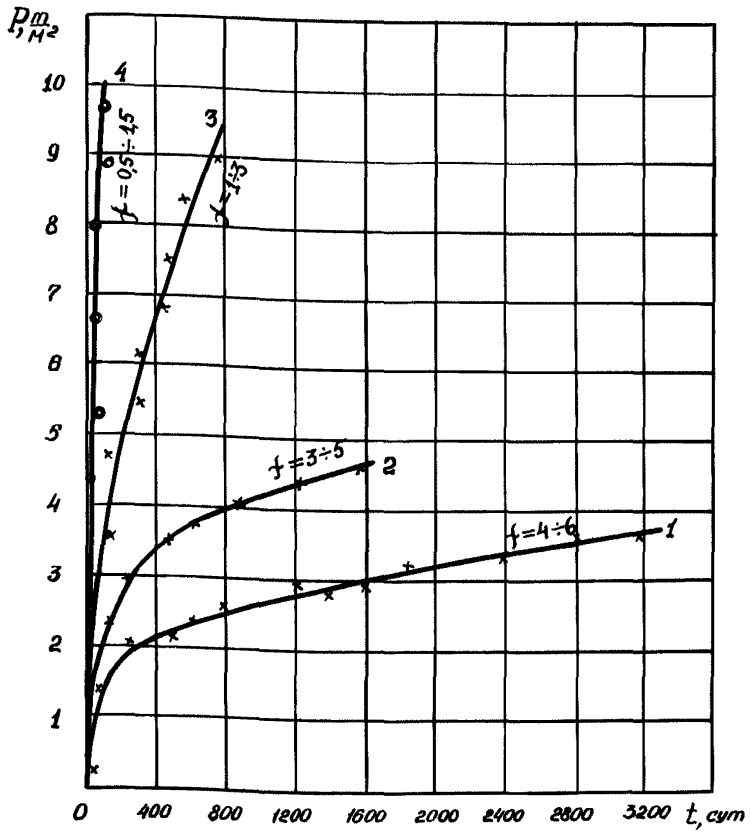


Рис. 27. Графики роста нагрузок во времени по станциям

Ко второму типу относятся слабые глинистые горные породы. Нагрузки на крепь выработок, пройденных в породах второго типа, по данным, полученным измерительными станциями № 12,16,20,25, 26 (табл.3) в слабо метаморфизированных пластичных глинах на глубине 100–200 м по истечении уже первых 100 суток, составляют 8–9 т/м^2, а для слабых перемятых глинистых сланцев $f = 1,5 \div 2,5$ на глубине 100–200 м через 100 суток составляют 3,5 т/м^2, но уже по истечении 800 суток нагрузки в этих условиях достигают 10–12 т/м^2 (кривые 1,3).

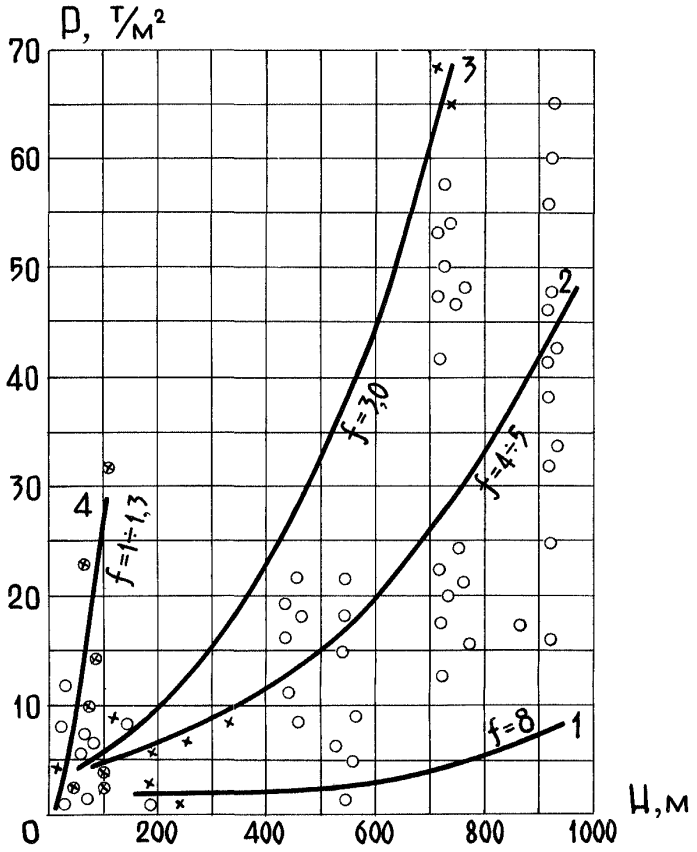


Рис.28. Графики роста нагрузок на крепь с глубиной пород различной крепости

При этом следует заметить, что рост нагрузки в породах второго типа в исследованных интервалах времени практически не затухает.

Например, для пород крепостью f = 4–6 на глубине 200–300 м (кривая I) коэффициенты a_n и b_n определяются из следующих двух уравнений:

$$P_1(t) = \frac{\ln \frac{t+1}{b_n}}{a_n}; \qquad P_2(t) = \frac{\ln \frac{t_2+1}{b_n}}{a_n}$$

или, подставив значения из кривой I (рис.28), получим

$$2{,}5 = \frac{\ln \frac{19200+1}{b_n}}{a_n}; \qquad 3{,}0 = \frac{\ln \frac{38400+1}{b_n}}{a_n},$$

откуда a_n = I,39; b_n = 600,II, а уравнение будет иметь вид:

$$P(t) = \frac{\ln \frac{t+1}{600{,}11}}{1{,}39}.$$

Аналогично:

- для второй кривой $P(t) = \frac{\ln \frac{t+1}{191}}{1{,}15}$;
- для третьей кривой $P(t) = \frac{\ln \frac{t+1}{1720}}{0{,}26}$;
- для четвертой кривой $P(t) = \frac{\ln \frac{t+1}{574}}{0{,}15}$.

Приведенные выше наблюдения и рекомендации не охватывают все многообразие условий работы крепи и должны уточняться в процессе накопления новых данных путем проведения натурных замеров, моделирования и расчетов.

На рис.28 изображены графики роста нагрузок на крепь с глубиной в зависимости от прочности на одноосное сжатие по данным приложения 2.

Обработка показала, что несмотря на значительный разброс данных все же можно проследить существование вполне четкой зависимости между нагрузкой на крепь, глубиной разработки и прочностью пород. Эта зависимость в общем виде может быть выражена уравнением вида: $P = aH^2 + bH + C$.

Таблица 3

Результаты измерений нагрузок на крепь по динамометрическим станциям

Номер станции	Место установки станции. Выработка	Период наблюдений	Глубина от поверхности, м	Характеристика пород	Вид крепи	Тип динамометрической крепи	Замеренные нагрузки, т/м^2
1	2	3	4	5	6	7	8
	шахта "Энергетическая"						
I	Главный квершлаг	I8.Ш.62г. I5.П.73г.	200	Трещиноватые аргиллиты, $R_{сж.}$ = 300-400 кг/см^2; $R_р$ = 70- 80 кг/см^2; E = I,8-2,0xI0^5 кг/см^2; ν = 0,2-0,3	Ребристая тюбинговая крепь, несущая способность I0 т/м^2; $R_{св.}$ = 2,5 м; $S_{св.}$ =I0,8 м^2	ДТК-3	3,96
2	Главный квершлаг		200				4,87
	шахта "Юбилейная"						
3	Главный квершлаг	I3.УП.68г. I2.ХП.73г.	200	Миктовые слоистые песчаники, $R_{сж.}$ = 500-700 кг/см^2; $R_р$ = 70-I00 кг/см^2; E = 2-3xI0^5 кг/см^2; ν = 0,2-0,3	Ребристая тюбинговая крепь, несущая способность I0 т/м^2; $R_{св.}$ =2,5 м; $S_{св.}$ =I2,3 м^2	ДТК-4	4,58
4	Главный квершлаг		200				5,7I

1	2	3	4	5	6	7	8
	шахта "Западная"						
5	Восточный полевой штрек	8.XII.63г. I4.XII.73г.	200	Песчаник миктовый монолитный, $R_{сж}$=800 кг/см^2; $R_р$ =I00 кг/см^2; E =4xI0 кг/см^2; ν =0,I5	Ребристая тюбинговая крепь, $R_{св}$ =2,6 м; $S_{св}$ =I3,4 м^2. Несущая способность I0 т/м^2	ДТК-4	3,46
6	Восточный полевой штрек	II.XII.63г. I4.XII.73г.	200				4,I5
7	Западный полевой штрек	30.XII.64г. I4.XII.73г.	200	Песчаник миктовый слоистый.Алевролит трещиноватый с прослойками угля			2,78
	шахта им.Ворошилова						
8	Основной штрек пласта Горелого	27.Ш.65г. 6.IX.65г.	I00	Уголь	Деревянная трапециевидная крепь. Расстояние между рамами L =0,6 м; пролет выработки ℓ =2,2 м; диаметр верхняка d = 0,2 м.	ДК-2	4,I6
9	Основной штрек пласта Горелого	27.Ш.65г. 6.IX.65г.	I00	Уголь			4,3

1	2	3	4	5	6	7	8
	шахта "Чертинская"						
I0	Главный квершлаг	28.УП.65г. I4.XII.73г.	400	Песчаник миктовый слоистый. Аргиллит слоистый трещиноватый с прослойкой угля, $R_{сж.}$ =300 кг/см^2; E =0,6xI0^5 кг/см^2; R_p = 25 кг/см^2; ν =0,45	Гладкостенная тюбинговая крепь. Несущая способность I0 т/м^2; $R_{св.}$= 2,6 м; $S_{св.}$=I3,6 м^2	ДТК-4	I,63
	шахта "Северная"						
II	Квершлаг № I46	5.Ш.66г. 6.УП.66г.	85	Песчаник, f = 2-3; E = I,33xI0^5 кг/см^2	Деревянная трапециевидная крепь, ℓ =2,4 м; d =0,25 м	ДК-2м	5,55
I2	Южный полевой штрек	4.УI.66г. 2.0I.68г.	85	Аргиллит, f = 2÷3	Деревянная трапециевидная крепь, L =0,25 м; ℓ =2,8 м; d =0,23 м		6,3
	шахта "Шушталепская"						
I3	Основной штрек	I0.X.67г. 2I.XI.70г.	II0	Уголь	Деревянная трапециевидная крепь, L =I,2 м; ℓ =4,3 м, d =0,22 м; $S_{св.}$ =I0,4 м^2	ДК-2м	2,42

1	2	3	4	5	6	7	8
I4	Квершлаг	I2.X.67г. 20.XI.68г.	228	Песчано-глинистые породы	Деревянная трапециевидная крепь, L =I,2м; ℓ =3,0 м; d =0,22м; $S_{св}$=7,83 м	ДК-2м	0,58
	шахта "Северная"						
I5	Полевой штрек	29.УП.68г. I2.УI.69г.	300	Песчаники средней устойчивости, $R_{сж}$ =200 кг/см^2; $R_р$ =20 кг/см^2; E =0,8xI0^5 кг/см^2; ν =0,4	Деревянная трапециевидная крепь установлена сплошняком, ℓ =2,4 м; d =0,2 м	ДК-2м	3,5
	шахта им.Ярославского						
I6	Обгоночная ветвь южного полевого штрека	I6.XI.69г. II.XII.7Iг.	I20	Аргиллит, $R_{сж}$ =I90 кг/см^2; E =I,29xI0^5 кг/см^2. Алевролит, $R_{сж}$=250 кг/см^2; E =I,3xI0^5 кг/см^2	Кольцевая гладкостенная тюбинговая крепь, несущая способность 20 т/м^2; $R_{св}$=2,5 м	ДТК-4	9,35
	шахта "Северная"						
I7	Северный полевой штрек	28.УШ.69г. 25. Ш.7Iг.	260	Среднезернистый полимиктовый песчаник, $R_{сж}$ =33I кг/см^2; $R_{изг}$ =67 кг/см^2; E =I,24xI0^5 кг/см^2	Арочная металлическая крепь из спецпрофиля СП-I8 с деревянной затяжкой, L = I м; $S_{св}$ =I2,5 м^2	АДК	2,85

1	2	3	4	5	6	7	8
	реконструкция шахты "Капитальная"						
I8	Скиповая грузовая ветвь околоствольного двора	I4.X.69г. I3.XII.73г.	500	Среднезернистый алевролит, $R_{сж.}$ =776 кг/см^2; $R_{изг.}$ =I43 кг/см^2; E =2,45xI0^5 кг/см^2	Коробовая металлобетонная крепь. Металлические рамы из СП-I8 установлены через L =0,5 м; $S_{св.}$ =I3,5 м^2	КДК	3,85
	шахта "Северный Маганак"						
I9	Подводящий квершлаг к южному стволу	I8.VI.70г. 26.VI.72г.	250	Аргиллит, $R_{сж}$ =I56 кг/см^2; $R_{изг.}$ =43 кг/см^2; E =I,4xI0^5 кг/см^2, Алевролит, $R_{сж}$ =I95 кг/см^2	Арочная металлобетонная крепь. Металлические рамы из СП-I8, L =0,8 м; S =I0,6 м^2	КДК	I0,2
	шахта им.Калинина						
20	Скиповая ветвь околоствольного двора	I8.VI.7Iг. 27.VI.7Iг.	250	Алевролит, $R_{сж}$ =860 кг/см^2	Арочная металлическая крепь из СВП-I7, L =0,8 м; $S_{св}$ =7,6 м^2.	АДК	0,465

1	2	3	4	5	6	7	8
21	Скиповая ветвь околоствольного двора	I5.IX.7Iг. I4.XII.73г.	250	Алевролит, $R_{сж}$ =26I кг/см^2	Коробовая металлобетонная крепь. Металлические рамы из СП-I8, L = I м; $S_{св}$ = 7,6 м^2	КДК	2,69
22	Полевой штрек	I2.X.72г. I3.XII.73г.	250	Перемятый углистый алевролит, $R_{сж}$ = 26I кг/см	Металлическая арочная крепь из СВП-27 с железобетонной затяжкой, $S_{св}$ = I6,4 м^2; L = 0,5 м	АДК	6,37
	шахта "Листвянская"						
23	Разведочный штрек	2.XI.73г. I4.XII.73г.	I00	Перемятый уголь с глинистыми прослойками, f =0,5-0,8	Металлическая арочная крепь из СВП-27, L =0,8 м с деревянной затяжкой; $S_{св}$ =8,I м^2	АДК	7,73

Для первой кривой ($f=6\div8$) - $a=10^{-5}$; $b=-685\cdot10^{-5}$; $c=3{,}92$;
для второй кривой ($f=3\div5$) - $a=6\cdot10^{-5}$; $b=-1906\cdot10^{-5}$; $c=9{,}38$;
для третьей кривой ($f=1\div3$) - $a=15\cdot10^{-5}$; $b=-2558\cdot10^{-5}$; $c=6{,}55$;
для четвертой кривой ($f=0{,}5\div1{,}5$) - $a=-414\cdot10^{-5}$; $b=69571\cdot10^{-5}$; $c=-14{,}64$.

Используя полученные результаты, легко построить график зависимости $P=f\left(\frac{R_{сж}}{\gamma H}\right)$, который изображен на рис.38.

Полученная зависимость довольно точно аппроксимируется уравнением :

$$P=\frac{180}{\frac{R_{сж}}{\gamma H}}-\frac{30}{\frac{R_{сж}}{\gamma H}}+6\ т/м^2. \qquad (39)$$

Формула (39) может быть использована для расчета давления на крепь сборных крепей с забутовкой из породной мелочи.

3.3. Измерение смещений горных пород и крепи

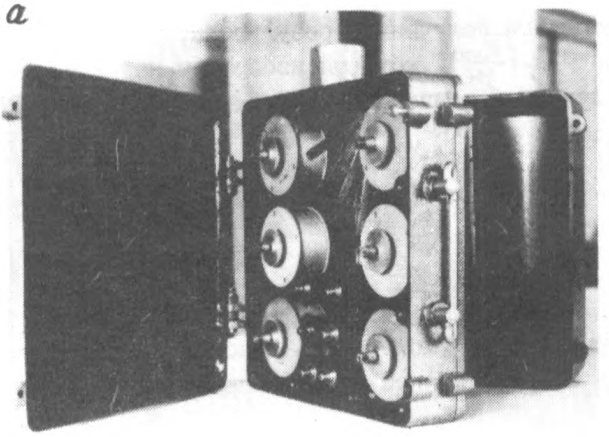
Для получения информации о характере проявлений горного давления кроме нагрузки на крепь необходимо также знать закономерности смещений горных пород.

Достаточно полная картина смещений горных пород может быть получена с помощью предложенного ВНИМИ метода глубинных реперов [62] .

Для регистрации смещений реперов и крепи разработан специальный самописец АС-6 (а.с. № 253420 от II июля 1969 г.). Общий вид самописца и его кинематическая схема приведены на рис. 29.

Автоматический самописец АС-6 состоит из корпуса, анкерной трубы для крепления прибора в скважине, барабанов со спиральными пружинами для натяжения анкерных струн и для запаса, привода ленты и пищущего устройства с грифелями. Глубинные репера с ав-

а



б

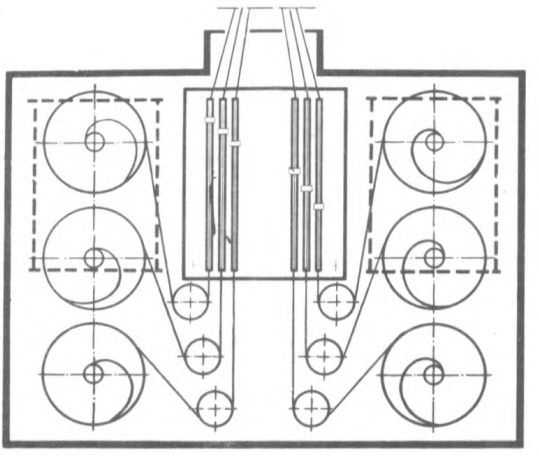


Рис.29. Самописец АС-6

а - общий вид самописца
б - кинематическая схема

томатическим самописцем АС-6 соединены струнами.

В пробуренную скважину устанавливаются глубинные репера со стальными струнами. Затем устанавливается анкерная труба, к которой гайкой прикрепляется корпус прибора, после чего анкерные струны запасовываются в прибор и закрепляются на соответствующих натяжных барабанах. После этого на соответствующей высоте на струнах укрепляются бобышки, заводится часовой механизм ведущего барабана, вставляются грифели и прибор готов к работе.

При смещении вместе с породами глубинные репера передают движение анкерным струнам, на которых укреплены бобышки с грифелями. Натяжные барабаны за счет энергии спиральных пружин выбирают смещения анкерных струн, и бобышки с грифелем, перемещаясь, оставляют на ленте график изменения сдвижения пород во времени.

Техническая характеристика самописца АС-6

Количество точек измерения, шт	- 6
Диапазон измерения без коррекции, мм	- 200
Точность измерения, мм	- 0,1
Тип лентопротяжного механизма	- МУН
Габариты, мм:	
длина	- 400
высота	- 350
ширина	- 200
В е с, кг	- 20

Применение автоматического самописца АС-6 позволяет одновременно регистрировать смещения 6 реперов в течение длительного времени (5-10 лет). Других подобных механических приборов для одновременного измерения и записи смещений горных пород в шахтах, опасных по газу и пыли, в нашей стране и за рубежом не имеется.

Относительные смещения реперов измеряются с помощью шлангового нивелира. За неподвижный репер принимается репер, наиболее удаленный от контура выработки. Обычно последний репер устанавливается на расстоянии 5+6 м от контура.

Результаты измерений смещений горных пород и крепи показаны на рис.30, 31, 32. Обобщая результаты измерений смещений горных

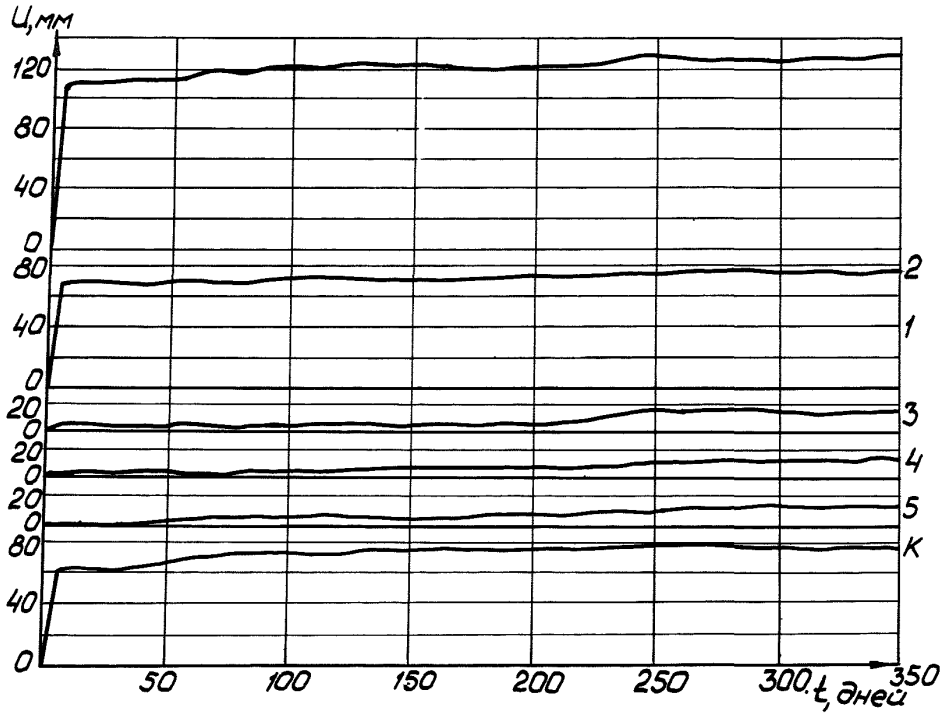


Рис. 30. Графики смещений реперов в вертикальной скважине, записанные с помощью самописца АС-6

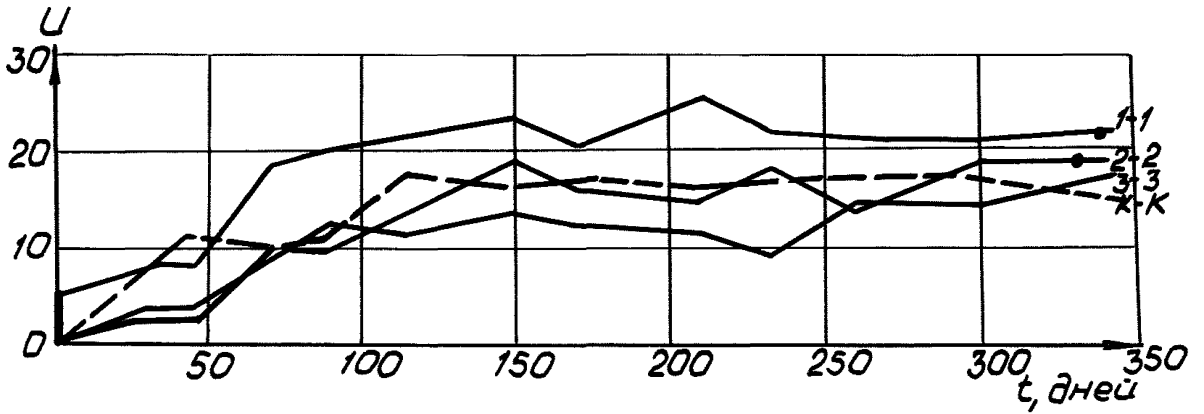


Рис. 3I. Графики смещений крепи и глубинных реперов в боковых горизонтальных скважинах для грузовой ветви околоствольного двора на реконструкции шахты"Капитальная"

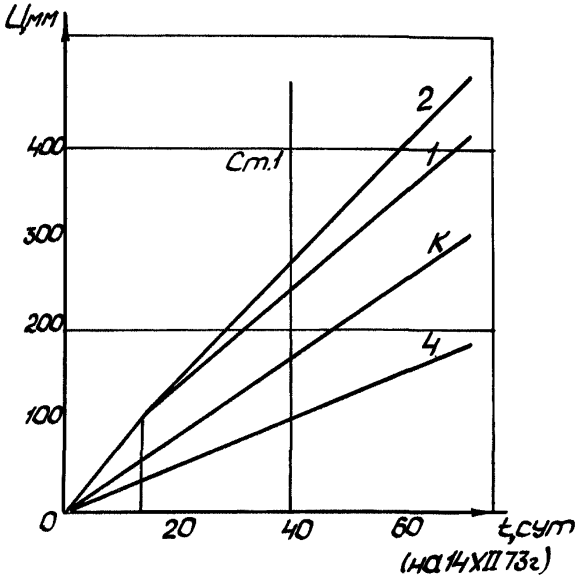


Рис.32. Графики изменения смещений реперов в зависимости от времени в вертикальной скважине одноцутевого разведочного штрека шахты "Листвянская", закрепленного металлической арочной крепью (глубина 100 м, породы представлены перемятым углем с глинистыми прослойками)

пород, можно сделать вывод, что в трещиноватых породах средней крепости (I-я группа пород) смещения распространяются на глубину более 6-7 м, считая от контура выработки. Во всяком случае репер, установленный на глубине 4-5 м, смещается на 3-10 мм. Смещения крепи, как правило, на 40-50 мм меньше, чем смещения I-го репера (счет ведется от контура). Это объясняется уплотнением забутовочного слоя. Наиболее интенсивно нагрузки растут в первые 40-50 дней. В последующий период времени скорость роста нагрузок

значительно замедляется, а часто и совсем прекращается.

В слабых породах глинистого типа скорость смещений на податливые крепи остается почти постоянной и мало зависит от времени. Смещения контура за 60 дней могут достигать 400 и более миллиметров.

§ 4. Классификация условий работы крепей

В настоящее время накоплен большой теоретический материал, посвященный решению отдельных вопросов прогнозирования проявлений горного давления, а также не менее обширные и вполне достоверные результаты о физико-механических свойствах горных пород и проявлениях горного давления в натурных условиях и на моделях, которые привязаны к конкретным горно-геологическим условиям.

В связи с изложенным назрела необходимость в создании классификации, которая позволила бы на основе натурных наблюдений и существующих теоретических предпосылок систематизировать условия работы крепей в зависимости от характера проявлений горного давления и характеристики системы крепь-забутовка-массив.

Такая классификация должна служить основой для выбора расчетной схемы при прогнозировании проявлений горного давления и для разработки основных принципов проектирования крепей.

Экспериментальные исследования, проведенные институтом КузНИИшахтострой на шахтах Кузбасса, а также исследования, выполненные институтами ИГД им.А.А.Скочинского, ВНИМИ, ДонУГИ, ЛГИ в других бассейнах страны, дают основание подразделить условия работы крепей в капитальных горизонтальных горных выработках на 6 классов, отличающихся друг от друга характером проявлений горного давления и режимом работы крепи (табл.4). Эти особенности взаимодействия крепи и массива определяют для каждого класса схемы и методы прогнозирования проявлений горного давления. Первый вариант классификации опубликован в работе [64] в 1966 г.

КЛАССИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ

Отличительные признаки:	I класс	II класс	III класс
Формы проявлений горного давления	Контур выработки устойчив	Первоначальный контур выработки разрушается, переходя в новый устойчивый для данных условий контур (свод естественного равновесия)	Первоначальный контур выработки разрушается, и восстановление равновесия в массиве возможно только при участии реакции крепи
Характеристика окружающего выработку массива	Упругий сплошной	Упругий сплошной. В разрушенной области – сыпучая среда	Упругий сплошной. В разрушенной зоне – квазипластическая или сыпучая среда
Коэффициент устойчивости контура	$n_1 \leq I$	$n_1 > I$ $n_2 \leq I$	$n_1 > I$ $n_2 > I$
Конструктивная податливость системы крепь-забутовка	$U_{кз} \geq U_{уп.}$	$U_{кз} > U_{уп.} + U_{р.}$	$U_{кз} \leq U_{уп.} + U_{р.}$
Режим работы крепи	Нагрузка отсутствует	Режим заданной нагрузки	Режим совместной работы системы крепь-порода
Распространенность и ориентировочные значения нагрузок для условий Кузбасса (H =I00÷500м)	5% P =0–I т/м^2	50% P =I–I0 т/м^2	20% P =I0–25 т/м^2

Примечание: $U_{уп.}$ – смещение породного контура за счет упругопластических деформаций;

$U_{р.}$ – смещение породного контура за счет разрыхления массива в разрушенной зоне;

$U_{кз}$ – податливость крепи и забутовки;

$n_1 = \frac{K \gamma H}{R_{сж} \xi \eta}$ – коэффициент устойчивости первоначального контура для хрупких пород;

РАБОТЫ КРЕПЕЙ

Таблица 4

IУ класс	У класс	УI класс
Первоначальный контур выработки деформируется, и вокруг выработки образуется устойчивая область предельных равновесий. Связь между элементами массива не нарушается	Восстановление равновесия массива после проходки выработки возможно только при участии крепи. Связь между элементами массива отсутствует	Восстановление равновесия массива возможно только при участии реакции крепи. Деформации окружающего выработку породного массива носят характер вязкого течения
Упругопластичный сплошной	Сыпучая среда	Вязкопластический сплошной
$n_з \leq I$	Отсутствует	$n_з > I$
$U_{кз} < U_{уп.}$	$U_{кз} < U_{уп.}$	$U_{кз} < U_{уп.}$
Режим совместной работы системы крепь-порода	Режим совместной работы системы крепь-порода	Режим совместной работы системы крепь-порода
I0%	I0%	5%
P =I0-30 т/м^2	P =I5-40 т/м^2	P =20-60 т/м^2

$n_з = \frac{K\gamma H}{R_{сж}\xi\eta K_{уд.}}$ - коэффициент устойчивости первоначального контура для пластичных пород по Н.С.Булычеву;

$n_2 = \frac{K_2\gamma H}{R_{сж}\xi\eta}$ - коэффициент устойчивости свода естественного равновесия,

где K, K_2 - коэффициент концентрации напряжений;

ξ - коэффициент длительной прочности,

η - коэффициент структурного ослабления.

4.I. Первый класс условий работы

К этому классу отнесены условия работы крепей в выработках, контур которых сохраняет устойчивость без приложения к нему внешних нагрузок. Напряженное состояние массива вокруг выработки может быть найдено на основе работ [2, 66, 67, 65], а развитие деформаций во времени - на основе решений, изложенных в работе [37].

Иначе говоря, к первому классу относятся условия работы крепи в выработках, которые теоретически можно эксплуатировать без крепления и в которых крепь играет роль конструкции, ограждающей от случайных вывалов. В качестве такой ограждающей крепи могут применяться либо обычные виды крепей, либо набрызгбетонная крепь с металлической сеткой. Набрызгбетонная крепь должна рассматриваться в данном случае как способ предохранения от выветривания и расслоения контура выработки, а не как грузонесущая конструкция. Условия работы крепи, очевидно, в данном случае являются наиболее благоприятными, а поддержание выработок - наиболее выгодно с экономической и технической точек зрения. Поэтому при выборе места заложения горных выработок и способа их проведения желательно обеспечить указанное выше условие работы крепи.

Ориентировочно к первому классу могут быть отнесены выработки, для которых коэффициент устойчивости контура

$$n = \frac{\overline{R}}{\gamma H K_2} \geq 1, \qquad (40)$$

где R - прочность массива горных пород на одноосное сжатие или растяжение;

$K_2\gamma H$ - напряжение на контуре.

Более подробно вопрос о выборе критерия устойчивости излагается в работе [II3], в которой условие устойчивости контура для хрупких пород выражается уравнением

$$K_0\gamma H \leq \xi\eta\overline{R}_{сж}.$$

Следовательно, коэффициент устойчивости $\eta = \frac{K_0\gamma H}{\xi\eta R_{сж}}$ для выработки эллиптической формы при $\lambda=0{,}5$; $\xi=0{,}5$; $\eta=0{,}7$; $K_0 = 1+2c-\lambda$.

Для круглой выработки

$$\eta = \frac{(1+2-0,5)\gamma H}{0,5\cdot 0,7\cdot R_{cm}} \geqslant \frac{2,5\gamma H}{0,35 R_{cm}} \geqslant \frac{7,15\gamma H}{R_{cm}}.$$

При $\eta<1$ контур выработки устойчив, если же $\eta>1$, следует ожидать разрушения массива вокруг выработки.

4.2. Второй класс условий работы

В том случае, когда напряжения на контуре выработки, пройденной в хрупких породах, превосходят предел прочности, начинается разрушение массива, и контур выработки стремится приобрести такую форму, при которой восстанавливается равновесие между действующими напряжениями и прочностными свойствами пород.

Многие исследователи считают, что наиболее вероятной устойчивой формой области предельных равновесий является эллипс. Экспериментальные наблюдения за развитием области предельных равновесий вокруг выработки различных форм также дают основание для такого вывода [68, 69, 70] .

Примем изложенные выше соображения за рабочую гипотезу и отнесем ко второму классу условий работы те случаи, когда при проведении выработки вокруг нее образуется новый устойчивый контур выработки или свод естественного равновесия.

Для этого класса характерным является то обстоятельство, что свод естественного равновесия формируется без учета реакции крепи и устойчив во времени. Крепь в этом случае воспринимает на себя вес пород, находящихся в объеме свода естественного равновесия.

Напряжения на контуре свода обрушения, форма которого представляет собой эллипс (рис.33), для изотропного невесомого массива определяется формулой [27, 42, 71] :

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma H}{\sin^2\theta + c^2\cos^2\theta}\left\{(1+c^2)\cos^2\theta - 1 + \lambda\left[(1+c)^2\sin^2\theta - c^2\right]\right\}, \qquad (41)$$

где θ – угол между вектором точки, где определяются напряжения, и осью x ;

c – отношение полуосей эллипса.

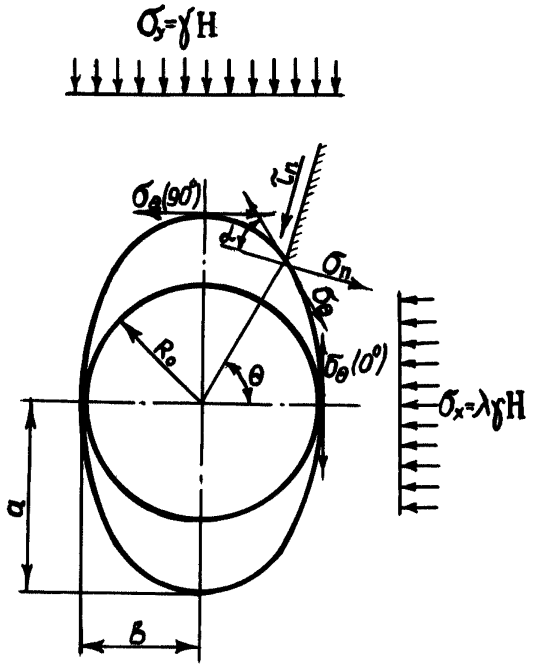


Рис.33. Расчетная схема к определению свода предельных равновесий для изотропной среды

Результаты определения $\tilde{\sigma}_\theta$ при разных C и θ приведены в приложении 3.

При $\lambda < 1$ растягивающие напряжения имеют наибольшие значения при $\theta = 90^\circ$. Решив уравнение (41) относительно C при $\theta = 90^\circ$, получим

$$C = \frac{\sigma_\theta + \gamma H(1-\lambda)}{2\lambda\gamma H}. \qquad (42)$$

Условие прочности по растягивающим напряжениям имеет вид:

$$\sigma_\theta \leq \bar{R}_p. \qquad (43)$$

Тогда размеры свода обрушения, на контуре которого принятое приведенное выше условие прочности по растягивающим напряжениям должно быть соблюдено, найдутся из выражения:

$$C = \frac{-\bar{R}_p + \gamma H(1-\lambda)}{2\lambda\gamma H}. \qquad (44)$$

Разрушение контура выработки может быть вызвано также действием касательных напряжений. Для эллиптического отверстия, контур которого свободен от внешних нагрузок, при $\lambda < 1$ наибольшие нормальные напряжения будут иметь место при $\theta = 0^0$ и могут быть найдены из уравнения:

$$\sigma_\theta = \frac{2\gamma H}{C} + \gamma H(1-\lambda). \qquad (45)$$

Условие прочности имеет вид:

$$\tau_{nt} \leq \bar{R}_\tau, \qquad (46)$$

где τ_{nt} - напряжение на площадке среза;

$\bar{R}_\tau$ - прочность породы в массиве на срез.

Для параболической огибающей, построенной по методу Г.Н.Кузнецова [26], прочность породы на срез при двухосном напряженном состоянии через K и R_p может быть определена из выражения:

$$R_\tau^2 = \frac{(\sigma_n + \bar{R}_p)\bar{K}_M^2}{\bar{R}_p}, \qquad (47)$$

где σ_n - нормальное напряжение по площадке среза;

$\bar{K}_м$ - коэффициент сцепления пород в массиве.

Для свободного контура касательные к нему напряжения являются главными. Следовательно, напряжения по площадкам, направленным под любым углом α к направлению действия σ_θ, могут быть найдены из формул:

$$\sigma_n = \sigma_\theta \cos^2\alpha ; \tag{48}$$

$$\tau_{nt} = \frac{1}{2}\sigma_\theta \sin 2\alpha . \tag{49}$$

После соответствующих подстановок условие прочности запишется в следующем виде :

$$\left(\frac{\sigma_\theta}{2}\sin 2\alpha\right)^2 = \frac{(\sigma_\theta \cos^2\alpha + \bar{R}_p)\bar{K}_м^2}{\bar{R}_p} . \tag{50}$$

Но, как ранее было показано, угол между главным напряжением σ_θ и нормалью к площадке среза

$$\alpha = arc\cos\sqrt{\frac{\bar{R}_p}{2\bar{R}_p + \bar{K}_м}} .$$

Подставив значение α в выражение (50) и выразив из него σ_θ, получим

$$\sigma_\theta = \frac{\bar{K}(2\bar{R}_p + \bar{K})}{\bar{R}_p + \bar{K}} . \tag{5I}$$

Подставим теперь найденные значения σ_θ в уравнение (45)

$$\frac{2\gamma H}{C} + \gamma H(1-\lambda) = \frac{\bar{K}(2\bar{R}_p + \bar{K})}{\bar{R}_p + \bar{K}} . \tag{52}$$

Выразив из уравнения (52) C, окончательно получим

$$C = \frac{2\gamma H \bar{R}_p}{\bar{K}(2\bar{R}_p + \bar{R}) - \gamma H(1-\lambda)\bar{R}_p}. \qquad (53)$$

Результаты определения по этой формуле на ЭВМ "Наири-2" при $\theta=0$ приведены в приложении 4.

Но с другой стороны, если принять напряженное состояние контура одноосным, то очевидно, что условие прочности на контуре может быть также записано в следующем виде:

$$\sigma_\theta \geq \bar{R}_{сж}. \qquad (54)$$

Тогда на основании формулы (45) можно записать еще одно выражение для определения размеров свода предельных равновесий:

$$C = \frac{2\gamma H}{\bar{R}_{сж} - \gamma H(1-\lambda)}. \qquad (55)$$

Результаты расчетов по этой формуле приведены в приложении 5.

Формула (5I) может быть использована для определения направления площадки скольжения при разрушении пород на контуре выработки.

Предел применимости формул (53) и (56) определяется следующим неравенством:

$$\frac{a_1}{b_1} \leq C \leq \frac{1}{\lambda}, \qquad (56)$$

где a_1 и b_1 - размеры выработки по высоте и ширине.

При $C \leq \frac{a_1}{b_1}$ можно считать, что контур выработки будет устойчив, однако необходима все же последующая проверка условий прочности в точках контура с угловыми координатами $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$.

При $C = \frac{1}{\lambda}$ тангенциальные напряжения σ_θ, как известно, имеют одинаковые значения во всех точках эллиптического отверстия.

Причем эти напряжения меньше, чем наибольшее значение при любом другом значении C . Следовательно, если при расчетах по формулам (53) и (55) получим $C > \frac{1}{\lambda}$, то это будет означать, что для данной задачи условия прочности на контуре свода обрушения не могут быть удовлетворены.

Ранее в § 2 было показано, что предел длительной прочности пород на одноосное сжатие может быть значительно меньше предела прочности, определенного обычными испытаниями.

Используя выражение (26), подставим в формулу (55) вместо $R_{сж}$ функцию этого параметра от времени. Тогда получим следующее выражение:

$$C = \frac{2\gamma H}{R(t) - \gamma H(1-\lambda)} \qquad (57)$$

или

$$C = \frac{2\gamma H}{\frac{B}{\ln\frac{1+1}{\beta}} - \gamma H(1-\lambda)} \cdot \qquad (58)$$

При этом необходимо иметь в виду, что расчеты размеров свода с учетом длительной прочности (см.приложение 6) носят ориентировочный характер, т.к. закономерности изменения прочностных свойств горных пород с учетом фактора времени изучены недостаточно.

На рис.34 приведены графики изменения высоты свода предельных равновесий в зависимости от времени с учетом длительной прочности при λ =0,5 для породы с пределом прочности в массиве $\bar{R}_{сж}$ =1800 т/м^2.

Длительная прочность играет весьма существенную роль в формировании характера проявлений горного давления для самых различных условий.

Реальные горные массивы, слагающие угленосные толщи, представляют собой, как уже отмечалось выше, слоистые трещиноватые среды.

Следуя Лехницкому С.Г. [50, 51, 52] , реальная слоистая среда может быть с известной степенью точности заменена тран-

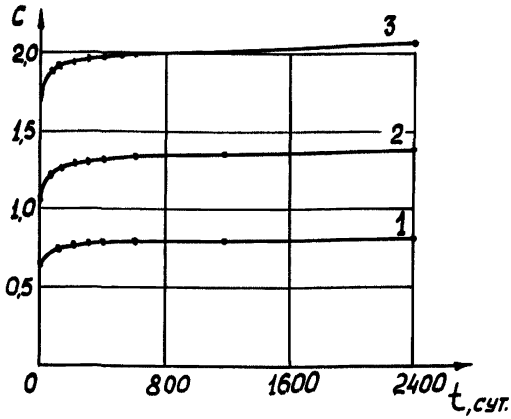


Рис.34. Графики зависимости высоты свода предельных равновесий от времени

сверсально-изотропной.

Для такой среды Лехницким С.Г. дано решение, определяющее напряжения на контуре эллиптического отверстия, в следующем виде:

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma H \ell^2}{S P}\left\{\frac{N P}{C^2}\sin^2\theta - \frac{1}{C}\left[MN + K\left(L + \frac{1}{C}P\right)\right]\sin\theta\cos\theta + \right.$$

$$\left. + \left[K\left(K + \frac{1}{C}M\right) + N\left(N - \frac{1}{C}L\right)\right]\cos^2\theta\right\} + \lambda\,\frac{\gamma H \ell^2}{S}\left\{\frac{1}{C}\left(L + \frac{1}{C}P\right)\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\sin^2\theta - \left(K + \frac{1}{C}M\right)\sin\theta\cdot\cos\theta + N\cos^2\theta\right., \qquad (59)$$

где

$$K = 0{,}5\,n\,(1-\kappa)\sin 2\psi\,; \qquad (60)$$

$$L = 0{,}5\, n\,[1+\kappa+(1-\kappa)\cos 2\psi];$$

$$M = 0{,}5\,[1-\kappa^2+(1+\kappa^2-m)\cos 2\psi]; \qquad (6I)$$

$$N = 0{,}25\,(1+\kappa^2-m)\sin^2 2\psi - \kappa;$$

$$S = \Big(\frac{1}{\beta_{11}^0}\,[\beta_{11} c^4 \sin^4\theta - 2\beta_{16} c^3 \sin^3\theta\cos\theta + (2\beta_{12}+\beta_{66})\cdot$$

$$\cdot c^2 \sin^2\theta\cos^2\theta - 2\beta_{26} c \sin\theta\cos^3\theta + \beta_{22}\cos^4\theta]; \qquad (62)$$

$$\ell^2 = \cos^2\theta + \frac{1}{c^2}\sin^2\theta; \qquad (63)$$

$$P = 0{,}125\,[3+3\kappa^2+m+4(1-\kappa^2)\cos 2\psi+(1+\kappa^2-m)\cos 4\psi; \qquad (64)$$

$$\beta_{11} = \beta_{11}^0\, P; \quad \beta_{22} = \beta_{11}^0\,[P-(1-\kappa^2)\cos 2\psi]; \qquad (65)$$

$$\beta_{12} = \beta_{11}^0\,[-\alpha+0{,}25\,(1+\kappa^2-m)\sin^2 2\psi]; \qquad (66)$$

$$\beta_{66} = \beta_{11}^0\,[\beta+(1+\kappa^2-m)\sin^2 2\psi]; \qquad (67)$$

$$\beta_{16} = 0{,}5\,\beta_{11}^0\,[1-\kappa^2-(1+\kappa^2-m)\cos 2\psi]\sin 2\psi; \qquad (68)$$

$$\alpha = \frac{\nu_2}{1-\nu_1}; \qquad \beta = \frac{q}{1-\nu_1^2}; \qquad (69)$$

$$\beta_{11}^0 = \frac{1-\nu_1^2}{E}; \quad \beta_{22}^0 = \frac{1}{E_2} - \frac{\nu_2^2}{E_1}; \quad \beta_{12}^0 = \frac{\nu_2(1+\nu_1)}{E_1}; \qquad (70)$$

$$\beta_{66}^0 = \frac{1}{c^2}; \quad \kappa^2 = \frac{\ell-\nu_2^2}{1-\nu_1^2}; \quad m = \frac{q-2\nu_2(1+\nu_1)}{1-\nu_1^2}; \quad n = \sqrt{2\kappa+m}; \qquad (7I)$$

где ψ – угол между плоскостью анизотропии и горизонтальной плоскостью;

E_1 – модуль упругости для направлений, лежащих в плоскостях изотропии;

E_2 – модуль упругости для направлений, нормальных к плоскостям изотропии;

ν_1 – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в плоскости изотропии при приложении нагрузок в той же плоскости;

ν_2 – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в направлении, нормальном к плоскости изотропии, при приложении напряжений в этой же плоскости;

C_1, C_2 – модули сдвига для плоскостей изотропии и для плоскостей, нормальных к плоскостям изотропии;

a – большая полуось эллипса;

b – меньшая полуось эллипса;

θ – центральный угол эллипса, отсчитываемый от горизонтальной оси против часовой стрелки.

Для детального анализа степени влияния анизотропии на величину напряжений для пород Кузбасса нами были проведены расчеты с помощью ЭЦВМ "Наири-2". Результаты расчетов приведены в приложении 7.

Расчеты показали, что даже при очень большой анизотропии упругих свойств напряжения на контуре эллиптической выработки при самых различных соотношениях полуосей изменяются незначительно.

Отклонения числовых показателей напряжений в анизотропной среде от соответствующих показателей, вычисленных для изотропной среды, составляют всего 0,5–0,6%.

Это обстоятельство позволяет при решении практических задач по определению контурных напряжений σ_θ для слоистых массивов использовать выражение (4I).

Ранее было показано, что, кроме упругой анизотропии, слоистые среды обладают так называемой прочностной анизотропией, которая выражается в том, что прочностные показатели (R_p, R_{cm}, R_τ) таких сред зависят от угла наклона главных напряжений к плоскостям анизотропии.

В частности было показано, что

$$R_{cm}^{\psi} = \frac{R_{cm}^{\perp} - 17{,}9\,R_p^{\perp}}{4096}\,\psi + \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} - R_{cm}^{\perp}}{32} + R_{cm}^{\perp}, \qquad (72)$$

$$R_\rho^\psi = \frac{R_\rho'' - R_\rho^\perp}{90}\psi + R_\rho^\perp \cdot \qquad (73)$$

Для определения размеров области предельных равновесий с учетом слоистой анизотропии необходимо составить условия равновесия на контуре эллиптического отверстия в зависимости от отношения полуосей $\frac{a}{b}$ и угловой координаты „θ" точки N (рис.35).

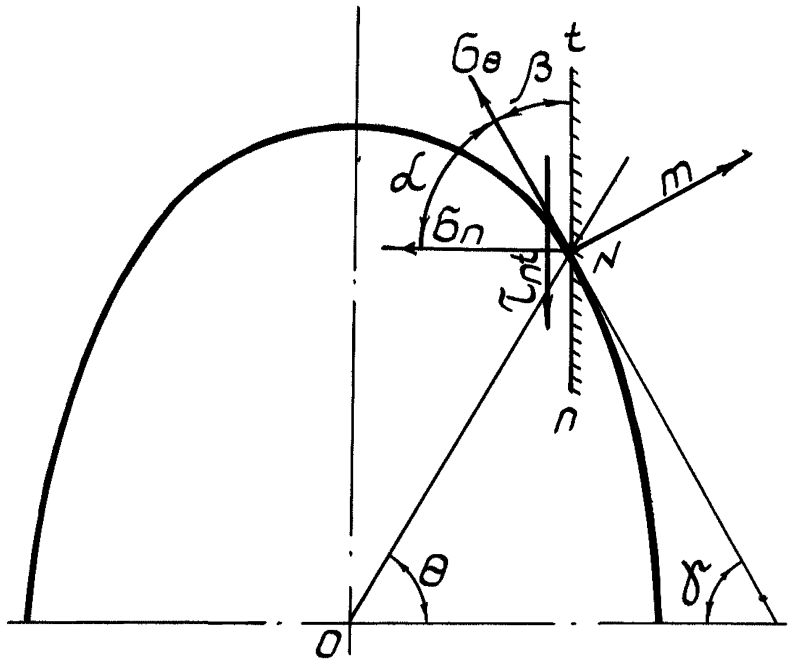


Рис.35. Схема к определению зависимости между углами γ и θ

Для того, чтобы найти угол наклона плоскости анизотропии к нормали для любой точки контура, продлим линию действия касательных напряжений до пересечения с осью абсцисс и обозначим угол между касательной к точке N и осью абсцисс – γ .

Выразим угол γ через θ и C следующим образом. Координаты точки касания M (X, Y), касательной к эллипсу с отношением полуосей C, можно представить в виде:

$$\begin{cases} x = b\cos\varphi ; \\ y = a\sin\varphi , \end{cases} \tag{74}$$

тогда

$$tg\alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{y'_\varphi}{x'_\varphi} = -\frac{a\cos\varphi}{b\sin\varphi} = -\frac{a}{b}ctg\varphi, \tag{75}$$

где

$$\alpha = 180^\circ - \gamma , \qquad \text{т.е.} \quad tg\alpha = tg(180^\circ - \gamma) \tag{76}$$

или

$$tg(180^\circ - \gamma) = -\frac{a}{b}ctg\varphi ; \quad tg\gamma = \frac{a}{b}ctg\varphi , \tag{77}$$

но

$$ctg\varphi = \frac{a}{b}ctg\theta ,$$

откуда $tg\gamma = \frac{a^2}{b^2}ctg\theta$ или

$$\gamma = arc\,tg\,(c^2 ctg\theta). \tag{78}$$

Когда плоскости анизотропии расположены вертикально, $\xi = 90^\circ$, то из построения (рис.36а) очевидно, что $\psi = \gamma$, т.е. для данного случая

$$\psi = arc\,tg\,(\kappa^2 ctg\theta).$$

Для горизонтального расположения слоев, $\xi = 0^\circ$, угол ψ из построения (рис.36б) определяется по формуле:

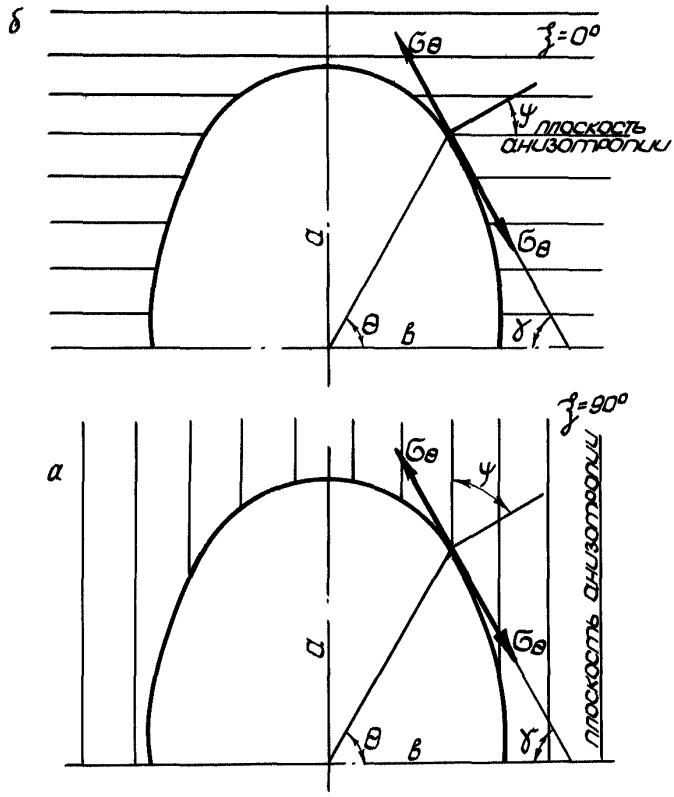


Рис.36. Расчетные схемы к определению устойчивого контура для слоистых пород:

а - при $\zeta=90^\circ$;

б - при $\zeta=0^\circ$.

$$\psi = 90^\circ - \gamma = 90^\circ - arc\,tg\,(c^2 ctg\,\theta). \qquad (79)$$

На основании изложенных ранее соображений условие прочности на контуре эллиптического отверстия может быть записано в следующем виде: $\sigma_\theta \le R_{cm}^{\psi}$ или, подставив соответствующие выражения для σ_θ из уравнения (41) и R_{cm}^{ψ} из уравнения (72), получим:
при $\psi = \gamma\ (\xi = 90^\circ)$

$$\frac{R_{cm}^{\perp} - 17{,}9\,R_p^{\perp}}{4096}\left[arc\,tg\,(c^2 ctg\,\theta)\right]^2 + \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} - R_{cm}^{\perp}}{32} \times arc\,tg\,(c^2 ctg\,\theta) + R_{cm}^{\perp} =$$

$$= \frac{\gamma H}{\sin^2\theta + c^2\cos^2\theta}\left\{c^2\cos^2\theta - c^2\sin^2\theta + 2c\cos^2\theta + \lambda\left[(1+c)^2\sin^2\theta - c^2\right]\right\}; \qquad (80)$$

при $\psi = 90^\circ - \gamma\ \ (\xi = 0^\circ)$

$$\frac{R_{cm}^{\perp} - 17{,}9\,R_p^{\perp}}{4096}\left[90 - arc\,tg\,(c^2 ctg\,\theta)\right]^2 + \frac{17{,}9\,R_p^{\perp} - R_{cm}^{\perp}}{32} \times$$

$$\times\left[90 - arc\,tg\,(c^2 ctg\,\theta)\right] + R_{cm}^{\perp} = \frac{\gamma H}{\sin^2\theta + c^2\cos^2\theta}\left\{c^2\cos^2\theta - \right.$$

$$\left. - c^2\sin^2\theta + 2c\cos^2\theta + \lambda\left[(1+c)^2\sin^2\theta - c^2\right]\right\}. \qquad (81)$$

Проведенные расчеты показали, что устойчивость контура незакрепленных выработок для слоистых анизотропных пород при прочих равных условиях значительно хуже, чем для изотропных.

Сравнивая устойчивость контура для слоистых пород в зависимости от угла наклона слоев к горизонту, установили, что устойчивость контура при горизонтальном расположении слоев лучше, чем при вертикальном.

Пользуясь формулой (55), можно определить глубину, начиная с которой существование устойчивого контура предельных равновесий невозможно.

Выше отмечалось, что предельная величина $C \geq \frac{1}{\lambda}$.

Тогда для изотропного массива

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\gamma H_{пр}}{R_{сж} - \gamma H_{пр.}(1-\lambda)}, \qquad (82)$$

откуда

$$H_{пр.} = \frac{R_{сж}}{\gamma(1+\lambda)}. \qquad (83)$$

С учетом длительной прочности

$$H'_{пр.} = \frac{\frac{\beta}{\ln\frac{t+1}{\beta}}}{\gamma(\lambda+1)} = \frac{\beta}{\gamma(1+\lambda)\ln\frac{t+1}{\beta}}. \qquad (84)$$

Результаты определения $H_{пр}$ и $H'_{пр}$ приведены в приложении IO.

Для анизотропных пород при определении $H'_{пр}$ необходимо в уравнения (80) и (8I) вместо C подставить его значение ($C = \frac{1}{\lambda}$). Решая это уравнение относительно H , получим:

для $\xi = 90^{\circ}$ и $\psi = \gamma$

$$H=\frac{\left\{\sin^2\theta+\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\cos^2\theta\right\}\left\{\frac{R_{cm}^{1}-17{,}9\,R_{p}^{1}}{4096}\left[\operatorname{arc\,tg}\left\{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\operatorname{ctg}\theta\right\}\right]\right\}^2}{\gamma\left\{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\cos^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta+2\frac{1}{\lambda}\cos^2\theta+\lambda\left[\left(1+\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right]\right\}}+$$

$$+\frac{\frac{17{,}9\,R_{p}^{1}-R_{cm}^{1}}{32}\operatorname{arc\,tg}\left[\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\operatorname{ctg}\theta\right]+R_{cm}^{1}}{\gamma\left\{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\cos^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta+2\frac{1}{\lambda}\cos^2\theta+\lambda\left[\left(1+\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right]\right\}}. \qquad (85)$$

для $\xi=0$ и $\psi=90^\circ-\gamma$

$$H=\frac{\left\{\sin^2\theta+\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\cos^2\theta\right\}\left\{\frac{R_{cm}^{1}-17{,}9\,R_{p}^{1}}{4096}\left[90^\circ-\operatorname{arc\,tg}\left\{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\operatorname{ctg}\theta\right\}\right]\right\}^2}{\gamma\left\{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\cos^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta+2\frac{1}{\lambda}\cos^2\theta+\lambda\left[\left(1+\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right]\right\}}+$$

$$+\frac{\frac{17{,}9\,R_{p}^{1}-R_{cm}^{1}}{32}\left\{90^\circ-\operatorname{arc\,tg}\left[\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\operatorname{ctg}\theta\right]+R_{cm}^{1}\right\}}{\gamma\left\{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\cos^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta+2\frac{1}{\lambda}\cos^2\theta+\lambda\left[\left(1+\frac{1}{\lambda}\right)^2\sin^2\theta-\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right]\right\}}. \qquad (86)$$

В том случае, если глубина расположения выработки превышает указанную предельную глубину, равновесие массива, нарушенное ее проведением, может быть восстановлено только за счет участия реакции крепи, т.е. резко изменится форма проявлений горного давления и второй класс условий работы перейдет в третий.

В известной степени предельная глубина связана, по нашему мнению, с понятием глубокого горизонта для средневзвешенной прочности массива горных пород.

4.3. Третий класс условий работы

Если хрупкий массив, разрушаясь, образует вокруг выработки зону неупругих псевдопластических деформаций, за которой следует зона нетронутого массива, и восстановление равновесия может быть достигнуто только при участии реакции крепи, тогда будет

иметь место третий класс условий работы крепи. Физико-механические свойства предельной зоны и массива различны. Известно несколько теоретических методов по прогнозированию проявлений горного давления, которые отвечают изложенной выше схеме. К таким методам можно отнести предложения Р.Феннера, А.Лабасса, Ю.М.Либермана, М.Т.Алимжанова-Л.В.Ершова. В задачу настоящей работы не входит анализ этих предложений, поэтому отметим только, что метод М.Т.Алимжанова-Л.В.Ершова, в основе которого лежат работы Л.В.Ершова, К.В.Рушенейта и Ю.М.Либермана, имеет более универсальный характер и учитывает большее число факторов, оказывающих влияние на формы проявлений горного давления.

Последнее обстоятельство дает основание для более детального анализа метода М.Т.Алимжанова-Л.В.Ершова с целью оценки его применимости для предварительной оценки проявлений горного давления.

Расчетная схема данного метода аналогична ранее предложенным, т.е. предполагается, что в невесомом однородном изотропном массиве, к которому на бесконечности приложены напряжения интенсивностью γH (λ =I), пройдена круглая выработка радиусом R_0. По контуру выработки приложено равномерно распределенное давление P. В результате хрупкого разрушения части массива вокруг выработки образуется область квазипластических деформаций радиусом R_L.

Прочностные свойства неразрушенного массива и области неупругих деформаций описываются уравнением:

$$(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 4\tau_{r\theta}^2 = \sin^2\rho\,(\sigma_r + \sigma_\theta + 2H)^2. \qquad (87)$$

Для неразрушенного массива $H = \frac{R_{сж}}{\alpha_2}$, для разрушенной зоны $H = K\,ctg\,\rho$,

где K – коэффициент сцепления пород в разрушенной или предельной зоне;

ρ – угол внутреннего трения пород в предельной зоне и в массиве; $\alpha_2 = \frac{2\sin\rho}{1-\sin\rho}$.

В качестве связи между деформациями и напряжениями в предельной зоне использовано соотношение деформационной теории пластичности:

$$\varepsilon_{ij} = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_i} , \qquad (88)$$

где Φ - условие пластичности.

В конечном виде зависимость между давлением на крепь и смещением породного контура имеет вид:

$$U_o = \left[\frac{(1-\sin\rho)(\gamma H - \frac{\bar{R}_{сж}}{2}) + K \operatorname{ctg}\rho}{P + K \operatorname{ctg}\rho} \right]^{\frac{1}{\sin\rho}} \left[\frac{R_o \sin\rho}{2G} \left(\gamma H + \frac{\bar{R}_{сж}}{\alpha_2} \right) \right] \qquad (89)$$

При подстановке параметров $\bar{R}_{сж}, K$, $\rho, \bar{G}$ и $\bar{E}$ необходимо учитывать изложенные ранее соображения, а именно:

$$\bar{R}_{сж} = (0{,}25 \div 0{,}5) R_{сж} ; \quad K = \frac{\bar{R}_{сж}}{50} ;$$

$$\rho' = \rho'' = \rho ; \quad \bar{E} = (0{,}4 \div 0{,}7) E ; \quad \bar{G} = \frac{\bar{E}}{2(1-\nu)} . \qquad (90)$$

Для оценки применимости данного метода с помощью ЭВМ "Наири-2" были произведены вычисления нагрузки на крепь при следующих исходных данных:

U_o = 25;50; I00; I50; 200; 250; 300 мм

$\bar{R}_{сж}$ = I000; 2700 т/м^2

K = 20; 54 т/м^2

G = 0,3I·I0^6; 0,5·I0^6 т/м^2

H = I00; 200; 300; 400; 500; 700; I000 м.

Результаты расчетов в виде таблиц приведены в приложении I2.

На рис.37 изображены графики роста нагрузок на крепь с глубиной, рассчитанные по методу М.Т.Алимжанов-Л.В.Ершова.

На рис.38 изображены совмещенные графики роста нагрузок на крепь в зависимости от отношения $\frac{\bar{R}_{сж}}{\gamma H}$, построенные по данным экспериментальных наблюдений (кривая I), по методу М.Т.Алимжанова-Л.В.Ершова (кривая 3) и по предложению автора (кривая 2).

Сравнение результатов выполненных расчетов с результатами натурных замеров показало, что между ними имеется значительное

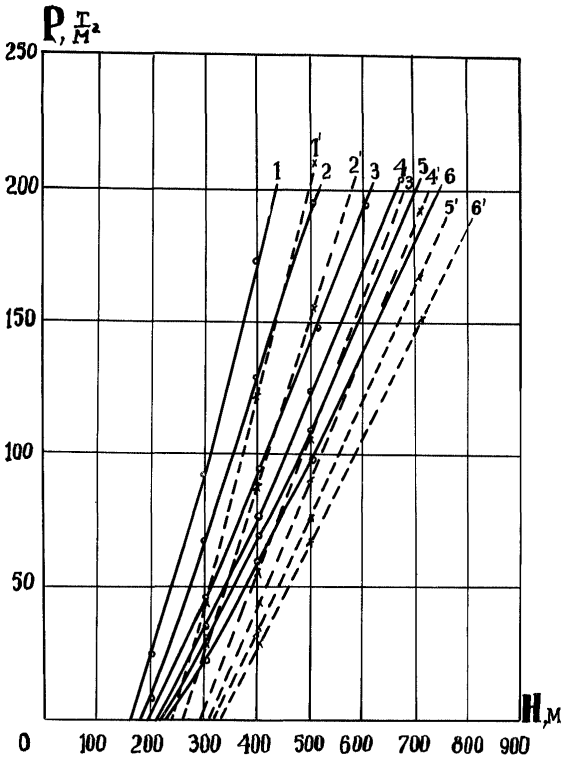


Рис.37. Графики роста нагрузок на крепь с глубиной (рассчитаны по методу М.Т.Алимжанова-Л.В.Ершова)

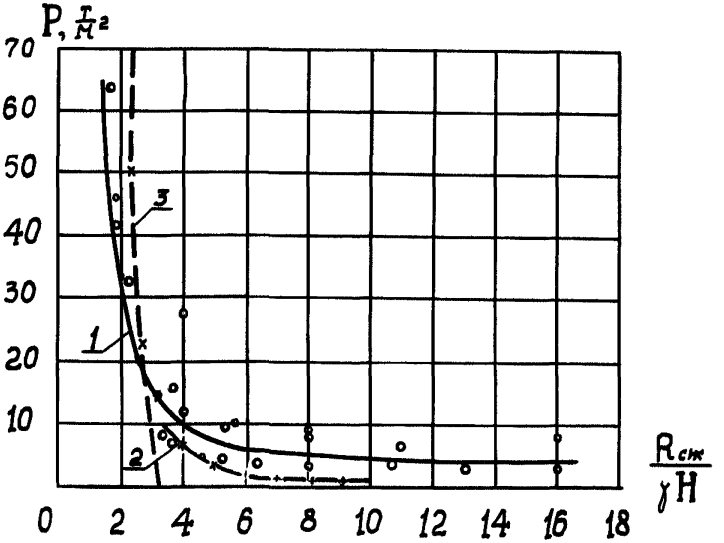


Рис.38. Графики применения нагрузок на крепь в зависимости от отношения

расхождение.

Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что нагрузка на крепь по формуле М.Т.Алимжанова-Л.В.Ершова при $\frac{R_{ст}}{\gamma H} < 2{,}5$ возрастает более интенсивно, чем по данным экспериментов, а при $\frac{R_{ст}}{\gamma H} > 2{,}7$ нагрузка может быть в несколько раз меньше фактической. Указанные выше обстоятельства позволяют рекомендовать формулу (89) только для ориентировочных расчетов.

В том случае, если $\frac{\bar{R}_{ст}}{\gamma H} > 2{,}7$, нагрузку на крепь следует определять по формулам(88,80,81).

В целях совершенствования упругопластической модели и приближения ее к реально существующим закономерностям необходимо, очевидно, усложнить модель и внести следующие изменения

в исходные предпосылки:

- в условиях пластичности вместо прямолинейной наклонной огибающей взять огибающую в виде квадратной параболы;
- коэффициент бокового давления принять как переменную величину, отличную от единицы;
- учесть изменение коэффициента сцепления в разрушенной зоне;
- учесть снижение прочности пород с течением времени;
- учесть влияние прочностной анизотропии.

Ниже сделана попытка учесть прочностную анизотропию для слоистых пород по аналогии с тем, как это выполнено в § 2.I. Для этого в формулу (I5) вместо $\bar{R}_{см}$ введем значение по формуле:

$$R_{см}^{\psi} = \frac{\bar{R}_{см}^{\perp} - 17{,}9\,\bar{R}_{р}''}{4096}\,\psi^{2} + \frac{17{,}9\,\bar{R}_{р}'' - \bar{R}_{см}^{\perp}}{32} + R_{см}^{\perp}.$$

Из построения, приведенного на рис. 39, можно легко установить, что $\psi = \xi_{\gamma} - \theta$ для $\theta < \xi_{\gamma}$; $\psi = \theta - \xi_{\gamma}$ для $\theta > \xi_{\gamma}$.

Ранее было показано, что $R_{см}^{\psi}$ имеет наименьшее значение при $\psi = 64^{\circ}$.

Тогда

$$R_{см\,min}^{\psi} = (\bar{R}_{см}^{\perp} - 17{,}9\,\bar{R}_{р}'') - 2\,(17{,}9\,\bar{R}_{р}'' - \bar{R}_{см}^{\perp}) + \bar{R}_{см}^{\perp}, \qquad (9I)$$

а разрушение начинается в точке с угловой координатой $\theta = \xi_{\gamma} + \psi$ для $\theta > \xi_{\gamma}$ и $\theta = \xi_{\gamma} - \psi$ для $\theta < \xi_{\gamma}$.

Если принять, что условие равновесия должно выполняться по всему контуру предельной зоны R_{L}, то в уравнение (89) вместо $\bar{R}_{см}^{\perp}$ необходимо подставить значение $\bar{R}_{см\,min}^{\psi}$ из уравнения (9I).

В приложении I3 в качестве примера с помощью ЭВМ "Наири-4" выполнены расчеты по определению $P = f(H)$ для условий примера, приведенного в приложении 4.

Влияние длительной прочности может быть учтено так же, как это выполнено в § 4.2 настоящей работы.

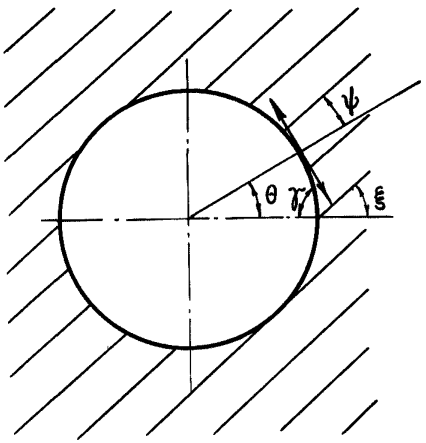


Рис.39. Схема к определению углов

В работе А.Лабасса [72] коэффициент разрыхления пород при их разрушении принят I,I2÷I,I5. На практике зазор между крепью и породой заполняется мелкой породой, которая препятствует беспорядочному падению кусков, и процессы деформаций сводятся лишь к раскрытию имевшихся в массиве трещин.

Предположим, например, что при разрушении пород в кровле объем отдельных блоков в среднем составит v_i . Предположим также, что форма отдельностей - кубическая со стороной a , а раскрытие трещин увеличивается на Δd_i . Поверхность каждого куба $S_i = 6a^2$, но $a = \sqrt[3]{v_i}$, следовательно, $S_i = 6(\sqrt[3]{v_i})^2$ В I м^3 таких кубических отдельностей будет $n = \frac{1}{v_i}$, и объем трещин в I м^3 составит:

$$\Delta V = \frac{1}{v_i} \, 6 \left(\sqrt[3]{v_i}\right)^2 \Delta d_i = \frac{6 \Delta d_i}{\sqrt[3]{v_i}} \qquad (92)$$

Увеличение объема пород в своде предельного равновесия будет составлять 2,8% вместо обычно принимаемых I2-I5%.

Пусть радиус выработки вчерне составляет r_o м , а радиус разрушенной зоны – r_L . Увеличение объема за счет разрушения будет равно:

$$\Delta V = (\pi r_L^2 - \pi r_o^2)\Delta v_i = \pi (r_L^2 - r_o^2) \cdot \frac{6 d_i}{\sqrt[3]{v_i}} . \qquad (93)$$

Следовательно, смещение контура за счет увеличения объема разрушенной породы составит:

$$u_p = r_o - r_u \; ; \quad S_p = (r_o^2 - r_u^2) = (r_L^2 - r_o^2) \frac{6 \Delta d_i}{\sqrt[3]{v_i}} ;$$

$$(r_o - r_u)(r_o - r_u) = (r_L^2 - r_o^2) \frac{6 \Delta d_i}{\sqrt[3]{v_i}} ; \qquad (94)$$

$$r_u^2 = r_o^2 - (r_L^2 - r_o^2) \frac{6 \Delta d_i}{\sqrt[3]{v_i}} ; \qquad (95)$$

$$r_u = \sqrt{r_o^2 - (r_L^2 - r_o^2) \frac{6 \Delta d_i}{\sqrt[3]{v_i}}} ; \quad u_v = r_o - r_u . \qquad (96)$$

Для наглядности рассчитаем несколько вариантов и сведем их в таблицу.

Таблица 5

Δd_i, м v_i, м³	0,00I 0,0I	0,00I 0,005	0,0005 0,0I	0,0005 0,005
u_v, см	9	II	5	6

Расчеты показывают, что величина смещений контура за счет хрупкого разрушения массива может достигать значительных величин и должна учитываться при составлении уравнений. Необходимо, правда, заметить, что в приведенных расчетах величины Δd_i и V_i взяты до некоторой степени произвольно с целью общей иллюстрации возможных смещений и требуют дополнительной экспериментальной проверки.

Следуя Ю.М.Либерману, В.Т.Глушко и др., учет свойств ползучести горных пород может быть произведен путем введения в формулу (90) реологического параметра α', который показывает, во сколько раз возрастает величина деформации при $t=\infty$ по сравнению с начальной упругой. По данным, приведенным в работе [54], α' колеблется в пределах I,I÷I,5.

4.4. Четвертый класс условий работы

Образование области неупругих деформаций может происходить не только за счет хрупкого разрушения горных пород, но и за счет пластических деформаций без нарушения сплошности и сцепления.

Поэтому к четвертому классу предлагается отнести условия работы крепи в том случае, когда деформации пород носят ярко выраженный пластический характер и затухают во времени даже тогда, когда реакция крепи отсутствует. При проведении горной выработки в таком массиве в том случае, когда действующие на контуре выработки напряжения достигают предельных величин, вокруг выработки образуется область пластических деформаций, в результате чего снижается концентрация напряжений вокруг выработки и восстанавливается естественное равновесие горного массива.

Описанное выше явление наблюдается на целом ряде шахт. В частности, при проведении главного квершлага на шахте "Судженская" в Анжеро-Судженске. Монолитная бетонная крепь при проведении квершлага возводилась сразу вслед за подвиганием забоя и в результате значительных смещений горного массива, достигших 8-I0 мм, была разрушена и полностью потеряла свою несущую способность. Однако, несмотря на это, смещения породного контура со временем прекратилось. При перекрепке квершлага после разборки крепи на некоторых участках выработки кровля не обрушалась и могла находиться в

удовлетворительном состоянии в течение продолжительного времени. Конечно, эксплуатировать выработку в подобных условиях без крепления чрезвычайно опасно, т.к. горный массив в зоне развития пластических деформаций меняет свои прочностные показатели в сторону их ухудшения, хотя степень снижения прочности в этом случае, и особенно длительной прочности, изучена недостаточно.

Образование вокруг выработки области пластических деформаций в зависимости от физико-механических свойств и состояния горных пород может наблюдаться на небольшой глубине проведения выработки в слабых глинистых породах, а также при проведении выработок в достаточно прочных породах на больших глубинах. Хотя механизм этих явлений на малых и больших глубинах может иметь существенные различия, математические модели явлений для обоих случаев могут быть приняты одинаковыми. Для прогнозирования проявлений горного давления в условиях, отнесенных к четвертому классу, можно рекомендовать методы К.В.Руппенейта, Ю.В.Заславского, В.Т.Глушко, П.И.Перлина и др. [77, 78, 79] .

Для выбора расчетного метода прогнозирования проявлений горного давления были проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния массива с помощью моделирования.

В соответствии с поставленной задачей в процессе исследований измерялись следующие параметры: напряженное состояние массива вокруг незакрепленной и закрепленной выработок, нагрузки на замкнутые и незамкнутые сборные железобетонные крепи с подаливой забутовкой и без нее, смещения крепи.

Моделирование выполнялось методом эквивалентных материалов. Подбор механических характеристик эквивалентного материала производится по формуле:

$$N_м = \frac{\ell}{L} \frac{\gamma_м}{\gamma_н} N_н , \qquad (97)$$

где $N_н, N_м$ – характеристики натуры и модели имеющие размерность сила/площадь;

$\gamma_м, \gamma_н$ – объемные веса материалов модели и натуры;

ℓ, L – линейные размеры модели и натуры.

При $\gamma_м = \gamma_н$ $\quad N_м = \alpha_\ell N_н$, $\quad \alpha_\ell = \frac{\ell}{L}$.

Для моделирования слабых пластичных пород принималась серая глина с содержанием влаги I5%.

Характеристика прочности подобранного эквивалентного материала в значительной мере зависит от способа уплотнения и величины уплотняющей нагрузки, поэтому определение предела прочности образцов из эквивалентного материала на сжатие и сдвиг производилось после их уплотнения нагрузкой интенсивностью σ_n = I500 г/см^2, т.е. при напряжениях, равных напряжениям модели.

Образцы-цилиндры диаметром 56 мм и высотой 20 мм испытывались на сдвиг на односрезном приборе П-10С. График зависимости между нормальным давлением и сопротивлением образцов сдвигу (паспорт прочности) для эквивалентного материала влажностью I5% приведен на рис.40.

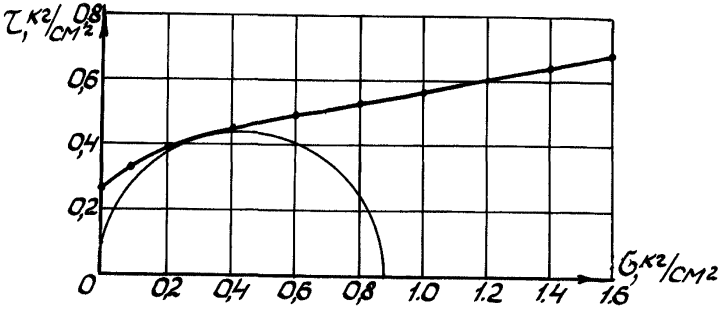


Рис.40. Паспорт прочности для эквивалентного материала модели

Испытания моделей производились на специально сконструированном стенде, который позволяет создавать в массиве плоско-деформированное состояние.

Размеры моделируемого участка массива составляют 1000x1000x300 мм. В качестве ограждающих поверхностей применялись плиты из оргстекла толщиной 10 мм. Для увеличения жесткости боковых поверхностей (стенок) они прижимались к несущей раме стенда металлическими балками. Наличие механической пригрузки, выполненной в виде гидравлических домкратов, позволило моделировать разрез толщи пород глубиной 100, 200 и более метров в натуре.

Для определения радиуса зоны неупругих деформаций вокруг незакрепленной горной выработки во время закладки эквивалентного материала в модель по вертикальной и горизонтальной осям будущей выработки устанавливались микродатчики конструкции автора [80] для измерения напряженного состояния массива.

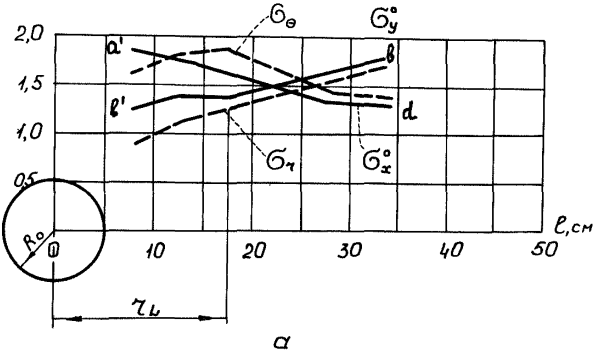
На рис.41а приведены графики распределения напряжений для незакрепленной выработки. Индексами σ_x^0 и σ_y^0 обозначены напряжения в модели до проведения выработки вдоль ее горизонтальной оси симметрии. Индексами $\sigma_\theta = \sigma_y$, $\sigma_r = \sigma_x$ обозначены напряжения после проведения в массиве выработки радиусом R_0 .

Экспериментальное измерение напряжений в массиве сопряжено с целым рядом сложностей как методического, так и чисто технического характера, поэтому ошибки опыта неизбежны. Очевидно, что несовпадение значений напряжений σ_y^0 и σ_x^0 для нетронутого массива вызвано ошибкой, возникающей в результате совместной работы отдельных датчиков и массива, а снижение уровня напряжений с 2,1 (давление домкратов пригрузки) до 1,5 кг/см^2 вызвано влиянием трения массива о стенки модели.

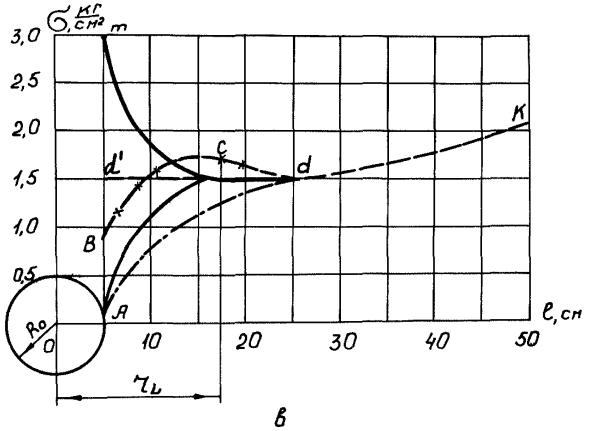
Однако сопоставление графиков распределения напряжений до и после проведения выработки позволяет все же вполне четко выяснить общую закономерность этих изменений, а также определить точку, где σ_θ имеет наибольшее значение. В свою очередь известно, что положение максимума σ_θ определяет границы области неупругих деформаций.

Для того, чтобы сравнить результаты экспериментальных измерений с существующими теоретическими решениями, произведем дополнительное построение на основе имеющихся экспериментальных данных (рис.41б).

Отложим в осях координат σ и ℓ точку K , соответствую-



а



б

Рис.41. Графики распределения напряжений в массиве для незакрепленной выработки:

а - данные эксперимента;

б - приведенные кривые

щую средней интенсивности напряжений нетронутого массива по показаниям датчиков в непосредственной близости от будущей выработки. Кривая $d-к$ характеризует снижение напряжений за счет трения массива модели о стенки. Отрезок $d-d'$ соответствует среднему напряжению нетронутого массива $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = 1{,}5$ кг/см^2 в непосредственной близости от будущей выработки. Кривые dm и dA представляют собой расчетные графики изменения напряжений σ_θ и σ_η для идеальной упругой среды при $\lambda = 1$; $\sigma_0 = 1{,}5$ кг/см^2.

Для совмещения экспериментальных данных с расчетными примем во внимание то обстоятельство, что отрезок $d-d'$ (рис.41), если исключить ошибки эксперимента, должен был совпадать с отрезками $a'd$ и $b'b$ на рис.41 а. Для построения значений напряжений σ_θ и σ_η после проведения выработки, полученных в результате эксперимента, следует, очевидно, отложить разность их значений с графиков на рис.41а от отрезка $d'd$, изображенного на рис.41в. Для окончания построения продлим кривые $dA\,(\sigma_\eta)$ и $dcB\,(\sigma_\theta)$ до границы контура выработки, принимая во внимание, что на контуре $\sigma_\eta = 0$.

Проведенное выше построение позволяет совместить экспериментальные и расчетные значения напряжений по горизонтальной оси симметрии и выявить тем самым общие закономерности распределения напряжений вокруг выработки, пройденной в породах, склонных к пластическим деформациям.

В процессе исследований моделировались также выработки, закрепленные железобетонной тюбинговой крепью с податливой забутовкой и без нее.

В соответствии с поставленной задачей производилось измерение нагрузок на крепи с помощью специальных динамометрических блоков (рис.42), состоящих из собственно блоков I, четырех динамометрических элементов из вакуумной резины 2, криволинейной металлической площадки 3 и четырех направляющих втулок 4,5 со штоками.

Снятие показаний с динамометрических элементов производилось индикатором часового типа.

Для того, чтобы выяснить влияние податливого забутовочного слоя и его параметров на закономерности формирования нагрузок на крепь, было предусмотрено выполнение экспериментов в следующем порядке.

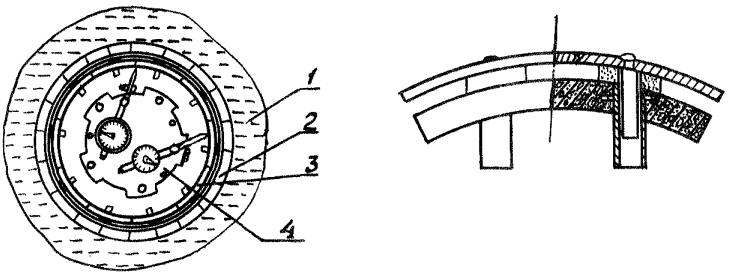


Рис.42. Динамометрический блок

1 - массив;
2 - податливая забутовка;,
3 - динамометрический блок;
4 - индикаторный щиток.

Во время закладки эквивалентного материала в модель по вертикальной и горизонтальной осям будущей выработки устанавливались микродатчики для измерения напряжений в массиве. После предварительного уплотнения модели боковая стенка убиралась, "проходилась" выработка и устанавливалась крепь. После установки крепи боковая стенка вновь ставилась на свое место. Выбор материала забутовочного слоя производился, исходя из того, что его прочность на объемное сжатие при осадке 4-6 мм (10-15 см в натуре) должна быть несколько меньше, чем среднее давление $\sigma_{ср.}$ на жесткую шарнирную крепь.

В первом цикле экспериментов проводились исследования горного давления (напряжений в массиве) и его проявлений для жесткой крепи из тюбингов. Затем аналогичные исследования были выполнены для крепи с податливой забутовкой.

В качестве материала податливой забутовки был принят пенобетон с пределами прочности на одноосное сжатие 0,26 кг/см^2.

На рис.43 приведены результаты определения напряжений в массиве по горизонтальной оси симметрии для закрепленной выработки с податливой забутовкой и без нее.

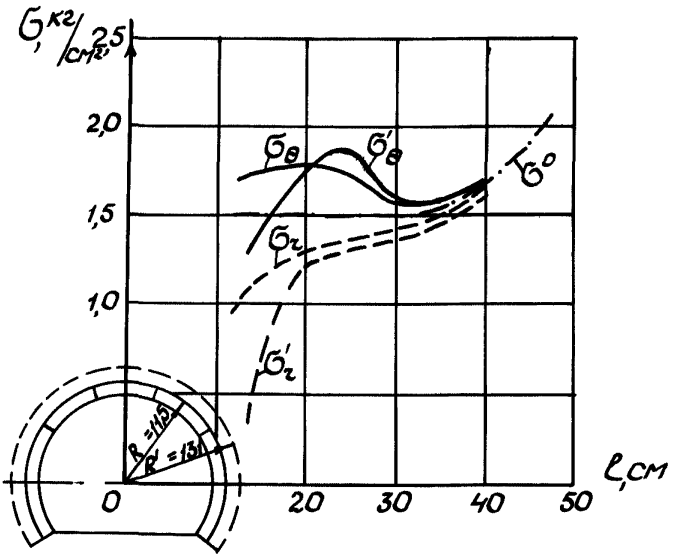


Рис. Распределение напряжений в массиве по горизонтальной оси симметрии для выработок, закрепленных сборной железобетонной крепью с податливой забутовкой и без нее

На рис.44 приведены эпюры распределения нагрузок на крепь. С помощью проведенных экспериментов удалось показать, что в том случае, когда вокруг выработки в массиве горных пород существуют условия для образования области неупругих деформаций, применение податливого забутовочного слоя позволяет снизить нагрузки на крепь в 3 и более раз.

В общих чертах полученные распределения напряжений подтверждают известные теоретические решения упругопластической задачи. Однако для более полного сопоставления известных тео-

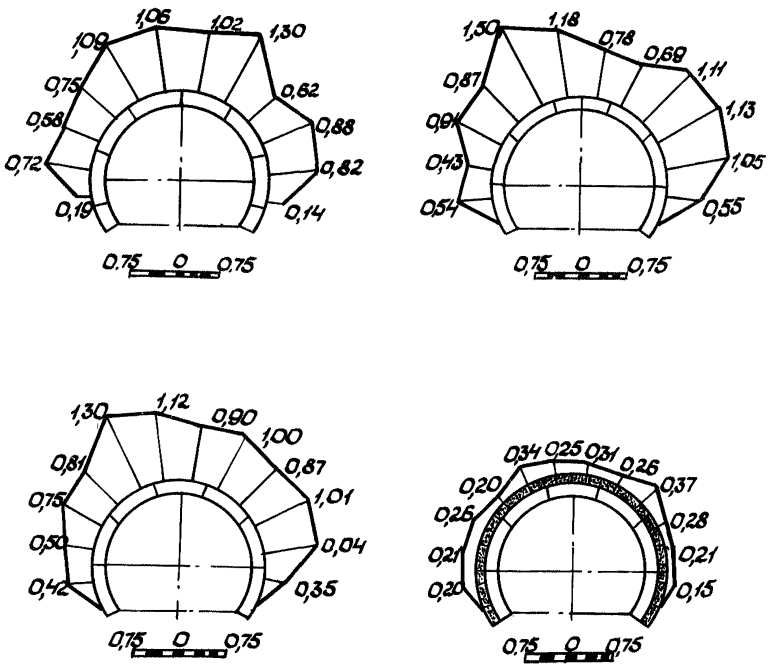


Рис.44. Эпюры распределения нагрузок на сборную железобетонную тюбинговую крепь с податливой забутовкой и без нее.

ретических решений этой задачи с полученными экспериментальными данными произведем расчет напряжений по горизонтальной оси симметрии, пользуясь методами К.В.Руппенейта и Л.А.Галина (метод Л.В.Ершова-М.Т.Алимжанова по существу дает формулы, аналогичные формулам К.В.Руппенейта).

В области упругих напряжений компоненты напряжений определяются уравнениями Кирша [81] :

$$\sigma_r = 0{,}5(\gamma H - \lambda\gamma H)\left[1-\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\right] - 0{,}5(\gamma H - \lambda\gamma H)\left[1+3\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 - 4\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\right]\cos 2\theta;$$

$$\sigma_\theta = 0{,}5(\gamma H + \lambda\gamma H)\left[1+\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\right] + 0{,}5(\gamma H - \lambda\gamma H)\left[1+3\left(\frac{R_0}{R}\right)^4\right]\cos 2\theta;$$

$$\tau_{r\theta} = 0{,}5(\gamma H - \lambda\gamma H)\left[1-3\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 + 2\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\right]\sin 2\theta, \qquad (98)$$

где θ – полярный угол, отсчитываемый от горизонтальной оси.

Компоненты напряжений в области неупругих деформаций по Л.А.Галину:

$$\sigma_r = P + 2K\ln\frac{R}{R_0};$$
$$\sigma_\theta = K + P + 2K\ln\frac{R}{R_0}; \qquad (99)$$

по К.В.Руппенейту:

а) для прямолинейной наклонной огибающей

$$\left.\begin{matrix}\sigma_r + K\operatorname{ctg}\rho \\ \sigma_\theta + K\operatorname{ctg}\rho\end{matrix}\right\} = \mp\frac{(P \pm K\operatorname{ctg}\rho)(1\mp 1+2\sin\rho)\rho^\alpha}{1\mp 1-2\sin\rho}, \qquad (100)$$

где

$$\rho = \frac{R}{R_0}; \qquad \alpha = \frac{2\sin\rho}{1-\sin\rho};$$

б) для комбинированной огибающей (циклоида, переходящая в прямолинейную наклонную прямую)

в области прямолинейной огибающей

$$\left.\begin{matrix}\sigma_r + K\operatorname{ctg}\rho \\ \sigma_\theta + K\operatorname{ctg}\rho\end{matrix}\right\} = \pm \frac{(P \pm K\operatorname{ctg}\rho)(1 \mp 1 + 2\sin\rho)}{1 \mp 1 - 2\sin\rho}\left(\frac{r}{r^*}\right), \quad (101)$$

где

$$\alpha = \frac{2\sin\rho}{1-\sin\rho}; \quad r^* = \frac{\cos\psi_0}{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\rho}{2}\right)}; \quad 2\psi_0 - \sin 2\psi_0 = \frac{P+H}{K^*};$$

в области, отвечающей циклоидальной огибающей

$$\left.\begin{matrix}\sigma_r + H \\ \sigma_\theta + H\end{matrix}\right\} = 2K^*\left[\arccos\left(\frac{\cos\psi_0}{r}\right) \mp \frac{\cos\psi_0}{r}\sqrt{1-\frac{\cos^2\psi_0}{r^2}}\right], \quad (102)$$

где K^* – радиус окружности, являющейся границей области неупругих деформаций, отвечающей криволинейной части огибающей.

Причем область эта существует только тогда, когда

$$2\psi_0 \leq \frac{\pi}{2} - \rho. \quad (103)$$

Сравнение экспериментальных и расчетных данных (рис.44 и 45) показывает, что теоретические решения, построенные на использовании в качестве условия пластичности прямолинейной наклонной или комбинированной огибающей (решения К.В.Руппенейта), не могут быть рекомендованы для слабых пород, склонных к значительным пластическим деформациям. И наоборот, решение Л.А.Галина (идеальная пластичность) хорошо подтверждается экспериментальными данными и, следовательно, может быть рекомендовано для практического использования.

На основании изложенных предпосылок для данного класса условий работы крепи в качестве расчетных методов для прогнозирования проявлений горного давления рекомендуется метод Л.А.Галина, переработанный для горных условий В.Т.Глушко.

По методу Л.А.Галина, областью неупругих деформаций является эллипс с полуосями:

$$a = c(1+\beta); \qquad b = c(1-\beta), \quad (104)$$

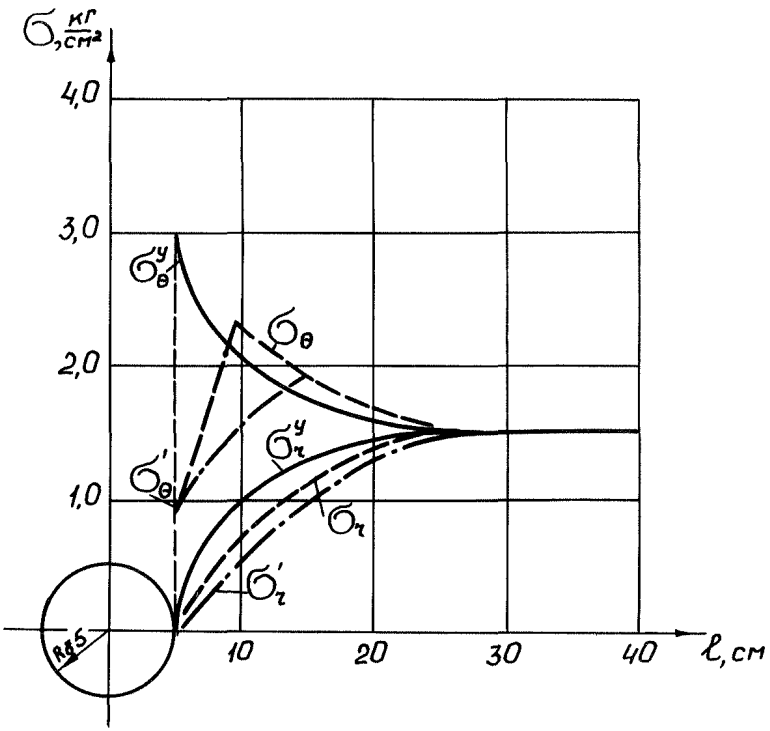


Рис.45. Расчетные графики распределения напряжений в массиве:

I - для упругой задачи;

2 - по методу Л.А.Галина;

3 - по методу К.В.Руппенейта

где

$$C = R_0 \exp\frac{(\lambda_3\gamma H - p - K)}{2K}; \qquad \beta = \frac{\lambda\gamma H}{K}; \quad \lambda = \frac{1}{2}(1-\lambda_2).$$

Для определения смещений на контуре выработки может быть рекомендовано уравнение Д.Д.Ивлева с учетом дополнений В.Т.Глушко [77].

$$u = K\frac{R_0}{2G}\exp\left[\frac{1}{2K}\left(\frac{\gamma H + \lambda\gamma H}{2} + p - K\right) + \frac{(\gamma H - \lambda\gamma H)^2}{2KG_0}\right.$$

$$\cdot R_0 \exp 2\left[\frac{1}{2K}\left(\frac{\gamma H + \lambda\gamma H}{2} + p - K\right)\right] - (\gamma H - \lambda\gamma H)\frac{R_0}{G} \cdot \quad (105)$$

$$\left.\cdot \cos 2\theta + \frac{3(\gamma H - \lambda\gamma H)^3}{2K^2G}R\gamma_0 - \frac{2(\gamma H - \lambda\gamma H)^3}{K^2G}R\gamma_0\exp\left[\frac{1}{2K}\left(\frac{\gamma H + \lambda)H}{2} + R - K\right)\right]\right.$$

В качестве примера вычислим величину предельной области по формулам К.В.Рушенейта и Л.А.Галина для условий модели.
По К.В.Рушенейту,

$$r_0^{\alpha} = (1 - \sin\rho)\,\frac{\lambda_3\gamma H + K\operatorname{ctg}\rho}{p + K\operatorname{ctg}\rho}$$

при $\rho = 18^\circ$; $\lambda_3 = 1$; $\gamma H = 1{,}8$ кг/см^2; $\alpha = \frac{2\sin\rho}{1-\sin\rho}$; $R_0 = 11{,}5$ см;
$K = \frac{(1-\sin\rho)R_{см}}{2\cos\rho} = 0{,}32$ кг/см^2; $P = 0{,}84$ кг/см^2.

Подставив приведенные выше значения входящих в формулу величин, получим значение $r_0 = 12{,}15$ см
По Л.А.Галину,

$$a = c(1+\beta); \quad C = R_0\exp\frac{\lambda_3\gamma H - p - K}{2K}; \qquad \beta = \frac{\lambda\gamma H}{K}; \quad K = \frac{\sigma_{см}}{2}.$$

при $\lambda_3 = \frac{1}{2}(1+\lambda_2)$; $\lambda_2 = 1$; $\lambda_3 = 1$; $\lambda = \frac{1}{2}(1-\lambda_2)$; $\lambda = 0$; $\beta = 0$; $K = 0{,}45\frac{кг}{см^2}$.

Тогда

$$C = 11{,}5\ exp.\ \frac{1{,}8 - 0{,}84 - 0{,}45}{2 \cdot 0{,}45} = 20{,}33\ см.$$

Формулы (I05) не учитывают ползучести горных пород. Ползучесть согласно предложениям, изложенным в работах [69 и др.], может быть учтена путем замены упругих констант K и G интегральными операторами вида:

$$\widetilde{K} = K\left[1 - \chi_c \Im_\alpha^*(-\beta_i) \cdot 1\right]; \qquad (I06)$$

$$\frac{1}{\widetilde{G}} = \frac{1}{G}\left[1 + \chi_c \Im_\alpha^*(\chi_c - \beta_i) \cdot 1\right]$$

или по аналогии с выражением ( ) путем введения множителя α.

Для упрощения расчетов можно принять, что смещения, необходимые для образования устойчивой во времени области неупругих деформаций, протекают достаточно быстро и время, необходимое для этого, может не учитываться.

Снижение прочности со временем, а, следовательно, и увеличение зоны неупругих деформаций может быть учтено по методике, изложенной в § 2.2.

4.5. Пятый класс условий работы

Пятый класс условий работы крепи будет иметь место в том случае, когда выработка проходится по сильно раздробленному геологическими нарушениями массиву, который с достаточной степенью точности может быть представлен в виде сыпучей среды. Поддержание выработок в такой среде без крепи не представляется возможным.

Прогнозирование проявлений горного давления в сыпучей среде проводилось многими исследователями. Так, М.М.Протодьяконов при построении своего метода исходил из предположения, что при проведении выработки образуется некоторый свод равновесия [82].

Размеры этого свода определяются из предположения, что свод будет устойчивым, если в каждой его точке момент внешних сил

будет равен нулю (безмоментный свод). Нагрузка на крепь определяется весом пород в объеме свода естественного равновесия и определяется формулой:

$$P = \frac{2}{3} \gamma \frac{a}{f}, \qquad (107)$$

где γ – объемный вес пород;
a – полупролет выработки;
f – коэффициент крепости пород.

По М.М.Протодьяконову,

$$f = tg\varphi, \qquad (108)$$

где φ – угол естественного откоса для сыпучей среды или угол внутреннего трения для связанного массива.

Между углом внутреннего трения и прочностными показателями пород предполагается следующая корреляционная связь:

$$f = \frac{R_{сж}}{100}. \qquad (109)$$

Значения углов внутреннего трения и коэффициента крепости даны М.М.Протодьяконовым в его классификации горных пород.

Не воспроизводя подробного вывода теории, отметим все же, что с современных позиций механики он несколько не корректен. Но при всех своих недостатках теория М.М.Протодьяконова продолжает служить горнякам для ориентировочных расчетов при небольшой (100–300 м) глубине заложения выработок.

В дальнейшем теория М.М.Протодьяконова была дополнена П.М.Цимбаревичем [83], который к расчетной схеме добавил призмы сползания в боках выработки, увеличивающие размеры свода равновесия и вызывающие боковое давление.

Угол сползания

$$\theta = \frac{90 + \varphi}{2} \qquad \text{(по Кулону).} \qquad (110)$$

Полупролет свода равновесия

$$a_1 = a + h_1 \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right). \qquad \text{(III)}$$

Высота свода естественного равновесия

$$b_1 = \frac{a + h_1 \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{f}. \qquad \text{(II2)}$$

Интенсивность нагрузки на крепь

$$q = \frac{\gamma a_1}{f}. \qquad \text{(II3)}$$

Боковые нагрузки на уровне кровли выработки q_{1} и на уровне подошвы q_{2} определяются согласно теории давления грунта на подпорные стенки по формулам:

$$q_{1} = \gamma b \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right); \qquad \text{(II4)}$$

$$q_{2} = \gamma (b + h) \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right). \qquad \text{(II5)}$$

Формулы (II3, II4, II5) до недавнего времени широко использовались проектными и научными институтами, но в целом ряде случаев, особенно с переходом на более глубокие горизонты, этот метод давал результаты, во много раз отличающиеся от фактических.

Кроме того, метод М.М.Протодьяконова-П.М.Цимбаревича не содержит в себе возможностей для управления горным давлением за счет изменения податливости крепи, формы выработки и т.д.

В отличие от М.М.Протодьяконова, К.Терцаги [70] при выводе своих уравнений принимал за исходные следующие предпосылки:

- вертикальные сжимающие напряжения в массиве равны произведению γH ;

- осадка основания (кровли) вызывает опускание лежащего над ней слоя грунта;

- между опускающимися и находящимися в покое слоями грунта возникают сдвигающие усилия, которые уменьшают давление на основание, но зато увеличивают - на смежные жесткие части основания;

- при достаточно большой осадке основания возникает срез по двум плоскостям скольжения, проходящим от краев опускающейся полосы до поверхности;

- вблизи верхней поверхности грунт опускается вертикально вниз, а это значит, что поверхность скольжения пересекает горизонтальную поверхность под прямым углом.

Вывод уравнений поверхностей скольжения до сих пор еще не удался, однако опытами Вельми (1937 г.) установлено, что средний угол наклона поверхностей скольжения близок к 90^0 при малых значениях $\frac{H}{2a}$ и уменьшается до значений, близких к $45^0+\frac{\varphi}{2}$ при очень больших значениях $\frac{H}{2a}$ (рис.46).

Перераспределение веса грунта, лежащего над полосой опустившегося основания, с передачей части его на смежные массы грунта названо Терцаги арочным эффектом. При аналитическом решении задачи Терцаги, следуя в этом Янсену, принимает, что поверхности скольжения вертикальны и вертикальное давление распределено равномерно.

Если выработка находится на большой глубине, то арочный эффект проявляется выше определенной зоны H_2 над кровлей выработки. Слой грунта, лежащий выше этого уровня, действует на заклинившую зону, как простая нагрузка величиной γH_2 .

В этом случае давление определяется по формуле:

$$\sigma_v = \frac{\gamma a_1}{\lambda \operatorname{tg}\varphi}\left(1 - e^{-\lambda \operatorname{tg}\varphi \frac{H_1}{a_1}}\right) + \gamma z_2 e^{-\lambda \operatorname{tg}\varphi \frac{H_1}{a_1}} \qquad (II6)$$

При достижении высотой H_1 примерно 20% от общей глубины H_1+H_2 вторым слагаемым можно пренебречь.

Первое слагаемое при всех значениях H меньше $\frac{H}{\lambda \operatorname{tg}\varphi}$, поэтому при глубоком залегании выработки

$$\sigma_{v\infty} = \frac{\gamma a}{\lambda \operatorname{tg}\varphi}, \qquad (II7)$$

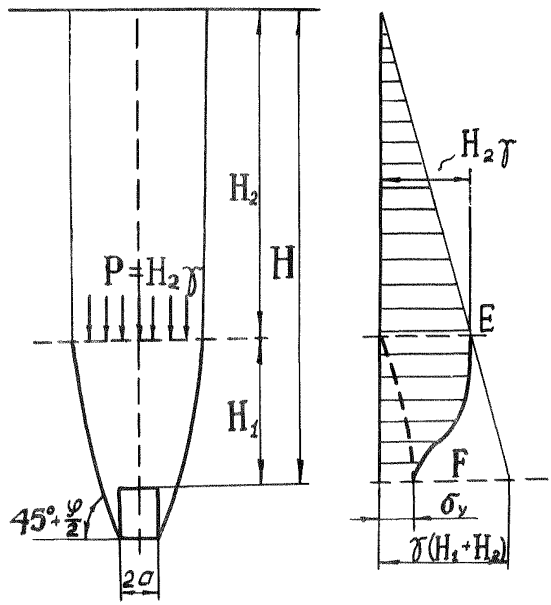


Рис.46. Расчетная схема к методу К.Терцаги

для связанного грунта соответственно

$$\sigma_v = b_1 \frac{\gamma - \frac{c}{a_1}}{\lambda \operatorname{tg}\varphi}\left(1 - e^{-\lambda \operatorname{tg}\varphi \frac{H_1}{a_1}}\right) \qquad \text{(II8)}$$

Давление на кровлю по формуле (II8) равно нулю при любой глубине, если $a_1 \leq \frac{c}{\gamma}$,

где c - сцепление;

λ - коэффициент бокового давления.

Любопытно отметить, что при $\lambda = 1$ формула (II8) переходит в формулу М.М.Протодьяконова.

Ориентировочно нагрузка на крепь может быть найдена также по методу В.М.Мосткова [9I] .

Расчетная схема представлена на рис.47. В основу метода положена предпосылка о том, что вокруг выработки образуется зона ослабленной нарушенной породы, за пределами которой порода считается ненарушенной. Порода нарушенной зоны отслаивается от массива и стремится обрушиться в выработку.

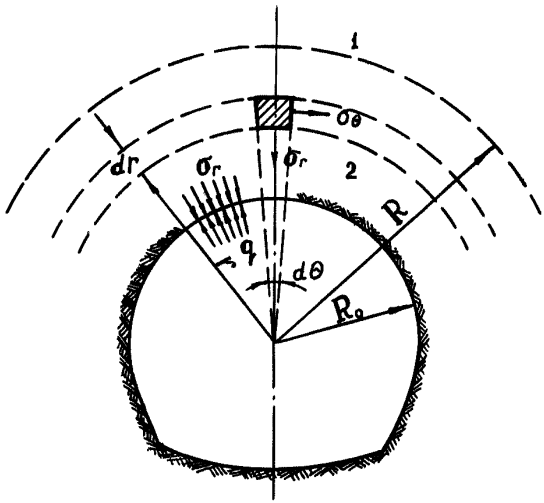


Рис.47. Расчетная схема к методу В.М.Мосткова

Равновесие достигается за счет участия реакции крепи.

Свойства пород в разрушенной зоне описываются уравнением прямолинейной наклонной огибающей вида.

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + c.$$

В окончательном виде В.М.Мостковым получена следующая формула для нахождения нагрузки на крепь:

$$q = K_1 \gamma R_0 - K_2 C,$$

где

$$K_1 = \frac{1-\sin\varphi}{3\sin\varphi - 1}\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{R}{R_0}\right)^{\frac{3\sin\varphi-1}{1-\sin\varphi}}}\right];$$

$$K_2 = c\operatorname{tg}\varphi\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{R}{R_0}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}}}\right].$$

Для сыпучей среды согласно работе [113] $C=0$ и $R=\infty$. Тогда

$$q = \frac{\gamma R_0(1-\sin\varphi)}{3\sin\varphi - 1}.$$

Таким образом, для податливой крепи нагрузка на нее в сыпучей среде зависит только от размеров выработки.

Для сравнения произведем расчет по методам К.Терцаги, В.М.Мосткова, М.М.Протодьяконова-И.П.Цимбаревича при следующих данных:

- угол внутреннего трения $\varphi = 30°$;
- объемный вес пород $\gamma = 2{,}5\ т/м^3$;
- полупролет выработки $R = a = 2{,}5\ м$;
- коэффициент бокового распора $\lambda = 1$.

По К.Терцаги

$$q = \frac{\gamma a}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{2{,}5 \cdot 2{,}5}{0{,}58} = \frac{6{,}25}{0{,}58} = 10{,}7\ т/м^2;$$

по В.М.Мосткову,

$$q = \frac{2,5 \cdot 2,5\,(1-0,5)}{3 \cdot 0,5 - 1} = \frac{6,25 \cdot 0,5}{0,5} = 6,25\ т/м^2;$$

по М.М.Протодьяконову-П.М.Цимбаревичу,

$$q = \frac{\gamma a_1}{f} = \frac{2,5 \cdot 3,95}{0,58} = 17,0\ т/м^2.$$

Для выяснения закономерностей проявлений горного давления и выбора расчетного метода прогнозирования были проведены исследования на моделях.

Касаясь экспериментальных исследований проявлений горного давления в сыпучей среде, проведенных М.М.Протодьяконовым, А.А. Борисовым, Н.С.Булычевым [86] , И.П.Толстуновым [87] , следует отметить, что наиболее существенными недостатками исследований (за исключением исследований И.П.Толстунова и Н.С.Булычева) являются, во-первых, нарушение граничных условий подобия для крепи, т.к. в большинстве своем имитация выработки производилась путем опускания некоторой части днища, среды, что, конечно, не отвечает реальным условиям работы крепи, и, во-вторых, отсутствие комплексных измерений основных форм проявлений горного давления.

При выполнении исследований, помещенных в данной главе, впервые был применен комплексный метод моделирования системы крепь-порода, который сочетает методы эквивалентных материалов, фотоупругости, тензометрии и позволяет вести одновременную регистрацию смещений массива, эпюры нагрузки на крепь, напряжений в массиве и напряжений в крепи при достаточно полном соблюдении условий подобия.

В процессе исследований было отработано 5 моделей (табл.6) с жесткой крепью различных конструкций и очертаний и 2 модели с податливой трапециевидной крепью. Для каждой модели опыт повторялся от 5 до 20 раз.

Типы исследованных моделей крепей

Таблица 6

№№ пп	Наименование модели крепи	Размеры выработки в свету, см		Податливость, мм
		ширина	высота	
I.	Трапециевидная	8,5	II,3	-
2.	Трапециевидная	I2,47	II,3	-
3.	Кольцевая бесшарнирная	8,0	8,0	-
4.	Кольцевая двухшарнирная	8,0	8,0	-
5.	Кольцевая четырехшарнирная	8,0	8,0	-
6.	Трапециевидная	8,5	II,3	2-4-7
7.	Трапециевидная	I2,47	II,3	2-4-I0

На моделях I и 5 исследовалось влияние формы выработки на величину и характер распределения эпюры нагрузок по периметру. Модель 5 представляет собой четырехшарнирную круговую крепь из жестких элементов, а модель № I - также четырехшарнирную, но трапециевидную крепь из жестких прямолинейных элементов.

Как видно из рис.48, эпюры нагрузок на эти крепи имеют принципиальное отличие. Если для круговой крепи эпюра по форме близка к эллиптической, то для трапециевидной крепи эпюра нагрузки на верхняк имеет вид седлообразной кривой.

Средняя величина удельного давления при одинаковой глубине для трапециевидной крепи составляет I50 г/см^2 и зависит от прогиба (жесткости) элементов крепи, а для круговой четырехшарнирной крепи σ_v = I03 г/см^2.

На круговых моделях (№ 3,4 и 5) исследовалось влияние числа шарниров круговой крепи на форму и величину эпюры давления. Модель 3 представляет собой жесткую кольцевую крепь, а модели 4 и 5 соответственно имели 2 и 4 шарнира.

Отношения удельных нагрузок $\frac{\sigma_г}{\sigma_в}$ для моделей 3,4 и 5 соответственно равны 0,48; 0,68; I,07.

Таким образом, уже для четырехшарнирной крепи за счет перемещения элементов кровли возникают силы упругого отпора, нагруз-

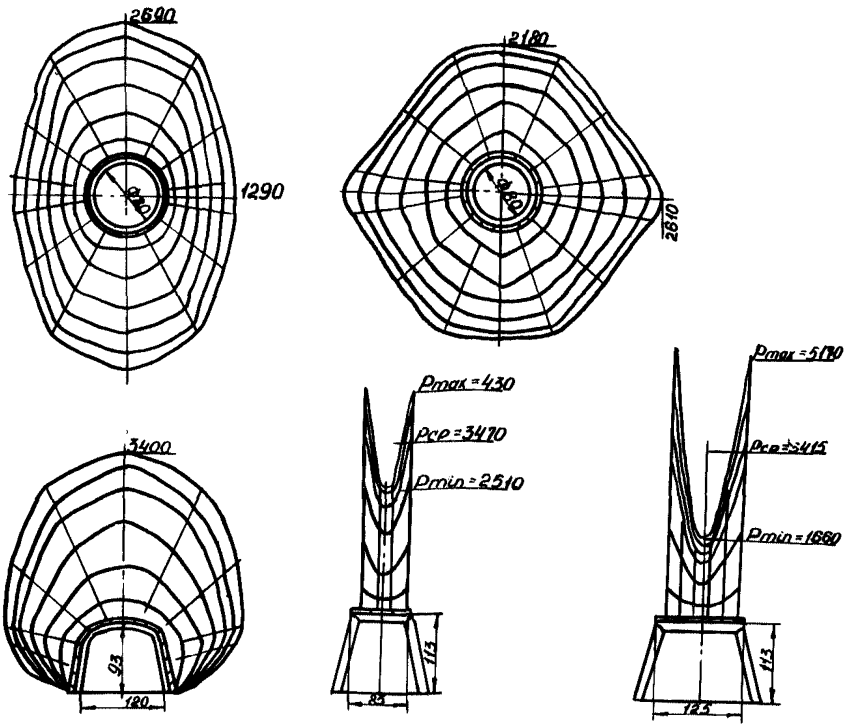


Рис.48. Эпюры нагрузок на жесткие крепи

ки перераспределяются и эпюра может быть принята в виде равномерно распределенной радиальной нагрузки.

Влияние податливости крепи изучалось на моделях № 6 и 7. Для этого четырехшарнирная жесткая крепь первоначально устанавливалась для работы в жестком режиме. После того, как стенд полностью загружался, стойки крепи укорачивались на нужную величину и таким образом имитировалась податливость крепи.

Массив за крепью смещался вслед за ней и после того, как смещение стоек заканчивалось, вновь создавал давление на крепь.

На рис.48 показаны эпюры нагрузки на крепь до момента проявления податливости. После проявления податливости эпюра нагрузок резко уменьшилась по абсолютной величине и изменила свою форму, приняв вид прямого свода (рис.49). Резкое снижение величин нагрузок и изменение формы эпюры наблюдалось уже при податливости 2 мм. При дальнейшем увеличении податливости до I0 мм наблюдалось снижение нагрузки.

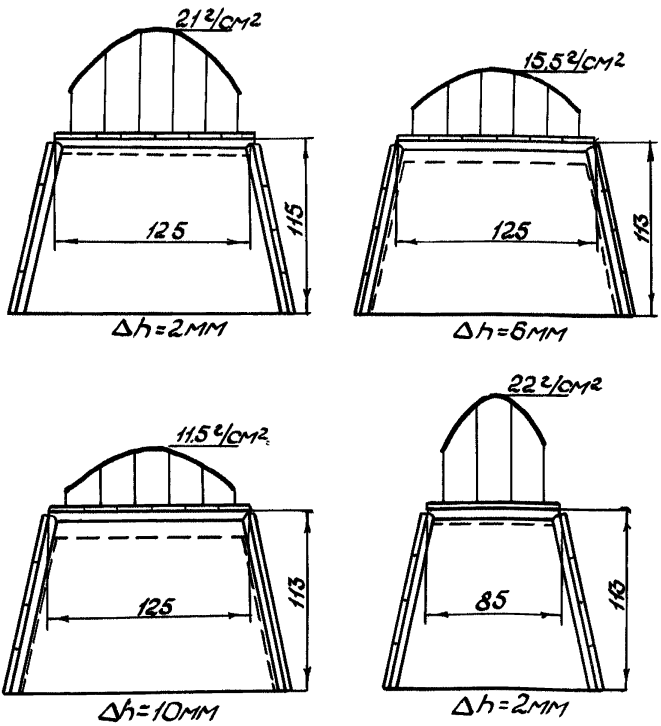


Рис.49. Эпюры нагрузок на податливые крепи

При податливости Δ = I0 мм средняя нагрузка на крепь уменьшилась примерно в 20 раз.

Из табл.6 видно, что модели № I,2 и № 6,7 отличаются размерами выработки по ширине (8,5 и I2,5 см) и это позволяет в какой-то степени оценить влияние размеров выработки на величину удельного вертикального давления при жестком (модели № I,2) и податливом (модели № 6,7) режимах работы.

И в том, и в другом случаях средняя интенсивность нагрузки на крепь для указанных пределов практически не зависит от ширины выработки. Для жестких крепей: однопутевой - I50 г/см^2, двухпутевой - I34 г/см^2.

Для податливых - при податливости Δ = 2 мм: однопутевой - - 22 г/см^2, двухпутевой - 2I г/см^2, т.е. изменение размеров выработок в указанных пределах практически не влияет на величину удельного вертикального давления.

Для жестких крепей, представленных на моделях № I,2,3,4 и 5, интенсивность вертикальной нагрузки на крепь возрастает почти прямо пропорционально глубине заложения выработки (рис.50) и может быть определена из следующих зависимостей:

а) для трапециевидных крепей $q_{в\,сф.} = K_1 \gamma H$, $q_{г\,сф} = \lambda_1 K_1 \gamma H$;

б) для круговых крепей $q_{в\,сф.} = K_2 \gamma H$, $q_{г\,сф} = \lambda_2 K_2 \gamma H$,

где q - интенсивность соответствующей нагрузки;

K - коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции крепи и количества шарниров,

$$K_1 > K_2 > 1 ;$$

λ_1, λ_2 - коэффициенты бокового распора,

$$0 < \lambda_{1,2} < 1 .$$

Совершенно иная картина наблюдается для податливых крепей. На рис.49 представлены эпюры нагрузки на двухпутевую трапециевидную крепь с податливостью 2,6,I0 мм. Как видно из рисунка, несмотря на значительное изменение глубины заложения выработки, интенсивность средней нагрузки q осталась неизменной и равной I2 г/см^2. Иначе говоря,этот эксперимент убедительно показал, что для податливых крепей при достаточной величине податливости нагрузка в сыпучей среде в исследованных пределах практически не зависит от глубины заложения выработки.

Если же податливость недостаточна, то нагрузка на крепь с

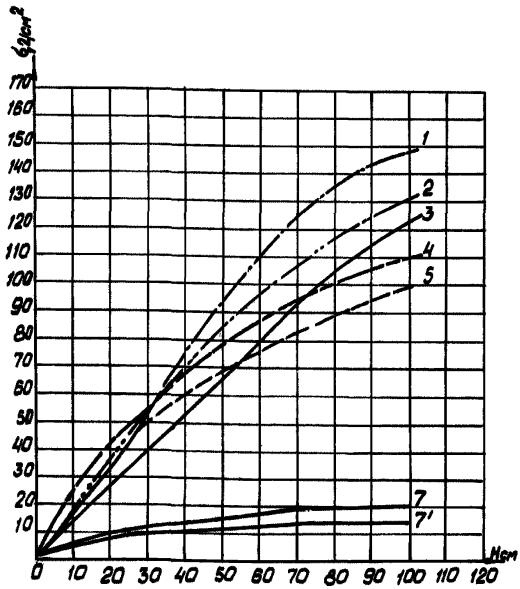


Рис.50. Графики зависимости интенсивности вертикальной нагрузки на крепи от глубины для жестких (I,2,3,4,5) и податливых (6,7) крепей

глубиной будет несколько возрастать, но по абсолютной величине останется значительно меньше нагрузок на жесткие крепи.

Траектория движения массива при проявлении податливости изображена на рис.5I.

В приложении I4 приведены результаты пересчета данных моделирования в натуру.

Сравнение показывает, что для моделей, обладающих податливостью, наблюдается удовлетворительное совпадение результатов моделирования с натурными замерами и выполненными выше расчетами по методам К.Терцаги и В.М.Мосткова.

Это объясняется, очевидно, тем, что в реальных условиях

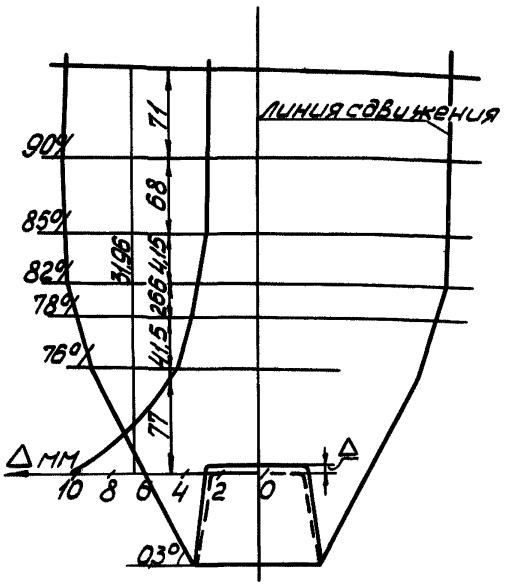


Рис.51. Траектория движения массива при проявлении податливости

породы при проходке всегда имеют возможность свободного перемещения, за счет чего до момента установки крепи успевают произойти некоторые деформации кровли. В моделях с ограниченной податливостью или практически жестких нагрузки при пересчете в натуру оказались в несколько раз больше.

На основании сопоставления и анализа полученных экспериментальных данных о влиянии параметров крепи на формы проявлений горного давления можно сделать следующие выводы:

I. В том случае, когда крепь является жесткой и устанавливается непосредственно вслед за подвиганием забоя без начально-

го зазора между крепью и породой, например, при возведении крепи методом "задавливания", нагрузки на крепь равны напряжениям, которые возникают на контуре выработки и могут быть определены из решения соответствующей контактной упругопластической задачи.

2. Нагрузки на крепь при ее работе в таком режиме пропорциональны глубине выработки. Для податливой крепи вокруг выработки появляется область пониженных напряжений, за которой следует область повышенных напряжений, переходящая в напряжения нетронутого массива. Напряжения в области пониженных напряжений и, как следствие этого, нагрузки на крепь сравнительно невелики и практически не зависят от глубины расположения выработки.

3. Сравнение данных моделирования с расчетами, сделанными по существующим методам прогнозирования проявлений горного давления применительно к сыпучей среде, показывает, что методы дают нагрузки, по величине мало отличающиеся от средних значений, полученных на основе экспериментальных данных для крепей, обладающих податливостью.

Но, если рассматривать каждую гипотезу более подробно не только с точки зрения формального результата, но и с точки зрения соответствия ее расчетной схемы данным эксперимента и конкретным условиям, то можно установить, что ни одна из перечисленных гипотез не может с достаточной объективностью объяснить полученные зависимости между формами проявлений горного давления и параметрами крепи.

Изменение влажности песка в пределах от 0 до 5% (естественная влажность) не оказывает заметного влияния на характер и формы проявлений горного давления.

4.6. Шестой класс условий работы

К последнему, шестому, классу отнесены условия работы крепей в вязких породах глинистого типа, когда величина напряжений такова, что породы переходят в состояние вязкого течения. Возникают незатухающие во времени деформации и при недостаточной несущей способности крепи породы могут полностью заполнить все сечение выработки.

Для математического описания проявлений горного давления в указанных условиях обычно прибегают к замене реального массива идеальным упруговязким телом.

Известно относительно немного методов, которые рассматривают процесс деформирования горных пород с точки зрения вязкоупругого поведения массива. К их числу следует отнести методы, разработанные Г.А.Крыжановской [88], А.П.Максимовым [89], В.А.Лыткиным [90]. Не останавливаясь подробно на анализе перечисленных методов, отметим, что для капитальных выработок наибольший теоретический и практический интерес представляет метод А.П.Максимова, совершенствование которого на основе экспериментальных (натурных и лабораторных) исследований может дать надежный инженерный метод расчета.

§ 5. Основные принципы проектирования крепей

Основные принципы проектирования крепи определяются теми требованиями, которые к ней предъявляются.

Первое и основное требование, которое предъявляется к любой крепи, заключается в том, что крепь должна выдерживать, не разрушаясь и не деформируясь больше допустимых пределов, нагрузки от горного давления.

Второе требование - крепь должна быть долговечна, т.е. материал, из которого выполнены ее элементы, в течение заданного срока службы выработки не должен изменять своих свойств в сторону снижения прочности.

Третье требование - крепь должна быть технологична и не трудоемка в изготовлении и установке.

Четвертое требование - стоимость крепи не должна превышать пределов, определяемых техническим уровнем развития шахтного строительства.

Суммируя все сказанное, можно кратко все эти требования изложить следующим образом: крепь должна обеспечивать безремонтное поддержание горных выработок на весь срок эксплуатации при минимально возможных затратах средств. Учитывая, что поддержание горных выработок в одних и тех же условиях может быть обеспече-

но за счет различных видов крепей, а также за счет упрочнения массива, в каждом конкретном случае должен выбираться такой способ поддержания, который имеет лучшие технико-экономические показатели.

Рассматривая крепь с точки зрения требований долговечности, следует на первое место поставить сборную железобетонную и монолитную бетонную крепи, т.к. бетон обладает известным свойством набирать прочность с течением времени в отличие от других материалов, применяющихся для крепления горных выработок.

На второе место по долговечности из применяющихся материалов следует поставить металлическую крепь. При этом следует учитывать, что срок службы незащищенного от коррозии металла будет значительно меньше, чем срок службы монолитной бетонной крепи.

И, наконец, третье место по долговечности занимает комбинированная крепь, состоящая из железобетонных анкеров и набрызгбетонной крепи. В настоящее время проводятся большие экспериментальные работы по применению крепей, изготовленных из полимерных материалов. Очевидно, в ближайшие годы эти крепи еще не найдут достаточно широкого применения из-за высокой стоимости материала. Применение в качестве постоянной крепи обычных анкеров с клиновыми замками даже в сочетании с набрызгбетонной крепью для выработок с большим сроком службы нецелесообразно, так как породы в области клинового замка с течением времени разрушаются и анкер теряет несущую способность. Применение анкерной крепи с замоноличенным замком является более перспективным решением вопроса, однако для того, чтобы судить о долговечности такой крепи, следует провести дополнительные исследования.

Таким образом, рассмотрение крепей с точки зрения их долговечности на основе накопленного опыта и технико-экономического сравнения показывает, что в качестве крепей для капитальных горных выработок, имеющих срок службы более 5 лет, могут быть рекомендованы следующие виды крепей:

- монолитная бетонная и железобетонная крепи;
- сборная железобетонная крепь;
- металлическая крепь с железобетонной или металлической затяжками;
- комбинированная крепь, состоящая из железобетонных анкеров и набрызгбетонного покрытия по металлической сетке.

Рассматривая вопрос о технологичности той или иной крепи, следует иметь в виду, что наиболее технологичной будет являться та крепь, которая позволяет механизировать все процессы по возведению крепи, требует наименьшего количества времени на монтаж крепи, позволяет совмещать работы по креплению с другими проходческими операциями, требует наименьших затрат труда на возведение крепи в выработке.

Оценка различных видов крепей капитальных горных выработок с точки зрения указанных выше факторов показала, что в настоящее время при существующих средствах механизации и технологии проведения горных выработок наиболее технологичной является сборная железобетонная крепь, т.к. она позволяет полностью механизировать все процессы крепления.

Однако в ближайшем времени следует ожидать создания комплексов, позволяющих полностью механизировать процессы крепления выработок монолитной бетонной крепью. В этом случае монолитная бетонная крепь по технологичности будет успешно конкурировать со сборным железобетоном и будет, очевидно, обладать наименьшей стоимостью. Еще большими потенциальными возможностями с точки зрения технологичности обладает комбинированная крепь (анкерная крепь в сочетании с набрызгбетоном по металлической сетке или анкерная крепь в сочетании с металлической арочной крепью). Однако широкое применение этих крепей сдерживается недостаточным исследованием долговечности анкерной крепи, отсутствием методов расчета, а также достаточно работоспособных механизмов и приспособлений для возведения анкерной крепи.

Наибольшее распространение для крепления капитальных горных выработок имеет в настоящее время металлическая крепь с железобетонной затяжкой. Возведение этой крепи не может быть полностью механизировано и требует больших затрат ручного труда на укладку железобетонных затяжек. Однако шахтостроители наиболее охотно применяют именно этот вид крепи, так как ее элементы имеют сравнительно небольшой вес, а установка крепи при достаточном количестве рабочих требует сравнительно небольшого времени.

5.I. Проектирование крепи для первого класса условий работы

Как уже отмечалось выше,первый класс условий работы крепи характеризуется тем, что крепь несет нагрузку только от случайных вывалов и обрушений небольших объемов горного массива. Размеры крепи определяются конструктивно, исходя из предположений, что крепь нагружается вертикальной равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью 0,5-I т/м^2. В качестве крепей из существующих и прошедших промышленные испытания могут быть рекомендованы набрызгбетонные и монолитные бетонные крепи. Набрызгбетонная крепь особенно эффективна в том случае, если будет обеспечено достаточно хорошее оконтуривание горной выработки (гладкое или контурное взрывание) (рис.52).

Крепь из монолитного бетона толщиной I2-I5 см (рис.53) рекомендуется возводить механизированным способом с применением металлических передвижных опалубок и бетоноподатчиков. Первый класс условий работы крепи является наиболее выгодным с экономической и технической точек зрения. Поэтому при выборе места заложения горных выработок и способа их проведения желательно обеспечить указанное выше условие работы крепи, что может быть достигнуто за счет следующих мероприятий:

- расположения выработки в прочных монолитных породах;
- проведения выработки комбайновым способом или с применением контурного взрывания, что предотвращает разрушение законтурного массива;
- в отдельных случаях первый класс условий работы крепи может быть обеспечен за счет искусственного упрочнения окружающего выработку горного массива, однако целесообразность применения этого метода в каждом конкретном случае требует особого технико-экономического обоснования.

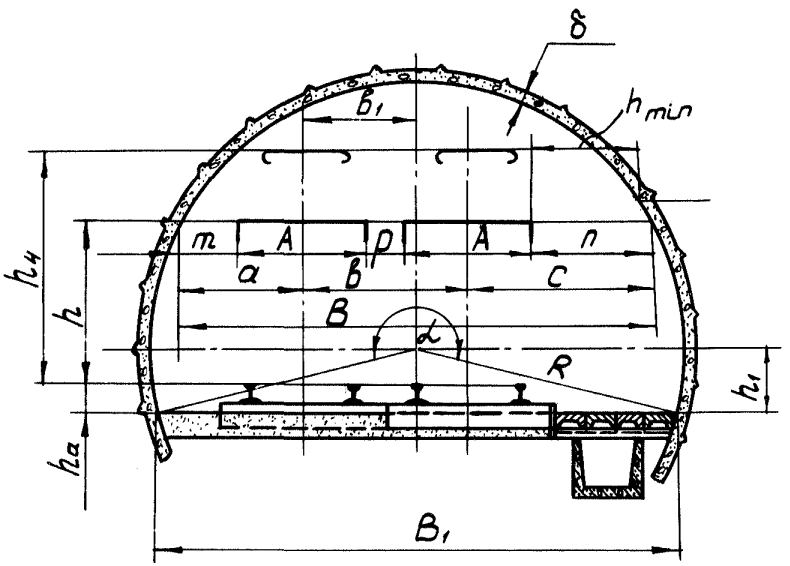


Рис.52. Набрызгбетонная крепь

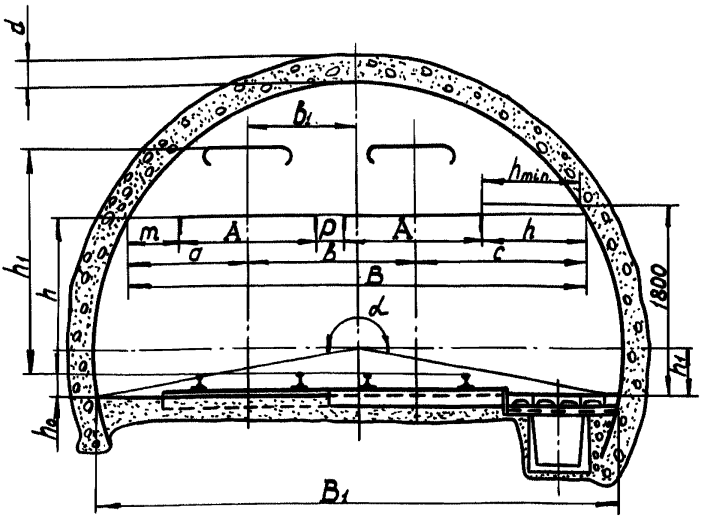


Рис.53. Монолитная бетонная крепь

5.2. Проектирование крепи для второго класса условий работы

Ко второму классу условий работы относятся условия работы крепи в выработках, если в результате процессов разрушения образуется свод предельных равновесий, а крепь работает в режиме заданной нагрузки. Такой режим работы может существовать при условии, что

$$U_{кз} > U_o + U_п + K, \qquad (I23)$$

где $U_{кз}$ – смещения крепи и забутовки;

U_o – упругие смещения массива;

$U_п$ – смещения массива с учетом ползучести горных пород;

K - смещения за счет разрыхления пород в процессе разрушения при формировании зоны предельных равновесий.

Нагрузка на крепь в этих условиях для выработок пролетом до 6 м обычно не превышает 5÷6 т/м^2.

Поддержание выработок в условиях второго класса также не требует больших затрат, поэтому при проектировании крепи и выборе места заложения выработки необходимо стремиться к обеспечению указанных выше условий. Во многих случаях это может быть выполнено за счет применения податливых крепей или крепей с податливой забутовкой (рис.54).

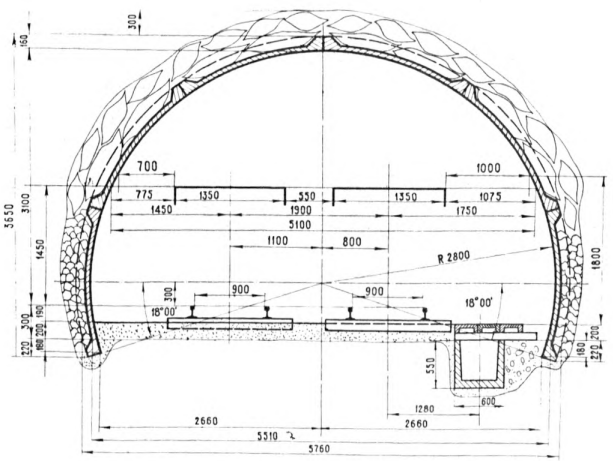


Рис.54. Сборная железобетонная тюбинговая крепь с податливой забутовкой

Для второго класса рекомендуются:

а) сборные железобетонные крепи

- для однопутевых выработок - сборные железобетонные плитные крепи конструкции ВНИИОМШСа (УТЭ), КузНИИшахтостроя (ГАК) и др., а также сборные крепи из железобетонных рам конструкции ИГД им.А.А.Скочинского, КузНИИшахтостроя (АРК) в сочетании с железобетонной или металлической затяжкой. Применение рамных крепей должно быть рекомендовано тогда, когда применение плитных крепей по каким-либо причинам невозможно;

- для двухпутевых выработок - сборные железобетонные тюбинговые крепи КузНИИшахтостроя (ГТК) , ВНИИОМШСа (КТАГ) и ИГД им.А.А.Скочинского;

б) металлические крепи (рис.19) с железобетонной, металлической или стеклопластиковой затяжкой. Применение металлических крепей рекомендуется в том случае, если применение сборных железобетонных крепей невозможно;

в) монолитные бетонные крепи с коробовым сводом и прямолинейными стенками для крепления выработок околоствольного двора, на участках сопряжений,камер и частой смены сечений. При возведении монолитной бетонной крепи особенно вслед за подвиганием забоя на глубоких горизонтах или в слабых породах должна обеспечиваться требуемая податливость либо за счет оставления некоторого зазора в кровле выработки, либо за счет применения податливой забутовки;

г) комбинированные крепи из железобетонных анкеров или анкеров с замоноличенными замками в сочетании с металлической арочной крепью или с металлическими подхватами и торкрет-бетоном по сетке(рис.55). Последний вид крепи рекомендуется применять при контурном взрывании.

5.3. Проектирование крепи для третьего класса условий работы

При креплении выработок, пройденных в крепких скальных породах, в том случае, когда напряженное состояние массива и его физико-механические свойства будут таковы, что любой свободный контур выработки не может быть устойчив (см.стр.87), будет иметь место третий класс условий работы крепи. Характерным от-

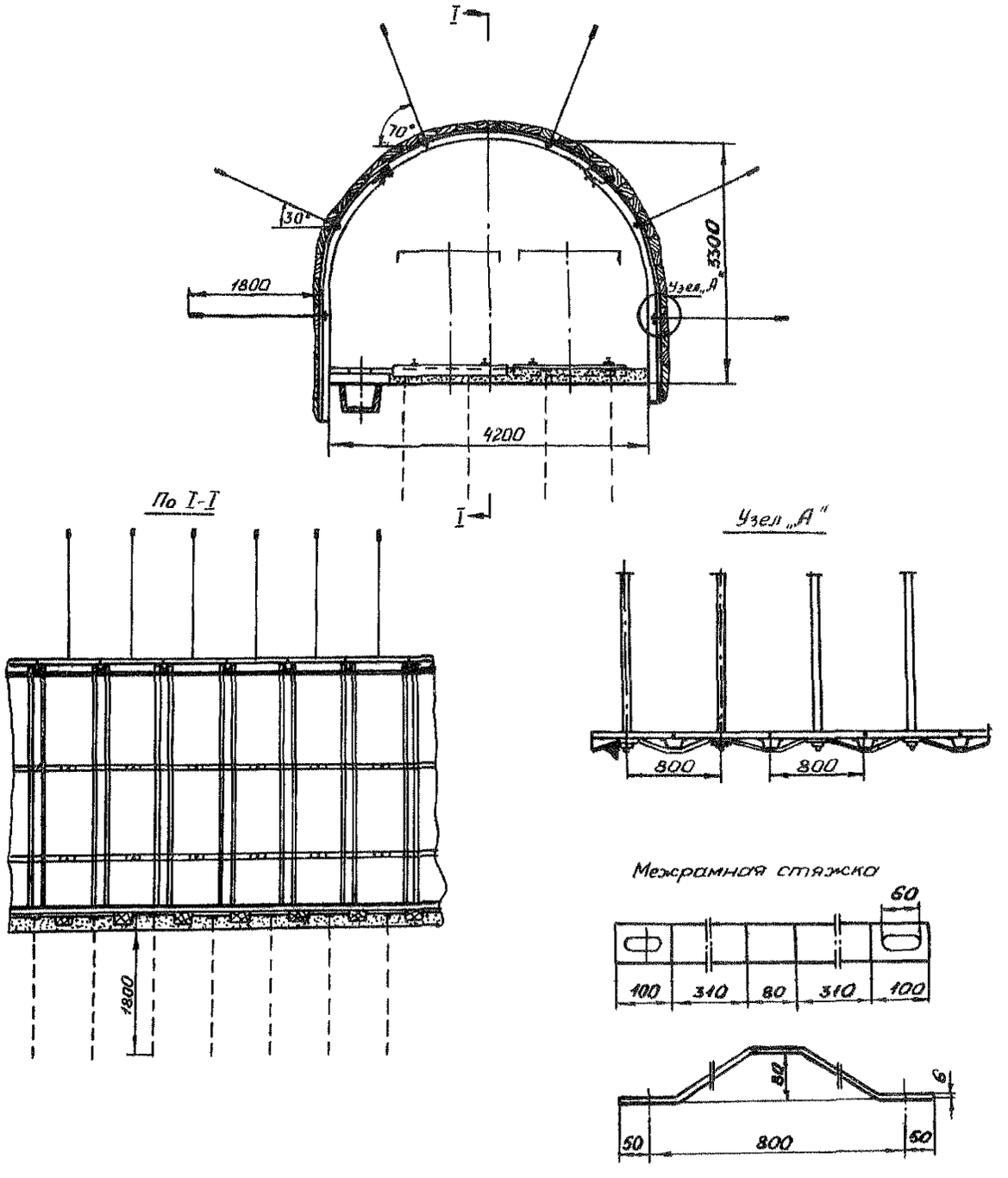


Рис.55. Комбинированная крепь

личительным признаком данного класса является то обстоятельство, что реакция крепи участвует в формировании области предельных равновесий, а также нового контура неразрушенного массива. Изложенные предпосылки определяют и принципы проектирования крепи, которые в общих чертах сводятся к тому, что крепь должна обладать достаточно высокой несущей способностью и податливостью в радиальном направлении. Нагрузки на крепь в этих условиях могут колебаться в широких пределах в зависимости от глубины заложения выработки и физико-механических свойств вмещающих пород.

На основании данных, приведенных на рис.28, можно предполагать, что изменение нагрузки для глубин, не превышающих I000 м, в породах с $f > 4$ находится в пределах 3÷20 т/м^2.

Для третьего класса условий рекомендуются к применению сборные железобетонные жесткие шарнирные крепи кольцевого очертания, если постоянная крепь возводится с отставанием от забоя. В том случае, когда крепь возводится вслед за подвиганием забоя, необходимо вводить конструктивную податливость или податливую забутовку.

Конструктивная податливость может быть выполнена либо за счет податливых прокладок (рис.56), либо за счет специальных двухслойных блоков (рис.57). Блок состоит из несущей части и податливого слоя. Податливость обеспечивается за счет различного сочетания сквозных отверстий и регулируется за счет изменения толщины стенок между ними.

Применение прокладок может быть рекомендовано, если требуемая податливость крепи в радиальном направлении не превышает 5–6 см.

Весьма эффективным мероприятием, снижающим нагрузки на крепь и улучшающим условия поддержания выработок в данных условиях, является предварительное или последовательное упрочнение горных пород.

5.4. Проектирование крепи для четвертого класса условий работы

Отличительным признаком четвертого класса, как уже отмечалось выше, является то обстоятельство, что массив в зоне неупругих (пластических) деформаций сохраняет связь между отдельными

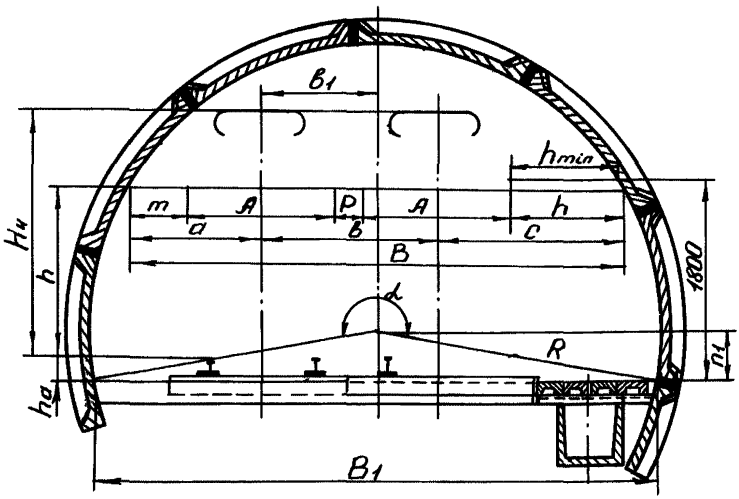


Рис.56. Сборная железобетонная крепь с податливыми прокладками

элементами, т.е. обладает в значительной степени пластическими свойствами. Условия работы крепи в этом случае будут благоприятными, если конструктивная податливость крепи и забутовки будет равна упругопластическим смещениям свободного контура, необходимым для формирования области предельных равновесий. На практике достижение этого равенства, очевидно, будет удаваться лишь случайно, однако к нему нужно всегда стремиться, соблюдая некоторый запас конструктивной податливости. При $U_{кз} \gg U_о + U_п$ нагрузка на крепь, очевидно, будет несколько выше своего минимального значения, когда $U_{кз} = U_о + U_п$, а при $U_{кз} < U_о + U_п$ нагрузка на крепь может достигать довольно значительных величин, в несколько раз превышающих P_{min}.

В условиях данного класса могут быть рекомендованы к применению сборные железобетонные крепи с податливой забутовкой, блочные двухслойные крепи (рис.57), металлические арочные или кольцевые крепи со сборной железобетонной металлической или стеклопластиковой затяжкой (рис.19).

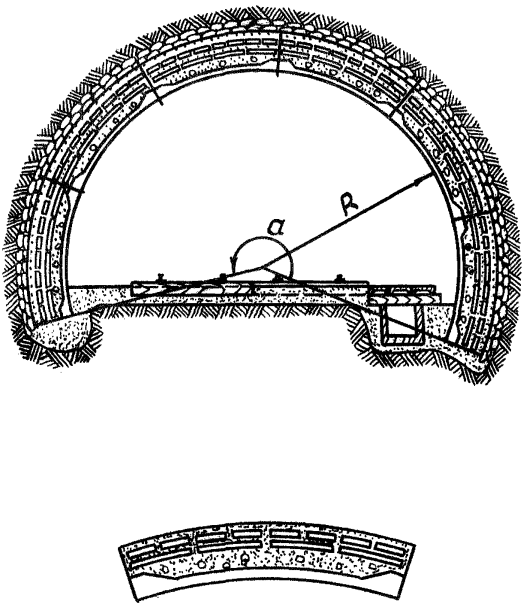


Рис.57. Податливые двухслойные блоки

Можно также рекомендовать проведение выработок с применением временной крепи и возведением постоянной крепи через 3-5 месяцев после проведения выработки. Обычно в качестве временной крепи применяются металлическая арочная или анкерная крепи.

5.5. Проектирование крепи для пятого класса условий работы

Пятый класс условий работы крепи будет иметь место при проведении выработок в породах, лишенных связи между отдельными частями массива, т.е. в квазисыпучей среде. Как показали экспериментальные, теоретические и натурные исследования проявле-

ний горного давления, при проведении выработок в таких горно-геологических условиях требуется немедленная установка крепи вслед за подвиганием забоя. Причем установленная крепь должна сразу воспринимать нагрузку от обрушающихся горных пород. В целях значительного снижения нагрузок на крепь и улучшения условий ее работы крепь должна обладать податливостью в радиальном направлении 10-15 см. Тогда нагрузки на крепь за счет проявления арочного эффекта будут иметь значения в пределах 6÷20 т/м^2.

Для этого класса могут быть рекомендованы сборные железобетонные арочные крепи ИГД им.А.А.Скочинского и сборные железобетонные тюбинговые крепи КузНИИшахтостроя (рис.58), ВНИИОМШСа и др. податливые крепи кругового или арочного очертаний.

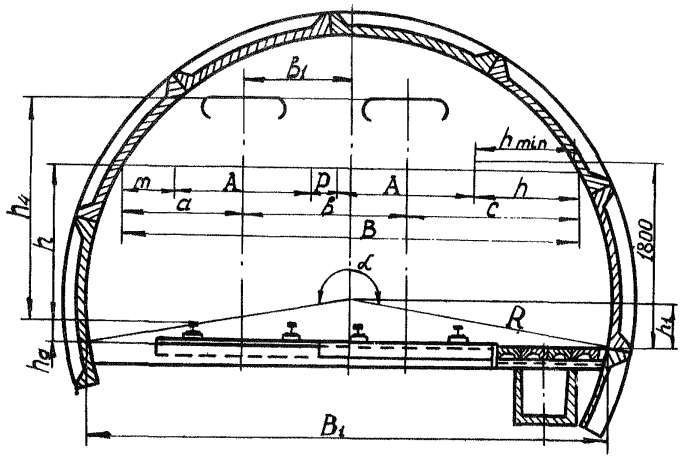


Рис.58. Сборная железобетонная тюбинговая крепь конструкции института КузНИИшахтострой

В отдельных случаях могут быть рекомендованы железобетонные крепи кругового или арочного очертания с жесткой арматурой, причем жесткой арматурой должна служить временная крепь, устанавливаемая вслед за подвиганием забоя. Обычно в качестве вре-

менной крепи применяется металлическая арочная крепь.

Весьма эффективным мероприятием, облегчающим проведение выработки и дальнейшее ее поддержание, может служить предварительное упрочнение массива разрушенных пород цементационными и химическими растворами.

5.6. Проектирование крепи для шестого класса условий работы

Поскольку к шестому классу относятся условия работы крепи в выработках, пройденных по слабым породам, склонным к вязкопластическому течению, то поддержание выработок в этих условиях особенно затруднено. Опыт эксплуатации крепи на шахтах Егоршинского месторождения, Караганды, Кузбасса показал, что в том случае, если крепь имеет недостаточную несущую способность, выработка может быть целиком заполнена горной массой. Нагрузки на крепь зависят от напряженного состояния массива, физико-механических свойств горных пород и в конечной своей стадии почти не зависят от податливости крепи. Последнее утверждение не относится к тем случаям, когда применяется крепь постоянного сопротивления, т.е. когда крепь "уходит" от нагрузки. Однако применение такой крепи при длительной эксплуатации выработки нецелесообразно, так как в конечном счете сечение выработки уменьшается настолько, что ее эксплуатация становится невозможной. Искусственное регулирование нагрузок на крепь в этих условиях возможно также путем оставления окон в крепи, через которые горная масса продавливается внутрь выработки и систематически срезается.

Суммируя высказанные выше соображения, следует отметить,что для поддержания выработок в течение длительного срока службы в этих условиях необходимо применять жесткие крепи высокой несущей способности, способные воспринимать нагрузки сразу после установки крепи. Форма сечения выработки должна быть близка к круговой. Таким образом, это могут быть сборные железобетонные или металлические тюбинговые крепи, металлические кольцевые или металлобетонные крепи с жесткой арматурой, способные воспринимать нагрузки сразу после установки.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Результаты измерений напряжений в массиве

Приложение I

Авторы	Бассейн, шахта	Метод определения напряженного состояния массива	Результаты измерений
1	2	3	4
Галушко П.Я., Куренков Я.К., Френзе Ю.К., Халимовский М.А. [9]	I. Львовско-Волынский бассейн: а) шахта № 6 Нововолынская (выработки главных направлений);	Измерения выполнялись в горизонтальной скважине Ø 76мм, глубиной I0 м методом разгрузки с помощью тензодатчиков. Скважины бурились из капитальных или подготовительных выработок. Все измерения характеризуют напряженное состояние массива, т.к. выполнены вне зоны влияния капитальных и подготовительных выработок и очистных работ	Породы-аргиллиты, алевролиты, песчаники, известняки. H = 335 м; γH = 75 кг/см^2; измеренное $\sigma_{z\,эф.}$ = 69 кг/см^2.
	б) шахта № 6 Велико-Московская (в околоствольном дворе)		H = 536 м; γH = I30 кг/см^2; $\sigma_{z\,эф.}$ = I49 кг/см^2. Деформации разгрузки по горизонтальной оси равны 0, т.е. $\sigma_x = \lambda \sigma_z$; $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu} = \frac{0,3}{0,7} = 0,42$. Измерения проводились в зоне незначительных тектонических нарушений
	2. Донецкий бассейн: а) шахта им. Ильича (выработки околоствольного двора);	то же	Глинистые сланцы, песчаники и известняки. H = 540 м; γH = I35 кг/см^2; $\sigma_{z\,эф.}$ = 250 кг/см^2; σ_x = 220 кг/см^2.
	б) шахта им. XXII съезда КПСС (выработки околоствольного двора);		H = 7I0 м; γH = I80 кг/см^2; $\sigma_{z\,эф.}$ = 305 кг/см^2; $\sigma_{x\,эф.}$ = I80 кг/см^2.
	в) шахта "Красный профинтерн" (в породах почвы пласта Дерезовка, опасного по внезапным выбросам угля и газа)		H = 645 м; γH = I60 кг/см^2; σ_{z1} = 620 кг/см^2; σ_{x1} = 500 кг/см^2.

1	2	3	4
Курленя М.В. [10]	Кузбасс. Прокопьевско-Киселевский район, шахта им. Ворошилова. Напряжения измерялись в угольном массиве на пласте Лутугинском с квершлага 8I и на пласте Горелом с квершлага 62	Метод разгрузки керна-соосными скважинами. В центральной измерительной скважине устанавливается деформометр и производится кольцевая разгрузка элемента массива	В Кузнецком бассейне на разных месторождениях угля вне зоны геологических нарушений до глубины 240 м напряженное состояние угольного массива приблизительно соответствует формулам Динника, т.е. $\sigma_z=\gamma H$; $\sigma_x=\lambda\gamma H$
Бублик Ф.П., Иванов Г.А.; [II] Кузнецов С.Г., Бублик Ф.П., Иванов Г.А. [I2]	Кузбасс: I. Шахта "Заречная", пласт Полысаевский I;	Напряжения определялись методом разгрузки торца скважины (метод ВНИМИ) в угольных целиках шириной 4-5 м. Напряжения измерялись в массиве на расстоянии не менее 2-3 радиусов от оси выработки	$R_{сж.}$ угля = 35-40 кг/см^2; I.H = 65 м; γH = I8 кг/см^2 σ_z = I0; σ_x = 6; λ = 0,6; σ_z = 30; σ_x = I5; λ = 0,5; σ_z = I3; σ_x = I0; λ = 0,76;
	2. Шахта "Усинская", пласт Полысаевский XI	то же	2.H = 80 м; γH = I6 кг/см^2 σ_z = 26; σ_x = I6; λ = 0,6; σ_z = 40; σ_x = 28; λ = 0,7
Твердовский Р.К., Скозобцов Б.С., Нестеренко Г.Т. [I3]	Миргалимсайское месторождение	На забой скважины эпоксидной смолой наклеивался тензометр с двумя взаимно перпендикулярными тензорезисторами. Исследования проводились на трех различных по глубине участках	Известняки: $R_{сж.}$ = I200-I600 кг/см^2; $R_{сж.}$ = 300-500 кг/см^2; μ = 0,2-0,34; порода трещиноватая: H = 80 м; γH = 22 кг/см^2; σ_z = 50; σ_x = 39; λ = 0,76 монолитное рудное тело: H = 2I0 м; γH = 57 кг/см^2; σ_z = 86; σ_x = 56 кг/см^2; λ = 0,66, доломитизированный известняк: H = 320 м; γh = 86 кг/см^2; σ_z = II0 кг/см^2; σ_x = 28 кг/см^2; λ = 0,30

Приложение 2

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НАГРУЗОК НА КРЕПЬ

Авторы	Бассейн, шахта	Наименование выработки	Глубина, м	Способ проходки и тип крепи	Характеристика пород и горно-геологических условий	Измерительные средства	Величины смещений и давлений	Длительность
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И.Л. [73]	Донбасс, шахта "Красная звезда"	Восточный полевой коренной откаточный штрек	770	Круглое сечение $R_{вн}$=1900 мм, выработка закреплена кольцевой податливой крепью из СВП-17 с железобетонной затяжкой буровзрывным способом	Песчанистые сланцы мощностью 20 м, $R_{кр.}$ = 420 кг/см^2, $R_{бок.}$ = 500 кг/см^2. Угол падения пород φ = 12-13^0	Динамометрическая рама, состоящая из внутренней грузонесущей рамы, на которую устанавливались динамометры 50Д-180. Наружная рама устанавливалась из отдельных сегментов	L = 0,33 м ρ = 15,5 т/м^2; L = 1 м ρ = 4,7 т/м^2	1-1,5 года
		Первый западный полевой откаточный штрек пласта m 3	910	Диаметр выработки в чверне R =4,4м. Податливая кольцевая крепь из СВП-27 с железобетонной затяжкой	Песчаники $R_{сж.}$ = 800-900 кг/см^2, m>25 м, φ = 18-20^0	То же	P = 6,8 т/м^2	1 год
Гелескул М.Н., Усан-Подгорнов Б.М. [92]	Донбасс: шахта "Бутовская-Глубокая"	Западный полевой коренной вентиляционный штрек	1006	Ширина выработки 5,9 м, высота 4,6 м. Штреки пройдены буровзрывным способом и закреплены металлическими арками из СВП-27 через 0,5-0,7 м	Крепкие песчаники, глинистые сланцы, известняки	Динамометры устанавливались по контуру арок, а промежутки между ними перекрывались жесткими траверсами	$P_{кр.}$ = 7 т/м^2; $P_{б.}$ = 5,9 т/м^2	1 год
	Шахта "Пролетарская-Глубокая"	Восточный квершлаг №2	704	Ширина выработки 3,9 м, высота 3,1 м	Песчанистые сланцы, глинистые сланцы	То же	$P_{кр.}$ = 3,8 т/м^2 $P_{б.}$ = 1,4 т/м^2	1 год
Ларионов В.Д., Коллегова Н.А., Зверев А.Б., Фелицин Б.Д., Дорожкин В.И., Трущенко Н.Г. [93]	Донбасс	Горизонтальные капитальные выработки	500	Выемка породы производилась участками с временной крепью, а затем возводилась постоянная крепь - монолитная или железобетонная	Сланцевые неустойчивые глины	Динамометрические баллоны, заполненные маслом, битумом или водой. Размер баллона 500x800x40	Для однопутевой круглой выработки $R_{св.}$ = 14 м: а) закрепленной монолитным железобетоном, 40 < P< 228 т/м^2; б) закрепленной сборным железобетоном, 50 < P< 300 т/м^2; в) закрепленной бетонитами, 15 < P < 85 т/м^2	40-60 дней

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Усан-Подгорнов Б.М., Мининберг В.Я. [94]	Львовско-Волынский бассейн. Шахта №8	I. I-й восточный откаточный 2. I4-I6-й сборный 3. Южный откаточный 4. 3I-й западный бортовый	320	Буровзрывной способ. Металлическая арочная крепь, $S_{св.}$=II,I; L =0,5; $S_{св.}$= 6,3; L =I,0; $S_{св.}$=II,I; L =0,5. Комбайновый (ШБМ-2), $S_{св.}$= 6,5; L =I,3	Песчанистый сланец, m =4,5 м, $R_{сж.}$=380 кг/см^2; уголь, углинистый сланец, $R_{сж.}$=230 кг/см^2	Давление замерялось с помощью механических динамометров типа 50Д-I80, располагаемых по контуру выработки и под стойками динамометрических арок	P = 8÷I0 т/м^2	
Насонов Л.Н., Моцкин И.А., Нуждихин Г.И., Субботин В.А. [95]	Подмосковный бассейн. Шахта №4 Сафоновского месторождения	Главный вентиляционный восточный штрек	I00	Кольцевая бесшарнирная крепь из спецпрофиля СП-I8	Пластичные глины	Нормальные и касательные составляющие внешних нагрузок замерялись методом фотоупругих покрытий с помощью оптических датчиков	P = 32 т/м^2; коэффициент неравномерности нагрузок 0,7-0,8	300 дней
Максимов А.П., Стыцин В.И. [96]	Западный Донбасс. Шахта "Западно-Донбасская" № 29	Западный панельный вентиляционный штрек № 2	I40	Арочная податливая крепь	Аргиллиты, редко песчаники, $R_{сж.}$=I00-200кг/см^2	Глубинные репера. Динамометрические арки	P = 8-9 т/м^2	I5 месяцев
Качарава Г.Г. [97]	Трест Ткибулауголь. Шахта им. Ленина	Штрек	200	Выработка трапециевидного сечения, закрепленная металлической крепью из двутавра № I8, $S_{св.}$=II м^2; L = 0,7 м	Мелкозернистые глинистые песчаники, f =6-7; $R_{сж.}$= 269-436 кг/см^2	Фотоупругие датчики	Эпюры нагрузок на верхняк жесткой крепи имеют вид обратного свода. Максимальное боковое давление зафиксировано в местах соединений верхняка с ножками, $P_{б\ max}$ = = 6,2 т/м^2; $P_{б\ max}$ = 3,4 - - 2,7 т/м^2	I20 суток
Басинский Ю.М. [98]	Донбасс: Шахта №2 им. Артема; Шахта "Щегловская-Глубокая"; Шахта №I7-бис; Шахта "Красная звезда"; Шахта им. Ильича	Капитальные выработки	733 915 770 7I0	Жесткая замкнутая железобетонная крепь из двутавровых рам с бетонным заполнением, $S_{св.}$= I5 м^2	Слабые породы с пределом $R_{сж.}$= 300-500 кг/см^2	Динамометрические баллоны, заполненные битумом	Для выяснения зависимости давления от глубины использовались данные Киевского политехнического института и ЦНИИподземмаша: $P_{100\,м}$ = I0 т/м^2; $P_{200\,м}$ = I2 т/м^2; $P_{300\,м}$= I4 т/м^2; $P_{400\,м}$= I7 т/м^2; $P_{500\,м}$= 25 т/м^2; $P_{800\,м}$= 33 т/м^2; $P_{1000\,м}$= 5I т/м^2	3-6 лет

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коржик М.В., Алферов Б.В. [99]	Донбасс: шахта им. Ильича	Обгонная ветвь ствола №4. Станция I (качественная забутовка закрепного пространства). Станция 2 (некачественная)	7I0	Мелкоразмерные тюбинги МТ, $D_{св.}$ = 5,5 м	Малоустойчивые трещиноватые породы, $R_{сж.}$ = = I57-392 кг/см^2; φ = 37°	Приборы для измерения нагрузок	$P_{1\ станц.}$= 68 т/м^2 $P_{2\ станц.}$= 8 т/м^2	8-I2 месяцев
Ващилин В.А. [I00]	Шахта им. XXII съезда КПСС комбината Луганскуголь	Западный полевой штрек пласта	800	Буровзрывной способ. Металлическая арочная крепь из спецпрофиля СВП-22,СВП-27 через один метр, затяжки деревянные	Алевролиты и песчаники	Замерные станции конструкции ЛГИ	$P_{в.}$ =6-I0 т/м^2 $P_{в.}$ =20-25 т/м^2	50 суток
Гринько Н.К., Захаров Е.П. [I02]	Трест Кадиевуголь: I.Шахта им. Ильича	Выработки околоствольного двора	7I0	Замкнутая крепь из двутавровых рам в бетоне	$R_{сж.}$=350+I400 кг/см^2; $R_{сж.}$=450-I500 кг/см^2	I8 станций,по 9 станций на каждой шахте	P_{max}=60-70 т/м^2	от I до 4I лет
	2.Шахта им.XXII съезда КПСС		9I3				P =20-30 т/м^2	
Нарусевич В.С., Соболев В.П. [I0I]	Карагандинский бассейн шахта №I07	I. Второй западный вентиляционный штрек	200	Взамен деформированной деревянной крепи применили железобетонные кольца D = 2,6 м (однопутевая выработка). Состоит из 5 элементов таврового сечения, соединенных через пропущенные прокладки болтами или шпильками. Затяжка железобетонная	Слабоустойчивые породы, аргиллиты, алевролиты $R_{сж.\ почвы}$ = = I90 кг/см^2; $R_{сж.\ кровли}$ = =220-270 кг/см^2	Динамометрические станции	I. $P_{кр.}$=23,7 т/м^2; $P_{п.}$ =I3+I4,3 т/м^2; $P_{б.}$ =I6,6 т/м^2. Окончательная стабилизация нагрузки на крепь наступила после I8 месяцев с момента установки крепи и замерных станций	I8 месяцев
		2. Сбойка					2. P =22,I т/м^2	
Попов Ю.Г. [I03]	Карагандинский бассейн Шахта им.Костанко	Полевой штрек откаточный		Арочная податливая крепь из спецпрофиля СП-I8, $S_{св.}$= I5,3 м^2			Влияла надработка. $P_{к\ max}$= I0,0 т/м^2	720 суток

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Максимов А.П., Стыцин В.И. [I04]	Шахта "Западно-Донбасская-29"	Западный панельный вентиляционный штрек	I40	Временная арочная крепь, затем устанавливали постоянную бетонную крепь	Аргиллиты, алевролиты, песчаники, $R_{сж.}$=I00-200 кг/см^2	Динамометрическая арочная крепь	P = 8 т/м^2 Боковое давление на арки почти отсутствует	I5 месяцев
Глушко В.Т., Широков А.З. [I05]	Донбасс. Шахта №I-2	Первый северный откаточный штрек	408	Металлическая кольцевая податливая крепь из СП-I8, $S_{св.}$ =9,9 м^2	Аргиллиты	Механические динамометры конструкции НУТИ типа 50Д-I80; шариковые динамометры ШДУ-I50	$P_{кр.}$ =I4,5-I5,2 т/м^2; $P_{п.}$ =9,0 т/м^2. Затем были ослаблены гайки на хомутах и давление уменьшилось: $P_{кр.}$ =3,4 т/м^2; $P_{б.}$ =3,0 т/м^2; $P_{п.}$ =2,I т/м^2	I0I сутток
Бакин Н.П., Петров В.А. [I06]				Монолитная бетонная крепь из железобетонных тюбингов, D =5,5 м	Кембрийские глины	Механические динамометры конструкции ЛГИ, динамометрические баллоны	Неравномерная эпюра по контуру обделки, P_{max} =33,2 т/м^2; $P_{min.}$ = 4,0 т/м^2; $P_{ср.}$ =I7,0 т/м^2	< I года
Белаенко Ф.А. [I07]	Никопольский бассейн							
	I. Шахта №24		32	Замкнутая деревянная прямоугольная крепь	I. Песок	Гидравлические (ртутные) месседозы	I. $P_{б.}$ = 2,5 т/м^2; $P_{к.}$=0,8 т/м^2; λ = 0,26	От 3 месяцев до 3 лет
	2. Шахта №I2		37		2. В кровле глина, в почве - песок		2. $P_{б.}$=I4,7-I5,4; $P_{к.}$= 6,8-7,4 т/м^2 λ = 0,44	
	3. Шахта №I5		8I		3. В кровле глина в почве песок и глина		3. $P_{б.}$=29-I7 т/м^2; $P_{к.}$=I7,8 т/м^2 λ = 0,63	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пригожин Е.С., Денисов В.Н. [I08]	Подмосковный бассейн. Шахта №I2 "Липковская"	Главный восточный откаточный штрек	46	Железобетонные блоки конструкции Шахтоспецстроя. Штрек проходится с помощью щитов ПЩ-4 и ПЩМ-4	Породы из песка, глины и слабого песчаника	Замеры давления проводились с помощью герметических камер с битумом	$P = 7$ т/м^2	365 суток
Галескул М.Н., Усан-Подгорнов Б.М. [I09]	Подмосковный бассейн. Шахта № 2 "Зубовская"	Штреки, расположенные вне зоны влияния очистных работ	60-I00	Рамные железобетонные, металлические и деревянные крепи	Глины и пески	Механические стоечные динамометры типа 50Д-I80 конструкции ВУГИ	$P = 6{,}3$ т/м^2	670 дней
Суворов Н.А., Чугай М.И. [II0]	Донбасс. Шахта им. Ильича	Обгонная ветвь, пройденная вкрест простирания пород	7I0	Сборная железобетонная крепь из мелкоразмерных тюбингов МР-2	Неустойчивые обводненные породы		$P_{кр.} = 69{,}4$--70 т/м^2	< I года
Славин Б.Е., Казаков В.П. [III]	Железнодорожные тоннели (семь) в Сибири		50-I50	Сначала возводилась временная штанговая, арочная-штанговая или арочно-рамная крепь, затем возводилась бетонная обделка	Метаморфические сланцы, кристаллические сланцы, известняки, песчаники f = 2-I0	Съемные индикаторные деформометры ЦНИИС и электрические динамометры типа ЭД-2	Максимальная глубина вывала от 0,5 до 4 м; P колебалась от 2 т/м^2 в крепких песчаниках, f=6+8, до 22 т/м^2 в алевролитах с f =2-3; 0,8 т/м^2 < $P_{ф.}$ <I5 т/м^2	390 дней
Джанджгава И.Д., Махарадзе М.Н. [II2]	Чиатурское месторождение	Капитальные штольни	80-I70	Прямоугольное сечение. Металлические верхняки и каменные стенки	Месторождение представлено одним пластом мощностью от 0,3 до 6,6 м. Средний угол падения 2°. Породы кровли сложены тонкослоистыми глинами мощностью от 29 до 80 м	Механический динамометр конструкции ВУГИ	3,75 т/м^2 < P < 4,4 т/м^2	I8,5-2I месяц

Приложение 3

Результаты определения σ_θ вокруг эллипса для изотропной задачи

θ, град	c								
	I,00	I,I5	I,30	I,45	I,60	I,75	2,00	3,00	4,00
				$\lambda = 0,5$					
0	2,50	2,239	2,04	I,88	I,75	I,64	I,50	I,I7	I,00
I5	2,37	2,I6	I,99	I,85	I,73	I,63	I,50	I,I8	I,0I
30	2,00	I,92	I,83	I,75	I,68	I,60	I,50	I,2I	I,05
45	I,50	I,55	I,58	I,58	I,57	I,55	I,50	I,30	I,I5
60	I,00	I,I4	I,25	I,33	I,40	I,45	I,50	I,50	I,39
75	0,63	0,79	0,93	I,07	I,20	I,32	I,50	I,98	2,I6
90	0,50	0,65	0,80	0,95	I,I0	I,25	I,50	2,50	3,50
				$\lambda = 1,0$					
0	2,00	I,74	I,54	I,38	I,25	I,I4	I,00	0,67	0,50
I5	I,99	I,77	I,58	I,43	I,30	I,20	I,05	0,7I	0,53
30	2,00	I,85	I,7I	I,59	I,47	I,37	I,23	0,85	0,65
45	I,99	I,98	I,93	I,87	I,79	I,72	I,60	I,20	0,94
60	2,00	2,I3	2,22	2,27	2,30	2,3I	2,28	2,00	I,68
75	2,00	2,25	2,49	2,70	2,90	3,08	3,33	3,9I	3,99
90	2,00	2,30	2,60	2,90	3,20	3,50	4,00	6,00	8,00

Приложение 4

Результаты определения C при $\theta = 0$ для изотропной задачи по формуле:

$$C = \frac{2\gamma H \bar{R}_p}{\bar{K}(2\bar{R}_p + \bar{R}) - \gamma H(1-\lambda)\bar{R}_p}$$

$\bar{R}_p$, т/м²	$\bar{R}_{сц}$, т/м²	H, м							
		1000	200	300	400	500	700	800	1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		$\lambda = 0{,}5$; $1 \leq C \leq 2$							
10	1000	< 1	1,33	>2	>2	>2	>2	>2	>2
20	1250	< 1	< 1	1,71	>2	>2	>2	>2	>2
30	1500	< 1	< 1	1,33	2,00	>2	>2	>2	>2
40	1750	< 1	< 1	1,09	1,60	>2	>2	>2	>2
50	2000	< 1	< 1	< 1	1,33	1,82	>2	>2	>2
100	3250	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,47	1,78	>2
150	4500	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,14	1,54

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				$\lambda = 0{,}7$; $1 \leqslant c \leqslant 1{,}43$					
10	1000	< 1	1,18	1,93	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43
20	1250	< 1	< 1	1,46	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43
30	1500	< 1	< 1	1,18	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43
40	1750	< 1	< 1	< 1	1,38	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43
50	2000	< 1	< 1	< 1	1,18	> 1,43	> 1,43	> 1,43	> 1,43
100	3250	< 1	< 1	< 1	< 1	> 1,43	1,28	> 1,43	> 1,43
150	4500	< 1	< 1	< 1	< 1	> 1,43	< 1	1,02	1,33
				$\lambda = 0{,}8$; $1 \leqslant c \leqslant 1{,}25$					
10	1000	< 1	1,11	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25
20	1250	< 1	< 1	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25
30	1500	< 1	< 1	1,11	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25
40	1750	< 1	< 1	< 1	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25
50	2000	< 1	< 1	< 1	1,11	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1,25
100	3250	< 1	< 1	< 1	< 1	> 1,25	1,21	> 1,25	> 1,25
150	4500	< 1	< 1	< 1	< 1	> 1,25	< 1	< 1	> 1,25

I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
				$\lambda = 0{,}9$; $1 \leqslant C \leqslant 1{,}11$.					
I0	I000	< I	I,05	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II
20	I250	< I	< I	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II
30	I500	< I	< I	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II
40	I750	< I	< I	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II
50	2000	< I	< I	< I	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II
I00	3250	< I	< I	< I	< I	> I,II	> I,II	> I,II	> I,II
I50	4500	< I	< I	< I	< I	< I	< I	< I	> I,II
				$\lambda = 1{,}0$; $C = 1$.					
I0	I000	< I	I,00	> I	> I	> I	> I	> I	> I
20	I250	< I	< I	> I	> I	> I	> I	> I	> I
30	I500	< I	< I	I,00	> I	> I	> I	> I	> I
40	I750	< I	< I	< I	> I	> I	> I	> I	> I
50	2000	< I	< I	< I	I,0	> I	> I	> I	> I
I00	3250	< I	< I	< I	< I	> I	> I	> I	> I
I50	4500	< I	< I	< I	< I	> I	> I	> I	> I

Примечание. Цифровые значения C приведены только для тех случаев, когда неравенство $1 \leqslant C \leqslant \frac{1}{\lambda}$ ужовлетворяется. При $C < 1$ контур выработки устойчив. При $C > \frac{1}{\lambda}$ устойчивого контура свода не существует. Второй класс условий работы крепи переходит в третий.

Приложение 5

Результаты определения C по формуле

$$C = \frac{2\gamma H}{\bar{R}_{сж} - \gamma H(1-\lambda)}$$

H м	$R_{сж}$, т/м²						
	I000	I250	I500	I750	2000	3250	4500
1	2	3	4	5	6	7	8
			$\lambda = 0{,}5$; $1 \leq C \leq 2$				
I00	0,57	0,44	0,36	0,3I	0,27	0,I6	0,II
200	I,33	I,00	0,80	0,67	0,57	0,33	0,24
300	2,40	I,7I	I,33	I,09	0,92	0,52	0,36
400	4,00	2,67	2,00	I,60	I,33	0,73	0,50
500	6,67	4,00	2,86	2,22	I,82	0,45	0,65
600	I2,00	6,00	4,00	3,00	2,40	I,20	0,80
700	28,00	9,33	5,00	4,00	3,II	I,47	0,97
800		I6,00	8,00	5,33	4,00	I,78	-I,I4
900	-36,00	36,00	I2,00	7,20	5,I4	2,I2	I,33
I000	-20,00		20,00	I0,00	6,67	2,50	I,54
			$\lambda = 0{,}7$; $1 \leq C \leq 1{,}43$				
I00	0,54	0,43	0,35	0,30	0,26	0,I6	0,II
200	I,I8	0,9I	0,74	0,63	0,54	0,32	0,23
300	I,94	I,46	I,I8	0,98	0,85	0,50	0,35
400	2,86	2,I0	I,67	I,38	I,I8	0,68	0,48
500	4,00	2,86	2,22	I,82	I,54	0,87	0,6I
600	5,45	3,75	2,86	2,3I	I,93	I,07	0,74
700	7,37	4,83	3,59	2,85	2,37	I,28	0,88
800	I0,00	6,I5	4,44	3,48	2,86	I,5I	I,02
900	I3,85	7,83	5,45	4,I9	3,40	I,75	I,I8
I000	20,00	I0,00	6,67	5,00	4,00	2,00	I,33

1	2	3	4	5	6	7	8
			$\lambda = 0,8$; $1 \leq C \leq 1,25$				
100	0,53	0,42	0,34	0,29	0,26	0,16	0,11
200	1,11	0,87	0,71	0,61	0,53	0,32	0,23
300	1,76	1,36	1,11	0,94	0,81	0,48	0,34
400	2,50	1,90	1,54	1,29	1,11	0,65	0,47
500	3,33	2,50	2,00	1,67	1,43	0,83	0,59
600	4,29	3,16	2,50	2,07	1,76	1,02	0,71
700	5,38	3,89	3,04	2,50	2,12	1,21	0,84
800	6,67	4,71	3,64	2,96	2,50	1,40	0,98
900	8,18	5,63	4,29	3,46	2,90	1,61	1,11
1000	10,00	6,67	5,00	4,00	3,33	1,82	1,25
			$\lambda = 0,9$; $1 \leq C \leq 1,11$				
100	0,51	0,41	0,34	0,29	0,25	0,15	0,11
200	1,05	0,83	0,69	0,59	0,51	0,31	0,22
300	1,62	1,28	1,05	0,90	0,78	0,47	0,34
400	2,22	1,74	1,43	1,21	1,05	0,63	0,45
500	2,86	2,22	1,82	1,54	1,33	0,80	0,57
600	3,53	2,73	2,22	1,88	1,62	0,97	0,69
700	4,24	3,26	2,64	2,22	1,92	1,14	0,89
800	5,00	3,81	3,08	2,58	2,22	1,31	0,93
900	5,81	4,39	3,53	2,95	2,54	1,49	1,05
1000	6,67	5,00	4,00	3,33	2,86	1,67	1,18
			$\lambda = 1,0$; $C = 1$.				
100	0,50	0,40	0,33	0,29	0,25	0,15	0,11
200	1,00	0,80	0,67	0,57	0,50	0,31	0,22
300	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,46	0,33
400	2,00	1,60	1,33	1,14	1,00	0,61	0,44
500	2,50	2,00	1,67	1,43	1,25	0,77	0,55
600	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	0,92	0,66
700	3,50	2,80	2,33	2,00	1,75	1,08	0,77
800	4,00	3,20	2,67	2,28	2,00	1,23	6,88
900	4,50	3,60	3,00	2,57	2,25	1,38	0,00
1000	5,00	4,00	3,33	2,86	2,50	1,54	1,11

Приложение 6

Результаты определения C по формуле $C = \frac{2\gamma H}{\frac{\beta}{\ln\frac{t+1}{B}} - \gamma H(1-\lambda)}$ при $\lambda = 0{,}5$

H, м / $R_{сж}$, т/м² / t, сут.	100				200				300				400			
	1000	1800	5600	7750	1000	1800	5600	7750	1000	1800	5600	7750	1000	1800	5600	7750
0	0,57	0,30	0,09	0,07	1,33	0,64	0,19	0,13	2,40	1,05	0,29	0,21	4,00	1,54	0,39	0,28
100	1,04	0,35	0,11	0,09	2,83	0,77	0,29	0,19	6,58	1,27	0,35	0,29	19,40	1,90	0,48	0,39
200	1,09	0,35	0,11	0,09	3,01	0,78	0,23	0,19	7,23	1,29	0,36	0,29	24,22	1,93	0,49	0,40
300	1,12	0,36	0,11	0,09	3,11	0,78	0,23	0,19	7,65	1,31	0,36	0,30	28,09	1,95	0,50	0,41
600	1,17	0,36	0,11	0,10	3,30	0,80	0,24	0,20	8,48	1,33	0,37	0,30	37,91	1,99	0,51	0,42
1200	1,22	0,37	0,12	0,10	3,50	0,81	0,24	0,20	9,35	1,35	0,37	0,31	56,40	2,02	0,51	0,43
2400	1,27	0,37	0,12	0,10	3,71	0,82	0,24	0,21	10,40	1,37	0,38	0,32	104,11	2,06	0,52	0,44

$H, м$ / $\bar{R}_{см}, \frac{т}{м^2}$ / t, сут	500				700				I000			
	I000	I800	5600	7550	I000	I800	5600	7550	I000	I800	5600	7550
0	6,66	2,I3	0,50	0,36	28,00	3,78	0,74	0,52	-20,00	9,09	I,I5	0,79
I00	-II4,00	2,69	0,62	0,50	-I3,00	5,I6	0,93	0,74	-7,70	I6,47	I,48	I,I5
200	-58,00	2,75	0,63	0,52	-I2,00	5,30	0,95	0,76	-7,50	I7,50	I,5I	I,I8
300	-46,00	2,78	0,64	0,52	-II,00	5,39	0,96	0,77	-7,40	I8,20	I,53	I,20
600	-35,00	2,84	0,65	0,54	-II,00	5,54	0,98	0,79	-7,20	I9,50	I,56	I,24
I200	-28,00	2,89	0,66	0,55	-I0,00	5,70	0,99	0,8I	-7,00	20,90	I,59	I,30
2400	-24,00	2,95	0,67	0,56	-9,80	5,86	I,0I	0,83	-6,80	22,50	I,62	I,3I

Примечание: $\bar{R}_{см}$= I000 т/м^2; β = II860 т/м^2; $B = 6{,}92 \cdot I0^{-6}$ час;

$\bar{R}_{см}$= I800 т/м^2; β = 89000 т/м^2; $B = 3{,}I6 \cdot I0^{-22}$ час;

$\bar{R}_{см}$= 5600 т/м^2; β = 209000 т/м^2; $B = 6{,}3 \cdot I0^{-I7}$ час;

$\bar{R}_{см}$= 7550 т/м^2; β = I68000 т/м^2; $B = 2{,}24 \cdot I0^{-I0}$ час

Результаты определения σ_θ для анизотропной задачи при $\nu_1 = 0{,}23$; $\nu_2 = 0{,}33$; $E_1 = 0{,}52 \cdot 10^5$ кг/см^2; $E_2 = 0{,}40 \cdot 10^5$ кг/см^2

θ	ψ	C											
		I,00	I,I5	I,30	I,45	I,60	I,75	2,00	2,40	2,80	3,00	3,50	4,00
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II	I2	I3	I4
						$\lambda = 0{,}5$							
	0	2,43	2,I9	I,20	I,85	I,73	I,63	I,49	I,34	I,22	I,I8	I,09	I,02
	I5	2,45	2,20	2,0I	I,86	I,74	I,63	I,50	I,34	I,23	I,I8	I,09	I,02
	30	2,48	2,25	2,03	I,87	I,75	I,64	I,50	I,34	I,23	I,I8	I,09	I,02
0	45	2,5I	2,25	2,05	I,89	I,76	I,65	I,5I	I,34	I,22	I,I7	I,08	I,00
	60	2,54	2,27	2,06	I,90	I,76	I,65	I,5I	I,33	I,2I	I,I6	I,06	0,99
	75	2,54	2,27	2,06	I,89	I,76	I,65	I,50	I,32	I,20	I,I5	I,05	0,97
	90	2,54	2,27	2,06	I,89	I,75	I,64	I,49	I,32	I,I9	I,I4	I,04	0,97
	0	2,32	2,II	I,95	I,82	I,7I	I,6I	I,49	I,34	I,23	I,I9	I,I0	I,03
	I5	2,30	2,I0	I,95	I,82	I,7I	I,62	I,49	I,34	I,23	I,I9	I,I0	I,03
	30	2,30	2,II	I,95	I,82	I,72	I,62	I,50	2,35	I,24	I,I9	I,I0	I,04
I5	45	2,3I	2,I2	I,97	I,84	I,73	I,63	I,50	I,35	I,24	I,I9	I,I0	I,03
	60	2,34	2,I5	I,98	I,85	I,74	I,64	I,5I	I,35	I,23	I,I8	I,09	I,0I
	75	2,36	2,I6	I,99	I,85	I,73	I,63	I,50	I,33	I,2I	I,I7	I,07	0,99
	90	2,37	2,I6	I,99	I,84	I,72	I,62	I,48	I,32	I,20	I,I5	I,05	0,98

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	0	2,01	1,91	1,82	1,74	1,66	1,59	1,49	1,35	1,25	1,21	1,13	1,06
	15	1,98	1,89	1,81	1,73	1,65	1,59	1,49	1,36	1,26	1,22	1,14	1,07
	30	1,96	1,88	1,80	1,72	1,65	1,59	1,49	1,37	1,27	1,23	1,15	1,08
30	45	1,94	1,87	1,80	1,72	1,66	1,59	1,50	1,38	1,28	1,24	1,15	1,08
	60	1,94	1,87	1,81	1,74	1,67	1,60	1,51	1,38	1,27	1,23	1,14	1,07
	75	1,95	1,88	1,81	1,74	1,67	1,60	1,50	1,37	1,26	1,21	1,12	1,05
	90	1,95	1,88	1,80	1,73	1,65	1,58	1,48	1,34	1,24	1,19	1,10	1,02
	0	1,54	1,58	1,59	1,59	1,56	1,54	1,48	1,40	1,32	1,28	1,20	1,14
	15	1,54	1,58	1,59	1,58	1,56	1,54	1,49	1,41	1,33	1,30	1,22	1,16
	30	1,52	1,56	1,57	1,57	1,56	1,53	1,49	1,42	1,34	1,31	1,24	1,17
45	45	1,49	1,53	1,55	1,56	1,55	1,53	1,49	1,42	1,36	1,32	1,25	1,19
	60	1,47	1,52	1,55	1,57	1,55	1,54	1,50	1,43	1,36	1,33	1,25	1,18
	75	1,44	1,50	1,54	1,55	1,55	1,53	1,50	1,43	1,35	1,33	1,25	1,18
	90	1,43	1,49	1,53	1,54	1,54	1,52	1,48	1,40	1,32	1,29	1,20	1,13
	0	1,02	1,15	1,26	1,34	1,40	1,45	1,48	1,50	1,47	1,45	1,40	1,34
	15	1,05	1,18	1,28	1,36	1,41	1,45	1,49	1,51	1,49	1,47	1,42	1,37
	30	1,06	1,18	1,28	1,36	1,41	1,45	1,49	1,51	1,59	1,49	1,44	1,40
60	45	1,05	1,17	1,26	1,34	1,40	1,44	1,50	1,52	1,51	1,50	1,47	1,42
	60	1,02	1,14	1,24	1,32	1,39	1,44	1,49	1,53	1,53	1,52	1,49	1,44
	75	0,99	1,12	1,22	1,31	1,38	1,43	1,49	1,53	1,53	1,52	1,49	1,44
	90	0,96	1,09	1,20	1,29	1,37	1,42	1,48	1,52	1,52	1,50	1,46	1,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	0	0,59	0,75	0,90	I,05	I,I8	I,30	I,48	I,70	I,86	I,92	2,02	2,06
	I5	0,64	0,79	0,94	I,08	I,2I	I,33	I,50	I,72	I,87	I,93	2,02	2,06
	30	0,67	0,82	0,97	I,I0	I,23	I,34	I,50	I,72	I,87	I,92	2,03	2,08
75	45	0,69	0,84	0,98	I,II	I,23	I,33	I,50	I,7I	I,86	I,92	2,04	2,I0
	60	0,69	0,83	0,96	I,09	I,2I	I,32	I,49	I,70	I,87	I,94	2,06	2,I4
	75	0,67	0,8I	0,95	I,08	I,20	I,3I	I,48	I,7I	I,89	I,96	2,I0	2,I8
	90	0,65	0,79	0,93	I,06	I,I8	I,30	I,48	I,72	I,90	I,98	2,I2	2,20
	0	0,43	0,59	0,75	0,90	I,06	I,22	I,48	I,9I	2,33	2,54	3,06	3,59
	I5	0,45	0,60	0,76	0,92	I,07	I,23	I,49	I,9I	2,33	2,54	3,06	3,58
	30	0,48	0,63	0,79	0,94	I,09	I,25	I,5I	I,92	2,33	2,54	3,05	3,57
90	45	0,5I	0,66	0,8I	0,96	I,II	I,26	I,5I	I,92	2,32	2,5I	3,02	3,52
	60	0,53	0,68	0,82	0,97	I,I2	I,26	I,5I	I,89	2,28	2,48	2,97	3,45
	75	0,54	0,68	0,82	0,97	I,II	I,26	I,49	I,87	2,25	2,44	2,92	3,39
	90	0,54	0,69	0,88	0,97	I,II	I,25	I,49	I,86	2,24	2,43	2,90	3,37
						$\lambda = 1,0$							
	0	I,99	I,74	I,55	I,40	I,28	I,I8	I,04	0,89	0,78	0,73	0,64	0,58
	I5	2,00	I,75	I,56	I,4I	I,28	I,I8	I,05	0,89	0,77	0,73	0,64	0,57
	30	2,0I	I,75	I,56	I,40	I,28	I,I7	I,03	0,87	0,76	0,7I	0,6I	0,55
0	45	2,0I	I,75	I,55	I,39	I,26	I,I5	I,0I	0,84	0,72	0,68	0,58	0,50
	60	2,0I	I,74	I,53	I,37	I,24	I,I3	0,98	0,8I	0,68	0,63	0,54	0,46
	75	I,99	I,72	I,5I	I,35	I,2I	I,I0	0,95	0,77	0,65	0,59	0,49	0,42
	90	I,98	I,7I	I,50	I,33	I,I9	I,08	0,93	0,76	0,63	0,58	0,48	0,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	0	1,99	1,77	1,59	1,44	1,33	1,23	1,09	0,93	0,81	0,77	0,68	0,60
	15	1,99	1,77	1,59	1,45	1,34	1,24	1,10	0,94	0,83	0,78	0,69	0,61
	30	1,99	1,78	1,60	1,46	1,34	1,24	1,17	0,94	0,82	0,78	0,68	0,61
15	45	2,01	1,79	1,61	1,46	1,34	1,24	1,10	0,93	0,81	0,76	0,67	0,58
	60	2,01	1,79	1,60	1,45	1,33	1,22	1,07	0,90	0,77	0,72	0,61	0,54
	75	2,01	1,78	1,59	1,43	1,30	1,19	1,04	0,86	0,72	0,67	0,57	0,49
	90	2,00	1,75	1,56	1,40	1,27	1,15	0,99	0,82	0,69	0,63	0,52	0,45
	0	2,00	1,84	1,71	1,58	1,47	1,37	1,24	1,07	0,94	0,89	0,78	0,70
	15	1,99	1,85	1,71	1,59	1,49	1,31	1,26	1,10	0,97	0,92	0,81	0,73
	30	1,99	1,85	1,72	1,61	1,51	1,41	1,28	1,12	0,99	0,94	0,83	0,75
30	45	1,99	1,86	1,74	1,62	1,52	1,43	1,30	1,12	0,99	0,94	0,83	0,74
	60	1,99	1,86	1,74	1,62	1,53	1,43	1,30	1,11	0,97	0,92	0,79	0,70
	75	2,00	1,88	1,75	1,63	1,51	1.41	1,26	1,07	0,93	0,87	0,75	0,65
	90	2,02	1,87	1,73	1,60	1,48	1,37	1,22	1,03	0,88	0,82	0,69	0,59
	0	2,01	1,97	1,91	1,84	1,76	1,69	1,56	1,39	1,24	1,18	1,05	0,94
	15	2,01	1,97	1,92	1,85	1,78	1,70	1,59	1,42	1,28	1,22	1,09	0,99
	30	1,99	1,97	1,92	1,86	1,79	1,73	1,62	1,46	1,33	1,27	1,14	1,04
45	45	1,99	1,97	1,93	1,88	1,82	1,76	1,65	1,50	1,36	1,30	1,17	1,06
	60	1,99	1,99	1,96	1,90	1,84	1,79	1,68	1,52	1,37	1,31	1,17	1,05
	75	2,01	2,01	1,97	1,93	1,87	1,80	1,68	1,51	1,35	1,28	1,13	1,01
	90	2,02	2,01	1,98	1,93	1,86	1,78	1,66	1,47	1,30	1,23	1,06	0,94

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	0	2,00	2,12	2,20	2,24	2,26	2,25	2,21	2,09	1,96	1,89	1,73	1,59
	15	2,01	2,13	2,20	2,24	2,25	2,25	2,21	2,11	1,99	1,93	1,78	1,65
	30	2,00	2,12	2,19	2,23	2,25	2,26	2,24	2,15	2,04	1,99	1,85	1,72
60	45	1,99	2,11	2,19	2,24	2,27	2,28	2,27	2,20	2,20	2,05	1,92	1,79
	60	1,99	2,11	2,20	2,26	2,30	2,32	2,32	2,26	2,16	2,11	1,97	1,84
	75	1,99	2,13	2,23	2,30	2,34	2,37	2,37	2,31	2,21	2,15	1,99	1,85
	90	2,01	2,16	2,26	2,33	2,38	2,40	2,40	2,32	2,20	2,13	1,97	1,80
	0	1,99	2,24	2,49	2,70	2,90	3,07	3,31	3,59	3,75	3,80	3,83	3,79
	15	2,01	2,26	2,49	2,70	2,88	3,05	3,28	3,55	3,70	3,75	3,79	3,76
	30	2,01	2,26	2,48	2,68	2,86	3,02	3,25	3,51	3,67	3,73	3,79	3,79
75	45	2,01	2,24	2,46	2,65	2,83	2,99	3,22	3,50	3,69	3,75	3,85	3,87
	60	1,99	2,23	2,44	2,64	2,82	2,99	3,23	3,54	3,73	3,82	3,95	3,99
	75	1,98	2,23	2,45	2,65	2,89	3,02	3,28	3,71	3,85	3,93	4,08	4,13
	90	2,00	2,24	2,47	2,69	2,89	3,08	3,36	3,71	3,96	4,05	4,20	4,24
	0	1,98	2,30	2,62	2,93	3,25	3,56	4,09	4,33	5,78	6,19	7,25	8,30
	15	1,99	2,31	2,62	2,93	3,25	3,56	4,09	4,93	5,76	6,18	7,23	8,28
	30	2,01	2,32	2,63	2,94	3,25	3,55	4,07	4,90	5,72	6,13	7,16	8,19
90	45	2,01	2,32	2,62	2,91	3,22	3,52	4,02	4,83	5,63	6,03	7,03	8,03
	60	2,01	2,30	2,59	2,88	3,17	3,47	3,95	4,73	5,50	5,90	6,87	7,84
	75	1,99	2,28	2,56	2,85	3,13	3,42	3,89	4,65	5,40	5,79	6,73	7,68
	90	1,99	2,27	2,55	2,83	3,11	3,39	3,86	4,62	5,37	5,74	6,68	7,62

Результаты определения C

θ, град	H, м	100					200				
	$R^{\lambda}_{сж.}$, Т/м²	1000	1500	2000	3000	4000	1000	1500	2000	3000	4000
	$R''_{р}$, Т/м²	56	83	112	166	224	56	83	112	166	224
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	$\lambda = 0{,}5$;											
0		0,58	0,36	0,27	0,18	0,13	1,34	0,80	0,58	0,36	0,27
15		–	–	–	–	–	1,27	0,72	–	–	–
30		–	–	–	–	–	1,01	–	–	–	–
45		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
60		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
75		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
90		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	$\lambda = 0{,}7$;											
0		0,54	0,36	0,26	0,17	0,13	1,18	0,75	0,54	0,36	0,26
15		–	–	–	–	–	0,15	0,68	–	–	–
30		–	–	–	–	–	1,01	–	–	–	–
45		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
60		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
75		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
90		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Приложение 8

при $\psi = \gamma$

300						400				
1000	1500	2000	3000	4000		1000	1500	2000	3000	4000
56	83	112	166	224		56	83	112	166	224
12	13	14	15	16		17	18	19	20	21
$1 \leq C \leq 2$										
2,42	1,34	0,93	0,58	0,42		–	–	1,34	0,80	0,58
2,28	1,27	0,85	–	–		–	1,91	1,27	0,72	–
1,89	1,01	–	–	–		2,75	1,61	1,01	–	–
1,29	–	–	–	–		1,83	1,01	1,28	–	–
–	–	–	–	–		1,01	–	–	–	–
–	–	–	–	–		–	–	–	–	–
–	–	–	–	–		–	–	–	–	–
$1 \leq C \leq 1{,}43$										
1,95	1,18	0,85	0,54	0,40		2,88	1,68	1,18	0,75	0,54
1,89	1,15	0,79	–	–		2,73	1,64	1,14	0,68	–
1,72	1,01	–	–	–		2,36	1,50	1,01	–	–
1,47	–	–	–	–		1,92	1,26	–	–	–
1,1	–	–	–	–		1,52	–	–	–	–
–	–	–	–	–		1,24	–	–	–	–
–	–	–	–	–		1,14	–	–	–	–

I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	20	2I
					$\lambda = 0{,}8$;									$1 \leqslant C \leqslant 1{,}25$						
0	0,53	0,35	0,25	0,I7	0,I3	I,II	0,7I	0,53	0,85	0,25	I,78	I,II	0,82	0,53	0,39	2,5I	I,54	I,II	0,7I	0,53
I5	–	–	–	–	–	I,09	0,65	–	–	–	I,75	I,09	0,77	–	–	2,43	I,62	I,22	0,85	0,65
30	–	–	–	–	–	I,00	–	–	–	–	I,66	I,00	–	–	–	2,2I	I,65	I,29	0,87	–
45	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,53	–	–	–	–	I,95	I,64	I,3I	–	–
60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,36	–	–	–	–	I,70	I,59	I,30	–	–
75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,2I	–	–	–	–	I,53	I,52	I,2I	–	–
90	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,I3	–	–	–	–	I,47	I,4I	–	–	–
					$\lambda = 0{,}9$;									$1 \leqslant C \leqslant 1{,}11$						
0	0,5I	0,34	0,25	0,I7	0,I3	I,06	0,70	0,5I	0,34	0,25	I,63	I,06	0,79	0,5I	0,39	2,23	I,43	I,06	0,69	0,5I
I5	–	–	–	–	–	I,04	0,64	–	–	–	I,62	I,04	0,75	–	–	2,20	I,43	I,04	0,64	–
30	–	–	–	–	–	I,00	–	–	–	–	I,6I	I,00	–	–	–	2,II	I,43	I,00	–	–
45	–	–	–	–	–	0,89	–	–	–	–	I,58	0,89	–	–	–	I,98	I,4I	0,89	–	–
60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,56	–	–	–	–	I,86	I,4I	–	–	–
75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,53	–	–	–	–	I,78	I,37	–	–	–
90	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	I,5I	–	–	–	–	I,74	I,36	–	–	–
					$\lambda = 1{,}0$;									$C = 1$						
0	0,50	0,33	0,25	0,I7	0,I2	I,00	0,67	0,50	0,33	0,25	I,50	I,00	0,75	0,50	0,38	2,00	I,34	I,00	0,67	0,50
I5	–	–	–	–	–	I,00	0,63	–	–	–	I,52	I,00	0,72	–	–	2,0I	I,36	I,00	0,63	–
30	–	–	–	–	–	I,00	–	–	–	–	I,57	I,00	0,57	–	–	2,00	I,39	I,00	–	–
45	–	–	–	–	–	I,0I	–	–	–	–	I,64	I,0I	–	–	–	2,00	I,47	I,0I	–	–
60	–	–	–	–	–	I,02	–	–	–	–	I,7I	I,0I	–	–	–	2,00	I,58	I,0I	–	–
75	–	–	–	–	–	I,70	–	–	–	–	I,79	I,02	–	–	–	2,00	I,67	I,03	–	–
90	–	–	–	–	–	I,76	–	–	–	–	I,82	I,00	–	–	–	2,00	I,7I	I,00	–	–

Приложение 9

Результаты определения C при $\psi = 90 - \gamma$

θ, град	H, м	100					200					300					400				
	$R_{сш}$ т/м²	1000	1500	2000	3000	4000	1000	1500	2000	3000	4000	1000	1500	2000	3000	4000	1000	1500	2000	3000	4000
	$R''_{р}$ т/м²	56	83	112	166	224	56	83	112	166	224	56	83	112	166	224	56	83	112	166	224
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	$\lambda = 0{,}5$; $1 \le C \le 2$																					
0		0,53	0,36	0,27	0,18	0,13	1,33	0,80	0,58	0,36	0,27	2,40	1,33	0,93	0,58	0,41	–	2,00	1,33	0,80	0,58
15		–	–	–	–	–	1,26	0,71	–	–	–	2,26	1,26	0,85	–	–	–	1,90	1,26	0,71	–
30		–	–	–	–	–	1,00	–	–	–	–	1,88	1,00	–	–	–	2,73	1,60	1,00	–	–
45		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,29	–	–	–	–	1,82	1,01	–	–	–
60		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,01	1,01	–	–	–
75		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
90		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	$\lambda = 0{,}7$; $1 \le C \le 1{,}43$																				
0		0,54	0,35	0,26	0,17	0,13	1,18	0,74	0,54	0,35	0,26	1,93	1,18	0,85	0,54	0,39	2,86	1,67	1,13	0,74	0,54
15		–	–	–	–	–	1,15	0,67	–	–	–	1,88	1,14	0,79	–	–	2,71	1,62	1,14	0,67	–
30		–	–	–	–	–	1,00	–	–	–	–	1,71	1,00	–	–	–	2,35	1,50	1,00	–	–
45		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,47	–	–	–	–	1,91	1,26	–	–	–
60		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,12	–	–	–	–	1,52	–	–	–	–
75		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,25	–	–	–	–
90		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,14	–	–	–	–

I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	20	2I
						$\lambda = 0{,}8$;									$1 \leqslant C \leqslant 1{,}25$					
0	0,53	0,35	0,25	0,I7	0,I3	I,II	0,7I	0,58	0,34	0,25	I,76	I,II	0,8I	0,53	0,39	2,50	I,54	I,II	0,7I	0,53
I5	-	-	-	-	-	I,09	0,65	-	-	-	I,74	I,09	0,77	-	-	2,42	I,52	I,09	0,65	-
30	-	-	-	-	-	I,04	-	-	-	-	I,66	I,00	-	-	-	2,2I	I,46	I,00	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,53	-	-	-	-	I,94	I,34	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,36	-	-	-	-	I,70	I,I7	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,2I	-	-	-	-	I,53	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,I4	-	-	-	-	I,46	-	-	-	-
						$\lambda = 0{,}9$;									$1 \leqslant C \leqslant 1{,}11$					
0	0,5I	0,34	0,25	0,I7	0,I2	I,05	0,69	0,5I	0,34	0,25	I,62	I,05	0,78	0,5I	0,38	2,22	I,43	I,05	0,69	0,5I
I5	-	-	-	-	-	I,04	0,64	-	-	-	I,62	I,04	0,75	-	-	2,I9	I,43	I,04	0,64	-
30	-	-	-	-	-	I,00	-	-	-	-	I,6I	I,00	-	-	-	2,I0	I,42	I,0I	-	-
45	-	-	-	-	-	0,89	-	-	-	-	I,58	0,89	-	-	-	I,97	I,4I	0,89	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,55	-	-	-	-	I,86	I,89	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,53	-	-	-	-	I,78	I,38	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I,52	-	-	-	-	I,75	I,36	-	-	-
						$\lambda = 1{,}00$;									$C = 1$					
0	0,50	0,33	0,25	0,I7	0,I2	I,00	0,67	0,50	0,33	0,25	I,50	I,00	0,75	0,50	0,37	2,00	I,33	I,00	0,66	0,50
I5	-	-	-	-	-	I,00	0,63	-	-	-	I,5I	I,00	0,72	-	-	2,00	I,35	I,00	0,63	-
30	-	-	-	-	-	I,00	-	-	-	-	I,56	I,00	0,57	-	-	2,00	I,40	I,00	-	-
45	-	-	-	-	-	I,0I	-	-	-	-	I,63	I,0I	-	-	-	2,00	I,46	I,0I	-	-
60	-	-	-	-	-	I,02	-	-	-	-	I,7I	I,02	-	-	-	2,00	I,57	I,0I	-	-
75	-	-	-	-	-	I,06	-	-	-	-	I,79	I,06	-	-	-	2,00	I,67	I,06	-	-
90	-	-	-	-	-	I,I0	-	-	-	-	I,82	I,I0	-	-	-	2,00	I,7I	I,I0	-	-

Определение $H'_{пр.}$ и $H_{пр.}$ для изотропной среды с учетом длительной прочности при γ = 2,5 т/м^3; t = 2400 суток

λ	0,5		0,8		I,0	
$\bar{R}$ сж, т/м^2	I000	2000	I000	2000	I000	2000
β, т/м^2	II860	89000	II860	89000	II860	89000
B, час	$6,92 \cdot I0^{-6}$	$3,I6 \cdot I0^{-22}$	$6,92 \cdot I0^{-6}$	$3,I6 \cdot I0^{-22}$	$6,92 \cdot I0^{-6}$	$3,I6 \cdot I0^{-22}$
$H'_{пр.}$, м	I38,5	392,5	II5,4	327,I	I03,8	294,4
$H_{пр.}$, м	266,0	533,0	222,0	444,0	200,0	400,0

Приложение II

Определение $H_{пр.}$ для анизотропной среды при $C = \frac{1}{\lambda}$ и $H'_{пр.}$ при $C = I$

$R^{\perp}_{сопр.}$, $\frac{Т}{М^2}$	$\psi = \gamma$				$\psi = 90° - \gamma$			
	I000		2000		I000		2000	
$R^{\parallel}_{сопр.}$, $\frac{Т}{М^2}$	7I3		I428		7I3		I428	
θ, град.	$H_{пр.}$	$H'_{пр.}$	$H_{пр.}$	$H'_{пр.}$	$H_{пр.}$	$H'_{пр.}$	$H_{пр.}$	$H_{пр.}$
I	2	3	4	5	6	7	8	9
			$\lambda = 0,5$					
0	I90	II4	38I	228	267	I60	533	320
I0	I9I	-	382	-	264	-	528	-
I5	-	II3	-	227	-	I46	-	292
20	I98	-	396	-	270	-	540	-
30	2I6	I33	433	266	290	I52	580	305
40	258	-	5I6	-	338	-	677	-
45	-	I85	-	37I	-	I85	-	37I
50	375	-	75I	-	476	-	953	-
60	I238	304	248I	609	I445	266	2993	533
70	-58I	-	-II65	-	-640	-	-I28I	-
75	-	544	-	I089	-	423	-	848
80	-25I	-	-503	-	-230	-	-46I	-
90	-266	799	-53I	I598	-I90	570	-380	II42

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			λ = 0,8					
0	I58	I30	3I7	260	222	I82	444	364
I0	I54	-	309	-	209	-	4I8	-
I5	-	I25	-	25I	-	I6I	-	322
20	I54	-	308	-	200	-	400	-
30	I56	I33	3I3	267	I93	I52	387	305
40	I63	-	327	-	I90	-	380	-
45	-	I54	-	309	-	I54	-	309
50	I76	-	353	-	I89	-	379	-
60	I97	I90	395	38I	I92	I66	385	333
70	229	-	458	-	I99	-	399	-
75	-	237	-	475	-	I85	-	370
80	272	-	544	-	2I2	-	425	-
90	323	285	645	57I	230	204	46I	408

I	2	3	4	5	6	7	8	9
			$\lambda = I$					
0	I43	I43	286	286	200	200	400	400
I0	I36	-	273	273	I8I	I8I	362	362
I5	-	I34	-	-	-	-	-	-
20	I33	-	267	267	I65	I65	330	330
30	I33	I33	267	267	I52	I52	305	305
40	I36	-	273	273	I43	I43	286	286
45	-	I39	-	-	-	-	-	-
50	I43	-	286	286	I36	I36	273	273
60	I52	I52	305	305	I33	I33	267	267
70	I65	-	330	330	I33	I33	267	267
75	-	I72	-	-	-	-	-	-
80	I8I	-	362	362	I36	I36	273	273
90	200	200	400	400	I43	I43	285	285

Определение нагрузок на крепь p и p' с учётом

$H_м$	u, м					
	0,025		0,05		0,I0	
	p	p'	p	p'	p	p'
	$\bar{R}_{сж}$ = I000 т/м^2; ρ = 20°;					
I00	-98	-42	-89	-4I	-82	-40
200	-32	2I	-37	9	-40	-I
300	43	93	22	66	6	44
400	I25	I73	87	I29	57	94
500	2I2	259	I56	I97	III	I48
700	403	448	307	346	230	265
I000	723	767	559	597	429	463
	$\bar{R}_{сж}$ = I500 т/м^2; ρ = 23°;					
I00	-I5I	-I0I	-I32	-90	-II8	-82
200	-I0I	-53	-94	-53	-88	-53
300	-43	3	-50	-I0	-55	-2I
400	20	67	-I	37	-I8	I5
500	89	I34	5I	89	22	55
700	24I	284	I67	204	III	I43
I000	499	54I	364	400	26I	292
	$\bar{R}_{сж}$ = 2000 т/м^2; ρ = 25°;					
I00	-I97	-I08	-I69	-95	-I48	-85
200	-I55	-68	-I37	-66	-I24	-63
300	-I07	-22	-I02	-3I	-98	-38
400	-53	30	-62	8	-68	-9
500	5	87	-I8	50	-35	23
700	I34	2I4	79	I46	37	94
I000	357	435	244	3I0	I6I	2I7

Приложение I2

по методу М.Т. Алимжанова - Л.В. Ершова прочностной анизотропии

u, м								
0,I5		0,20		0,25		0,30	
p	p'	p	p'	p	p'	p	p'
C_1 = 0,3I·I0^6 т/м^2; $\bar{K}$ = 20 т/м^2							
-78	-40	-76	-39	-75	-39	-74	-39
-42	-5	-44	-8	-44	-I0	-45	-I2
-2	34	-7	27	-I0	22	-I3	I9
42	77	33	66	27	69	22	53
90	I24	76	I09	67	98	59	90
I93	226	I70	202	I53	I84	I4I	I7I
367	399	327	358	299	329	278	307
C_1 = 0,42·I0^6 т/м^2; $\bar{K}$ = 30 т/м^2							
-III	-78	-I07	-75	-I04	-74	-I0I	-72
-86	-54	-84	-54	-83	-54	-82	-54
-57	-26	-58	-29	-59	-3I	-60	-33
-25	5	-30	-I	-34	-6	-36	-9
9	39	-	29	-6	22	-I0	I7
84	II4	68	96	56	83	47	74
2I2	24I	I82	2I0	I6I	I88	I45	I7I
C_1 = 0,5·I0^6 т/м^2; $\bar{K}$ = 40 т/м^2							
-I38	-8I	-I32	-78	-I28	-76	-I25	-75
-II8	-62	-II5	-62	-II2	-6I	-II0	-6I
-96	-4I	-94	-43	-94	-44	-93	-45
-7I	-I6	-72	-2I	-73	-24	-74	-27
-43	I0	-48	3	-5I	-3	-54	- 7
I8	70	6	56	-3	46	-9	38
I22	I74	98	I47	8I	I29	69	II5

Приложение I3

Определение нагрузки на крепь
по формуле $P = R_0(c-1)\gamma$;
при R_0 = 2,5 м; γ = 2,5 т/м^2

H, м \ $\bar{R}_{см.}$, т/м^2	I000	I250	I500	I750	2000	3250	4500
				λ = 0,5			
I00	-2,69	-3,50	-4,00	-4,3I	-4,56	-5,25	-5,56
200	-2,06	0	-I,25	-2,06	-2,69	-4,I9	-4,75
300	8,75	4,44	2,06	0,56	-0,50	-3,00	-4,00
400	-	-	6,25	3,75	2,06	-I,69	-3,I2
500	-	-	-	7,62	5,32	-0,3I	-2,I9
600	-	-	-	-	8,75	I,25	-I,25
700	-	-	-	-	-	2,94	-0,20
800	-	-	-	-	-	4,88	0,7I
900	-	-	-	-	-	-	2,06
I000	-	-	-	-	-	-	3,37
				λ = 0,8			
I00	-2,94	-3,62	-4,I2	-4,44	-4,62	-5,25	-5,56
200	0,70	-0,8I	-I,8I	-2,44	-2,94	-4,25	-4,8I
300	4,75	2,25	0,70	-0,40	-I,I9	-3,25	-4,I2
400	-	-	3,38	I,8I	0,70	-2,I9	-3,3I
500	-	-	-	-	2,69	-I,06	-2,56
600	-	-	-	-	-	0,I	-I,8I
700	-	-	-	-	-	I,3I	-I,00
800	-	-	-	-	-	2,50	-0,I0
900	-	-	-	-	-	-	0,70
I000	-	-	-	-	-	-	I,56

Приложение I4

№№ моделей	Выработки, крепь	Средняя нагрузка на верхняк, г/см2	Податливость, мм: в модели	Податливость, мм: в натуре	Пересчёт данных моделирования в натуре, т/м2	Примечание
I	Однопутевая трапециевидная неподатливая	I50	-	-	37,5	
2	Двухпутевая трапециевидная неподатливая	I34	-	-	33,5	
3	Однопутевая кольцевая бесшарнирная	I28	-	-	32,0	
4	Однопутевая кольцевая двухшарнирная	II3	-	-	28,2	
5	Однопутевая кольцевая четырёхшарнирная	I03	-	-	25,7	
6.	Однопутевая трапециевидная	22	2	50	5,5	По данным ИТД им. А.А. Скочинского в результате замеров на шахтах Подмосковного бассейна и по данным ЦНИИподземмаша на глубине 25 - 60 м.
7.	Двухпутевая трапециевидная	2I	2	50	5,25	
		I3,5	6	I50	3,38	
		II,5	I0	250	2,87	

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

σ – нормальное напряжение, кГс/см^2;

τ – касательное напряжение, кГс/см^2;

$R_p, \bar{R}_p$ – прочность пород на одноосное растяжение в "куске" и массиве, кГс/см^2;

$R_{сж}, \bar{R}_{сж}$ – прочность пород на одноосное сжатие в "куске" и в массиве, кГс/см^2;

$R_{изг.}$ – прочность пород на изгиб в "куске", кГс/см^2;

$\bar{R}_\tau$ – прочность пород в массиве на срез, кГс/см^2;

$R^{\perp}_{сж}, R''_{сж}$ – пределы прочности пород в "куске" на сжатие поперек и вдоль слоистости;

$R^{\perp}_p, R''_p$ – пределы прочности пород в "куске" на растяжение поперек и вдоль слоистости, кГс/см^2;

$K, \bar{K}, K'$ – сцепление пород в "куске", в массиве и в области неупругих деформаций в массиве, кГс/см^2;

$E, \bar{E}$ – модули упругости в "куске" и в массиве, кГс/см^2;

ν – коэффициент Пуассона;

G' – модуль сдвига породы, находящейся в области неупругих деформаций;

ρ' – угол внутреннего трения породы в области неупругих деформаций, град ;

$K_{сж}, K_p$ – коэффициенты ослабления пределов прочности пород на сжатие и растяжение в массиве;

K^o – коэффициент однородности материала;

f – коэффициент крепости пород по М.М.Протодьяконову;

w – влажность, %;

L – расстояние между рамами крепи, м;

l – длина верхняка крепи, м;

d – диаметр верхняка, мм;

n – коэффициент устойчивости контура;

K_2 – коэффициент концентрации напряжений;

C – отношение полуосей эллипса;

R_0 – радиус выработки, м.

ЛИТЕРАТУРА

I. Указания по терминологии горного давления. Л.,1972, (ВНИМИ).

2. Динник А.Н., Моргаевский А.П., Савин Г.Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. - Труды совещания по управлению горным давлением. М., 1938.

3. Гзовский М.В. Градиент скорости движения, напряженное состояние коры и энергия тектонических процессов новейшего времени. - В кн.: Тектонические движения и новейшие структуры земной коры. М., 1967.

4. Вереда В.С., Юрченко Б.К. О соотношении газодинамических зон трещиноватости углей и температурного режима Донбасса с современными тектоническими движениями. - В кн.: Современные движения земной коры. № 4.М.,1968.

5. Батугин С.А., Шаманская А.Г. Исследования напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железорудного месторождения. - "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1965, № 2.

6. Николаев Н.И., Шенкарева Г.А. Карта градиентов скорости новейших тектонических движений территории СССР. - В кн.: Тектонические движения и новейшие структуры земной коры. М., 1967.

7. Люстих Е.Н., Магницкий В.А. Вертикальные движения земной коры, изменения гравитационного поля во времени и перемещения подкорковых масс. - В кн.: Современные движения земной коры. № I. М., 1961.

8. Балакина Л.М. и др. Исследование напряжений в очагах землетрясений. - "Вестник АН СССР", 1968, № I.

9. Галушко П.Я. и др. Результаты исследования напряжений в массивах горных пород Львовско-Волынского и Донецкого угольных бассейнов. - В кн.: Напряженное состояние земной коры. М., 1973.

10. Курленя М.В. Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния угольных массивов Кузбасса. - В кн.: Напряженное состояние земной коры. М.,1973.

11. Бублик Ф.П., Иванов Г.А. Определение напряжений в целиках методом разгрузки. - "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1967, № 2.

12. Кузнецов С.Т., Бублик Ф.П., Иванов Г.А. Результаты определения напряжений в целиках методом разгрузки на шахте "Полысаевская - Северная". - В кн.: [Труды ВНИМИ] Сб. 45. Л., 1962.

13. Твердовский Р.К., Скозобцов Б.С., Нестеренко Г.Т. Измерение в нетронутом массиве известняков Миргалимсайского месторождения /Южный Казахстан/. - В кн.: Напряженное состояние земной коры. М., 1973.

14. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М., "Недра", 1967.

15. Ильницкая Е.И. и др. Свойства горных пород и методы их определения. М., "Недра", 1969.

16. Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З. Определение свойств горных пород. М., Госгортехиздат, 1962.

17. Турчанинов И.А., Медведев Р.В., Панин Г.В. Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород. М., "Недра",1967.

18. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. М., "Недра", 1972.

19. Канлыбаева Ж.М., Бакитов К.Б., Джанбуршина К.Ш. Физико-механические свойства горных пород и их влияние на процесс сдвижения массива. Алма-Ата, 1972.

20. Койфман М.И., Ильницкая Е.И., Карпов В.И. Прочность горных пород в объемном напряженном состоянии. М., "Наука", 1964.

21. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1948.

22. М а т в е е в Б.В. Исследования объемной прочности и деформационных характеристик горных пород при объемных нагрузках. - В кн.: Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. М., I962.

23. М о р О. Чем обусловлен предел прочности и временное сопротивление материала. - В кн.: Новые идеи в технике. №I. Пг., I9I5.

24. К а р м а н Т. Опыты по всестороннему сжатию. - В кн.: Новые идеи в технике. №I. Пг., I9I5.

25. П р о т о д ь я к о н о в М.М., И л ь н и ц к а я Е.И., К а р п о в В.И. Методы исследования механических свойств горных пород в условиях объемного напряженного состояния. - В кн.: Механические свойства горных пород. М., I963.

26. К у з н е ц о в Г.Н. Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления. - Труды совещания по управлению горным давлением. М., I948.

27. Р у п п е н е й т К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М., Углетехиздат, I954.

28. М а т в е е в Б.В. Методика лабораторного определения прочности горных пород на сдвиг /срез/. Л.,I968, (ВНИМИ).

29. П р о т о д ь я к о н о в М.М. Методы определения прочности горных пород на срез. - В кн.: Механические свойства горных пород. М., I963.

30. И л ь н и ц к а я Е.И. Влияние масштабного фактора на прочностные свойства горных пород. - В кн.: Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. М., I962.

3I. К о й ф м а н М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях. - В кн.: Проблемы механики горных пород. М., I963.

32. К о й ф м а н М.И. О влиянии размеров на прочность горных пород. - В кн.: Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. М., I962.

33. Franklin J.A. Triaxial strength of rock materials. Rock mechanic, vol 3 N2, 1971.

34. Kasawa A. Journal of the Japanese Civil Engeneering Institude, Nov, 1943.

35. Carneiro E., Barcelbos A. Resistance a la fraction des Betons. Inst. Nacional de Technologia Rio de Janeiro, 1949.

36. Требования по нормативам обьемов, видов и методов испытаний механических свойств горных пород при строительстве угольных шахт. Л., I973, (ВНИМИ).

37. Е р ж а н о в Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата, "Наука", I964.

38. П р о т о д ь я к о н о в М.М., Ч и р к о в С.Е. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. М.,"Наука", I964.

39. К а р т а ш о в Ю.М. Методические указания по ускоренным лабораторным испытаниям слабых горных пород на длительную прочность. Л., I966, (ВНИМИ).

40. В я л о в С.С. и др. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов. М., "Наука", I966.

4I. Б и ч Я.А., С т а в р о г и н А.Н. Методические указания по длительным испытаниям горных пород. Л.,I968, (ВНИМИ).

42. Б у б л и к Ф.П., И в а н о в Г.А. Исследование длительной прочности и ползучести неоднородных целиков. - В кн.: [Труды ВНИМИ], Сб. 78. Л., I970.

43. Б у б л и к Ф.П. Методические указания по определению несущей способности целиков. Л., I972, (ВНИМИ).

44. Ф и с е н к о Г.Л. Прочностные характеристики массива горных пород.-В кн.: Механика горных пород и маркшейдерское дело. М., Углетехиздат, I959.

45. Р а з и н Н.В. Сопротивление сдвигу бетонных плотин на скальном основании. - "Гидротехническое строительство", I948, № 5.

46. К и м Д.Н. Исследование структурного ослабления трещиноватых пород моделированием прочностных свойств в лабораторных условиях. - В кн.: Вопросы исследования горного давления и сдвижения пород. Свердловск, I963.

47. Временные требования по составу и методам механических испытаний горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых для проектирования подземной разработки. Л.,I965, (ВНИМИ).

48. М а к с и м о в А.П., Р е в а С.Н. Изучение свойств и текстурных особенностей горных пород Западного Донбасса ультразвуковым методом. - В кн.: Проблемы механики горных пород. Новосибирск, I97I.

49. Б а р о н А.И. и др. Исследования прочности и деформируемости горных пород. М., "Наука", I973.

50. Л е х н и ц к и й С.Г. Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения. - В кн.: [Труды ВНИМИ]. Сб. 45. Л., I962.

5I. Л е х н и ц к и й С.Г. Определение напряжений в трансверсально-изотропном массиве вблизи цилиндрической выработки типа квершлага. - В кн.: [Труды ВНИМИ] .Сб. 68. Л., I968.

52. Л е х н и ц к и й С.Г. Распределение напряжений вблизи горизонтальной выработки эллиптического сечения в трансверсально-изотропном массиве с наклонными плоскостями изотропии. - " Механика твеодого тела", I966, №2.

53. Л е х н и ц к и й С.Г. Анизотропные пластинки.М., Госгортехиздат, I957.

54. Л и б е р м а н Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок. М., "Наука", I969.

55. Ерофеев Л.М. Методика натурных исследований проявлений горного давления в капитальных горизонтальных горных выработках на шахтах Кузбасса. - В кн.: [Труды ВНИМИ]. Сб. 40. Л., I966.

56. Строительные нормы и правила. Часть П. Раздел М. Гл. 4. Подземные горные выработки предприятий по добыче полезных ископаемых. Нормы проектирования. СНиП П-М, 4-65.М., Стройиздат,I966.

57. Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А., Курапов А.Ф. Методика расчета металлических арочных крепей. Кемерово, I972, (КузНИИшахтострой).

58. Басовская А.М. Армоцементная рамная панельная крепь для подготовительных выработок. - В кн.:Вопросы горного давления. Вып. I3. Новосибирск, I962.

59. Виноградов Б.Н. Методы исследования проявлений горного давления при сооружении тоннелей метрополитена. - В кн.: [Труды ВНИМИ]. Сб. 40. Л., I966.

60. Гелескул М.Н., Глушко В.Т., Усан-Подгорнов Б.М. Методика шахтных исследований горного давления в капитальных и подготовительных выработках на больших глубинах. - В кн.: Вопросы горного давления.Вып.20. Новосибирск, I964.

6I. Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А., Шабров Ю.В. Исследование проявлений горного давления и рекомендации по креплению выработок применительно к условиям шахты "Северный Маганак".- В кн.: Совершенствование технологии, организации и механизации строительства угольных предприятий. Труды института. Вып. I0. Кеморово, I972,(КузНИИшахтострой).

62. Билик Ш.М., Кораблев А.А., Слободов М. . Измерительная аппаратура для исследований проявлений горного давления. М., Углетехиздат, I958.

63. Устройство для измерения сдвижения горных пород - "Открытия, изобретения, промышленные образцы,товарные знаки", I969, №30.

64. Ерофеев Л.М. Классификация условий работы крепи и основные расчетные схемы для определения нагрузок на крепь одиночных горизонтальных горных выработок угольных шахт Кузбасса. - Вопросы горного давления.Материалы научно-координационного совещания по горному давлению. Новосибирск, I966.

65. Баклашов И.В., Руппенейт К.В.Прочность незакрепленных горных выработок. М.,"Недра", I965.

66. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М., Госгортехиздат, I960.

67. Борисов А.А. Давление на крепь горизонтальных выработок. М., Углетехиздат, I948.

68. Квапил Р. Новые взгляды на вопросы теории давления горных пород и горных ударов. - В кн.: Исследования горного давления. М., I96I.

69. Орлов В.В. Выбор рациональных типов крепей для горизонтальных выработок,находящихся в сложных условиях. - В кн.: Исследования горного давления. М., I960.

70. Шевяков Л.Д. О горном давлении на вертикальные стволы и их крепь. - В кн.: Горное давление и крепь вертикальных стволов. М., I963.

7I. Шевяков Л.Д. О горном давлении на вертикальные стволы и их крепь. - В кн.: Горное давление и крепь вертикальных стволов. М., I963.

72. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах. - В кн.: Вопросы теории горного давления. М.,I96I.

73. Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт. Киев, " Техника", I972.

74. Заславский Ю.З. Определение целесообразных параметров крепей капитальных горных выработок глубоких шахт. В кн.: Разработка угольных пластов на больших глубинах.М.,I965.

75. А л и м ж а н о в М.Т., Е р ш о в Л.В. О характере проявлений горного давления вблизи одиночной горизонтальной выработки глубокого заложения. - В кн.: Проблемные вопросы механики горных пород. Алма-Ата, I972.

76. Л и б е р м а н Ю.М. К вопросу о расчете оптимальных параметров крепей капитальных выработок. - В кн.: Проблемы механики горных пород. Алма-Ата, I966.

77. Г л у ш к о В.Т. Проявления горного давления в глубоких шахтах. Киев, "Наукова Думка", I97I.

78. Г а л и н Л.А. Плоская упругопластическая задача. - В кн.: Труды АН СССР, т.X. М., I946.

79. П е р л и н П.И. Приближенный метод решения упругопластических задач. - "Инженерный сборник", I960. т. 28.

80. Е р о ф е е в Л.М., М и р о ш н и к о в а Л.А., Ц а й Т.Н. Метод моделирования при исследовании напряженно-деформированного состояния пород вокруг горизонтальных капитальных выработок. - "Шахтное строительство", I97I, № 2.

8I. Ф е н н е р Р. Исследование горного давления. - В кн.: Горное давление. М., I96I.

82. П р о т о д ь я к о н о в М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. М., Углетехиздат, I933 .

83. Ц и м б а р е в и ч П.М. Рудничное крепление. М., Углетехиздат, I95I.

84. Т е р ц а г и К. Теория механики грунтов. М., Стройиздат, I96I.

85. Б о р и с о в А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. М., "Недра", I964.

86. Б у л ы ч е в Н.С. Некоторые результаты исследования перемещений в сыпучем изотропном массиве вблизи вертикальной выработки с податливой крепью. - В кн.: [Труды ВНИМИ]. Сб. 43. Л., I96I.

87. Т о л с т у н о в И.П. Исследование на моделях работы крепи горизонтальных выработок в неустойчивых породах.- В кн.: [Труды ВНИМИ] . Сб. I4. Л., I962.

88. Крыжановская Г.А. Исследование давления горных пород на крепь горизонтальных выработок на основе теории вязкопластического течения. - В кн.: Исследования горного давления. М., 1960.

89. Максимов А.П. Горное давление и крепь выработок. М., "Недра", 1973.

90. Лыткин В.А. Пучение пород в горных выработках. М., 1963, (ИПД им. А.А. Скочинского).

91. Мостков В.М. Строительство подземных сооружений большого сечения. М., Госгортехиздат, 1963.

92. Гелескул М.Н., Усан-Подгорнов Б.М. Исследование сдвижения пород и работы податливых крепей в полевых горизонтальных выработках глубоких шахт. - "Шахтное строительство", 1963, № 8.

93. Ларионов В.Д. и др. Проявление горного давления при проведении горно-капитальных выработок в слабых породах на большой глубине. - "Шахтное строительство",1969, №3.

94. Усан-Подгорнов Б.М., Мининберг В.Я. Результаты натурных исследований проявлений горного давления в штреках шахт Львовско-Волынского бассейна. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1967, №7 (103).

95. Насонов Л.Н. и др. Экспериментальные исследования проявлений горного давления на шахтах Подмосковного бассейна. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1967, №7 (103).

96. Максимов А.П., Стыцин В.И. Некоторые закономерности в проявлении горного давления на строящихся шахтах Западного Донбасса. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1971, №4 (147).

97. Качарава Г.Г. Исследование работоспособности металлической крепи методом фотоупругих покрытий. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1969, №9.

98. Басинский Ю.М. Зависимость величины нагрузок на крепь от глубины расположения выработок. - "Проектирование и строительство угольных предприятий",1968,№10 (118).

99. К о р ж и к М.В., А л ф е р о в Б.В. Исследование работоспособности тюбинговой крепи в капитальных выработках глубоких шахт Донбасса. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1968,№11-12(119-120).

100. В а щ и л и н В.А. Поддержание полевых штреков в условиях крутого падения пластов. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1969, №1 (121).

101. Н а р у с е в и ч В.С., С о б о л е в В.П. Применение кольцевой железобетонной крепи в сложных горногеологических условиях. - " Проектирование и строительство угольных предприятий", 1969,№3 (123).

102. Г р и н ь к о Н.К. и др. Исследование условий работы крепи капитальных выработок глубоких горизонтов.-"Проектирование и строительство угольных предприятий",1969,№6 (126).

103. П о п о в Ю.Г. Выбор расчетных нагрузок на крепь полевых выработок. - " Проектирование и строительство угольных предприятий", 1970, №1.

104. М а к с и м о в А.П., С т ы ц и н В.И. Некоторые закономерности в проявлении горного давления на строящихся шахтах Западного Донбасса. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1971, №4 (147).

105. Г л у ш к о В.Т., Ш и р о к о в А.З. Механика горных пород и охрана выработок. Киев, 1967.

106. Б а ж и н Н.П., П е т р о в В.А. Давление на крепь выработок в кембрийских глинах. - В кн.: Труды ВНИМИ . Сб. 58. Л., 1966.

107. Б е л а е н к о Ф.А. Горное давление при разработке марганцевых руд в Никопольском бассейне.-В кн.: Исследования горного давления. М., 1960.

108. П р и г о ж и н Е.С., Д е н и с о в В.Н. Результаты замеров нагрузок на крепь штреков в условиях слабых пород. - "Проектирование и строительство угольных предприятий", 1962, №6.

109. Г е л е с к у л М.Н., У с а н - П о д г о р н о в В.М. Исследование проявлений горного давления на шахтах Подмосковного бассейна. - "Уголь", 1961, № 6.

110. С у в о р о в Н.А., Ч у г а й М.И. Некоторые результаты исследований горного давления в выработках околоствольного двора шахты им. Ильича. - "Материалы IX научно-технической конференции Украинского заочного политехнического института", № I. Харьков, 1968.

111. С л а в и н Б.Е., К а з а к о в В.П. Результаты натурных исследований проявлений горного давления при сооружении железобетонных тоннелей в трещиноватых скальных породах. - В кн.: Вопросы горного давления. Новосибирск, 1968.

112. Д ж а н д ж г а в а И.Д., М а х а р а д з е М.Н. О проявлении горного давления в капитальных штольнях Чиатурских марганцевых рудников. - "Шахтное строительство", 1963, № 5.

113. Б у л ы ч е в Н.С., А м у с и н Б.З., О л о в я н н ы й А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. М., "Недра", 1974.

114. И з а к с о н В.Ю. Учет направления плоскостей ослабления при расчетах, связанных с разрушением горных пород. - "Горный журнал", 1968, № 5.

115. К у з н е ц о в Г.Н. Исследование предельных состояний хрупкого, ослабленного трещинами материала в различных условиях трехосного сжатия. - В кн.: Проблемы механики горных пород. Новосибирск, 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

§ 1. Напряженное состояние массива горных пород 3

§ 2. Физико-механические свойства горных пород 5

2.1. Прочностные свойства изотропных и анизотропных горных пород 6

2.2. Реологические свойства 22

2.3. Прочностные свойства горных пород в массиве . . 32

§ 3. Условия работы крепей 35

3.1. Определение нагрузок на крепь по результатам обследования горных выработок 36

3.2. Измерение нагрузок на крепь с помощью динамометрических станций 45

3.3. Анализ результатов натурных измерений 53

3.4. Измерение смещений горных пород и крепи 63

§ 4. Классификация условий работы крепей 69

4.1. Первый класс условий работы 72

4.2. Второй класс условий работы 73

4.3. Третий класс условий работы 87

4.4. Четвертый класс условий работы 95

4.5. Пятый класс условий работы 108

4.6. Шестой класс условий работы 122

§ 5. Основные принципы проектирования крепей 123

5.1. Проектирование крепи для первого класса условий работы 126

5.2. Проектирование крепи для второго класса условий работы 128

5.3. Проектирование крепи для третьего класса условий работы 130

5.4. Проектирование крепи для четвертого класса условий работы 132

5.5. Проектирование крепи для пятого класса условий работы 134

5.6. Проектирование крепи для шестого класса условий работы 136

Приложения 137

Основные обозначения 182

Литература 183

УДК 622,28:622.83I.24

Методика прогнозирования проявлений горного давления и условия работы крепей. Кемерово, I974. I95 стр.,58 рис., 6 табл. (Институт КузНИИшахтострой). Авт.канд.техн.наук Л.М. Ерофеев.

Основываясь на экспериментальных исследованиях физико-механических свойств горных пород и натурных наблюдениях,проведенных лабораторией горного давления института КузНИИшахтострой на шахтах Кузбасса, а также исследованиях,выполненных институтами ИПД им. А.А. Скочинского, ВНИМИ, ЛПИ, ДонУГИ в других бассейнах страны, в данной работе систематизируются условия работы крепей в зависимости от характера проявлений горного давления и характеристики системы крепь-забутовка - массив. Такая классификация служит для выбора расчетной схемы при прогнозировании проявлений горного давления и разработки основных принципов проектирования крепей. Первый вариант классификации опубликован в сборнике " Вопросы горного давления" (г. Новосибирск) в I966 году.

Для 2 класса условий работы крепей даны решения,определяющие размеры устойчивого контура выработки с учетом длительной прочности пород и прочностной анизотропии, для четвертого и пятого классов приведены результаты лабораторных исследований на моделях.

Леонид Михайлович Ерофеев

М е т о д и к а

прогнозирования проявлений горного давления и условия работы крепей

Технический редактор И.Н.Попов
Редактор и ответственный за выпуск А.П.Ильичева

Подписано к печати 10.I.75. Формат 60x90 I/I6. Печ.л. I2,25
ОП 01764. Тираж 250 экз. Цена 85 коп. Заказ № 7637

Кемеровский полиграфкомбинат управления издательств, полиграфии и книжной торговли Кемеровского облисполкома.

gost.e-ecolog.ru