*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLII, вып. 1, 1960 г.*

# РАБОТА КРЕПЕЙ В ЛАВЕ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С КРОВЛЕЙ

*А. А. Алейников*

С целью установления взаимодействия крепи и кровли автором в различных условиях на шахтах Донецкого бассейна проведены исследования воспринимаемых крепью нагрузок и податливости фрикционной и гидравлической крепей. Анализ полученных материалов производился в соответствии с намеченной методикой.[1]

## 1. Характер работы фрикционной крепи

**Кровли класса I.** Наблюдение за работой крепи СДТ проводилось в Северной лаве 1 шахты «Коммунист-Новая». Замерялись нагрузки на четыре рядом стоящие куста и на все расположенные в этом районе призабойные стойки. Кривая изменения нагрузок, воспринимаемых кустами, имеет пилообразную форму с возрастанием как максимальных так и минимальных величин при сбросах. При этом отдельные стойки в кустах сбрасывают нагрузки, как правило, одновременно. Размеры сбросов зависят от работы по выемке. Минимальные нагрузки (на стойки) при сбросах остаются приблизительно на одном уровне, а после прохода комбайна начинают возрастать.

Исследование работы крепи СГК-2 на шахте «Ново-Моспино» (северная лава) на пласте мощностью 0,9 *м*, имеющем в непосредственной кровле глинистый сланец 10—12 *м*, способный к плавному прогибу, подтвердило возрастание нагрузок (максимальных, минимальных) при сбросах [1].

**Кровли класса II.** Наиболее полные исследования работы крепи нарастающего сопротивления произведены на шахте № 3-бис треста Чистяковантрацит. Непосредственная кровля, представленная песчанистым сланцем (2,5—4 *м*), легко отслаивается от основной кровли, состоящей из песчаников (10—12 *м*), способных к частичному расслоению.

Крепь нарастающего сопротивления применяется по всей ширине призабойного пространства, включая и органные тумбы ОКУ. Это дает возможность рассматривать характер работы всей крепи в целом там, где, как правило, имеют место групповые сбросы нагрузок. Например, в Западной лаве 16 можно видеть (рис. 1) три крупных групповых сброса, при которых средняя нагрузка на тумбу остается практически постоян-

[1] См. статью А. А. Алейникова «Изучение движения пород кровли в зависимости от технологии выемки пластов» в настоящем сборнике.

ной независимо от расстояния от забоя (17, 20 и 18 *т*). Однако минимальные нагрузки (средние) на тумбы ОКУ при сбросах могут изменяться в два и даже три раза, при этом удельная сопротивляемость крепи практически одинакова (равна 13 *т/м*$^2$) и не зависит от ширины призабойного пространства. При ширине призабойного пространства 2 *м* нагрузка на тумбы, например, составляет всего 10—11 *т*, а удельная сопротивляемость за счет возросшей реакции призабойных стоек остается 11—13 *т/м*$^2$. Этот характер сохраняется и при залегании в непосредственной кровле глинистого сланца мощностью 3—4 *м* при основной кровле из песчаников и песчанистых сланцев (шахта № 2—2-бис).

Такое поведение фрикционной крепи при кровлях класса II отмечается и рядом иностранных исследователей [2, 8], подтверждающих, что максимальные нагрузки при сбросах в целом возрастают с увеличением податливости стоек. Нижние же максимальные нагрузки остаются на уровне 10 *т*.

Таким образом, работа фрикционной крепи зависит от состава и строения кровли: при кровле класса I при сбросах возрастают максимальные и минимальные нагрузки; при кровле класса II возрастают лишь максимальные нагрузки. Для выяснения причин отмеченных явлений нами произведены дополнительные исследования.

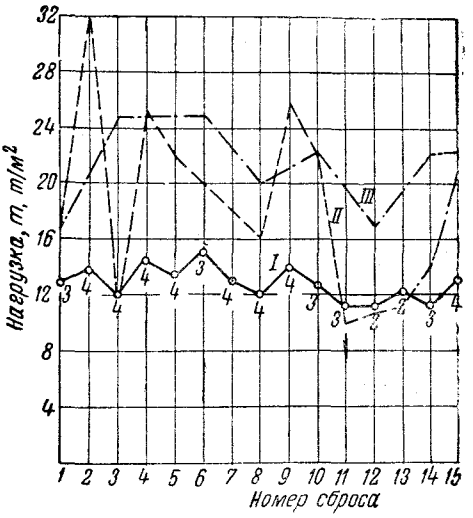



Рис. 1. Нагрузки на крепь при сбросах (Западная лава 6):

*I* – удельное сопротивление при сбросах; *II* – средние нагрузки на тумбы ОКУ в моменты сброса; *III* – среднее удельное сопротивление крепи за цикл; *2*, *3*, *4* — ширина призабойного пространства

**Взаимодействие фрикционных стоек с кровлей.** Податливость фрикционных стоек нарастающего сопротивления происходит главным образом за счет упругости выдвижной части элементов замка. При определенных величинах упругих деформаций в замке выдвижная часть стойки проседает, преодолевая силы трения в замке. Сопротивление стойки

$$P = N \operatorname{tg} \varphi + N \operatorname{tg} (\alpha + \varphi), \qquad (1)$$

где $N$ — зажимное усилие в замке;
$\varphi$ — угол трения;
$\alpha$ — угол конусности.

После преобразований

$$P = N (2 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha). \qquad (2)$$

Выразив силу через податливость стойки и пренебрегая поперечными упругими деформациями сжатия выдвижной части, получим

$$P = kh \operatorname{tg} \alpha (2 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha), \qquad (3)$$

где $k$ — коэффициент пропорциональности;
$h$ — величина податливости.

В общем случае

$$P = P_0 + kh \operatorname{tg}\alpha (2 \operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\alpha), \qquad (4)$$

где $P_0$ — первоначальная несущая способность.

Из выражения (4) видно, что несущая способность стойки в значительной степени зависит от коэффициента трения.

Исследования по этому вопросу [2] показали, что коэффициент трения движения примерно на 50% меньше коэффициента трения покоя

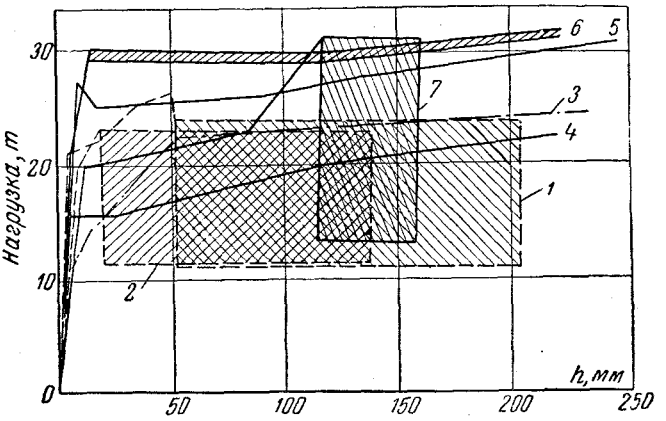



Рис. 2. Характеристики стойки ЛС-52:
*1–7* — номера нагружения

(см. табл. 1). Эта разница возрастает с увеличением продолжительности неподвижного контакта и при натирании поверхностей трения угольной пылью и может достигнуть 60—65% (см. табл. 2).

Таблица 1

| Коэффициент трения при | | Уменьшение коэффициента трения при движении, % | Состояние поверхности |
|---|---|---|---|
| покое | движении | | |
| 0,33 | 0,31 | 23.7 | Чистая, пришлифованная |
| 0.42 | 0.25 | 4 .5 | Натертая угольной пылью, сухая |
| 0,43 | 0,37 | 14,0 | Грубая, натертая сухой угольной пылью |
| 0,32 | 0,28 | 12,5 | То же, влажная |
| 0.44 | 0.24 | 45,5 | То же. после высыхания |

Таблица 2

| Коэффициент трения при | | Уменьшение коэффициента трения при движении, % | Продолжительность контакта, *сек* | Состояние поверхности |
|---|---|---|---|---|
| покое | движении | | | |
| 0,45 | 0,30 | 33,3 | 1 | Пришлифована, натерта угольной пылью |
| 0,60 | 0.32 | 46,5 | 3 | То же |
| 0,80 | 0.35 | 56,3 | 6 | » » |
| 0,80 | 0.35 | 56,0 | 10 | » » |
| 1.00 | 0 35 | 65,0 | 20 | » » |
| 0,43 | 0,37 | 14 0 | 1 | Грубая, натерта угольной пылью |
| 0,75 | 0,37 | 51,3 | 5 | То же |
| 0,93 | 0,37 | 60,0 | 20 | » » |

Теоретически [3, 4] в системе, обладающей большим переменным трением и разницей между силой инерции (вес отслаивающихся пород непосредственной кровли) и восстанавливающей силой, неизбежно возникают скачки трения. В стойках фрикционной крепи они проявляются в виде так называемых «скачков податливости».

Влияние различия коэффициентов трения при покое и движении, обусловленного появлением угольной пыли на трущихся поверхностях, наблюдалось и при испытании стоек типа ЛС-52 на прессе.

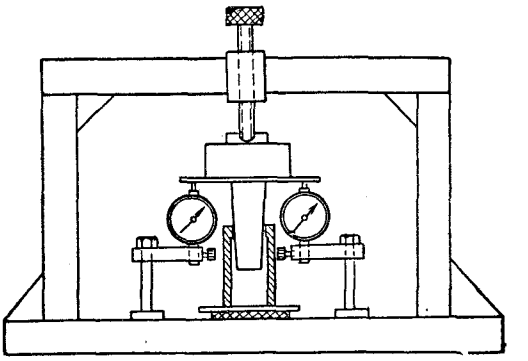


Рис. 3. Схема установки для исследования скачков податливости

Как показали исследования, после трех месяцев работы на шахте стойка имела сбросы нагрузок до 12—14 *т* (рис. 2, нагружения *1* и *2*). Затем, когда поверхности трения были очищены от угольной пыли и увлажнения (нагружения *3*, *4* и *5*), сбросов нагрузок не наблюдалось. После натирания поверхности трения сухой угольной пылью (нагружения *6* и *7*) сбросы нагрузок вновь появились.

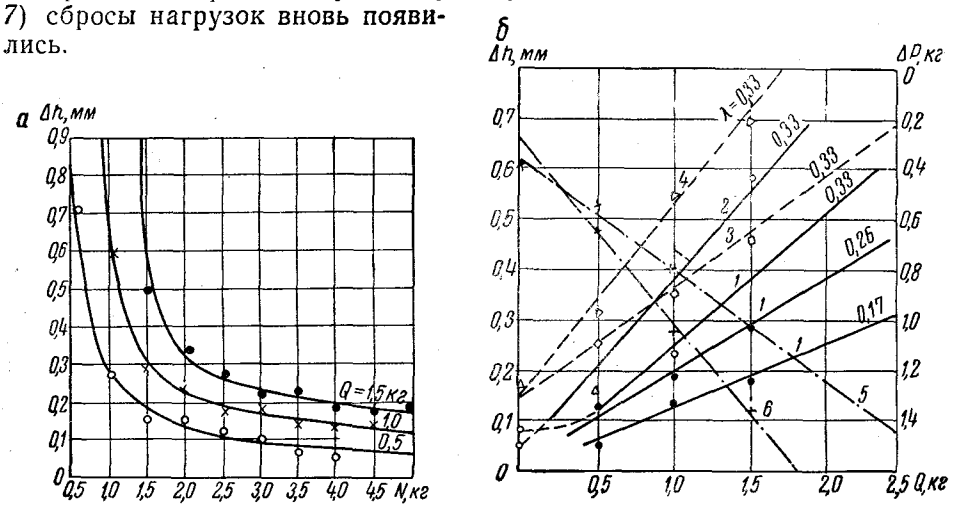



Рис. 4. Зависимость изменения величины «скачка податливости» стоек нарастающего сопротивления:

*а*—от зажимного усилия в замке *N* при инерционной нагрузке *Q*; *б* — от *Q* при постоянной разнице *P* — *Q* в сечении стойки. Жесткое основание: *1* — α = 0,10; *3* — α = 0,05. Упруго-податливое основание: *2* — α = 0,10; *4* — α = 0,05. Сбросы нагрузок: *5* — α = 0,1; *6* — α = 0,05; λ — разность коэффициентов трения при покое и движении

Исследование зависимости «скачков податливости» от инерционной нагрузки и жесткости системы крепления (рис. 3) показывает, что величина «скачка податливости» обратно пропорциональна разности между несущей способностью стойки *P* и инерционной нагрузкой *Q* (рис. 4, *а*). Кривые изменения «скачков податливости» при постоянной разнице *P*—*Q*, построенные для соответствующих сечений стойки, показывают, что величины «скачков податливости» пропорциональны инерционной нагрузке (рис. 4, *б*). «Скачки податливости» зависят также от разности

коэффициентов трения при покое и движении $(f_п - f_д)$ и жесткости системы опора — стойка — кронштейн. Взаимодействие крепи и кровли, определяющее зависимость «скачка податливости» фрикционной стойки от этих факторов может быть выражено в общем виде уравнением

$$\Delta h = n \frac{QN(f_п - f_д)}{(P - Q)\eta}, \qquad (5)$$

где $\eta$ — безразмерный коэффициент, зависящий от свойств поверхностей трещин;

$n$ — показатель жесткости.

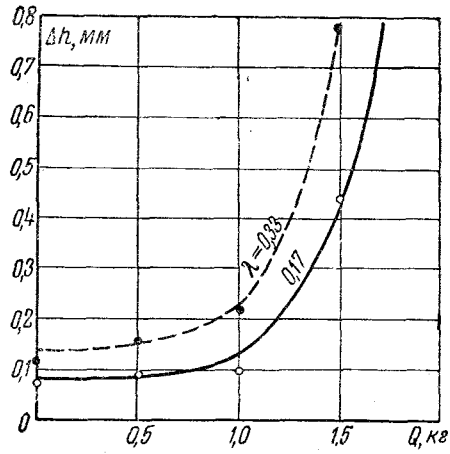



Рис. 5. Зависимость величины «скачков податливости» от инерционной нагрузки при крепи постоянной характеристики

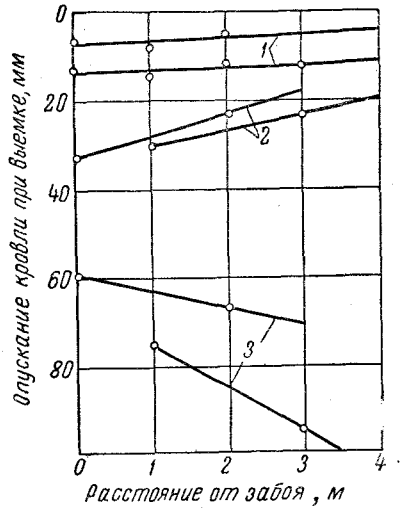



Рис. 6. Врубовый эффект при кровлях классов I и II:

*1* — кровли класса II, шахта № 3-бис; *2* — кровли класса II, шахта „Пролетарка Глубокая"; *3* — кровли класса I (шахта „Коммунист-Новая")

Подставив значения входящих в это выражение величин $N$, $P$, $Q$, а также полагая $\Delta h = vt$, можно написать

$$t = n \frac{\gamma m S k h \operatorname{tg}\alpha (f_п - f_д)}{(P_0 + 2kh \operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\varphi - \gamma m S)\eta v}, \qquad (6)$$

где $t$ — длительность времени срабатывания стойки;

$v$ — скорость опускания кровли;

$\gamma$ — удельный вес пород;

$m$ — мощность отслаивающихся пород;

$S$ — площадь кровли, поддерживаемая стойкой.

Для фрикционных стоек постоянного сопротивления уравнение (6) будет иметь вид

$$t = m \frac{\gamma m S N (f_п - f_д)}{(P - \gamma m S)\eta v}, \qquad (7)$$

где величины $N$ и $P$ постоянны и зависимость «скачка податливости» от инерционной нагрузки выражается гиперболой, что подтверждается кривыми, полученными эмпирическим путем (рис. 5).

Уравнения (6) и (7) показывают, что работа фрикционных стоек зависит от скорости опускания кровли и мощности отложившейся толщи

пород, т. е. стойки работают в режиме заданной нагрузки и заданной деформации [7, 8].

Проведенные исследования позволяют объяснить причины ряда явлений, наблюдаемых в шахтных условиях.

При кровлях класса II, когда непосредственная кровля имеет более или менее постоянную мощность и легко отслаивается от основной, действует постоянная инерционная нагрузка. Поэтому значения минимальных нагрузок при «скачках податливости» почти не изменяются.

При кровлях класса I возрастание минимальных нагрузок при сбросах может быть объяснено лишь увеличением инерционной нагрузки, которое обусловлено прогрессирующим расслоением пород кровли. Это подтверждается наличием обратного врубового эффекта, заключающегося в увеличении приращений опусканий кровли в период влияния выемки (рис. 6) по мере удаления точек от забоев.

Поскольку управление кровлей должно обеспечивать наиболее благоприятные условия для обрушения пород, что в значительной степени зависит от способности пород расслаиваться, то фрикционные крепи наиболее целесообразно применять при труднообрушаемых кровлях, обладающих вторичными осадками. Наибольший эффект эти крепи дадут при слоистых породах основной кровли, когда может возникнуть прогрессирующее расслоение.

Анализ выражений (6) и (7) показывает, что при прогрессирующем расслоении стойки нарастающего сопротивления более предпочтительны, чем стойки постоянной характеристики, так как величина скачка податливости последних возрастает быстрее и, следовательно, они могут исчерпать свою податливость раньше, чем стойки нарастающего сопротивления.

## 2. Характер работы гидравлической крепи

Характер работы гидравлической крепи постоянного сопротивления изучался на стойках типа ГС [5]. Работа их, как и фрикционных, имеет скачкообразный характер. Скачки выражаются резким увеличением скорости податливости (рис. 7), которая иногда превосходит скорость смещения кровли в 4 раза. Однако за счет упругих сил в гидросистеме отрыва стойки от кровли при этом не происходит. Микронаблюдения за работой десяти стоек в шахте показали, что величина сбросов нагрузок $\Delta P$, коэффициент упругой деформации $k$, размеры скачка податливости в период срабатывания клапана $\delta$ у всех стоек различны (см. табл. 3).

Таблица 3

**Характеристика стоек ГС**

| Номер стойки | $k$, *мм/т* | $\delta$, *мм* | $\Delta P$, *т* | $t$, час |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 210 | 0,187 | 1,670 | 0,300 |
| 3 | 0,165 | 0,090 | 1,870 | 0,224 |
| 4 | 0,185 | 0,051 | 0,800 | 0,110 |
| 5 | 0,730 | 0,075 | 0,266 | 0 150 |
| 6 | 0,234 | 0 250 | 2,470 | 0,420 |
| 7 | 0,111 | 0,093 | 1,200 | 0,180 |
| 10 | 0 138 | 0,110 | 1,335 | 1,163 |

Примечание. Скорость опускания кровли для всех стоек взята средняя по Западной лаве 5 и равна 1,8 *мм/час.*

Зависимость длительности сбрасывания стойки от указанных величин и скорости опускания кровли $v$ получим по выражению

$$t = \frac{\Delta P + k\delta}{kv}. \qquad (8)$$

Как видно из табл. 3, при равных условиях сбросы нагрузок будут происходить неодновременно, однако эти сбросы столь незначительны, что ими можно пренебречь, т. е. нагрузку (при стойках ГС) можно считать постоянной.

Исследование работы гидравлических секций МПК типа М74 и М77 (на шахте «Коммунист-Новая») показали, что при слабой кровле

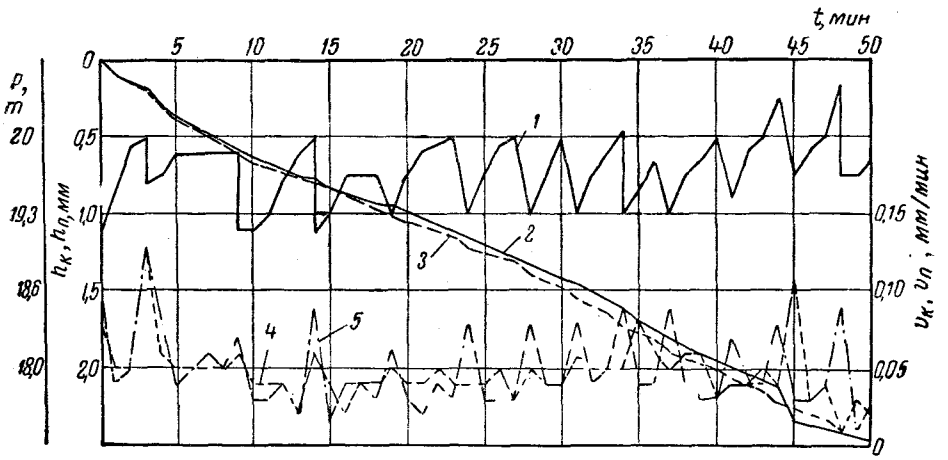



Рис. 7. Взаимодействие стоек ГС с кровлей:
*1* — нагрузка $P$, *т*; *2* — опускание кровли $h_к$, *мм*; *3* — скорость опускания кровли $v_к$, *мм/мин*; *4* — податливость стойки $h_п$, *мм*; *5* — скорость податливости стойки $v_п$, *мм/мин*

подобная крепь имеет сбросы нагрузок, доходящие до 50—60 *т*. Это происходит главным образом вследствие большой их несущей способности (до 120 *т*) и разновременности сбросов, создающих в кровле значительные динамические нагрузки, разрушающие кровлю [6]. При прочных породах непосредственной кровли характер работы секций М74 и М77 идентичен стойкам ГС, т. е. отвечает уравнению (8). Анализ этого уравнения показывает, что единственным внешним фактором, от которого зависит характер работы гидравлической крепи, является скорость опускания кровли Поэтому, в отличие от фрикционной, гидравлические крепи работают только в режиме заданной деформации.

### 3. Жесткость системы кровля — крепь

Жесткостью принято называть величину нагрузки, приходящуюся на единицу деформации конструкции или материала. Исследования на моделях из эквивалентных материалов показали, что увеличение жесткости крепи приводит к повышению жесткости слоев непосредственной кровли за счет ограничения свободы горизонтальных смещений между слоями и вследствие этого увеличения числа одновременно прогибающихся слоев.

Зависимость жесткости системы кровля — крепь от реакции крепи исследовалась на условной модели с пригрузкой, при этом крепь постоянной характеристики имитировалась рычажными планками с подвес-

ными грузами, а крепь нарастающего сопротивления — соответствующей пружиной. Как показали опыты, независимо от характера крепи с увеличением реакции жесткость системы кровля — крепь возрастает по гиперболическому закону (рис. 8). Повышение жесткости с увеличением несущей способности при крепи постоянной характеристики происходит интенсивнее, чем при крепи нарастающего сопротивления.

Так, например, крепи постоянной характеристики с несущей способностью $P = 10$ *г/см²* соответствует жесткость системы 2,8 *кг/мм*, а крепи нарастающего сопротивления — 0,85 *кг/мм* (в 2,4 раза меньше). Такое повышение жесткости системы кровля — крепь при крепи постоянной характеристики, по-видимому, происходит главным образом за счет повышенного первоначального сопротивления.

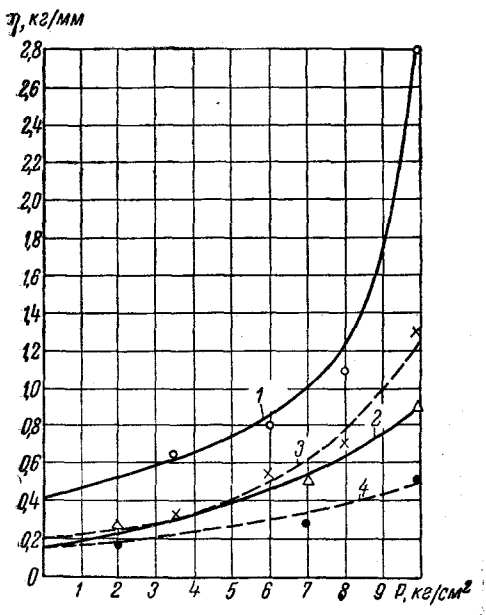



Рис. 8. Зависимость жесткости системы кровля — крепь от реакции крепи:
*1* и *2* — стойки постоянного сопротивления (при $f = 0{,}82$); *3* и *4* — стойки нарастающего сопротивления (при $f = 0{,}4$)

Исследования на моделях из эквивалентных материалов и испытание в производственных условиях показали, что увеличение жесткости приводит к ухудшению состояния кровли в период вторичных осадок. Так, например, осадки основной кровли при стойках ГС (шахта № 3-бис) носили более резкий характер с образованием заколов и ступенчатым смещением блоков относительно друг друга.

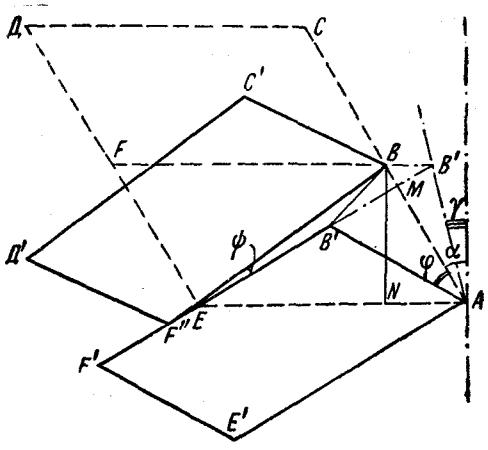



Рис. 9. Схема взаимодействия блоков непосредственной кровли. Пунктир — исходное положение блоков; сплошная линия — положение блоков после опускания

Схема взаимодействия двух налегающих друг на друга слоев-блоков (рис. 9), предложенная Г. Н. Кузнецовым [7], показывает, что при наличии между блоками пустот, определяемых треугольником *BEB'*, углы наклона блоков при удалении от контакта крепи с кровлей будут увеличиваться. Подобная схема справедлива для крепи с медленно нарастающей характеристикой, так как вследствие небольшой первоначальной несущей способности блоки в непосредственной близости от крепи не будут раздавлены. Это подтверждается данными практики: 1) при вторичных осадках не наблюдается резких нарастаний смещения, так как замеренные величины отвечают опусканиям непосредственной кровли и в моменты вторичных осадок они меньше, чем опускания основной кровли; 2) при вторичных осадках не наблюдается ступенчатых смещений блоков (шахта № 3-бис).

При крепях постоянного сопротивления зазоров, определяемых углом ψ, не отмечается (подтверждается на моделях из эквивалентных материалов), что может быть объяснено смещением точки шарнирного сочленения $B$ (см. рис. 9) в сторону угольного массива. Наклон линии, соединяющей точки шарнирного сочленения блоков, определится углом

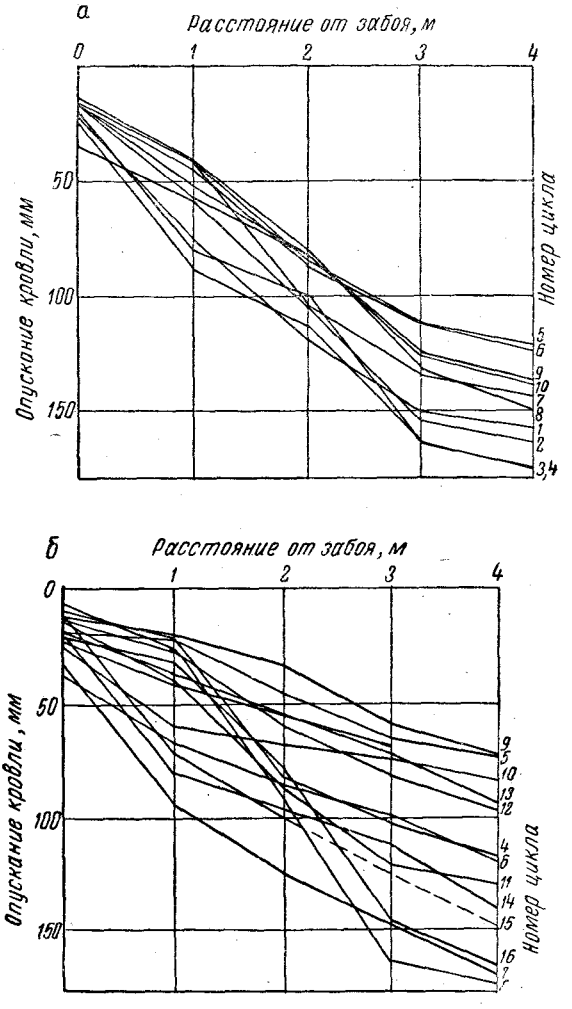



Рис. 10. Кривые сближения кровли с почвой (шахта № 3-бис):
*а* — стойки СДТ (Западная лава 16); *б* — стойки ГС (Западная лава 15)

γ, который равен половине угла наклона нижнего блока $\frac{\varphi}{2}$. Вследствие малости угла φ (0,025—0,05) линия $AB$ будет близка к вертикали. При вторичной осадке и значительной динамической пригрузке от обломившейся консоли основной кровли выступы в местах шарнирного сочленения разрушаются и происходят вертикальные смещения блоков.

Таким образом, при увеличении жесткости крепи точка приложения нагрузки от основной кровли смещается в сторону угольного массива и происходит нарушение пород кровли по всей ширине призабойного пространства. При крепи небольшой жесткости интенсивное движение

кровли в период вторичных осадок происходит лишь вблизи линии обрушения. Изложенное подтверждается данными, полученными при исследованиях со стойками СДТ и ГС. В лаве, закрепленной стойками СДТ (Западная 16) ординаты точек кровли к моменту вторичной осадки изменяются незначительно и кривые смещения отходят от забоя узким пучком (рис. 10, *а*). График лавы, закрепленной стойками ГС (Западная 15) характеризуется разбросом кривых смещения, начиная от линии забоя (рис. 10, *б*). Максимальные величины смещений кровли в обеих лавах одинаковы; средние значения при стойках ГС меньше за счет сокращения минимальных смещений.

Отметим, что замеренные смещения кровли не являются абсолютными значениями, а определяют лишь движение пород кровли в пределах призабойного пространства.

**Взаимозависимость работы крепи и кровли и основные требования к характеристикам крепи.** Управление кровлей должно не только обеспечить наиболее удовлетворительное состояние кровли в призабойном пространстве, но и создать благоприятные условия для работы крепи.

Практика работы металлической крепи на шахтах Донбасса показывает, что основная причина потерь стоек заключается в их выходе из строя вследствие несоответствия предельной податливости фактическому опусканию кровли.

Таблица 4

| Шахта | Лава | Тип крепи | Удельная сопротивляемость на 1 $м^2$, $т$ | Опускание кровли, $мм$ | Опускания кровли, приведенные к одной скорости подвигания, $мм$ | Уменьшение опусканий кровли при замене фрикционных стоек гидравлическими, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| № 3-бис | Западная 16 | Фрикционная | 20 | 146 | 146 | — |
| | Западная 15 | Гидравлическая | 32 | 117 | 111 | 25 |
| „Коммунист-Новая" | Северная 1 | Фрикционная | 27 | 214 | 214 | — |
| | Северная 2 | Гидравлическая | 38 | 206 | 141 | 35 |

Исследования на шахтах № 3-бис и «Коммунист-Новая» показали, что при увеличении удельной сопротивляемости крепь может значительно уменьшить величины среднего опускания кровли (табл. 4). Так, например, на шахте «Коммунист-Новая» увеличение сопротивляемости на 40% обеспечило уменьшение опускания кровли на 35%.

Обычно требования, предъявляемые к конструкции крепи, предусматривают в первую очередь увеличение удельной сопротивляемости с целью максимально возможного уменьшения среднего смещения кровли. Однако, как показывают исследования, увеличение удельной сопротивляемости ухудшает условия управления кровлей при вторичных осадках. Поэтому возникает необходимость введения дополнительного требования: конструкция крепи должна обеспечивать максимальное уменьшение проявлений вторичных осадок.

Ни одна из существующих конструкций крепей не удовлетворяет одновременно обоим требованиям, поэтому применительно к конкретным условиям необходимо выделять главное требование, которому крепь должна отвечать в первую очередь.

При кровлях класса I, когда вторичные осадки отсутствуют или их проявление незаметно, величины смещения кровли за счет прогрессирующего расслоения значительны, поэтому наиболее целесообразно применять гидравлические крепи постоянного сопротивления. Кровлям класса II, где главной задачей является максимальное уменьшение проявлений вторичных осадок, удовлетворяют фрикционные крепи нарастающего сопротивления.

Когда опускания кровли невелики( класса III) и вторичные осадки представляют значительную опасность, крепь должна обеспечивать предварительное искусственное расслоение и разрушение пород непосредственной кровли. Такой крепью могут служить жесткие секции типа МПК и податливые секции М77.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Давидянц В. Т., Козелев Г. Л. Измерение проявлений горного давления на шахтах Донецкого бассейна. Углетехиздат, 1952.
2. Шпрут Ф. Металлическое крепление очистных выработок. Углетехиздат, 1957.
3. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. Изд-во АН СССР, 1956.
4. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. ГНТИ, 1955.
5. Коган А. Б., Иванов М. М., Дубов Е. Д., Алейников А. А. Испытание и исследование работы гидравлических стоек ГС в условиях шахты № 3-бис треста Чистяковантрацит. ЦИТИ, 1958.
6. Козелев Г. Л., Дубов Е. Д., Алейников А. А., Резник Ю. Р. Исследование и испытание новых видов крепей в очистных забоях. Рукопись. Фонды ДонУГИ, Сталино, 1957.
7. Кузнецов Г. Н. О механизме взаимодействия боковых пород и крепи в очистных выработках пологопадающих угольных пластов. Сб. «Исследование горного давления применительно к механизированным крепям». Углетехиздат, 1954.
8. Mohr F. Glückauf, 1952, № 58.