

**А. А. ЖУРИЛО**

**ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ  
В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ  
С ТРУДНООБРУШАЮЩИМИСЯ  
КРОВЛЯМИ**



**А. А. ЖУРИЛО**

**ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ  
В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ  
С ТРУДНООБРУШАЮЩИМИСЯ  
КРОВЛЯМИ**



**МОСКВА "НЕДРА" 1980**

УДК 622.83.016.62\*112

Журило А.А. Горное давление в очистных забоях с труднообрушающимися кровлями. — М., Недра, 1980. — 124 с.

В книге рассмотрены проявления горного давления в очистных выработках при отработке угольных пластов с труднообрушающимися кровлями. Приведены результаты исследований формирования горного давления и взаимодействия крепей с кровлей. Предложены методы расчета, позволяющие определить напряженно-деформированное состояние кровли и параметры крепей. Установлены основные закономерности проявлений горного давления. Даны рекомендации по управлению труднообрушающимися кровлями и совершенствованию крепей.

Книга предназначена для инженерно-технических работников производства и сотрудников научно-исследовательских институтов.

Табл. 14, ил. 20, список лит. — 64 назв.

Рецензент — канд. техн. наук, А.П. Туров.

Ж  $\frac{30703 - 420}{043 (01) - 80}$  413-80 2504 000 000

© Издательство "Недра", 198

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Увеличение подземной добычи угля и повышение безопасности работ в значительной степени определяются эффективностью разработки угольных пластов, залегающих в сложных горно-геологических условиях, в том числе пластов с трудноуправляемыми кровлями. К трудноуправляемым наряду с другими относятся также кровли, в которых залегают прочные слои труднообрушающихся пород.

В настоящее время научно-исследовательскими институтами выявлено более 100 угольных пластов с труднообрушающимися кровлями [1]. Из них в Донецком бассейне разрабатывается 30%, в Кузнецком бассейне — 25%. В Карагандинском, Печорском, Челябинском бассейнах и месторождении о. Сахалин рассредоточено примерно по 10%. Соответственно 2 и 3% таких пластов разрабатываются в Подмосковном и Приморском бассейнах.

При разработке пластов с труднообрушающейся кровлей возникают осложнения с управлением горным давлением в очистных выработках, связанные с первыми и последующими осадками прочных слоев кровли. Осадки кровли приводят к повышенным нагрузкам, на крепь, ее разрушению и к обрушению кровли в призабойном пространстве.

Для исключения отмеченных проявлений горного давления необходимо применение средств и способов управления горным давлением, соответствующих условиям разработки.

В настоящее время в очистных забоях с труднообрушающимися кровлями применяются: крепи повышенного сопротивления, передовое торпедирование и гидрообработка, принудительная первичная посадка кровли. Однако выбор области применения этих способов еще недостаточно обоснован вследствие многообразия проявлений горного давления в различных условиях разработки. Поэтому в настоящей книге на основе анализа и обобщения горно-геологических условий разработки, применяемых на шахтах средств и способов управления кровлей, экспериментальных исследований и разработанной методики расчета выявлены закономерности проявлений горного давления в очистных выработках с труднообрушающимися кровлями, а методами математической статистики выявлены закономерности

обрушения кровель. Это позволило дать обоснованные рекомендации по эффективному управлению горным давлением.

Выбор эффективных способов и средств управления горным давлением невозможен без прогнозирования проявлений горного давления, которое может быть обеспечено путем аналитических решений и экспериментальных исследований. Используя расчетные методы, можно варьировать отдельными параметрами способы и средств управления горным давлением, а затем выбирать из них наиболее соответствующие рассматриваемым условиям. Экспериментальные исследования позволяют проверить и уточнить расчеты. В связи с этим была разработана комплексная методика расчета проявлений горного давления, в которой учтены особенности формирования горного давления при разработке пластов с труднообрушающимися кровлями.

Методикой предусмотрен расчет: напряжений, времени устойчивого состояния кровли между осадками труднообрушающихся пород и параметров ее разрушения, скоростей и величин смещений кровли и сопротивления крепи, необходимого для поддержания кровли над призабойным пространством при осадках.

Предложенные рекомендации по управлению горным давлением при труднообрушающихся кровлях основаны на экспериментально-аналитических исследованиях и даны исходя из необходимости снижения интенсивности проявлений горного давления без учета других технико-экономических требований.

Лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов проводились при участии кандидатов техн. наук А.М. Козиной, И.А. Закутского, инж. Е.П. Рутковской, В.В. Рыжкова, В.М. Офицера.

Моделирование на оптически активных материалах проведено совместно с инж. В.А. Закутским. Статистическая обработка экспериментальных данных о шаге обрушения кровли выполнена при участии инж. В.М. Офицера и канд. техн. наук А.С. Димапштейна.

Автор благодарен д-ру техн. наук Ю.М. Либерману за ценные советы, которые были им даны при разработке методики расчета горного давления и параметров крепи очистных выработок с труднообрушающимися кровлями, и рецензенту канд. техн. наук А.П. Турову за замечания, способствующие улучшению качества книги.

# ГЛАВА I ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТКАХ С ТРУДНООБРУШАЮЩИМИСЯ КРОВЛЯМИ

## § 1. Общие сведения о труднообрушающихся кровлях

В настоящее время существуют различные представления о труднообрушающихся кровлях и проявлениях горного давления в очистных выработках с такими кровлями. Это связано с большим разнообразием горно-геологических условий залегания угольных пластов, способов и средств управления кровлей, технологий ведения работ и т.д.

Существующие определения труднообрушающихся кровель отличаются друг от друга и разработаны преимущественно на основе исследований в определенном бассейне.

Принято считать, что к труднообрушающимся относятся кровли, при которых в очистной выработке возможны резкие проявления первых и последующих осадок труднообрушающихся слоев пород, зависающих в выработанном пространстве на значительных площадях [2-8].

Основными горно-геологическими факторами, влияющими на проявления горного давления рассматриваемого класса кровель, являются: строение кровли, литолого-петрографическая разновидность и мощность слоев пород кровли, наличие плоскостей ослаблений по контактам напластования и трещиноватость, прочностные свойства, шаг первого и последующих обрушений кровли, мощность пласта и глубина разработки.

На проявления горного давления, как известно [7], оказывают влияние и горнотехнические факторы: размеры выработок, способы управления кровлей и выемки полезного ископаемого, конструкция и параметры крепи. Установлено, что проявления осадок труднообрушающихся пород имеют место, если мощность легкообрушающихся пород непосредственной кровли не превышает 3,0-3,5 мощностей пласта [2, 4, 5, 8]. При расположении в непосредственной кровле пород средней обрушаемости влияние осадок трудно-

обрушающихся пород основной кровли отмечается при величинах отношения мощности непосредственной кровли к мощности пласта, достигающих пяти [9].

Более детальная характеристика кровель (по результатам исследований в Кузбассе), при которых проявляются осадки труднообрушающихся пород, дана следующим образом:

непосредственная кровля представлена пегкообрушающимися породами, нижние слои основной кровли (толщиной 1,0–2,0 м) – прочными малотрещиноватыми породами с пределом прочности на сжатие более  $60 \text{ МН/м}^2$  [8];

в непосредственной кровле залегают мощные монолитные слои пород песчано-глинистых разновидностей с пределом прочности на сжатие  $25\text{--}80 \text{ МН/м}^2$ , в основной – мощные монолитные слои, преимущественно песчаников с пределом прочности на сжатие более  $60 \text{ МН/м}^2$  [8, 9];

непосредственная кровля представлена прочными породами, образующими консоли, превышающие ширину призабойного пространства [9].

До сих пор нет единого определения труднообрушающихся пород, формирующих кровлю.

Так, по результатам обобщения исследований, проведенных в Донбассе [7], к труднообрушающимся отнесены алевролиты, песчаники и известняки, характеризующиеся определенными петрографическими признаками, расстояниями между ослаблениями по контактам напластования, трещиноватостью и шагом последующих обрушений более 6 м. Предел их прочности на сжатие превышает  $80\text{--}100 \text{ МН/м}^2$  [10].

Согласно другому определению [4] труднообрушающимися являются песчаники, известняки и песчанистые сланцы мощностью не менее 2–3 мощностей пласта, имеющие предел прочности на одноосное сжатие более  $70\text{--}80 \text{ МН/м}^2$ , шаг первого обрушения 30–40 м, последующих обрушений – более 15 м.

По ВНИМИ [2] к труднообрушающимся относятся породы, имеющие шаг первого обрушения более 25 м и последующих обрушений свыше 10 м с размером блоков, на которые разрушаются слои пород, более 1,5–2,0 м.

По типизации ПечорНИИпроекта [5] труднообрушающиеся породы кровли могут быть представлены аргиллитами, алевролитами и песчаниками с мощностью слоев 0,5 – 1,0 м, пределом прочности на растяжение более

4–7 МН/м<sup>2</sup> и шагом первого и последующих обрушений больше соответственно 70–90 и 16–20 м.

Приведенный краткий обзор определений труднообрушающихся пород показывает, что для их полной горно-геологической характеристики необходимо рассматривать совокупность параметров. Литологический и петрографический состав пород предопределяет их физико-механические свойства. Слоистость и трещиноватость влияют на изменение прочностных свойств и характер разрушения пород в массиве по сравнению с данными, полученными при испытании образцов. Строение и шаг обрушения кровли служат интегральными показателями, определяющими ее состояние и выбор способов и средств управления горным давлением. Вместе с тем следует иметь в виду, что на состояние и шаг обрушения кровли влияют и перечисленные выше горнотехнические факторы.

Основная часть пластов с труднообрушающимися кровлями (до 60%) имеет мощность от 1,0 до 2,0 м.

В Кузбассе и Печорском бассейне мощность большинства рассматриваемых пластов составляет 1,0–3,0 м, в Донбассе – до 2,0 м, в Карагандинском бассейне – от 1,5 до 2,5 м.

Отношение мощности легкообрушающихся и средней обрушаемости пород непосредственной кровли к мощности пласта преимущественно не превышает трех. Причем примерно для 85% пластов это отношение не превышает двух, в том числе в 30% случаев труднообрушающиеся слои пород залегают в непосредственной кровле.

В целом по всем бассейнам непосредственная кровля представлена аргиллитами, алевролитами, песчаниками. В основной кровле главным образом залегают песчаники, реже алевролиты или аргиллиты. В Донецком бассейне в отдельных случаях основная кровля может быть представлена известняком. Мощность труднообрушающихся слоев пород, как правило, превышает мощность пласта более чем в 3 раза, и в большинстве случаев их мощность составляет более 10 мощностей пласта.

В каждом бассейне породы кровли имеют различные прочностные и деформационные свойства [11] (табл. 1). Совокупность приведенных данных прежде всего влияет на шаг первого и последующих обрушений кровли (табл. 2) и проявления горного давления.

Таблица 1.

Бассейн	Породы	Плотность, т/м <sup>3</sup>		Предел прочности на сжатие, МН/м <sup>2</sup>		Модуль упругости, 10 <sup>3</sup> МН/м <sup>2</sup>		Коэффициент Пуассона	
		Среднее значение	Пределы изменения	Среднее значение	Пределы изменения	Среднее значение	Пределы изменения	Среднее значение	Пределы изменения
Донецкий	Аргиллит,	2,63	2,35-2,86	56,5	13,8-166,5	2,38	0,22-8,38	0,26	0,05-0,50
	алевролит,	2,63	2,44-3,24	93,0	20,0-245,2	2,89	0,16-7,66	0,25	0,07-0,40
	песчаник,	2,55	2,35-2,86	143,0	21,2-260,0	4,17	1,10-6,70	0,18	0,02-0,50
	известняк	2,49	2,00-2,71	157,0	78,5-230,4	6,5	5,05-11,30	0,30	0,18-0,40
Кузнецкий	Аргиллит,	-	-	41,5	11,2-115,0	1,35	0,45-2,14	0,26	0,17-0,31
	алевролит,	2,46	2,37-2,74	43,4	18,9-116,7	3,50	0,21-5,10	0,26	0,18-0,32
Карагандинский	песчаник	2,46	2,15-2,73	86,0	7,0-158,0	4,60	2,49-5,84	0,21	0,16-0,26
	Аргиллит,	2,41	2,35-2,49	20,0	0,3-38,0	1,22	0,11-2,15	0,34	0,30-0,41
	алевролит,	2,38	2,31-2,42	30,0	3,0-84,0	1,04	0,36-1,75	0,31	0,28-0,37
	песчаник	2,45	2,39-2,54	50,0	13,7-145,0	2,04	0,22-3,41	0,22	0,16-0,32
Пелорский	Аргиллит,	-	-	54,5	45,3-64,0	-	-	-	-
	алевролит,	-	-	78,5	48,2-139,0	-	-	-	-
	песчаник	2,66	2,50-2,74	136,5	80,5-164,0	3,38	2,65-5,74	0,23	0,19-0,27

Таблица 2

Бассейн	Шаг обрушения кровли, м	
	первый	последующие
Донецкий	35-80	10-45
Кузнецкий	10-50	5-30
Карагандинский	35-80	15-40
Печорский	70-130	15-40

К настоящему времени выполнен значительный объем натурных и лабораторных исследований, позволяющий выявить ряд особенностей в проявлениях горного давления при труднообрушающихся кровлях. Прежде всего следует отметить отличие по сравнению с обычными условиями в характере формирования и проявлениях горного давления в периоды до первой осадки труднообрушающегося слоя пород, при первой его осадке, между последующими осадками и при последующих осадках.

В первый период работы лав (до первой осадки труднообрушающихся пород) деформации кровли над забоем незначительны. Смещения кровли небольшие и не превышают податливость металлических индивидуальных крепей до достижения рабочего сопротивления [12, 13]. Механизированные крепи работают в режиме начального распра [14].

Шаг обрушения непосредственной кровли до первой осадки труднообрушающихся пород основной кровли в 2-3 раза превышает размеры шага ее обрушения в периоды между последующими осадками основной кровли [15].

Труднообрушающиеся породы по мере подвигания забоя расслаиваются [13]. Предельные площади их обнажения до первого обрушения колеблются в широких пределах от 1000 до 20000 м<sup>2</sup>. Установлено, что размеры предельных обнажений уменьшаются с увеличением длины лавы и мощности пласта [12].

При первых осадках труднообрушающихся кровель наблюдаются наиболее интенсивные проявления горного давления. Интенсивность проявлений первых осадок в значительной степени зависит от шага первого обрушения и

мощности легкообрушающихся или средней обрушаемости пород непосредственной кровли. В Кузбассе, где шаг первого обрушения кровель меньше, чем в других бассейнах, величины смещений и нагрузок на крепь при использовании достаточно жесткой посадочной крепи не превышают допустимых величин. В других бассейнах осадки труднообрушающихся пород происходят более интенсивно. Так, в Печорском бассейне появление трещин разлома труднообрушающихся споев пород наблюдалось на расстоянии 1,0–3,0 м впереди забоя. При этом происходит развитие трещиноватости, а иногда и разрушение непосредственной кровли, появляются заколы, опережающие забой от 0,3 до 1,5 м. Причем характер деформирования кровли изменяется незначительно при мощности пластов 1,3–2,2 м, мощности непосредственной и основной кровель соответственно 0–4,0 и 4,0–20,0 м, глубине работ от 200 до 260 м [15].

Смещения и нагрузки на крепь определяются опусканием труднообрушающейся кровли, особенно ее нижних споев толщиной до 2–3 мощностей пласта [13]. Смещения кровли, которые происходят практически мгновенно, достигают у забоя 200–300 мм, а на границе призабойного пространства 400–500 мм. При недостаточной податливости крепи происходят деформация крепи и завалы пав. Нагрузка на крепь на 25–50 % выше их несущей способности [14, 16], что приводит к посадке крепи "на жестко". Наиболее интенсивные проявления первых осадков труднообрушающихся пород основной кровли имеют место при мощности непосредственной кровли, не превышающей мощность пласта. В этих условиях смещения кровли возрастают в 3–5 раз. Максимальная скорость опускания кровли, замеренная в шахте, составляет 125 мм/с [17], а стойки механизированной крепи достигают рабочего сопротивления за 30–40 мин [14]. В лабораторных условиях скорость смещений, определенная с помощью осциллографов, составила 150 мм/с [18].

При обрушении кровля смещается практически мгновенно – со скоростью до 600 мм/с [9].

В периоды между последующими осадками несущая способность кровли за счет расслоения и развития трещиноватости значительно ниже, чем перед первым обрушением труднообрушающихся пород. В непосредственной кров-

ле над призабойным пространством систематически возникают наклонные трещины и образуются блоки. Наклонные трещины возникают на расстоянии до 1 м впереди забоя. Угол наклона трещин изменяется от  $50^\circ$  до  $70^\circ$  и в среднем составляет  $65-67^\circ$ . Образование трещин вызвано проходкой комбайна и интенсивным смещением кровли. Разрушение непосредственной кровли происходит на всю мощность до контакта с более прочными породами основной кровли. Расстояния между трещинами в направлении, перпендикулярном линии забоя, определяются петрографическим составом, мощностью и прочностью пород кровли, а также глубиной захвата выемочного механизма. В большинстве случаев это расстояние весьма близко к глубине захвата выемочного механизма. С увеличением прочности пород оно увеличивается. При увеличении мощности слоя непосредственной кровли образование трещин вначале возрастает, а затем замедляется.

Над призабойным пространством происходит ступенчатое опускание непосредственной кровли. В процессе отработки кровля размером до 5 мощностей пласта распаивается по контактам ослабления [19]. В выработанном пространстве непосредственная кровля обрушается, либо образуется арочная система блоков длиной 8-10 м, которая периодически резко проседает вследствие проскальзывания блоков относительно друг друга [9, 10].

Смещения в период между разрушениями арок не превышают величин, при которых кровля над крепью сохраняет несущую способность, а нагрузки на крепь значительно ниже ее рабочего сопротивления.

При проседании арочных систем непосредственной кровли смещения и нагрузки на крепь резко возрастают. Смещения кровли в призабойном пространстве возрастают до 350 мм. При этом наблюдается разрушение индивидуальных стоек трения. Сопротивление посадочных крепей ОКУМ изменяется от 180 - 200 до 900 кН на стойку. Сопротивление механизированной крепи поддерживающего типа возрастает от 100 до 400 кН/м<sup>2</sup>, т.е. до номинального [9].

Проседание арок часто сопровождается последующими осадками основной кровли, при которых наблюдаются расслоения и закопы пород непосредственной кровли. Обрушение кровли в выработанном пространстве при осадках

происходит послойно по поверхностям естественных трещин. Высота зоны обрушения достигает 6–8 мощностей пласта [20]. Непосредственная кровля и нижние спои основной кровли мощностью до 2 мощностей пласта обрушаются неупорядоченно. Опускание вышележащих споев пород упорядоченное. Площадь предельных обнажений перед последующими обрушениями примерно в 1,5 раза меньше, чем при первых осадках. Шаг последующих обрушений уменьшается с увеличением мощности пласта [12] и глубины разработки. Выявлено, что с увеличением глубины разработки от 160 до 400 м отношение шага обрушения к мощности нижнего слоя труднообрушающейся кровли уменьшается с 2 до 0,7 [9].

При расположении труднообрушающихся пород в непосредственной кровле максимальные смещения кровли в призабойном пространстве во время вторичных осадков превышают величины смещений в периоды между осадками в 2–3 раза, достигая значений, при которых теряется несущая способность пород. Сопротивление механизированной крепи достигает рабочего значения в течение 1–2 ч, а после того, как податливость крепи будет исчерпана, происходит ее посадка "на жестко" [14].

Скорость смещения кровли, как показали лабораторные исследования, достигает 250 мм/с. Продолжительность резких смещений составила 0,01–0,30 с [9]. Скорость смещения выдвигных частей крепи достигает 40–100 мм/с в интервале податливости 50 мм [21].

Необходимо отметить, что интенсивность последующих осадков зависит от строения, шага обрушения и мощности пласта. В качестве критерия используется коэффициент интенсивности осадков основной кровли  $K_n$  [6].

$$K_n = \frac{h_0 f_0 (m + h_n)}{h_n k_n},$$

где  $h_0 f_0$  – соответственно мощность и коэффициент крепости пород основной кровли;  $m$  – мощность пласта;  $h_n$ ,  $k_n$  – мощность и коэффициент разрыхления пород непосредственной кровли.

Анализируя данные о проявлениях горного давления в очистных выработках с труднообрушающимися кровлями, представляется возможным сделать следующие выводы.

1. Существующие определения труднообрушающихся кровель, являющихся частным случаем трудноуправляемых, весьма разнообразны. Труднообрушающимися принято считать кровли, при которых в очистной выработке возможны резкие проявления первых и последующих осадок труднообрушающихся пород. Существенное влияние на характер проявлений горного давления оказывают литолого-петрографическое строение кровли, прочностные и деформационные свойства пород непосредственной и основной кровли, мощность пласта.

2. К труднообрушающимся кровлям относятся такие, у которых непосредственная кровля представлена легкообрушающимися и породами средней обрушаемости мощностью соответственно не более 3,5 и 5,0 мощностей пласта, а основная — труднообрушающимися или весьма труднообрушающимися мощностью, превышающей трехкратную мощность пласта.

3. В непосредственной кровле большинства угольных пластов залегают аргиллиты и алевродиты с пределом прочности на сжатие 25–80 МН/м<sup>2</sup>. Примерно одна треть пластов имеет в непосредственной кровле труднообрушающиеся породы, которые представлены главным образом песчаниками, реже алевролитами и аргиллитами, а в Донбассе известняками. Прочность этих пород на сжатие превышает 60–80 МН/м<sup>2</sup>. Мощность разрабатываемых пластов с труднообрушающейся кровлей составляет преимущественно 1–2 м.

4. До первых осадок труднообрушающихся споев деформации и смещения кровли, а также нагрузки на крепь незначительны. В периоды между последующими осадками несущая способность кровли снижается за счет развития трещиноватости. В связи с этим смещения кровли и нагрузки на крепь возрастают, однако максимальные их значения не превышают податливости и рабочего сопротивления индивидуальных и механизированных крепей.

Первые и последующие осадки труднообрушающихся пород сопровождаются значительными проявлениями горного давления в очистном забое. Интенсивность проявлений первых осадок выше, чем последующих в связи с различием шагов обрушения прочных споев. Установлено, что шаг первого и последующих обрушений уменьшается с увеличением глубины и мощности пласта. Существенное влия-

ние на смещения кровли в забое и формирование нагрузки на крепь оказывает непосредственная кровля и нижние слои труднообрушающихся пород мощностью, равной 2–3 мощностям пласта.

Наиболее интенсивные проявления осадок прочных споев кровли происходят при отношении мощности непосредственной кровли к мощности пласта менее двух.

5. Смещения кровли и давление на крепь определяются характером разрушения кровли и параметрами крепи. При первых осадках смещения и нагрузки на крепь увеличиваются в 3 раза и более, в период последующих – более чем в 2<sup>1</sup> раза по сравнению с этими параметрами до первого и между последующими осадками. Смещения у забоя иногда достигают 200–300 мм, а на границе поддерживаемого пространства составляют 400–500 мм и часто превышают раздвижность крепи. Вследствие этого происходит посадка ее "на жестко".

6. Первые и последующие осадки труднообрушающихся споев характеризуются также высокими скоростями перемещения кровли. В особо тяжелых условиях смещения кровли происходят практически мгновенно. В лабораторных условиях максимальные замеренные скорости смещений составили: при первых осадках – 600 мм/с, при последующих – 250 мм/с. Величины скоростей, замеренные в шахтных условиях, не превышали 125 мм/с.

7. Величины нагрузок на крепь в период первых и последующих осадок зависят от характеристики крепи и перемещений кровли. В рассматриваемые периоды параметры широко применяемых в настоящее время крепей не обеспечивают эффективное управление горным давлением. Это связано в основном с недостаточным начальным распором, сопротивлением и раздвижностью крепи. Наиболее тяжелые условия поддержания призабойного пространства возникают в период разрушения труднообрушающихся споев по заколам, возникающим впереди забоя на расстоянии 1,3–3,0 м. В непосредственной кровле закопы и трещины часто опережают забой на 0,3–1,5 м.

## § 2. Способы и средства управления горным давлением

Основной задачей управления горным давлением в очистных забоях с труднообрушающейся кровлей является снижение интенсивности проявлений горного давления при

осадках кровли. Это обеспечивается полным обрушением кровли с применением специальных мер по предотвращению резких осадок кровли, закладкой выработанного пространства или оставлением цепиков.

В настоящее время наиболее широко применяется способ управления кровлей полным обрушением. При этом для предотвращения проявлений осадок труднообрушающейся кровли в призабойном пространстве необходимо либо воздействовать на массив одним из описываемых ниже способов, либо применять крепь с параметрами, соответствующими естественному поведению кровли.

Особенность способов управления горным давлением путем воздействия на массив состоит в том, что представляется возможным обеспечить разрушение кровли с определенным шагом обрушения и некоторой мощностью, при которых крепь с известными параметрами обеспечит поддержание кровли в призабойном пространстве. Среди этих способов известны [2]: передовое торпедирование, гидравлическая обработка кровли, взрывогидрообработка, принудительная первичная посадка кровли.

В основе способа передового торпедирования кровли лежит разрушение кровли взрывом впереди очистного забоя [2, 6]. В результате образуется зона трещиноватости. При подходе очистного забоя в этой зоне и над призабойным пространством происходит дальнейшее развитие деформаций кровли. Эффективность передового торпедирования зависит от расположения скважин и размеров зоны трещиноватости. Основными требованиями к расположению скважин являются обеспечение некоторой мощности нетронутой взрывом пачки пород над пластом и максимально допустимое удаление забоя скважины от пласта. Это нужно для того, чтобы, не разрушая непосредственной кровли, обеспечить необходимое ослабление основной кровли. При применении передового торпедирования снижение интенсивности проявлений горного давления обеспечивается благодаря искусственно вызванным первым и последующим осадкам кровли с заданным шагом обрушения.

Опыт применения этого способа на шахтах Карагандинского бассейна показал, что интенсивность проявлений осадок кровли в очистном забое существенно снизилась, а зависаний труднообрушающихся споев пород в выработанном пространстве не наблюдалось. Величины смещений кровли при первых осадках уменьшились на 37–50% и по-

следующих на 30%. Максимальные величины смещений наблюдались при переходе забоем плоскостей торпедирования. Применение данного способа обеспечивает возможность ликвидации внезапных осадок и вызов осадок кровли с заданной интенсивностью, что позволяет применять серийно выпускаемые крепи с обычными параметрами.

Однако предлагаемые параметры способа передового торпедирования [2, 6] не охватывают всего диапазона условий разработки пластов с труднообрушающимися кровлями.

Основными вопросами остаются: определение высоты зоны необходимого ослабления и установление размеров предельного шага обрушения кровли в различных условиях в зависимости от глубины разработки, длины очистного забоя, мощности пласта, структуры, строения и прочностных свойств кровли, а также формирования горного давления и его влияние на развитие зоны трещиноватости в различных условиях.

Гидравлическая обработка породного массива через скважины, пробуренные впереди забоя, приводит к снижению прочностных свойств пород ослабленного массива по трещинам и межслоевым контактам за счет увлажнения и гидроразрыва [2, 5]. В результате уменьшаются размеры зависающих консолей и изменяется характер разрушения кровли в выработанном пространстве.

Эффективность гидравлической обработки определяется: фильтрационными свойствами массива и характеристиками оборудования, используемого для нагнетания жидкости, схемами и параметрами заложения нагнетательных скважин, параметрами и режимами обработки. На основании экспериментальных исследований в Печорском бассейне установлено, что возможность применения данного способа определяется прежде всего коэффициентом проницаемости, характеризующим фильтрационные свойства массива, и соответствующими характеристиками нагнетательного оборудования — производительностью и напором.

Разработан ряд схем заложения скважин и режим гидроразработки — для первичной и последующих осадок кровли. К параметрам заложения скважин относятся: необходимая высота превышения забоя скважины над пластом, угол подъема и длина скважин, расстояние между скважинами. Высота превышения забоя скважины над пластом

рассчитывается, исходя из минимальной высоты превышения скважины над средней частью лавы, которая определяется из условия мощности слоев пород, участвующих в формировании нагрузки на крепь.

Угол подъема и длина скважины определяются из геометрических расчетов с учетом превышения забоя скважины над пластом, угла разворота скважины относительно выработки, из которой производится бурение, а также размеров обрабатываемого участка. Угол разворота скважины выбирается с учетом простирания природной трещиноватости и угла между направлением трещиноватости и линией очистного забоя. Для пересечения максимального количества трещин необходимо обеспечить угол между направлением оси скважин и простиранием природной трещиноватости, равный  $40-45^\circ$ . Расстояние между скважинами принимается в зависимости от мощности пород основной кровли.

Режим гидрообработки зависит от напряженного состояния пород впереди очистного забоя. Низконапорное увлажнение рекомендуется впереди зоны опорного давления, гидроразрыв — в зоне опорного давления, в области максимального сжатия пород, а в остальной части зоны опорного давления осуществляется высоконапорное увлажнение. В результате гидрообработки массива улучшается состояние кровли в призабойном пространстве: закопы и обрезы крепи при осадках труднообрушающихся пород не образуются, шаг обрушения прочных слоев пород снижается в 1,3-1,8 раза, смещения и нагрузки на крепь уменьшаются соответственно в 1,3-1,5 и 1,2-1,4 раза.

Рассмотренный способ управления горным давлением, разработанный в результате экспериментальных исследований в Печорском бассейне, обеспечивает возможность применения существующих крепей. Для определения области его применения необходимо иметь сведения о литологическом составе, мощности и прочности непосредственной и основной кровли, расположении и прочности ослабленных контактов по напластованию, направлениях и интенсивности породной трещиноватости. В некоторых условиях: при большой трещиноватости прочных слоев, неустойчивых породах непосредственной кровли, незначительной фильтрационной способности весьма прочных монолитных труднообрушающихся пород — применение этого способа ограничено.



Для широкого распространения данного способа в других бассейнах необходимо разработать методику определения мощности пород, формирующих нагрузку на крепь в различных условиях. Это позволит обоснованно выбирать параметры заложения скважин. Следует разработать также методику установления размеров зоны опорного давления, характера и величины распределения нагрузки массива в этой зоне с целью определения областей оптимальных режимов обработки массива впереди очистного забоя. Весьма важно выявить взаимосвязь между снижением прочностных свойств пород при гидрообработке, шагом обрушения кровли и интенсивностью проявлений горного давления.

Взрывогидрообработка кровли — это комбинация способов передового торпедирования и последующего увлажнения массива гидравлической обработкой впереди очистного забоя [2]. Данный способ еще недостаточно испытан на шахтах, поэтому подробно не рассматривается.

Способ принудительной посадки заключается в разрушении взрывом кровли в выработанном пространстве для исключения влияния первых осадок труднообрушающихся слоев пород [2, 13, 22]. Для этого в труднообрушающемся слое кровли параллельно линии забоя пробуриваются отдельные скважины или серия скважин. Взрывание осуществляется на некотором расстоянии от забоя, соответствующем минимально допустимой площади обнажения кровли, на глубину, равную мощности пород, обрушающихся при первой осадке труднообрушающегося слоя. В результате взрыва шаг первого обрушения кровли уменьшается. После принудительного обрушения кровли ее смещения и нагрузки на призабойные и посадочные стойки возрастали, однако их значения не превышали допустимых величин [13]. В настоящее время еще недостаточно изучен и обоснован в различных горнотехнических условиях выбор таких основных параметров этого способа, как высота зоны разрушения кровли и расстояние в выработанном пространстве от забоя и целика до линии обрушения.

Рассмотренные способы управления горным давлением при труднообрушающихся кровлях относятся к наиболее современным и прогрессивным, но отличаются высокой трудоемкостью. Применение таких известных способов, как закладка выработанного пространства и оставление целиков, весьма нерационально, однако встречается в

практике горных работ, когда другие способы не обеспечивают необходимых условий в очистном забое. При применении закладки, как и при управлении кровлей полным обрушением, во время первых и последующих осадков труднообрушающихся пород имеют место более интенсивные по сравнению с периодами между осадками проявления горного давления, в частности, величины и скорости смещений. Абсолютные значения этих величин при закладке меньше, чем при обрушении. Это происходит в связи с меньшими деформациями крепи при заполнении выработанного пространства, где общее опускание массива уменьшается за счет уплотненных бутовых полос примерно на 50% [10]. Характерно, что предельные значения площадей обнажений труднообрушающихся пород при применении закладки выше, чем при способе полного обрушения [12].

Экспериментальные исследования и практика показывают, что наиболее эффективным средством управления горным давлением в очистных выработках с труднообрушающимися кровлями является применение крепей с параметрами, соответствующими естественному поведению кровли.

При применении индивидуальных крепей для снижения интенсивности проявлений первых и последующих осадков труднообрушающихся слоев пород повышается сопротивление посадочных стоек. При этом необходимо обеспечить обрушение кровли за пределами поддерживаемого пространства за счет перемещения опоры в процессе изгиба кровли от забоя на посадочную крепь. Эффективность этого способа зависит от характеристики посадочной крепи, прочностных и деформационных свойств кровли и почвы. Наиболее целесообразным является применение этих крепей на пластах угля, непосредственная кровля и почва которых представлены прочными и средней прочности породами [10, 23], так как весьма важную роль играет жесткость крепи. При высокой жесткости крепи происходит разрушение кровли или почвы либо деформация крепи. Например, при применении экспериментальной крепи МОС наблюдалась ее деформация и происходили завалы лав вследствие заколов в кровле. Замеренные величины давления на посадочные стойки достигали 20–25 МН/м<sup>2</sup>. В то же время при давлениях более 7–10 МН/м<sup>2</sup> либо кровля над опорами деформировалась, либо крепь внедрялась в почву [10]. При залегании в непосредственной кровле легкообрушающихся слабых пород повышение сопротивления посадочного ряда

крепи неэффективно в связи с тем, что посадочная крепь практически не оказывает влияния на поведение труднообрушающихся пород основной кровли. Сопро́тивление крепи влияет на состояние кровли мощностью, равной примерно 3,5 мощности пласта от контакта с крепью [12].

Большое значение имеет режим работы посадочной крепи в начальный период после перестановки, когда происходит набор рабочего сопротивления. В этот период разрушение кровли над призабойным пространством может произойти при недостаточном начальном сопротивлении крепи. В таком случае применяют двухрядные посадочные крепи [23] с поочередной передвижкой рядов. При перестановке одного ряда другой работает в режиме рабочего сопротивления.

Однако, учитывая вероятность разрушения кровли по линии забоя и низкое сопротивление призабойной крепи, управление труднообрушающейся кровлей с помощью индивидуальной посадочной крепи не обеспечивает надежного поддержания труднообрушающейся кровли. Увеличение плотности индивидуальной крепи также не обеспечивает безопасность работ.

В индентичных условиях при применении обычных механизированных крепей осадки труднообрушающейся кровли проявляются менее интенсивно, хотя при передвижке механизированной крепи производится полная разгрузка кровли [16]. Это связано с повышенным по сравнению с индивидуальными крепями начальным и рабочим сопротивлением и значительно меньшим давлением на почву и кровлю. Однако сопротивление этих механизированных крепей при трудноуправляемой кровле также недостаточно. Для условий Печорского бассейна предложено увеличить величину предварительного распора серийно выпускаемых механизированных крепей в 2 раза, а их рабочее сопротивление в 1,5–1,8 раза [16].

Исследования механизированных крепей повышенного сопротивления, выполненные сотрудниками ИГД им. А.А. Сковчинского, показали, что для успешного поддержания труднообрушающейся кровли необходимо повышение рабочего сопротивления крепи в 2 раза [24]. При последовательном повышении сопротивления крепи поддерживающего типа М-87Э с 374 до 750 кН/м<sup>2</sup> изменялся характер проявлений горного давления: смещения кровли уменьша-

пись на 35–40%; непосредственная кровля и нижние слои основной разрушались на блоки; размеры которых по простиранию увеличивались, а при определенном сопротивлении крепи, в период между последующими осадками труднообрушающихся пород, такого разрушения вообще не наблюдались; длина зависания разрушенных пород основной кровли в выработанном пространстве уменьшалась, а также снижалась интенсивность последующих осадков основной кровли. При сопротивлении крепи  $750 \text{ кН/м}^2$  предотвращаются просадки крепи "на жестко" во время последующих осадков. Однако экспериментально не доказано, можно ли исключить появление закопов кровли над призабойным пространством.

Испытаниями на шахте "Распадская" производственного объединения "Южкузбассуголь" экспериментальной крепи УКП с повышенным рабочим сопротивлением  $1100 \text{ кН/м}^2$  подтверждена возможность обеспечения эффективного управления горным давлением при труднообрушающихся кровлях крепями оградительно-поддерживающего типа.

Повышение рабочего сопротивления крепи приводит к снижению динамических давлений в ее гидросистеме, так как уменьшаются величина и скорость смещения кровли [9]. Снижению этих величин способствует сближение начального и рабочего сопротивления крепи [18], обеспечивающее минимальное расслоение кровли.

Однако повышения общего рабочего сопротивления и начального распора недостаточно для исключения проявления осадков труднообрушающихся пород (повышенные по сравнению с типичными условиями величины и скорости смещений, появление закопов и трещин в непосредственной кровле). Для решения этой задачи кроме этого необходимо обеспечить:

податливость и скорость перемещения выдвигной части крепи, соответствующие максимальным величинам и скоростям смещений кровли при осадках труднообрушающихся пород;

соответствующее поддержание призабойного пространства при наличии трещин и закопов в кровле и максимальной концентрации нагрузок на перекрытие.

Этим предъявляются дополнительные требования к сопротивлению крепи по ширине поддерживаемого пространства, прочности перекрытий и работе гидросистемы крепи.

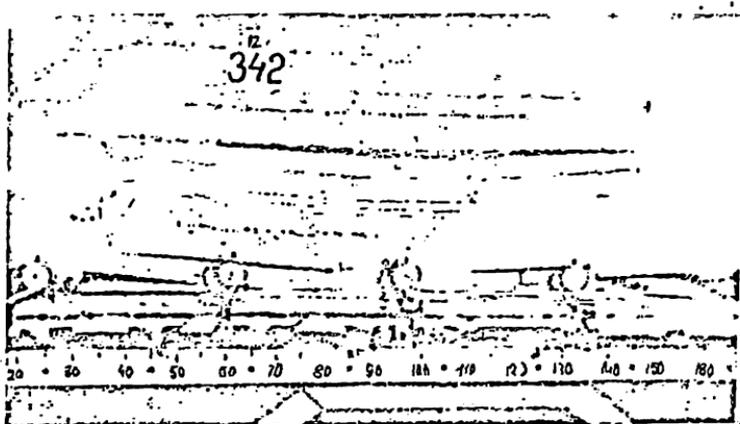
Для определения рациональных параметров крепи необходимо установить взаимосвязь между поведением кровли и параметрами крепи в зависимости от строения, прочностных и деформационных свойств кровли и мощности пласта под влиянием различных горнотехнических факторов.

### § 3. Экспериментальные исследования проявлений горного давления и взаимодействия механизированных крепей с кровлей

Проявления горного давления при труднообрушающихся кровлях в значительной степени определяются расположением арочного свода относительно угольного пласта, его мощностью, глубиной разработки, мощностью пласта, а также параметрами крепи.

Исследования механизма формирования горного давления и влияния вышеуказанных факторов на напряженно-деформированное состояние вмещающих пород и угольного пласта проводились на моделях из эквивалентных и оптически активных материалов по методикам, разработанным в ИГД им. А.А. Скочинского [25, 26]. В качестве эквивалентных материалов применялись песчано-парафиновые и песчано-гипсовые смеси. Моделирование полярizationsно-оптическим методом осуществлялось с помощью оптически активного материала — эпоксигеля [27]. Прочностные и деформационные свойства материалов рассчитывались из условий силового и геометрического подобия.

Масштаб моделирования выбирался в соответствии с решаемыми вопросами и изменялся от 1:20 до 1:100. Характер разрушения кровли и проявлений горного давления при различном расположении и мощности прочного свода изучался на моделях из песчано-парафиновых смесей, имитирующих натуру в масштабе 1:100 при выемке пласта мощностью 1,2 м с прочностью угля 20 МН/м<sup>2</sup> (рис. 1). Структура кровли изменялась таким образом, чтобы можно было получить наиболее обобщающую качественную картину особенностей проявлений горного давления при труднообрушающихся кровлях. Исследовалось состояние кровли в зоне опорного давления, над призабойным и в выработанном пространствах при первом и последующих обрушениях



*Рис. 1. Формирование зоны обрушения в выработанном пространстве*

прочного слоя. В каждой модели определились размеры зон опорного давления и разгрузки, величина и коэффициент концентрации давления в массиве и выработанном пространстве, шаг обрушения основной кровли и интенсивность нагружения забоя во время осадок труднообрушающегося слоя кровли.

Условия моделирования процессов формирования горного давления и полученные результаты представлены в табл. 3.

Исследования показали, что независимо от мощности легкообрушающейся непосредственной кровли характер разрушения массива до первой осадки не изменяется. При отходе от разрезной печи происходит обрушение непосредственной кровли вслед за подвиганием забоя. До определенных размеров пролета основная кровля сохраняет сплошность, а затем распаивается на два слоя. При дальнейшей выемке угля происходит поочередное обрушение нижнего и верхнего слоев труднообрушающихся пород, а затем всей вышележащей топки. Максимальная нагрузка на угольный пласт зафиксирована перед первым обрушением прочных пород. До их первой осадки давление в выработанном пространстве было весьма низким. После первого обрушения максимум опорного давления снижа-



7,5	40	30	100	27-38	30-40	1,70-1,87 1,50-1,67	1-2	20-30	$\frac{0,30-0,50}{0,95-0,97}$
2,5	40	15	100	20-28	60-70	$\frac{2,00-2,20}{1,50-1,72}$	4-7	35-40	$\frac{0,70-0,80}{1,13-1,18}$
-	-	15	100	22-30	70-80	$\frac{2,50-2,75}{2,00-2,16}$	10-23	40-50	$\frac{0,70-0,80}{1,67-1,84}$
-	-	5	100	18-25	60-70	$\frac{2,32-2,40}{2,00-2,04}$	5-7	20-30	$\frac{0,30-0,50}{1,10-1,13}$

Примечание.  $u$  - удельный вес пород;

$H$  - глубина разработки; максимальное давление  
представлено дробью, в числителе которой  
значения давления до осадки, в знаменателе -  
после осадки.

ется; а нагрузка на обрушенные породы непосредственной крепи в выработанном пространстве возрастает.

В периоды между последующими осадками труднообрушающихся пород при мощной легкообрушающейся непосредственной кровле обрушались сперва ее нижние слои, затем верхние. Основная кровля плавно прогибалась. Величина опорного давления после последующих осадок труднообрушающихся слоев пород изменялась несущественно. С уменьшением мощности непосредственной кровли она обрушалась полностью, последующие осадки основной кровли приводили к значительному перераспределению давления — нагрузка на призабойную часть угольного пласта снижалась, а в выработанном пространстве увеличивалась.

Характер разрушения прочного слоя кровли зависит от его мощности. Так при мощности 5 м происходит отслоение и обрушение труднообрушающегося слоя не всю мощность. При мощности 15 и 30 м прочный слой обрушается с расслоением. Следовательно, при мощной труднообрушающейся кровле повышенные смещения могут происходить в несколько этапов.

Проведенными исследованиями установлено, что на проявления горного давления при труднообрушающихся кровлях влияет наличие легкообрушающихся пород непосредственной кровли. При обрушении в выработанном пространстве непосредственная кровля снижает интенсивность сдвижения труднообрушающихся пород и влияет на параметры горного давления. С уменьшением мощности непосредственной кровли возрастает ширина зоны опорного давления, интенсивность нагружения призабойной части угольного пласта во время осадок кровли, величина давления в массиве и в выработанном пространстве. Максимальные значения этих параметров имеют место при отсутствии легкообрушающихся пород непосредственной кровли. Указанные параметры возрастают с увеличением мощности труднообрушающихся пород.

Шаг первого обрушения прочных пород явно снижается с уменьшением их мощности. Однако при последующих осадках между мощностью и шагом обрушения прочного слоя четкой зависимости не наблюдается. Мощность непосредственной кровли на первый и последующие шаги обрушения основной кровли прямого влияния не оказывает.

Приведенные результаты характеризуют проявления горного давления на глубине 100 м. Влияние глубины раз-

работки было исследовано на моделях из оптически активных материалов. Замеры напряжений при изменении глубины разработки до 1000 м показали, что коэффициент концентрации напряжений  $\tau_{xy}/\gamma H$  при этом уменьшается (рис. 2). Это означает, что напряженность кровли и угольного пласта с глубиной увеличивается, но непропорционально весу вышележащей толщи. Следовательно, с увеличением глубины разработки увеличиваются отжим угля, расслоение, разрушаемость и обрушаемость кровли.

Изучение формирования напряженного состояния кровли и угольного пласта показало, что наиболее существенное изменение напряжений происходит в окрестности забоя. Максимальные напряжения в угольном пласте имеют место на некотором расстоянии впереди забоя. В призабойном пространстве почва пласта свободна от давления. В выработанном пространстве напряжения постепенно возрастают и достигают величины  $\gamma H$  (рис. 3).

Максимальная концентрация напряжений в кровле наблюдается на контакте с угольным пластом вдоль линии очистного забоя. С удалением от пласта величина напряжений в сечении, перпендикулярном к плоскости пласта по линии забоя и над призабойным пространством, уменьшается (рис. 4). На некотором расстоянии от забоя, над пластом и в направлении выработанного пространства напряжения увеличиваются по мере удаления от поверхности кровли.

При расслоении кровли проявляется концентрация напряжений на границе плоскости расслоения, а распределение напряжений в непосредственной кровле становится аналогичным тому, которое наблюдается в консольно защемленных бапках (рис. 5). Однако вследствие трения име-

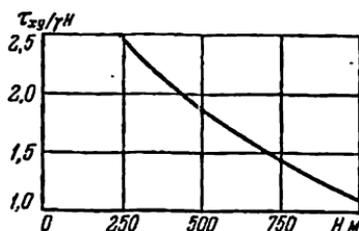


Рис. 2. Изменение коэффициента концентрации касательных напряжений с увеличением глубины разработки

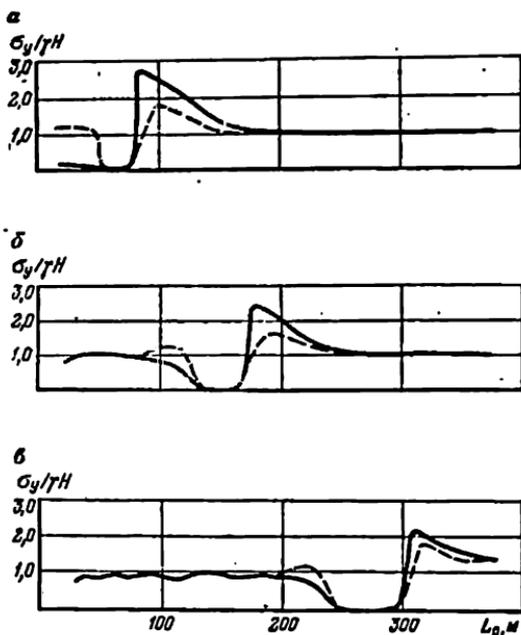


Рис. 3. Распределение коэффициента концентрации нормальных напряжений в непосредственной кровле на расстоянии от разрезной печи:

*a* – 80 м; *б* – 180 м; *в* – 300 м; сплошная линия – перед обрушением; штриховая – после обрушения труднообрушающихся пород

ются напряжения по контакту с вышележащим массивом и крепью. Следует отметить, что при отспоении непосредственной кровли напряжения в окрестности забоя, угольном пласте и кровле возрастают. При уменьшении мощности и длины зависающей консоли они уменьшаются.

Распоеение вышележащей основной кровли менее существенно влияет на напряженное состояние непосредственной кровли и угольного пласта.

При разрушении непосредственной кровли над крепью в период осадок прсисходит резкое изменение напряженного состояния массива вокруг очистного забоя: разрушенная часть кровли освобождается от напряжений, а напряженность в призабойной части пласта снижается. В случае разрушения основной кровли напряжения непосредственно вокруг забоя еще больше снижаются.

При выборе способов и средств управления труднообрушающимися кровлями необходимо учитывать особен-

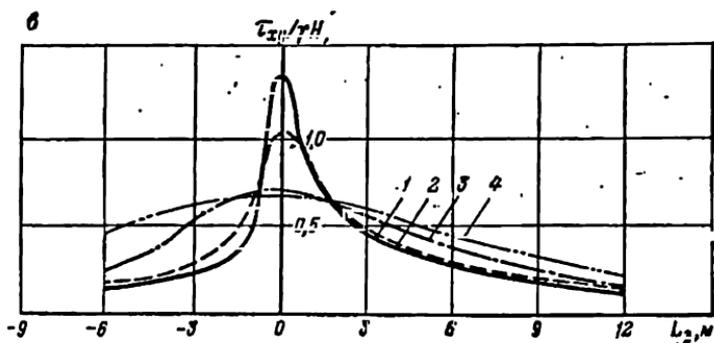
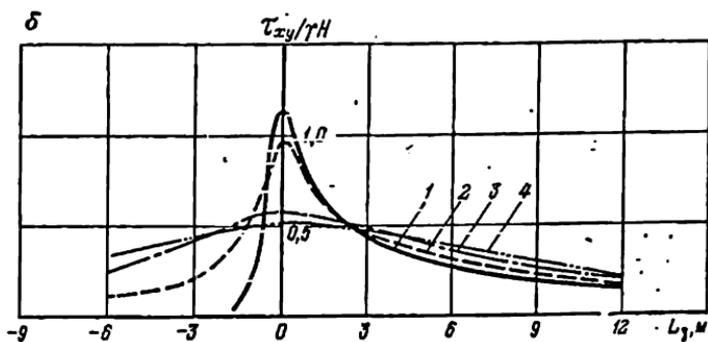
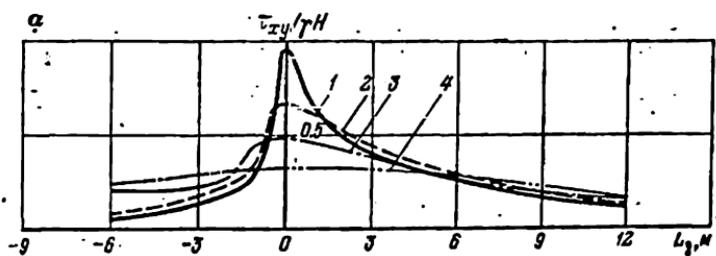
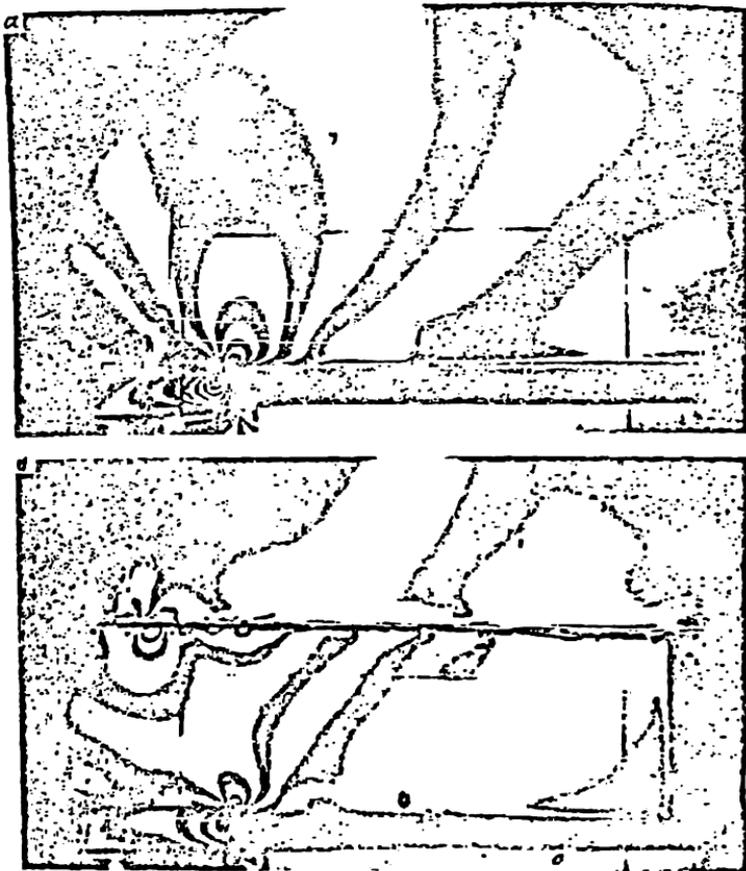


Рис. 4. Распределение коэффициента концентрации касательных напряжений в кровле при глубине разработки:

а - 500 м; б - 750 м; в - 1000 м; кривые 1-4 соответствуют расстояниям от пласта 0,25; 0,50; 2,00; 4,00 м.



*Рис. 5. Картина интерференционных полос в кровле очистной выработки:  
а – до отслоения непосредственной кровли; б – после отслоения*

ности их напряженно-деформированного состояния в периоды между осадками и во время осадок труднообрушающихся слоев пород.

Исследования влияния крепи на состояние и поведение

труднообрушающейся кровли на моделях из песчано-гипсовых и оптически активных материалов при изменении сопротивления от 500 до 1500 кН/м<sup>2</sup> позволили выявить некоторые закономерности взаимодействия крепи с кровлей.

На моделях из песчано-гипсовых смесей проводились исследования влияния механизированных крепей поддерживающего типа с удельным сопротивлением 500, 1000 и 1500 кН/м<sup>2</sup> при отработке угольного пласта мощностью 1,2 м с труднообрушающимися породами в непосредственной кровле мощностью 5 м (рис. 6). Труднообрушающиеся породы моделировались породами типа песчаника с пределом прочности  $\sigma_{сж} = 100 \text{ МН/м}^2$ , вышележащие слои — аргиллитами с  $\sigma_{сж} = 40 \text{ МН/м}^2$ . Для имитации крепления были использованы пружинные и гидравлические модели крепей, обеспечивающие возможность менять сопротивление в широких диапазонах.

Во всех моделях принята постоянная ширина поддерживаемого пространства — минимальная 3,4 м, максимальная 4,2 м. Во время отработки во всех моделях измеряли: смещение кровли, напряжения в почве пласта, опускание выдвигаемых частей крепи.

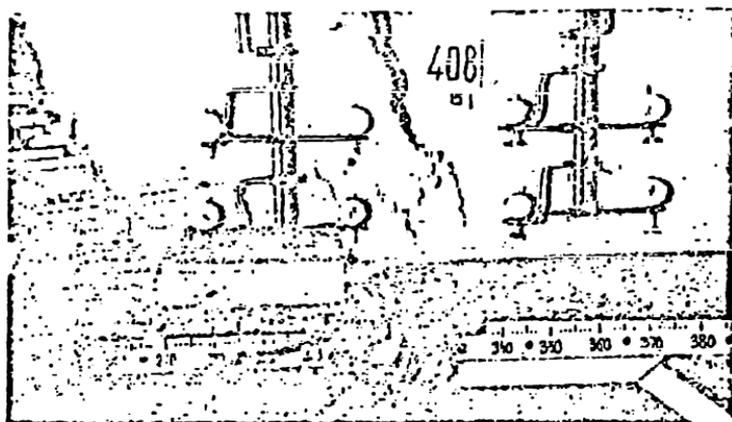


Рис. 6. Разрушение кровли при осадках труднообрушающихся пород

Испедования проводились при предварительном рас-  
поре, равном рабочему сопротивлению крепи. Замеры  
смешений производились в трудносбрушающей кровле  
и вышележащих сплех непосредственно над контактом.

В данных условиях зависения кровли перед первой осад-  
кой составили 31–38 м, а при последующих осадках 10–  
15 м. Смещения кровли над очистным забоем в проме-  
жутках между обрушениями незначительны, но посте-  
пенно возрастают по мере подвигания забоя. Перед обру-  
шением смещения кровли и концентрация напряжений  
впереди очистного забоя достигают максимума.

При работе с сопротивлением  $500 \text{ кН/м}^2$  (800 кН на  
стойку) зафиксированы следующие проявления горного  
давления. Максимальная величина опорного давления пе-  
ред первым обрушением кровли составляет (2,16–2,42) ун.  
На расстоянии 2,4–2,8 м впереди забоя наблюдается от-  
жим угля. Смещения над пластом угля составляют 40–  
60 мм. Смещения нижних сплех кровли в призабойном  
пространстве над последним рядом крепи достигли 160–  
200 мм, а верхних 108–142 мм, что указывает на  
распоевание крепи. Трещина обрушения во время осадок  
кровли образуется в целике угля. Во время осадок прои-  
ходит резкий облом зависающей консоли и обрушение вы-  
шележащей кровли, затем – смещения непосредственной  
кровли с динамическими ударами. Смещения кровли резко  
увеличиваются, а крепь, исчерпав свою податливость, пре-  
вращается в "жесткую". После обрушения кровли прои-  
ходит перераспределение давления между массивом и вы-  
работанным пространством. Опорное давление снижается  
до (1,89–2,01) ун, т.е. на 15–20%.

С увеличением сопротивления крепи до  $1000 \text{ кН/м}^2$   
(1600 кН на стойку) максимальное давление в массиве  
перед обрушением основной кровли возросло по сравнению  
с предыдущим случаем и колебалось в пределах (2,24–  
2,70) ун. Максимум напряжений находился в целике угля  
на расстоянии 0,8–1,2 м от забоя, т.е. зона отжима  
приближалась к забою. Несколько изменился характер де-  
формации кровли. Смещения кровли уменьшились: в цели-  
ке составили 5–20 мм, в нижнем сплехе над задним ря-  
дом крепи – 45–60 мм, в верхнем сплехе – 20–45 мм. Од-  
нако как над призабойным пространством, так и в целике  
угля имеет место распоевание крепи. Трещина обрушения

в массиве угля появилась только при первой осадке. Условия работы крепи несколько улучшились, выдвигная часть крепи опустилась "на жестко" лишь в одном случае — при первой осадке основной кровли. Опорное давление в массиве после обрушения кровли снизилось на 18–25% и составило (2,08–2,12) уН.

При применении крепи с сопротивлением  $1500 \text{ кН м}^2$  (2400 кН на стойку) резко изменился характер проявлений горного давления. Смещения пород кровли не превышали 14–60 мм. Расслоение кровли в массиве и призабойном пространстве не наблюдалось, но давление в гидросистеме повысилось до 3000 кН. Посадка кровли была плавной, без динамических ударов. Трещина обрушения во время первой и последующих осадок блока модели проходила у задней части верхняка над последним от забоя рядом крепи. Крезь не исчерпала податливости и сохраняла работоспособность.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что при недостаточном сопротивлении крепи во время осадок труднообрушающихся споев пород происходит раздавливание угольного пласта в зоне опорного давления, отслоение и разрушение нижних споев кровли. Путем повышения сопротивления крепи можно уменьшить расслоение кровли, а при определенном сопротивлении обеспечить сохранение сплошности кровли над крепью. Однако предотвращение расслоения кровли не является основным условием для обеспечения обрушения кровли за пределами поддерживаемого пространства.

Повышение сопротивления крепи при расположении в непосредственной кровле труднообрушающихся пород, как показали замеры напряжений на моделях из оптически активных материалов, приводит к увеличению напряжений по контакту с перекрытием. Однако концентрация напряжений над ним ограничивается мощностью, равной 4–5 м. Напряжения в вышележащих труднообрушающихся споях пород практически не изменяются. В случае расположения в непосредственной кровле слабых по сравнению с основной кровлей пород и отслоения непосредственной кровли повышение сопротивления крепи приводит к заметному снижению напряжений в непосредственной кровле.

При разрушении кровли над призабойным пространством крепь работает в режиме заданной нагрузки и не изменяет напряженность кровли. Эксперименты показали, что равно-

весное состояние обеспечивается за счет взаимодействия блоков кровли с окружающими породами и крепью. При этом в зависимости от степени разрушения кровли существует оптимальное сопротивление крепи.

Влияние предварительного распора изучалось при рабочем сопротивлении крепи  $1000 \text{ кН/м}^2$  ( $1600 \text{ кН}$  на стойку) с двумя режимами: при начальном распоре 20 и 80% от рабочего сопротивления.

Характер обрушения кровли был аналогичен предыдущим моделям: по мере подвигания забоя длина зависающей консоли песчаника увеличивалась и при достижении предельного пролета происходило обрушение кровли.

При начальном распоре  $200 \text{ кН/м}^2$  во время осадок кровли трещина обрушения проходила по линии забоя. Сопротивление крепи достигло рабочего значения, но, несмотря на это, стойки полностью исчерпали свою податливость и превратились в "жесткие".

При переходе на начальный распор  $800 \text{ кН/м}^2$  крепь выходила на рабочее сопротивление в самом начале опускания образующейся консоли. Трещина обрушения при достижении предельных значений длины консоли проходила по последнему ряду крепи. Сравнивая величины смещений кровли при первом и втором режимах, следует отметить, что смещение нижнего слоя при втором режиме уменьшилось по сравнению с первым с 90–100 до 68–70 мм, а верхнего с 76–90 до 70–75 мм. Над призабойным пространством при предварительном распоре  $200 \text{ кН/м}^2$  наблюдалось расслоение кровли. Повышение величины предварительного распора увеличивает опорное давление и приближает расположение его максимума к линии забоя. Так, при первом режиме максимум давления был равен  $(1,78-1,85) \gamma H$  и находился на расстоянии 3,2–4,0 м от линии забоя, а при втором – он возрастал до  $(2,11-2,20) \gamma H$ , а расстояние его от линии забоя сократилось до 1,0–2,0 м. Опускания выдвигных частей стоек в промежутках между обрушениями незначительны и колеблются в пределах 3–5 мм. Опускание задней стойки всегда больше, чем передней. При приближении длины зависающей консоли труднообрушающихся пород к предельному пролету величины опускания выдвигных частей возрастают до 50–80 мм, после чего при первом режиме крепь становится "жесткой", а при втором эта величина достигает максимума и резко снижается после осадки.

Итак, при недостаточном предварительном распоре крепь во время осадок не успевает выйти на рабочее сопротивление. Повышение предварительного распора обеспечивает ускоренный выход крепи на рабочее сопротивление. Это способствует снижению расползания кровли над крепью. Повышение величины предварительного распора крепей поддерживающего типа до 80% от рабочего дает возможность при оптимальном сопротивлении крепи обеспечить поддержание кровли при осадках труднообрушающихся слоев пород.

Наряду с рассмотренными исследованиями на моделях из песчано-гипсовых смесей проводилось изучение влияния взаимодействия кровли с крепью легкообрушающихся неустойчивых пород непосредственной кровли и мощности пласта. В результате было установлено, что обеспечение обрушения основной труднообрушающейся кровли за пределами поддерживаемого пространства путем повышения сопротивления крепи при наличии неустойчивых пород непосредственной кровли весьма затруднительно. В процессе отработки пласта происходит расползание непосредственной кровли и отслоение ее от основной. Трещина обрушения основной кровли во время осадок проходила над линией забоя. Вместе с тем при определенном сопротивлении крепи в данном случае можно обеспечить поддержание кровли. Например, при мощностях пласта легкообрушающихся пород непосредственной кровли и труднообрушающихся пород основной кровли, соответственно равных 1,2; 2,4 и 5 м, величина необходимого сопротивления крепи составила  $600 \text{ кН/м}^2$ .

При увеличении мощности пласта до 2,2 м обрушенные породы занимали в выработанном пространстве более значительный объем. Шаг обрушения кровли уменьшился, однако максимальное давление впереди забоя возросло с 2,54 до 2,85  $\gamma H$ , а расположение максимума давления приблизилось к забою с 4 до 3 м. Сопротивление крепи, необходимое для поддержания кровли в момент осадки, возросло при прочих равных условиях до  $900 \text{ кН/м}^2$ .

При отработке пласта мощностью 3,0 м в аналогичных условиях рабочее сопротивление, при котором обеспечивается поддержание кровли в период осадок ее над крепью, было повышено до  $1100 \text{ кН/м}^2$ .

Проведенные лабораторные исследования проявлений горного давления на моделях из эквивалентных и оттиче-

ски активных материалов позволили сделать ряд выводов об особенностях напряженно-деформированного состояния труднообрушающихся кровель и их взаимодействия с крепью.

1. Наибольшая интенсивность проявлений горного давления характерна для первой осадки труднообрушающейся кровли. Мощностъ труднообрушающихся пород кровли оказывает основное влияние на шаг обрушения при первой осадке — с ее увеличением шаг обрушения возрастает.

2. Динамические явления во время разрушения труднообрушающихся пород кровли вызываются повышением напряжений вблизи очистного забоя. Максимальная концентрация напряжений имеет место на контакте кровли с угольным пластом вдоль линии очистного забоя. Над пластом и над призабойным пространством с удалением от поверхности кровли величины напряжений уменьшаются.

3. Основной причиной повышения напряжений вблизи очистного забоя является увеличение длины консоли основной кровли, зависающей над выработанным пространством, и отсутствие достаточной толщи разрушенных пород непосредственной кровли в выработанном пространстве.

4. С увеличением мощности неустойчивой легкообрушающейся непосредственной кровли величина опорного давления и интенсивность нагружения призабойного пространства снижаются, препятствуя возникновению динамических явлений при разрушении труднообрушающихся пород основной кровли.

5. С увеличением глубины разработки и мощности пласта концентрация напряжений в зоне опорного давления увеличивается, способствуя разрушению кровли.

6. Повышение сопротивления крепи способствует увеличению сжимающих напряжений в нижних спяках непосредственной кровли над крепью и сдерживает расслоение непосредственной кровли в пределах поддерживаемого пространства. При высоком сопротивлении крепи и залегании труднообрушающихся пород непосредственно над пластом кровля в период осадок обрушается в выработанном пространстве за крепью. Заколы кровли вдоль забоя отсутствуют. Осадки труднообрушающихся пород происходят без динамических ударов.

7. Для поддержания кровли в призабойном пространстве в период осадок труднообрушающихся пород над крепью

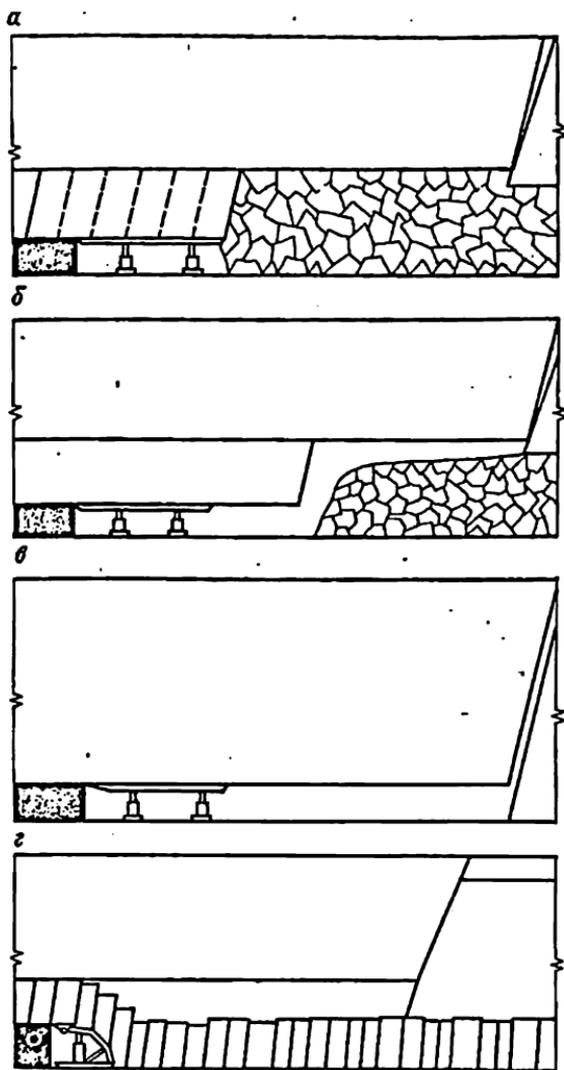
требуется более низкое сопротивление крепи по сравнению с необходимым для обеспечения обрушения кровли в выработанном пространстве. Однако при этом крепь должна воспринимать динамические нагрузки и перемещения кровли. Начальный распор крепи должен составлять не менее 80% от рабочего сопротивления.

## ГЛАВА II. РАСЧЕТ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТРУДНООБРУШАЮЩИХСЯ КРОВЛЯХ

### § 1. Выбор методики расчета проявлений горного давления

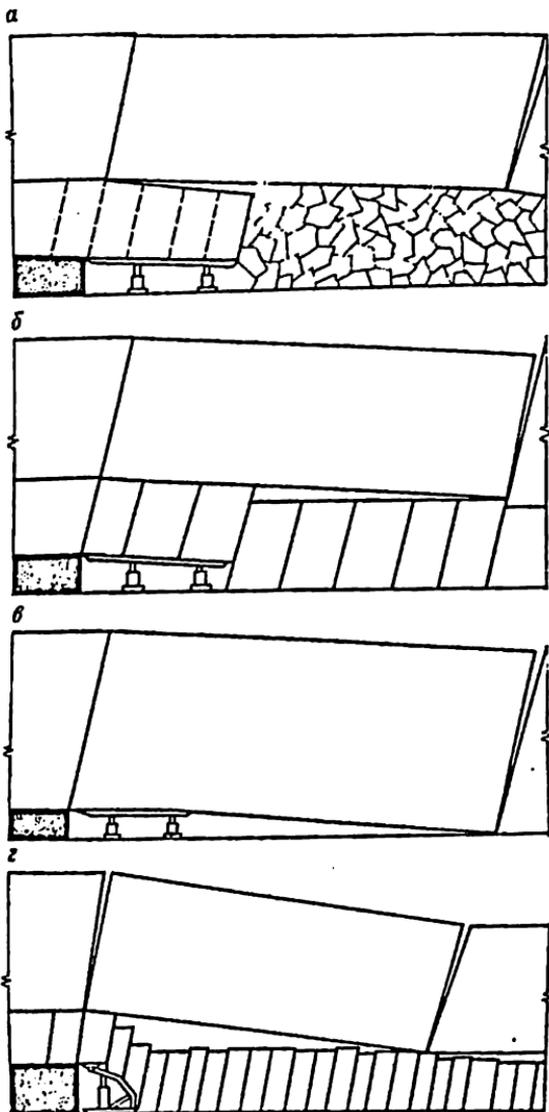
Для выбора рациональных способов и средств управления горным давлением в очистной выработке необходимо иметь данные о напряженно-деформированном состоянии кровли и взаимодействии крепи с боковыми породами в определенных горно-геологических условиях. Вместе с тем проявления горного давления в значительной степени определяются применяемыми способами и средствами управления горным давлением, причем управление горным давлением в призабойном пространстве будет эффективным в том случае, если параметры этих способов и средств будут соответствовать горно-геологическим условиям разработки. В связи с этим возникает необходимость прогнозирования проявлений горного давления в определенных горно-геологических условиях при применении различных способов и средств управления горным давлением с целью установления наиболее оптимальных параметров. При установлении закономерностей проявлений горного давления наряду с экспериментальными исследованиями определенное значение имеют расчетные методы. Но при этом необходимо учитывать особенности формирования горного давления и взаимодействия системы крепь — боковые породы в период между осадками и в процессе осадок труднообрушающихся пород.

В период между осадками труднообрушающихся пород кровля сохраняет несущую способность над призабойным пространством. Непосредственная кровля обрушается за крепью при пегкообрушающихся породах либо периодически зависит при наличии в непосредственной кровле средней обрушаемости или труднообрушающихся пород (рис. 7). Напряжения в кровле определяются мощностью и размерами зависящих консолей пород непосредственной и основной кровли, мощностью пласта, давлением вышележащего мао-



**Рис. 7** Состояние кровли в периоды между осадками труднообрушающихся пород при применении крепей:

**а** — поддерживающего типа и залегании в непосредственной кровле легкообрушающихся пород; **б** — то же пород средней обрушаемости; **в** — то же труднообрушающихся пород; **г** — оградительно-поддерживающегося типа и залегании в непосредственной кровле легкообрушающихся или средней обрушаемости пород



**Рис. 8. Схемы разрушения кровли над крепью при осадках труднообрушающихся пород при применении крепей:**

**а** — поддерживающего типа и залегании в непосредственной кровле легкообрушающихся пород; **б** — то же пород средней обрушаемости; **в** — то же труднообрушающихся пород; **г** — оградительно-поддерживающегося типа и залегании в непосредственной кровле легкообрушающихся или средней обрушаемости пород .

сива, сопротивлением крепи. Смещения кровли зависят от напряженно-деформированного состояния пород. На величину смещений существенное влияние оказывают процессы выемки угля и передвижки крепи. Податливость крепи должна быть не меньше допустимых смещений непосредственной кровли, при которых сохраняется ее удовлетворительное состояние, обеспечиваемое соответствующим сопротивлением крепи.

Для обеспечения обрушения труднообрушающихся пород в выработанном пространстве необходимо создать условия, при которых крепь выполняет роль режущей опоры. При этом минимальная податливость крепи ограничивается предельными смещениями основной кровли на линии обрушения.

При достижении предельных размеров зависающих консолей труднообрушающихся слоев пород, когда кровля разрушается над крепью (рис. 8), резко повышаются смещения кровли и нагрузки на крепь. Величина и интенсивность смещений зависят от массы разрушенной кровли, степени ее разрушения, взаимодействия образовавшихся блоков с окружающими породами и сопротивления крепи. Затем кровля временно переходит в новое равновесное состояние.

Исходя из особенностей формирования горного давления при труднообрушающихся кровлях, задача о расчете напряженно-деформированного состояния заключается в следующем.

В период между осадками кровли необходимо определить размеры зоны опорного давления и концентрацию напряжений в кровле и угольном пласте впереди очистного забоя, напряжения и смещения кровли в призабойном пространстве, характер разрушения и шаг обрушения кровли, влияние сопротивления крепи на состояние и поведение кровли.

При разрушении кровли над крепью в период осадок труднообрушающихся пород требуется, учитывая характер взаимодействия разрушенной кровли с окружающим массивом и крепью, определить скорости и величины смещений кровли, а также сопротивление, податливость и другие параметры крепи, необходимые для поддержания кровли.

На основании этих расчетов можно выбрать соответствующие способы и средства управления горным давлением.

Существующие методы расчета проявлений горного давления в очистных выработках можно разделить на три группы:

1. Расчет напряженно-деформированного состояния массива вокруг очистного забоя с использованием методов механики сплошной среды [28-33].

2. Определение обрушаемости кровли с использованием методов расчета плит и балок [34-38].

3. Расчет давления на крепь и смещений кровли методами механики твердого тела [9, 36, 38, 39].

Работы [28-30] являются последовательным развитием метода [28], который позволяет рассчитать напряжения в массиве вокруг выработок с объективным учетом влияния глубины разработки, мощности пласта, разрыхления и уплотнения пород в выработанном пространстве. Однако он не приемлем для исследования напряженного состояния труднообрушающихся кровель, так как согласно постановке задачи кровля обрушается вспед за подвиганием забоя.

В работе [31] получено иное решение для определения напряжений в кровле и смещений в призабойном пространстве с учетом структуры кровли, глубины разработки, физико-механических свойств пород, мощности пласта применительно к кровлям I класса по классификации б. ВУГИ.

Хорошо разработанный экспериментально-аналитический метод определения напряжений в массиве [32] позволяет получить пространственную картину напряженного состояния массива по предварительно замеренным данным о смещениях кровли в призабойном пространстве. Применение этого метода ограничивается пластами, разрабатываемыми в определенной горнотехнической обстановке, а прогнозирования поведения кровли до разработки невозможно.

Расчет напряженно-деформированного состояния кровли методом конечных элементов [31] имеет некоторые преимущества, так как позволяет учитывать неоднородность массива и изменение конфигурации очистной выработки при обрушениях кровли в выработанном пространстве, но процесс расчета связан с огромным объемом вычислений. Кроме того, достоверность расчетов с помощью этого метода снижается в связи с весьма произвольным выбором некоторых граничных условий, в частности, внешней нагрузки на рассматриваемую часть массива.

В целом рассмотренные методы расчета имеют то преимущество, что позволяют исследовать формирование напряженно-деформированного состояния не только в окрестности забоя, но и массива вокруг очистного забоя; что позволяет уста-

новить характер расщепления и разрушения кровли в призабойном и выработанном пространствах.

С помощью методов расчета плит и балок [34–38] представляется возможным рассчитать шаг обрушения кровли и сопротивление крепи, необходимое для разрушения кровли по режущему ряду под действием изгибающих моментов. Однако при определении шага обрушения не рассматривается воздействие касательных и нормальных напряжений, не учитывается влияние сопротивления крепи и взаимодействие непосредственной и основной кровли. Наряду с этим предположения о пригрузке вышележащего массива на основную кровлю недостаточно обоснованы. В этом отношении заслуживает внимания подход к определению пригрузки, рассчитываемой из условия равенства смещений консольно зависящих слоев пород кровли и вышележащего массива [37].

В работах [9, 36] предложены методы расчета смещений кровли и сопряжения крепи при разрушении кровли над поддерживаемым пространством. Здесь определение смещений непосредственной кровли осуществляется без учета перемещений блоков основной кровли. Сопротивление крепи рассчитывается из условия давления на крепь блоков непосредственной и основной кровли, но не учитывается характер передачи усилий на кровлю со стороны крепи. Вместе с тем имеются определенные предложения об уравнивании внешней активной нагрузки кровли распределенным по перекрытию сопротивлением крепи [38].

При труднообрушающихся кровлях существенное значение имеет вопрос о динамических проявлениях горного давления во время осадок кровли. Аналитический подход к решению этого вопроса в общей форме рассмотрен в работе [39].

Из краткого обзора литературы следует, что имеющиеся методы расчета не обеспечивают комплексного определения проявлений горного давления при труднообрушающихся кровлях в различных состояниях: между осадками и при осадках прочных слоев пород.

В связи с этим была поставлена задача — разработать методику расчета проявлений горного давления при труднообрушающихся кровлях применительно к выбору оптимальных параметров управления кровлей в очистных забоях с учетом основных влияющих факторов.

Методика включает:

расчет компонент напряжений и смещений кровли в период между осадками труднообрушающихся пород;

расчет времени устойчивого состояния и определение ха-

рактера и параметров разрушения кровли во время осадок.

расчет величин и скоростей смещения кровли, а также сопротивления крепи при осадках труднообрушающихся пород.

При разработке методики расчета приняты ряд исходных предпосылок, определивших постановку и решение задачи.

Исследованиями [34, 40] установлено, что проявления горного давления в призабойном пространстве прежде всего зависят от поведения той части массива пород в кровле, которая образует в выработанном пространстве зону обрушения. Вышележащий массив плавно опускается на обрушенные породы без существенного нарушения сплошности. Поэтому нами принимается следующая расчетная схема для определения напряженного состояния кровли в период между осадками труднообрушающихся пород. При отработке угольного пласта породы кровли, обрушаясь в выработанном пространстве, в призабойной зоне образуют консольно зависающие плиты мощностью, равной высоте зоны обрушения. Высота зоны обрушения  $h_{кр}$  определяется исходя из разрыхляемости споев пород, последовательно обрушающихся в выработанном пространстве [34]:

$$h_{кр} = h_{н.кр} + h_{о.кр}, \quad (II.1)$$

где  $h_{н.кр}$  — мощность непосредственной кровли при обрушении;  $h_{о.кр}$  — мощность основной кровли в зоне обрушения.

Мощность непосредственной кровли при обрушении составит:

$$h_{н.кр} = \frac{h_n}{k_n}, \quad (II.2)$$

где  $h_n$  — мощность непосредственной кровли;  $k_n$  — коэффициент разрыхления непосредственной кровли.

Мощность основной кровли в зоне обрушения:

$$h_{о.кр} = \frac{m - h_n(k_n - 1) - h_{пп}}{k_o - 1}, \quad (II.3)$$

Где  $h_{пл}$  — расстояние между плоскостями ослабления основной кровли по напластованию;  $k_0$  — коэффициент разрыхления основной кровли.

Массив пород, залегающих выше зоны обрушения, создает неравномерно распределенную нагрузку на консольно зависающие и обрушенные породы. Длина зависающих консолей и характер разрушения кровли определяются прочностными и деформационными свойствами пород и ее напряженным состоянием, которое зависит от давления вышележащего массива и сопротивления крепи.

В выработанном пространстве под давлением плавного опускающегося массива обрушенные породы уплотняются. Степень уплотнения пород увеличивается по мере удаления от очистного забоя. На некотором расстоянии от забоя давление массива равно первоначальному напряженному состоянию и деформация пород практически прекращается. Давление вышележащего массива на кровлю определяется из условия равенства смещений кровли, деформации обрушенных пород и смещений вышележащего массива. При этом учитывается влияние глубины разработки, мощности пласта, разрыхления и уплотнения пород в выработанном пространстве, деформационных свойств пород кровли и всего массива [ 37 ].

Влияние крепи на напряженное состояние кровли зависит от характера передачи ее сопротивления через перекрытие и от ее расположения относительно забоя. Сопротивление крепи на контакте перекрытия с кровлей имеет случайный характер и распределяется неравномерно [ 41, 42 ]. Для расчетов можно принять приближенное распределение сопротивления в виде прямой [ 43 ]. Рассмотрим наиболее характерные варианты крепления кровли:

**I** — двухрядная крепь с неравномерным распределением давления по перекрытию;

**II** — многорядная крепь с равномерным распределением давления по перекрытию и повышенным сопротивлением посадочного ряда.

В варианте **I** отражается взаимодействие современных механизированных крепей. Вариант **II** предусматривает возможность для случая, когда применяется индивидуальная крепь при равномерном распределении сопротивления по рядам, а сопротивление посадочной крепи значительно превышает сопротивление призабойной. Задавая различ-

ным сопротивлением крепи, можно оценить его влияние на напряженное состояние кровли. Оба варианта предусматривают наличие обнажений кровли у забоя вследствие ведения очистных работ.

При определении характера разрушения кровли следует учитывать вероятность расслоения кровли на контактах ослаблений по напастованию и разрушения вне этих контактов как впереди очистного забоя, так и над призабойным либо выработанным пространством.

Расслоение кровли на контактах ослаблений по напастованию оценивается из условия разрушения, заданного в форме прямолинейной огibaющей Мора. Состояние кровли и характер ее взаимодействия с крепью определяются процессом разрушения пород во времени. Как показывают исследования, процесс разрушения хрупких пород связан с развитием трещиноватости [44]. Известно, что породы имеют естественную трещиноватость, которая приводит к определенному ослаблению несущей способности кровли. Наблюдениями установлено, что в процессе нагружения массива происходит постепенное развитие трещиноватости пород под влиянием очистных работ. Однако при этом кровля сохраняет свою несущую способность до некоторого момента времени. Ускоренная стадия полного разрушения по трещинам протекает в течение короткого времени. Поэтому вероятность разрушения вне контактов напастования оценивается по пределам прочности на сжатие или изгиб с учетом снижения несущей способности кровли во времени вследствие наличия естественной трещиноватости и развития трещиноватости под влиянием горного давления.

Для планирования мероприятий по управлению кровлей и прогнозирования повышенных нагрузок на крепь необходимо установить время, в течение которого она сохраняет устойчивость от момента выемки очередного цикла. Особенно важно знать время устойчивого состояния кровли перед достижением предельного пролета прочного споя.

При определении конвергенции вмещающих пород в призабойном пространстве в период между осадками труднообрушающихся споев необходимо рассчитать смещения кровли и почвы, возникающие в процессе очистной выемки угля, а также смещения кровли, которые происходят в течение всего времени поддержания рабочего пространства.

При разрушении кровли над крепью в период осадок прочного споя кровля теряет связь с вышележащим массивом,

а крепь работает в режиме заданной нагрузки и незначительно влияет на напряженное состояние кровли. В период разрушения кровли до перехода ее в новое равновесное состояние происходят сдвиги, интенсивность которых определяется объемом разрушенных пород и взаимодействием их с крепью и окружающими породами.

Для определения скорости и величины смещений кровли в период перехода в разрушенное состояние приняты две обобщенные схемы: при расположении прочных споев пород в непосредственной и основной кровле.

Движение разрушенных пород можно рассматривать с позиций динамики твердого тела [39]. При опускании разрушенных консолей труднообрушающихся пород на почву или обрушенные породы непосредственной кровли наступает новое равновесное состояние. Общие смещения в очистном забое зависят от характера разрушения кровли и смещений труднообрушающихся пород. Если труднообрушающийся слой разрушается на длинные блоки и расположен в непосредственной кровле, то его максимальные смещения в выработанном пространстве равны мощности пласта. При расположении труднообрушающегося споя в основной кровле его максимальные смещения определяются разрыхлением непосредственной кровли.

При короткоблочном разрушении прочного споя смещения в очистном забое определяют согласно методике, изложенной в работе [9]. После перехода в новое равновесное состояние кровлю необходимо поддерживать с помощью крепи соответствующего сопротивления. Определение необходимого сопротивления крепи осуществляется методами статике твердых тел.

## § 2. Расчет напряженно-деформированного состояния кровли в период между осадками труднообрушающихся пород

В зависимости от схемы обрушения кровли в выработанном пространстве задача расчета напряженного состояния кровли сводится к определению вертикальных, горизонтальных и касательных компонент напряжений в непосредственной (рис. 9, а)



как нагрузка массива неравномерно распределена по консоли, то зависимость получена приближенно.

Для этого участок массива на контакте с прочным сполем пород разделим на ряд интервалов и предположим, что в пределах каждого интервала нагрузка массива остается постоянной, т.е.

$$P_i = \text{const.}$$

Расположим начало координат в точке восстановления первоначального напряженного состояния (см. рис. 9, а,б).

По контакту кровли с массивом граничные условия будут изменяться по мере изменения величины нагрузки в точках с координатами  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ . По нижней поверхности кровли от координаты  $x'$  до  $x''$ , где начинается влияние сопротивления крепи, кровля свободна от нагрузок. От  $x''$  до точки  $x_a$ , где расположена линия забоя, величина нагрузки зависит от расположения крепи относительно забоя и распределения сопротивления крепи (рис. 10).

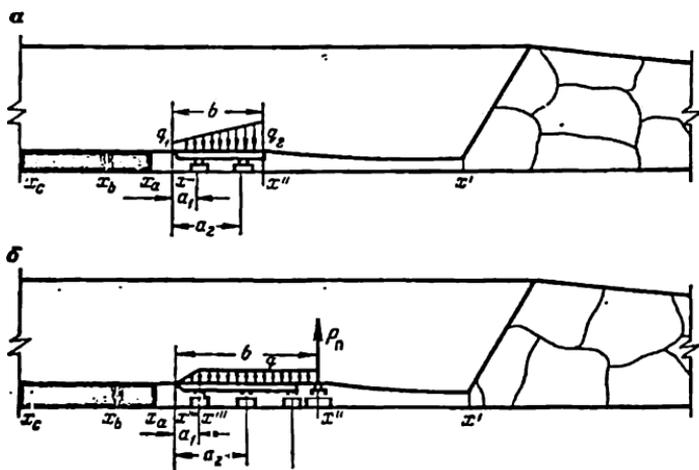


Рис. 10. Расчетные схемы для определения влияния сопротивления крепи на напряженное состояние кровли:

а — при механизированной крепи; б — при индивидуальной крепи

При обнажении кровли у забоя для I варианта распределения сопротивления крепи (рис. 10,а) в точке  $x^*$  заканчивается влияние сопротивления крепи, а от  $x^*$  до  $x_a$  поверхность кровли свободна от вертикальных нагрузок; для II варианта (рис. 10,б) в точке  $x^*$  меняется характер распределения сопротивления. Свободная поверхность кровли ограничивается координатами  $x''' - x_a$ . Если обнажения кровли у забоя нет, то соответственно вариантам I и II координаты  $x'''$  и  $x''''$  совпадают с точкой  $x_a$ .

Далее от точки  $x_a$  до  $x_c$ , определяющей границу пластической зоны угольного пласта, на состояние кровли влияет сопротивление угля. Причем на участке зоны отжима угля  $x_a - x_b$  сопротивление угольного пласта равно пределу прочности угля. От  $x_b$  до  $x_c$  влияние на кровлю угольного пласта определяется несущей способностью пласта в пластической зоне.

Расчет нагрузки на кровлю со стороны массива осуществляется по-разному на участке от конца зависающей консоли  $x'$  до  $x_b$  и в той части кровли, впереди очистного забоя, на участке  $x_b - x_c$ , где на угольный пласт действуют противоположно направленные друг другу нагрузки со стороны кровли и почвы.

На участке от  $x'$  до  $x_b$  нагрузка со стороны массива определяется из условия равенства смещений массива и прогиба консоли в точках наблюдения  $x_k$  под действием нагрузки, последовательно возрастающей от точки  $x'$  до  $x_b$ .

При этом предполагается, что на каждом интервале текущих координат  $x_i - x_{i+1}$  действует равномерно распределенная нагрузка.

Смещения массива при этом могут быть определены исходя из методики, изложенной в работе [37], а смещения консоли — методами сопротивления материалов [45]. Приведенная выражения для расчета смещений, получим уравнения вида

$$\sum_1^k P_i [(x_{i+1} - x_i) \frac{x_b - x_k}{b} + \frac{(x_b - x_{i+1})^2 - (x_b - x_i)^2}{4}] (x_b - x_k)^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k+1}^n P_i \left\{ [(x_{i+1} - x_i) \frac{x_b - x_k}{6} + \frac{(x_b - x_{i+1})^2 - (x_b - x_i)^2}{4}] (x_b - x_k)^2 - \right. \\
& - \left. \frac{(x_{i+1} - x_k)^4 - (x_i - x_k)^4}{24} \right\} = \frac{(\kappa + 1) E_{\kappa} I_{\kappa}}{2\mu} \left\{ \frac{\gamma H}{2} \left[ \sqrt{x_k (x_b - x_k)} + \right. \right. \\
& + \left. x_b \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_b - x_k}{x_k}} \right] - \frac{2x_b}{\pi} (\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_b - x_k}{x_k}})^2 \times \\
& \times \left. \frac{2\mu}{\kappa + 1} \lambda^{*m} - \frac{\gamma H x_b \pi}{2} \right\} + F_{\kappa}, \tag{II.4}
\end{aligned}$$

где  $P_i$  — удельная нагрузка массива в сечении  $x_i$ ,  $\text{МН/м}^2$ ;  $x_b$  — координата границы зоны отжима угля, м;  $x_k$  — координата рассматриваемой точки, м;  $\kappa = 3-4\nu$ ;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $E_{\kappa}$  — модуль деформации кровли,  $\text{МН/м}^2$ ;  $I_{\kappa}$  — осевой момент инерции кровли,  $\text{м}^4$ ;  $\mu = \frac{E_M}{2(1+\nu)}$ ,  $E_M$  — модуль деформации массива,  $\text{МН/м}^2$ ;  $\gamma$  — удельный вес пород,  $\text{МН/м}^3$ ;  $H$  — глубина разработки, м;  $\lambda^{*m}$  — коэффициент, учитывающий разрыхление пород в выработанном пространстве;  $F_{\kappa}$  — функция, учитывающая влияние крепи в рассматриваемой точке.

Решая систему уравнений при  $i \leq k \leq n$ , можно определить нагрузку массива для каждого рассматриваемого интервала.

Некоторые переменные: модуль деформации массива и кровли, момент инерции кровли, коэффициент, учитывающий деформацию пород в выработанном пространстве, координата границы зоны отжима угля, функция, учитывающая влияние крепи, должны быть рассчитаны.

Модуль деформации массива приравнивается к средневзвешенному значению модуля деформации, определяемому с учетом жесткости отдельных слоев пород, сплагающих массив:

$$E_M = k' \frac{\sum F_i \cdot h_i^3}{\sum h_i^3}, \text{ МН/м}^2, \tag{II.5}$$

где  $k'$  — коэффициент ослабления массива трещиноватостью;  $E_i$  — модуль деформации слоев пород, спагающих массив,  $\text{МН/м}^2$ ;  $h_i$  — мощность слоев пород, спагающих массив, м.

Величина модуля деформации и момента инерции кровли определяется в зависимости от ее строения.

При расположении прочного споя в непосредственной кровле (см. рис. 9,а)  $E'_k = E_n$  — модуль деформации непосредственной кровли, а

$$I_k = \frac{h_n^3}{12}, \text{ м}^4.$$

Если прочный спой залегает в основной кровле (см. рис. 9,б), то на участке от конца зависающей консоли до начала контакта с непосредственной кровлей модуль деформации соответствует модулю прочного споя, а момент инерции

$$I_k = \frac{h_0^3}{12}, \text{ м}^4.$$

На участке от начала контакта основной и непосредственной кровли от  $x_n$  до  $x_0$  определяются приведенные значения модуля деформации и момента инерции кровли:

$$E_k = \frac{E_n h_n^3 + E_0 h_0^3}{h_n^3 + h_0^3}, \quad (\text{II.6})$$

где  $E_n, E_0$  — модули деформации соответственно непосредственной и основной кровли,  $\text{МН/м}^2$ ;  $h_n, h_0$  — мощность споя непосредственной и основной кровли, м.

Учитывая различия в модуле деформации основной и непосредственной кровли, для расчета  $I_k$  определяется положение нейтральной оси кровли из зависимостей:

$$h_1 = h_n + h_0 - h_2;$$

$$h_2 = \frac{h_0^2 + h_n \left( \frac{E_n}{E_0} h_n + 2h_0 \right)}{2 \left( \frac{E_n}{E_0} h_n + h_0 \right)}.$$

Затем рассчитывается приведенный момент инерции кровли:

$$I_{\kappa} = \frac{1}{3} [h_1^3 + (h_2 - h_{\kappa})^3 (1 - \frac{E_{\kappa}}{E_0}) + h_2^3 \frac{E_{\kappa}}{E_0}]. \quad (\text{II.7})$$

Коэффициент, учитывающий разрыхление пород в выработочном пространстве, определяется исходя из условия восстановления напряженного состояния при  $x = 0$ , с учетом поведения обрушенных пород или закладки под давлением массива [46]:

$$\lambda^* = 1 - \frac{k_{\text{кр}}}{m} \{ k_{\text{ср}} - \epsilon_0 [1 - \exp(-\frac{\gamma H}{P_0})] - 1 \}, \quad (\text{II.8})$$

где  $\epsilon_0, P_0$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие деформацию обрушенных пород под давлением массива;  $k_{\text{ср}}$  — средний коэффициент разрыхления пород при обрушении.

Координата границы зоны отжима

$$x_b = x_a + l_p,$$

где  $x_a$  — координата, определяющая положение забоя без учета зоны отжима, м;  $l_p$  — размеры зоны отжима, м.

Расстояние от линии восстановления напряженного состояния до забоя рассчитывается согласно зависимости [30]:

$$x_a = \frac{\lambda^* E_M m}{2\pi\gamma H(1-\nu^2)}. \quad (\text{II.9})$$

Эмпирическая формула для расчета размеров зоны отжима получена с использованием методов теории предельного равновесия [47]

$$l_p = 0,15 \cdot 10^{-3} \gamma H m \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\rho\gamma}{2} \right),$$

где  $\rho\gamma$  — угол внутреннего трения угля, радиан.

Координата рассматриваемой точки является переменной величиной:

$$x_{\kappa} = x_b - L + \sum_1^k \Delta x_i, \quad (\text{II.10})$$

где  $L$  — длина консоли труднообрушающегося слоя кровли, м.

Вид функции ( $\bar{F}_k$ ) зависит от характера распределения сопротивления крепи по перекрытию и расположения крепи по отношению к забою. Соответственно для рассмотренных выше случаев распределения сопротивления крепи по перекрытию эта функция может быть рассчитана.

Вариант 1 (рис. 10,а):

$$\begin{aligned} F_k = & \frac{\sigma_{сж.у}(x_b - x_k)^2}{24} [4(x_b - x_a)(x_b - x_k) - 6(x_b - x_a)^2 - (x_b - x_k)^2] - \\ & - \frac{(x_b - x_k)^2(x''' - x'')}{12} [q_1(2x_b - 2x''' - x'' + x_k) + q_2(2x_b - x''' - \\ & - 2x'' + x_k)] \times \left| \frac{\sigma_{сж.у}(x_a - x_k)^4}{24} \right|_{x''} - \frac{q_1(x''' - x_k)^4}{24} - \\ & - \frac{(q_2 - q_1)(x''' - x_k)^5}{60(x''' - x'')} \left| \frac{x''}{x''} \right| + \frac{q_1(x''' - x_k)^4}{24} + \frac{(q_2 - q_1)(x''' - x_k)^5}{60(x''' - x'')} \left| \frac{x''}{x''} \right|, \quad (II.11) \end{aligned}$$

где  $\sigma_{сж.у}$  — предел прочности угля на сжатие, МН/м<sup>2</sup>;  $q_1$  — сопротивление перекрытия крепи на призабойном конце, МН/м<sup>2</sup>;  $q_2$  — сопротивление перекрытия крепи со стороны выработанного пространства, МН/м<sup>2</sup>.

Вариант 2 (рис. 10,б):

$$\begin{aligned} F_k = & \frac{\sigma_{сж.у}(x_b - x_k)^2}{24} [4(x_b - x_a)(x_b - x_k) - 6(x_b - x_a)^2 - (x_b - x_k)^2] - \\ & - \frac{q(x_b - x_k)^2(x''' - x'')}{12} (2x_b - x''' + x'' - x_k) - \frac{q(x_b - x_k)^2(x''' - x'')}{12} \times \\ & \times (4x_b - 3x''' - 3x'' + 2x_k) + \frac{P_{II}(x_b - x_k)^2}{6} (2x_b - 3x'' + x_k) \left| \frac{x_b}{x_a} \right| + \\ & + \frac{\sigma_{сж.у}(x_a - x_k)^4}{24} \left| \frac{x_a}{x''} \right| - \frac{q(x''' - x_k)^5}{50(x''' - x'')} \left| \frac{x''}{x''} \right| + \frac{q(x''' - x_k)^5}{60(x''' - x'')} - \end{aligned}$$

$$-\frac{q(x'' - x_k) x''}{24} \Big|_{x''} + \frac{q(x'' - x_k)^4}{24} - \frac{P_n (x'' - x_k)^3 x''}{6} \Big|_{x'}, \quad (\text{II.12})$$

где  $q$  – распределенное по перекрытию сопротивление призабойной крепи, МН/м<sup>2</sup>;  $P_n$  – сопротивление посадочной крепи, МН на стойку.

Для определения величин  $q_1$  и  $q_2$  необходимо задаться сопротивлением крепи по рядам.

Выражения, определяющие взаимосвязь сопротивления крепи, распределенного по контакту перекрытия с кровлей и заданного по рядам, получены из решения системы уравнений равновесия крепь – кровля.

Для варианта 1 эти выражения имеют вид:  
на призабойном конце перекрытия

$$q_1 = \frac{2(R_1 + R_2)}{b} - q_2; \quad (\text{II.13})$$

со стороны выработанного пространства

$$q_2 = \frac{2[3(R_1 a_1 + R_2 a_2) - b(R_1 + R_2)]}{b^2},$$

где  $R_1, R_2$  – сопротивление крепи по первому и второму рядам от забоя, МН на стойку;  $a_1, a_2$  – расстояние от призабойного конца перекрытия до первого и второго ряда крепи, м;  $b$  – длина перекрытия, м.

При применении индивидуальной призабойной и посадочной крепи (вариант 2) расчет распределенного по перекрытию сопротивления призабойной крепи производится согласно зависимости

$$q = R_r \left( \frac{3 \sum_1^r a_i}{3b^2 - a_1^2} + \frac{1}{2b - a_1} \right), \quad (\text{II.14})$$

где  $\bar{R}_r$  – сопротивление призабойных стоек, МН/ст;  $a_i$  – расстояние от призабойного конца перекрытия до соответствующего ряда крепи, м;  $r$  – число рядов крепи.

Сопротивление посадочной крепи принимается в виде сосредоточенной силы  $P_n$ .

Таким образом, разработаны все необходимые параметры, позволяющие рассчитать неравномерно распределенную нагрузку на кровлю со стороны вышележащего массива с учетом строения, деформационных свойств пород кровли, мощности пласта, глубины разработки, размеров поддерживаемого пространства, сопротивления крепи.

При построении системы уравнений для расчета нагрузки массива на прочный спой согласно (II.4) необходимо начинать с координаты  $x'$ . Затем последовательно переходить от участка к участку, рассчитывая  $x_k$  согласно (II.10) до  $k=n$ , где  $n$  – число участков по длине контакта с координатами  $x - x_b$ .

Расчет нагрузки массива от границы зоны отжима угля (координата  $x_b$ ) до конца пластической зоны (координата  $x_c$ ) также производится по участкам по формуле

$$\begin{aligned}
 P_k = & \frac{\sum P_i}{x_b - x'} \left\{ \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{x_b - x'}{x'}} \left[ \sqrt{x_k(x_k - x_b)} + \right. \right. \\
 & + x_b \ln \frac{\sqrt{x_b'} + \sqrt{x_k - x_b}}{\sqrt{x_b'}} \left. \right] + \frac{2}{\pi} [(x_i - x') \arctg \sqrt{\frac{x'(x_k - x_b)}{x_k(x_b - x')}} - \\
 & - \sqrt{x'(x_b - x')} \ln \frac{\sqrt{x_i'} + \sqrt{x_k - x_b}}{x_b} ] - (x_k - x_b) \left. \right\}. \quad (II.15)
 \end{aligned}$$

Граница пластической зоны определяется зависимостью:  $x_c = x_b + l_{пп}$ , где  $l_{пп}$  – длина пластической зоны угля, м.

Зона пластического состояния угольного пласта рассчитывается методом последовательных приближений [48] из уравнения

$$l_{пп} = m \left( \frac{\gamma H}{k} \sqrt{\frac{x_c}{x_c - x_a}} - \frac{\pi}{2} \right),$$

где  $\bar{k}$  — коэффициент пластичности угля,  $\text{МН/м}^2$ .

Расчет  $P_k$  по формуле (II.15) следует начинать с  $P_k = P_{n+1}$

Итак, пользуясь формулами (II.4) и (II.15), можно рассчитать нагрузку на прочный слой по всему контакту с вышележащим массивом при расположении прочного слоя в непосредственной или основной кровле. В последнем случае необходимо определить также давление, распределенное по контакту непосредственной и основной кровли (см. рис. 9,б).

Расчет нагрузки по контакту взаимодействия непосредственной и основной кровли можно выполнить, пользуясь выражением, полученным из условия равенства смещений непосредственной и основной кровли:

$$q_k = \frac{8}{(x_c - x_k)^4} \times \frac{E_H I_H (x_c - x_k)^2 \sum_1^k P_i [(x_{i+1} - x_i) \frac{x_c - x_k}{6} + \frac{(x_c - x_{i+1})^2 - (x_c - x_i)^2}{4}] + E_0 I_0 F_k}{E_0 I_0 + E_H I_H - (x_c - x_k)^2 \sum_1^{k-1} q_j [(x_{i+1} - x_i) \frac{x_c - x_k}{6} + \frac{(x_c - x_{i+1})^2 - (x_c - x_i)^2}{4}]} \quad \text{II.16}$$

где  $x_k$  — координата рассматриваемой точки контакта, м.

$$x_k = x_c - l + \sum_1^k \Delta x_i,$$

где  $l$  — длина консоли непосредственной кровли.

Расчет  $q_k$  начинается с координаты  $x_n$ , определяющей начало контакта непосредственной и основной кровли при  $j = 1$ , и заканчивается при  $x_c$ , т. е. в конце зоны пластичности угольного пласта. Нагрузка  $P_i$  при расчетах по формуле (II.16) рассматривается от конца зависящей консоли прочного слоя пород до координаты  $x_i$ , а  $\bar{F}_k$  соответственно рассчитывается по формулам (II.11), (II.12).

Таким образом, получены уравнения, позволяющие рассчитать неравномерно распределенную нагрузку на прочный слой со стороны массива, давление по контакту непосредственной и основной кровли, сопротивление крепи по перекрытию.

Полученные данные позволяют перейти к определению напряжений в кровле. Для этого необходимо рассчитать все три составляющие напряжений. При заpegании в основной кровле труднообрушающийся слой пород может рассматриваться как копсольно зависающая прямоугольная погоса, которая испытывает влияние массива, собственного веса и реакцию на контакте слоев пород, расположенных ниже. Слой пород, заpegающий в непосредственной кровле, находится под действием вышележащих пород, собственного веса и реакции крепи, а также угольного пласта. Наряду с этим на напряженное состояние слоя пород влияют также силы трения, возникающие на контактах с примыкающими слоями пород, угольным пластом или крепью.

Распределение напряжений в этом случае может быть получено решением плоской задачи о распределении напряжений в прямоугольной погосе при помощи цепых полиномов [49].

Уравнения для расчета напряжений имеют вид

$$\sigma_x = \frac{M_k y}{I_k} - q_k \left( \frac{4y^3}{h^3} - \frac{3y}{5h} \right);$$

$$\sigma_y = \frac{\gamma(h-2y) + 2q'_k}{2} \left( \frac{3y}{2h} - \frac{2y^3}{h^3} \right) + \frac{\gamma(h-2y) + 2q'_k}{4}; \quad (II.17)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q_k}{2I_k} \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) + \frac{\tau_v}{2} \left( \frac{2y}{h} - \frac{1}{2} + \frac{6y^2}{h^2} \right) - \frac{\tau_n}{2} \left( \frac{2y}{h} + \frac{1}{2} - \frac{6y^2}{h^2} \right),$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  — горизонтальная, вертикальная и касательная составляющие напряжения, МН/м<sup>2</sup>;  $M_k$  — изгибающий момент, МН·м;  $Q_k$  — поперечная сила, МН;  $q_k, q'_k$  — интенсивность нагрузки, МН/м;  $\tau_v$  — касательные напряжения на контакте с вышележающим слоем пород, МН/м<sup>2</sup>;  $\tau_n$  — касательные напряжения по нижнему контакту, МН/м<sup>2</sup>.

Выражения для расчетов значений  $M_k, Q_k, q'_k, q_k$ , входящих в уравнения (II.17), зависят от строения кровли и характера сопротивления крепи по перекрытию.

При расположении прочного слоя в непосредственной кровле и крепении согласно варианту 1 (см. рис. 10,а)

$$\begin{aligned}
M_k = & \sum_1^k (P_i - P_{i-1})(x_k - x_i) \frac{2(x_k - x_i) - fh}{4} + \frac{\gamma h(x_k - x')^2}{2} \Big|_{x'}^{x''} - \\
& - \frac{q_1(x_k - x'')^2}{2} - \frac{(q_2 - q_1)(x_k - x'')^2}{2(x'' - x')} \left( x''' - \frac{x_k + 2x''}{3} \right) \Big|_{x''}^{x'''} + \\
& + q_1 \left[ \frac{(x_k - x'')^2}{2} - (x''' - x'')(x_k - \frac{x'' + x'''}{2}) \right] + \\
& + (q_2 - q_1) \left[ \frac{(x_k - x'')^2}{2(x'' - x')} \left( x''' - \frac{x_k + 2x''}{3} \right) - \frac{(x'' - x')}{2} (x_k - \right. \\
& \left. - \frac{x'' + 2x'''}{3}) \right] \Big|_{x''}^{x_a} - \frac{\sigma_{\text{сж.у}}(x_k - x_a)^2}{2} \Big|_{x_a}^{x_b} - \\
& - \bar{k} \left[ \frac{\pi}{4} (x_k - x_b)^2 + \frac{(x_k - x_b)^3}{3m} \right] \Big|_{x_b}^{x_c} ; \tag{II.18a}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_k = & \sum_1^k (P_i - P_{i-1}) \frac{x_k - x_i}{2} (2 - f) + \gamma h(x_k - x') \Big|_{x'}^{x''} - q_1(x_k - x'') - \\
& - \frac{(q_2 - q_1)(x_k - x'')}{x'' - x'} \left( x''' - \frac{x_k - x''}{2} \right) \Big|_{x''}^{x'''} + q_1(x_k - x'') + \\
& + \frac{(q_2 - q_1)}{x'' - x'} (x_k - x'')(x''' - \frac{x_k + x''}{2}) - \frac{q_2 + q_1}{2} (x'' - x') \Big|_{x''}^{x_a} - \\
& - \sigma_{\text{сж.у}}(x_k - x_a) \Big|_{x_a}^{x_b} - \bar{k} \left[ \frac{\pi}{2} (x_k - x_b) + \frac{(x_k - x_b)^2}{m} \right] \Big|_{x_b}^{x_c} \tag{II.18б}
\end{aligned}$$

$$q_k^{i\sigma} = P_i \left| \frac{x''}{x'} \pm q_1 \pm \frac{(q_2 - q_1)(x'' - x_k)}{x'' - x''} \right| \frac{x''}{x''} \pm q_1 \pm \frac{(q_2 - q_1)(x'' - x_k)}{x'' - x''} \left| \frac{x_a}{x''} \pm \right.$$

$$\pm \sigma_{\text{сж.у}} \left| \frac{x_b}{x_a} \pm k \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{2(x_k - x_b)}{m} \right] \right| \frac{x_c}{x_b} \quad (\text{II.18d})$$

где  $h$  — мощность рассматриваемого слоя пород непосредственной или основной кровли;  $f$  — коэффициент трения.

Момент инерции  $i_k$  определяется по формуле  $i_k = \frac{h^3}{12}$ .

Касательные напряжения по контакту с массивом

$$\tau_{\text{в}} = P_k f.$$

Касательные напряжения по нижнему контакту соответственно рассчитываются:

$$\tau_{\text{н}} = [q_1 + (q_2 - q_1) \frac{x'' - x_k}{x'' - x''}] f, \quad x'' \leq x_k < x'';$$

$$\tau_{\text{н}} = \sigma_{\text{сж.у}} f, \quad x_a \leq x_k < x_b;$$

$$\tau_{\text{н}} = \bar{k} f \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{2(x_k - x_b)}{m} \right], \quad x_b \leq x_k \leq x_c.$$

При креплении согласно варианту 2 (см. рис. 10,6)

$$M_k = \sum_1^k (P_i - P_{i-1}) (x_k - x_i) \frac{2(x_k - x_i) - fh}{4} + \frac{yh(x_k - x_i)}{2} \left| \frac{x''}{x'} - \right.$$

$$\left. - P_{\text{н}} (x_k - x'' - \frac{q(x_k - x'')^2}{2} \right| \frac{x''}{x''} + q \left[ \frac{(x_k - x'')^2}{2} - (x'' - x'') (x_k - \frac{x'' + x''}{2}) - \right.$$

$$\left. - \frac{(x_k - x'')^2}{2(x'' - x'')} \left( \frac{x''}{x''} = \frac{x_k + 2x''}{3} \right) \right| + q \left[ \frac{(x_k - x'')^2}{2(x'' - x'')} \left( x'' - \frac{x_k + 2x''}{3} \right) - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{q(x''' - x'')}{2} \left( x_k - \frac{x''' + 2x''}{3} \right) \Big|_{x''}^{x_a} - \frac{\sigma_{сж.у} (x_k - x_a)^2}{2} \Big|_{x_a}^{x_b} - \\
 & - \bar{k} \left[ \frac{\pi}{4} (x_k - x_b)^2 + \frac{(x_k - x_b)^3}{3m} \right] \Big|_{x_b}^{x_c} ; \quad (II.19a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_k &= \sum_{i=1}^k (P_i - P_{i-1}) \frac{x_k - x_i}{2} (2-f) + \gamma h (x_k - x') \Big|_{x'}^{x''} - P_n - q(x_k - x'') \Big|_{x''}^{x''} + \\
 & + q \left[ (x_k - x'') - \frac{(x_k - x'')}{x''' - x''} (x''' - \frac{x_k + x''}{2}) \right] \Big|_{x''}^{x'''} + \\
 & + q \left[ \frac{x_k - x''}{x''' - x''} (x''' - \frac{x_k + x''}{2}) - \frac{x''' - x''}{2} \right] \Big|_{x''}^{x_a} - \sigma_{сж.у} (x_k - x_a) \Big|_{x_a}^{x_b} - \\
 & - \bar{k} \left[ \frac{\pi}{2} (x_k - x_b) + \frac{(x_k - x_b)^2}{m} \right] \Big|_{x_b}^{x_c} \quad (II.19b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_k'' &= P_i \Big|_{x'}^{x''} + q \Big|_{x''}^{x'''} - q + \frac{q(x''' - x_k)}{x''' - x''} \Big|_{x''}^{x'''} + \frac{q(x''' - x_k)}{x''' - x''} \Big|_{x''}^{x_a} + \\
 & + \sigma_{сж.у} \Big|_{x_a}^{x_b} + \bar{k} \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{2(x_k - x_b)}{m} \right] \Big|_{x_b}^{x_c} \quad (II.19c)
 \end{aligned}$$

Касательные напряжения на контакте с крепью:

$$r_H = qf, \quad x'' \leq x_k < x''' ;$$

$$r_n = qf \frac{(x'' - x_k)}{x'' - x''}, \quad x'' < x_k < x''$$

При расположении прочного слоя в основной кровле на этот слой действует распределенная нагрузка со стороны массива  $P_j$  и реактивный отпор на контакте основной и непосредственной кровли  $q_j$  (см. рис. 9, б).  $M_k$ ,  $Q_k$ ,  $q'_k$ ,  $q''_k$  определяются уравнениями:

$$M_k = \sum_1^k (P_i - P_{i-1}) \frac{2(x_k - x_i) - fh_0}{4} + \frac{\gamma h_0 (x_k - x'')}{2} \Big|_{x''}^{x_n} - \sum_1^k (q_j - q_{j-1}) \frac{2(x_k - x_j) - fh_n}{4} + \frac{\gamma h_n (x_k - x_n)}{2} \Big|_{x_n}^{x_c} \quad (\text{II.20a})$$

$$Q_k = \sum_1^k (P_i - P_{i-1}) \frac{(x_k - x_i)}{2} (2-f) + \gamma h_0 (x_k - x') \Big|_{x'}^{x_n} - \sum_1^k (q_j - q_{j-1}) \frac{x_k - x_j}{2} (2-f) + \gamma h_n (x_k - x_n) \Big|_{x_n}^{x_c} \quad (\text{II.20б})$$

$$q''_k = P_i \Big|_{x'}^{x_n} \pm q_j \Big|_{x_n}^{x_c} \quad (\text{II.20в})$$

Для расчета  $M_k$ ,  $Q_k$ ,  $q'$ ,  $q''$  в непосредственной кровле, которая в рассматриваемом случае находится под воздействием давления основной кровли и сопротивления крепи, можно использовать формулы (II.18, II.19), но при этом вместо  $P_j$  подставляется  $q_j$ , а  $x''$  заменяется на  $x_n$ .

Имея результаты расчетов вертикальных, горизонтальных и касательных напряжений, можно оценить характер разрушения крепи.

Для определения характера разрушения кровли приняты критерии, позволяющие оценить возможность расслоения по контактам ослабления по напгастованию и разрушения вне контактов ослабления от вертикальных сжимающих напря-

жений или вследствие изгиба кровли над призабойным и выработанным пространством.

Условие расслоения по контактам ослабления по напластованию

$$r_{xy} > C + \sigma_y \operatorname{tg} \rho_k, \quad (\text{II.21})$$

где  $C$  — сцепление пород кровли по контактам напластований,  $\text{MN}/\text{m}^2$ ;  $\rho_k$  — угол внутреннего трения по контактам напластований, радиан.

При определении разрушения вне контактов ослабления по напластованию необходимо учитывать снижение устойчивости кровли вследствие естественной трещиноватости [50] и развития трещиноватости в процессе разрушения пород горным давлением. Предполагается, что развитие трещиноватости происходит вследствие хрупкого разрушения пород во времени на фоне деформаций ползучести [51].

Оценка возможности разрушения вне контактов напластования производится согласно

$$\sigma_y \geq \sigma_{\text{сж.п}} \phi_0, \quad (\text{II.22})$$

где  $\phi_0$  — коэффициент ослабления пород естественной трещиноватостью.

При этом угол наклона трещин разрушения может быть рассчитан из условия разрушения в плоскости максимальных касательных напряжений:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\sigma_y - \sigma_x - 2 \operatorname{tg} \rho_n r_{xy}}{\operatorname{tg} \rho_n (\sigma_y - \sigma_x) + 2 r_{xy}} \right],$$

где  $\rho_n$  — угол внутреннего трения пород вне контактов напластования, радиан.

Условие разрушения при изгибе

$$\sigma_x = \sigma_{\text{и.п}} \phi_1, \quad (\text{II.23})$$

где  $\sigma_{\text{и.п}}$  — предел прочности пород кровли на изгиб,  $\text{MN}/\text{m}^2$ ;  $\phi_1$  — коэффициент ослабления пород, учитывающий развитие трещиноватости под влиянием действующих напряжений.

Для расчета коэффициента  $\phi_1$  имеется формула, выведенная путем интегрирования дифференциального уравнения, связывающего развитие трещиноватости и действующие растягивающие напряжения, так как именно с ними связано хрупкое разрушение.

$$\phi_1 = \sqrt{\bar{n}+1} \sqrt{\phi_0^{\bar{n}+1} - A_p (\bar{n}+1) \sigma_x^{\bar{n}} t_n},$$

где  $\bar{n}$ ,  $A_p$  — эмпирические коэффициенты;  $t_{\bar{n}} = \frac{24}{n_c}$  — время поддержания кровли в призабойном пространстве от момента обнажения до выемки очередного цикла, ч;  $n_c$  — число циклов выемки угля в сутки.

Принятая гипотеза хрупкого разрушения пород позволяет рассчитать и время устойчивого состояния кровли, т.е. период от момента зависания кровли в выработанном пространстве до момента, когда может произойти полное разрушение кровли.

Для расчета времени устойчивого состояния кровли введена формула

$$t_y = \frac{\phi_1^{\bar{n}+1}}{A_p (\bar{n}+1) \sigma_x} \quad (II.24)$$

### § 3. Аналитическое определение смещений вмещающих пород до разрушения кровли

Общая конвергенция вмещающих пород в очистных выработках определяется величинами смещений кровли при поддержании призабойного пространства, а также смещениями кровли и почвы в процессе очистной выемки угля. Последнее в определенных условиях могут составить весьма существенную часть конвергенции.

Экспериментально-аналитические исследования показали, что смещения в горных выработках можно интерпретировать как результат упруго-вязкого деформирования пород под действием напряжений, возникающих в массиве [52].

При этом величина остаточных смещений зависящей консоли, изгибаемой поперечными силами, рассчитывается через упругие смещения [53].

Выражение для определения смещений кровли при поддержании призабойного пространства с учетом упругих деформаций имеет вид

$$v_{кр} = \frac{v_{кр.у}}{\phi_1} \left( 1 + \frac{E_n t_p}{3\mu_n} \right),$$

где  $v_{кр.у}$  — упругие смещения кровли, м;  $\mu_n$  — вязкость пород непосредственной кровли,  $MH \cdot ч / M^2$ .

Упругие смещения кровли определяются схемой нагружения рассматриваемого слоя пород. Влияние неравномерно распределенной нагрузки массива на кровлю интерпретируется как сумма равномерно распределенных нагрузок, равных разности последовательно возрастающего давления на каждом интервале  $\bar{F}_i$ .

При I схеме строения кровли (см. рис. 9,а) упругие смещения непосредственной кровли рассчитываются согласно уравнению

$$v_{кр.у} = \frac{1}{\bar{F}_n \bar{F}_n} \left[ \sum_{i=1}^n P_i \left[ (x_{i+1} - x_i) \frac{x_b - x_k}{6} + \frac{(x_b - x_{k+1})^2 - (x_b - x_i)^2}{4} \right] \times \right. \\ \left. \times (x_b - x_k)^2 - \sum_{k+1}^n P_i \frac{(x_{i+1} - x_k)^4 - (x_i - x_k)^4}{24} - \bar{F}_k \right], \quad (\text{II.25})$$

причем  $P_i$  определяются из (II.4).

При II схеме (см. рис. 9,б) для расчета смещений непосредственной кровли  $P_i = q_j$ , определяемому из (II.16).

Функция  $F_k$  определяется уравнениями (II.11), (II.12).

Для расчета смещений основной кровли имеется формула

$$v_{кр.у}^0 = \frac{1}{E_0 J_0} \left[ \sum_{i=1}^n P_i \left[ (x_{i+1} - x_i) \frac{x_b - x_k}{6} + \frac{(x_b - x_{i+1})^2 - (x_b - x_i)^2}{4} \right] \times \right. \\ \left. \times (x_b - x_k)^2 - \sum_{i=1}^n q_j \left[ (x_{i+1} - x_i) \frac{x_b - x_k}{6} + \frac{(x_b - x_{i+1})^2 - (x_b - x_i)^2}{4} \right] (x_b - x_k)^2 - \sum_{k+1}^n (P_i - q_j) \times \right. \\ \left. \times \frac{(x_{i+1} - x_k)^4 - (x_i - x_k)^4}{24} \right].$$

Смещения кровли и почвы при очистной выемке угля рассматриваются как следствие необратимого деформирования вмещающих пород, которое происходит вслед за перемещающейся линией очистного забоя в процессе их освобождения от опорного давления. Эти смещения можно определить, используя решение задачи об изгибе вязких слоев вслед за перемещающейся нагрузкой [53].

При этом наклон кровли или почвы  $\alpha_n$  может быть рассчитан по формуле

$$\alpha_n = 0,547 \frac{P_m}{2k_{y.o} \sqrt{\frac{5N}{v} \frac{c_{\text{под}}}{k_{y.o}}}} \quad (\text{II.26})$$

где  $P_m$  — максимальная величина нагрузки на спой пород непосредственной кровли или почвы в зоне опорного давления,  $\text{МН/м}^2$ ;  $k_{y.o}$  — коэффициент упругого основания,  $\text{МН/м}^3$ ;  $N = \mu \frac{h^3}{\nu}$  — модуль вязко-упругого споя непосредственной кровли или почвы,  $\text{МН}\cdot\text{м}\cdot\text{ч}$ ;  $c_{\text{под}}$  — скорость продвижения забоя,  $\text{м/ч}$ .

Максимальная величина нагрузки по контакту непосредственной кровли или почвы, определяется величиной опорного давления и рассматривается выше.

В качестве упругого основания для непосредственной кровли служит угольный пласт, а для непосредственной почвы нижележащий спой пород. Формула для расчета коэффициента упругого основания получена решением системы уравнений, определяющей связь напряжений и деформаций:

$$k_{y.o} = \frac{E_o(1-\nu_o)}{h_o(1-\nu_o-2\nu_o^2)}, \quad (\text{II.27})$$

где  $E_o$  — модуль деформации упругого основания,  $\text{МН/м}^2$ ;  $\nu_o$  — коэффициент Пуассона упругого основания;  $h_o$  — мощность споя упругого основания,  $\text{м}$ .

Определив угол наклона почвы или кровли, можно рассчитать смещения под влиянием очистных работ на любом расстоянии от забоя

$$v_{\text{оч}} = b_k \alpha_n, \quad (\text{II.28})$$

где  $b_k$  — расстояние от забоя до рассматриваемой точки,  $\text{м}$ .  
Таким образом, конвергенция пород в очистном забое в период между осадками труднообрушающихся споев пород составит

$$v_{\text{конв}} = v_{\text{кр}} + v_{\text{оч.кр}} + v_{\text{оч.поч}},$$

где  $v_{кр}$  — смещения кровли при поддержании призабойного пространства, мм;  $v_{оч.кр}$ ,  $v_{оч.поч}$  — соответственно смещения кровли и почвы при очистной выемке угля, мм.

#### § 4. Определение скоростей и величин смещений при осадках труднообрушающихся кровель

Скорости и величины смещений кровли в рассматриваемый период определяются расположением, характером и последовательностью разрушения, шагом обрушения и разрыхлением кровли в выработанном пространстве, мощностью пласта, сопротивлением крепи и окружающего массива движению разрушенных пород. Представляют интерес не только вертикальные, но и горизонтальные смещения и скорости смещений, которые влияют на устойчивость крепи.

Расчет скоростей смещений кровли при разрушении можно осуществить через ускорения, используя методы динамики твердых тел [39, 54].

Скорость вертикальных ( $v'$ ) и горизонтальных ( $u'$ ) смещений кровли рассчитывается по формулам:

$$v' = v'' t_p; \quad u' = u'' t_p, \quad (II.29)$$

где  $v''$ ,  $u''$  — соответственно вертикальные и горизонтальные ускорения, м/с<sup>2</sup>;  $t_p$  — время от момента разрушения кровли до перехода ее в новое равновесное состояние, с.

Для расчета ускорений получены уравнения, определяющие зависимость ускоренного движения блоков кровли, образовавшихся в период осадок труднообрушающегося споя пород под действием сил собственного веса, сопротивления крепи и окружающего массива.

При расположении прочного споя в основной кровле (см. рис. 11,а) вертикальные ускорения рассчитываются по формуле

$$v'' = g \left[ 1 + \frac{Q \frac{2c}{l_H + h_H \operatorname{ctg} \alpha} - 2F(f \sin \alpha + \cos \alpha)}{\gamma (h_o l_o + h_H l_H)} \right], \quad (II.30)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $Q$  — рав-

нодействующая сопротивления крепи, МН;  $c$  — координата приложения равнодействующей сопротивления крепи, м;

При креплении согласно варианту I (см. рис. 10, а) равнодействующая  $Q$  и положение равнодействующей  $c$  определяются по формулам:

$$Q = R_1 + R_2;$$

$$c = \frac{R_1 a_1 + R_2 a_2}{R_1 + R_2}, \quad (\text{II.31})$$

где  $a_1, a_2$  — расстояние от призабойного конца перекрытия первого и второго рядов крепи, м;  $R_1, R_2$  — сопротивление первого и второго рядов крепи, МН на стойку.

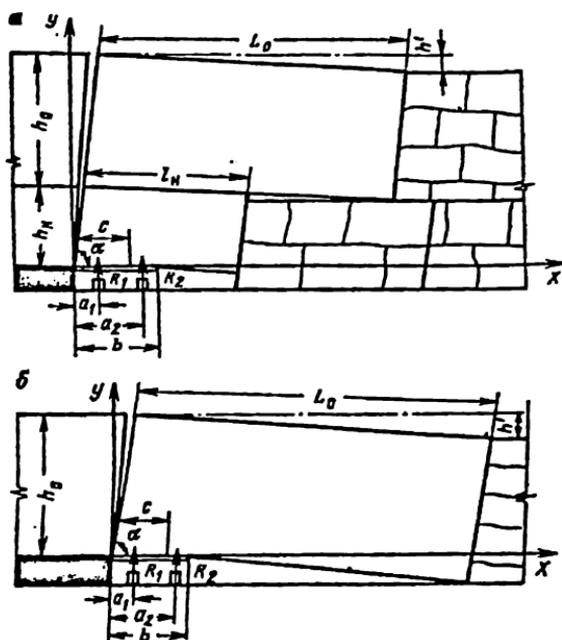


Рис. 11. Расчетные схемы для определения параметров, характеризующих проявления горного давления при осадках труднообрушающихся пород при их расположении:

а — в основной кровле; б — в непосредственной кровле

Для варианта II крепления (см. рис. 10,6)

$$Q = \sum_1^r \dot{R}_r + P_n;$$

$$c = \frac{3b^2 - a^2}{3(2b - a_1)} \quad (\text{II.32})$$

Функция  $F$  в уравнении (II.30) имеет вид

$$F = \frac{(f \sin \alpha - \cos \alpha) \operatorname{ctg} \alpha \left( \gamma h_0 L_0 + \gamma h_n l - \frac{2cQ}{l_n + h_n \operatorname{ctg} \alpha} \right)}{(1 + f^2) \sin 2\alpha + 2 \operatorname{ctg} \alpha (f^2 \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)} +$$

$$+ \frac{Q (f \cos \alpha + \sin \alpha) \left( 1 - \frac{2c}{l_n + h_n \operatorname{ctg} \alpha} \right)}{(1 + f^2) \sin 2\alpha + 2 \operatorname{ctg} \alpha (f^2 \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)} \quad (\text{II.33})$$

Ускорения при перемещении в горизонтальном направлении

$$u'' = \frac{g [F(1 + f^2) \sin 2\alpha - Q \left( 1 - \frac{2c}{l_n + h_n \operatorname{ctg} \alpha} \right) (f \cos \alpha + \sin \alpha)]}{\gamma (h_0 L_0 + h_n l_n)} \quad (\text{II.34})$$

Смещения кровли в период вторичных осадок зависят от возможности перемещения блоков разрушенной кровли, которые происходят до тех пор, пока прочный слой кровли со стороны выработанного пространства не опустится на обрушенные породы или почву. При запегании прочного слоя в основной кровле его перемещения со стороны выработанного пространства связаны с разрыхлением обрушенных пород и определяются по формуле

$$h' = m - (h_n - 1) h_n \quad (\text{II.35})$$

Зная значение  $h'$ , можно определить время, в течение которого будут происходить вторичные осадки, а затем и

скорости вертикальных и горизонтальных смещений, согласно выражениям (П.29) .

Время, в течение которого происходят осадки труднообрушающихся пород,

$$t_p = \sqrt{\frac{2v_c}{v''}},$$

где  $v_c$  — смещение центра тяжести разрушенной кровли,

$$v_c = \frac{h'}{L_0} \frac{h_n l_n (l_n + h_n \operatorname{ctg} \alpha) + h_0 L_0 [L_0 + 2h_n \operatorname{ctg} \alpha]}{2(h_n l_n + h_0 L_0)}. \quad (\text{П.36})$$

Смещения кровли по первому и второму ряду крепи:

$$v_1 = v_c - \left( \frac{L_0}{h'} v_c - a_1 \right) \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{h'}{L_0} \right); \quad (\text{П.37})$$

$$v_2 = v_1 + (a_2 - a_1) \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{h'}{L_0} \right).$$

Величина горизонтальных смещений центра тяжести блоков кровли

$$u_c = \frac{u'' t_p^2}{2}. \quad (\text{П.38})$$

Итак, получены все необходимые зависимости для расчета скоростей и величин смещений при осадках труднообрушающихся пород в случае, если они расположены в основной кровле. Для расчета этих величин при заpegании их в непосредственной кровле (см. рис. 11,6) следует в уравнениях (П.30), (П.33), (П.34) и (П.36) приравнять к нулю  $h_0$ ,  $L_0$ , а  $h_n$ ,  $l_n$  заменить соответственно на  $h_0$  и  $L_0$ , причем  $h' = m$ .

При выборе параметров крепи необходимо, чтобы ее податливость соответствовала общим смещениям кровли в пе-

риод между осадками труднообрушающихся пород и при разрушении кровли над призабойным пространством во время осадок. Наряду с этим, зная интенсивность проявлений осадок, характеризующую скоростями и ускорениями при динамических смещениях кровли, а также величину горизонтальных перемещений кровли, можно обоснованно подойти к расчету параметров крепи, связанных с работой гидросистемы и устойчивостью крепи.

### § 5. Расчет сопротивления крепи при разрушении кровли

Основным условием эффективного управления кровлей является правильный выбор сопротивления крепи, при котором обеспечивается поддержание кровли над призабойным пространством. При переходе кровли в новое равновесное состояние после осадок расчет сопротивления крепи можно осуществлять исходя из условия равновесия системы крепь-кровля с учетом взаимодействия разрушенных пород с окружающим массивом. Эта задача может быть решена с позиций статики твердого тела путем решения системы уравнений равновесия [54]. Для расчетов приняты обобщающие схемы разрушения, изображенные на рис. 11, при расположении прочного споя в основной (а) и непосредственной (б) кровле. Для обеспечения поддержания кровли необходимо определить не только общее сопротивление крепи, но также сопротивление крепи по рядам и распределение давления на контакте перекрытия с кровлей.

Так же как и при расчетах в период между осадками, рассмотрим два варианта распределения сопротивления и расстановки крепи (см. рис. 10).

При разрушении кровли по схеме (см. рис. 11,а) и расстановке крепи согласно варианту I (рис. 10,а) получена следующая зависимость для расчета величины давления на перекрытие со стороны выработанного пространства, при котором обеспечивается поддержание кровли в состоянии равновесия:

$$q_2 = \frac{6F_1 - (3F_2 - b) b q_1}{b(3F_2 - 2b)}, \quad (\text{II.39})$$

где  $\bar{F}_1 = F_2(k_3 + \gamma h_N i_N) - f [2F_3 h_N \operatorname{ctg} \alpha + \gamma h_N l_N (l_N + h_N \operatorname{ctg} \alpha)]$ ; (II.40)

$$F_2 = [f + (1 + f^2) \frac{\sin 2\alpha}{2}] [l_N + (h_N - h') \operatorname{ctg} \alpha]; \quad (\text{II.41})$$

$$F_3 = \gamma h_0 L_0 \left\{ 1 - \frac{f(L_0 + h_0 \operatorname{ctg} \alpha)}{[L_0 + (h_0 - h') \operatorname{ctg} \alpha] [f + (f^2 + 1) \frac{\sin 2\alpha}{2}]} \right\}. \quad (\text{II.42})$$

Значение  $h'$  рассчитывается по (II.35).

Давление на перекрытие со стороны забоя  $q_1$  может быть задано.

Общее сопротивление крепи

$$Q = \frac{(q_1 + q_2) b}{2}.$$

Сопротивления крепи для первого и второго от забоя ряда:

$$R_1 = \frac{Q(a_2 - c)}{a_2 - a_1}; \quad (\text{II.43})$$

$$R_2 = \frac{Q(c - a_1)}{a_2 - a_1}. \quad (\text{II.44})$$

Координата приложения равнодействующей сопротивления крепи

$$c = \frac{(q_1 + 2q_2) b}{3(q_1 + q_2)}.$$

При расположении стоек крепи и распределении сопротивления по перекрытию согласно варианту П (см. рис. 10,б) удельное давление на перекрытие

$$q = \frac{F_1(a_r - c)}{(F_2 - c) \left( b - \frac{a_1}{2} \right) \left( a_r - \frac{\sum a_i}{r} \right)}, \quad (\text{II.45})$$

где  $a_r$  — расстояние до последнего ряда крепи, м.  
 Здесь  $F_1$  и  $F_2$  определяются из (II.40), (II.41).  
 Общее сопротивление крепи

$$Q = q \left( b - \frac{a_1}{2} \right) \frac{\left( a_r - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r a_i \right)}{a_r - c}. \quad (\text{II.46})$$

Сопротивление призабойной крепи по всем рядам

$$R_r = \frac{Q(a_r - c)}{ra_r - \sum_{i=1}^r a_i}. \quad (\text{II.47})$$

Сопротивление посадочной крепи

$$P_n = Q \left[ 1 - \frac{(q - c)r}{ra_r - \sum_{i=1}^r a_i} \right] \quad (\text{II.48})$$

Где

$$c = \frac{3b^2 - a_1^2}{6(2b - a_1)} + \frac{a_r}{2}.$$

При расположении труднообрушающихся пород в непосредственной кровле (рис. 11,б) расчет давления на перекрытие производится по формулам (II.39) и (II.45). Однако при этом  $h_0$ ,  $L_0$  приравниваются к нулю, а  $h_n$  и  $l_n$  необходимо заменить  $h_0$  и  $L_0$ .

При расчетах общего сопротивления крепи, распределения давления по рядам и перекрытию требуется в конкретных условиях определить параметры разрушения кровли: высоту зоны обрушения, шаг обрушения непосредственной и основной кровли, угол наклона трещин разрушения. Указанные параметры крепи необходимы также для правильной оценки взаимодействия системы крепь — кровля, определения усилий в элементах крепи и расчета ее прочности при конструировании.

## ГЛАВА III ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

### § 1. Проявления горного давления

Проявления горного давления в очистном забое определяются напряженно-деформированным состоянием и взаимодействием с крепью части массива в кровле угольного пласта, образующей в выработанном пространстве зону обрушения. Общая мощность споев пород, которую необходимо рассматривать для прогнозирования поведения кровли в призабойном пространстве, определяется строением кровли, разрыхлением пород при обрушении, мощностью пласта. На основе предложенных методов расчета были вычислены максимальные значения высоты зоны обрушения при различном строении кровли и мощности пласта.

Расчеты показывают, что при залегании в кровле пород одного типа (табл. 4) высота зоны обрушения возрастает с увеличением прочности пород.

Таблица 4

Мощность пласта $m$ , м	Высота зоны обрушения $h_{кр}$ , м			
	Тип пород			
	Легкообрушающиеся	Средней обрушаемости	Труднообрушающиеся	Весьма труднообрушающиеся
0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
2,0	5,0	8,0	10,0	12,0
3,0	9,0	13,5	19,5	22,5
4,0	14,0	20,0	30,0	40,0

Следует отметить, что приведенные размеры высоты зоны обрушения соответствуют предельной мощности легкообрушающихся и средней обрушаемости пород непосредственной кровли, при превышении которых осадки трудно-

обрушающихся пород, залегающих в вышепежающем массиве, не будут влиять на проявления горного давления в очистной выработке.

Если в непосредственной кровле залегают породы легкообрушающиеся или средней обрушаемости мощностью меньше предельной, а основная кровля представлена труднообрушающимися или весьма труднообрушающимися породами, то высота зоны обрушения зависит от мощности пласта, мощности и типа непосредственной кровли и типа пород основной кровли (табл. 5). При таком строении кровли высота зоны обрушения уменьшается.

Таблица 5

Мощность пласта, м	Непосредственная кровля		Тип пород основной кровли	Общая высота зоны обрушения $h_{кр}$ , м
	тип пород	$h_{н}/m$		
1,0	Легкообрушающиеся	1,0	Труднообрушающиеся	1,5
2,0				8,0
3,0				15,0
4,0				22,0
1,0	Легкообрушающиеся	1,0	Весьма труднообрушающиеся	2,5
2,0				9,0
3,0				16,5
4,0				28,0
1,0	Средней обрушаемости	2,0	Труднообрушающиеся	3,0
2,0				11,0
3,0				19,5
4,0				28,0
1,0	Средней обрушаемости	2,0	Весьма труднообрушающиеся	4,0
2,0				12,0
3,0				22,5
4,0				36,0

Изложенные данные о формировании зоны обрушения, связанные с характером разрыхления пород в выработанном пространстве, объясняют особенности и разнообразие проявлений горного давления в призабойном пространстве при труднообрушающихся кровлях:

1. При небольшой мощности пласта интенсивность проявлений горного давления в очистном забое с труднообрушающимися кровлями возрастает незначительно по сравнению с нормальными условиями в связи с плавным опусканием кровли,

2. Неоднородный характер разрыхления пород в зоне обрушения в связи с различным строением кровли и наличием плоскостей ослаблений приводит к многостадийности проявлений осадок кровли.

3. Условия, при которых проявляются осадки труднообрушающихся пород основной кровли, не определяются однозначно, так как зависят от строения кровли, характера разрыхления пород, мощности пласта и т.д.

Напряженное состояние кровли в периоды между осадками в значительной степени определяется давлением вышележащего массива, которое находится в сложной зависимости от мощности пласта, характера обрушения, разрыхления и уплотнения пород в выработанном пространстве, глубины разработки, размеров зависающих консолей, расположения прочного слоя в кровле, деформационных свойств пород и угля, сопротивления крепи.

С увеличением мощности пласта давление массива увеличивается, так как возрастают перемещения в массиве, связанные с обрушением пород в выработанном пространстве. При этом увеличивается расстояние от забоя до обпаста восстановления напряженного состояния в выработанном пространстве и более значительная часть веса массива передается на призабойное пространство. Однако рост давления происходит не пропорционально увеличению мощности пласта.

Естественно, что с увеличением глубины разработки давление массива на кровлю увеличивается; однако оно также увеличивается и на обрушенные породы, что приводит к более интенсивному их уплотнению. Область восстановления напряженного состояния в выработанном пространстве приближается к забою, следовательно, с глубиной характер распределения давления массива на кровлю и выра-

ботанное пространство изменяется. В результате, хотя абсолютные значения давления на кровлю с глубиной возрастают, отношения их к  $uH$  уменьшаются.

Характер распределения нагрузки массива по длине консоли неравномерный и имеет вид, изображенный на рис. 9. Минимальное давление — на конце консоли, максимальное — на границе пластической зоны. Увеличиваясь от величины порядка  $(0,1-0,8) uH$ , давление резко возрастает в призабойной зоне, достигая максимума, равного  $(2,0-2,5) uH$ , на границе зоны пластического состояния угля.

С увеличением мощности консоли оно увеличивается одновременно по всей длине консоли пропорционально мощности, возведенной в третью степень.

С увеличением длины зависающих консолей значения минимума и максимума давления вышележащего массива уменьшаются, однако величина передаваемого давления на нижележащие слои непосредственной кровли возрастает.

В случае расположения труднообрушаемого слоя пород в непосредственной кровле (см. рис. 9, а) жесткость угольного пласта и сопротивление крепи способствуют повышению давления на контакте труднообрушающегося слоя пород с вышележащим массивом. Наиболее значительное влияние оказывает жесткость пласта, под которой понимается отношение воспринимаемой пластом нагрузки к смещениям по линии забоя.

При запегании труднообрушающихся пород в основной кровле (рис. 9, б) благодаря наличию более слабых пород в непосредственной кровле жесткость кровли существенно уменьшается. В связи с этим уменьшается нагрузка массива на основную кровлю.

По контакту основной и непосредственной кровли возникают нормальные к напластованию напряжения, величина которых определяется давлением массива на основную кровлю, сопротивлением крепи, а также размерами зависающих консолей и модулями деформации непосредственной и основной кровли. Разумеется, что при увеличении нагрузки массива на основную кровлю, жесткости угольного пласта и сопротивления крепи давление по контакту возрастает. Оно возрастает при увеличении длины консоли основной кровли, мощности и модуля деформации непосредственной и уменьшается с увеличением мощности и модуля деформации основной, а также длины консоли непосредственной кровли.

Характер распределения давления по контакту непосредственной и основной кровли несколько отличается от распределения давления массива на основную кровлю. Величина давления на конце консоли непосредственной кровли выше, чем по линии обрушения основной кровли (рис. 12). В окрестности забоя происходит более резкое возрастание нагрузки на непосредственную кровлю, а над забоем она превышает величины нагрузки массива на основную кровлю.

Закономерности распределения давления на кровлю и деформационные свойства угольного пласта в основном определяют величины распределения интенсивности нагрузки, поперечных сил и изгибающих моментов, от которых зависит напряженное состояние кровли. Сопротивление крепи при этом также оказывает влияние. Распределение давления по контакту перекрытия крепи с кровлей зависит от размеров перекрытия, сопротивления стоек и их расстановки. С увеличением сопротивления крепи и уменьшением размеров перекрытия давление по контакту перекрытия увеличивается. При более близком расположении стоек крепи к забою нагрузка на призабойную часть перекрытия возрастает. Наиболее благоприятным для эффективного поддержания кровли в период между осадками прочных слоев следует считать равномерное распределение давления по перекрытию.

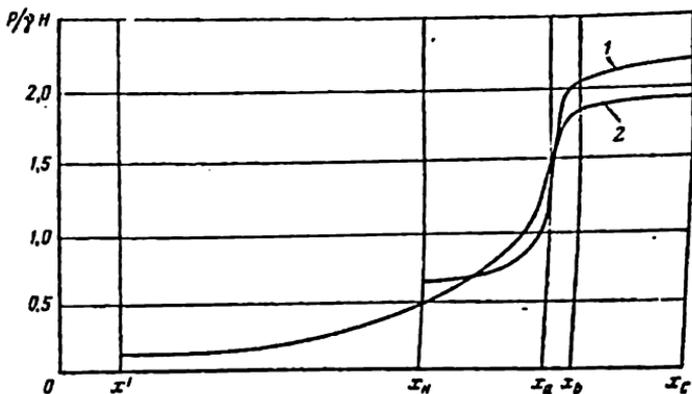


Рис. 12. Распределение давления на непосредственную кровлю (кривая 1) и основную (кривая 2) в период между осадками труднообрушающихся пород, расположенных в основной кровле

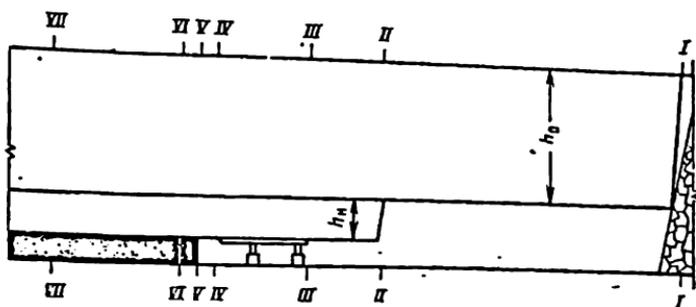


Рис. 13. Схема исследования напряженно-деформированного состояния пород кровли в периоды между осадками труднообрушающихся пород

При этом не создается местных концентраций напряжений в кровле. Однако повышение сопротивления крепи у границы поддерживаемого пространства обеспечивает снижение поперечных сил и изгибающих моментов над забоем, что способствует разрушению кровли во время осадок труднообрушающихся слоев пород по ряду, расположенному со стороны выработанного пространства.

Для оценки напряженного состояния кровли необходимо рассматривать все компоненты напряжений.

На рис. 13 представлена схема исследования напряженного состояния пород кровли в периоды между осадками труднообрушающихся пород.

Характер распределения компонент напряжений в непосредственной и основной кровле по их высоте в сечениях I - I - УП - УП показан на рис. 14.

Максимальные напряжения имеют место в конце пластической зоны угольного пласта (сечение УП - УП). Нормальная составляющая напряжений (рис. 14,а) в этом сечении уменьшается от нижней плоскости споя пород до контакта с вышележащими споями. Она зависит от интенсивности нагрузки, действующей по верхнему контакту и нижней плоскости, а также от веса споя. Распределение величин напряжений в сечении определяется соотношением действующих сил. Влияние сил, действующих по контактам, убывает от плоскости прилегания. Собственный вес споя увеличивает напряжения.

Максимальные значения напряжений, действующих вдоль напастования (рис. 14,б), имеют место по контактам

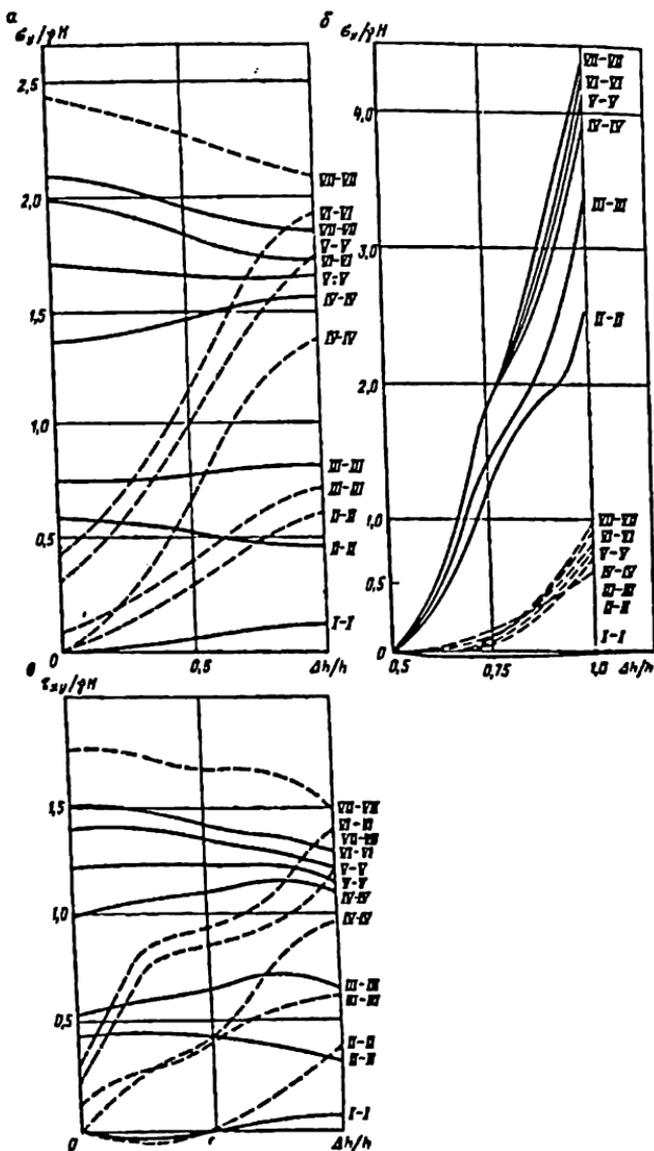


Рис. 14. Распределение коэффициентов концентрации напряжений в периоды между осадками труднообрушающихся пород основной кровли (сплошная линия) и непосредственной (штриховая линия) :

*а* – нормальные; *б* – горизонтальные; *в* – касательные

споев пород непосредственной и основной кровли с прилегающими породами или угольным пластом. Эти напряжения зависят от изгибающих моментов, которые определяются интенсивностью нагрузки и поперечными силами, направленными нормально к напастованию, а также длиной консоли и мощностью споев пород непосредственной и основной кровли.

Напряжения, возникающие от действия изгибающих моментов, нелинейно растут с увеличением длины консоли, а с увеличением мощности споев при неизменном давлении массива уменьшаются. Учитывая, что давление массива при увеличении мощности пласта растет, рассматриваемые напряжения также соответственно увеличиваются с увеличением мощности пласта.

Интенсивность нагрузки несколько изменяет картину напряжений, действующих вдоль напастований: уменьшает максимальные растягивающие и сжимающие напряжения по всей длине консоли в плоскостях, близких к контактам, и увеличивает их в окрестности нейтральной линии.

На величину касательных напряжений влияют поперечные силы, мощность слоя, трение на контактах с примыкающими слоями либо с крепью. Эти напряжения увеличиваются с ростом поперечных сил и уменьшаются с увеличением мощности слоя, достигая максимума в середине слоя. Касательные напряжения, возникающие вследствие трения по контактам, существенно изменяют картину. Максимальные напряжения на контактах пропорциональны действующей интенсивности нагрузки и коэффициенту трения пород. В средних плоскостях слоя их влияние уменьшается.

Для оценки состояния кровли необходимо рассмотреть напряжения, действующие по линии отжима угля (сечении VI-VI), где наиболее вероятны разрушения. Здесь характер распределения нормальных и касательных напряжений в непосредственной кровле отличается тем, что над угольным пластом они значительно ниже по сравнению с контактом непосредственной и основной кровли, где эти напряжения имеют максимальное значение.

В других сечениях все составляющие напряжений уменьшаются. Нормальные и касательные напряжения при отжиме непосредственной кровли отсутствуют. По контакту перекрытия крепи с непосредственной кровлей они определяются распределением сопротивления крепи и моментом трения между перекрытием и породами.

Аналитические исследования показывают, что на напряженное состояние кровли прежде всего влияет мощность пласта. При увеличении мощности пласта напряжения в кровле возрастают за счет мощности кровли, участвующей в формировании давления, и влияния выработанного пространства. Более мощная и, следовательно, жесткая кровля воспринимает более высокую нагрузку массива. Это, естественно, приводит к росту напряжений. Причем определенную роль играет строение кровли. При залегании труднообрушающихся пород в непосредственной кровле высота зоны обрушения больше, чем при расположении их в основной кровле. Поэтому напряжения в этом случае также будут выше. Если в непосредственной кровле имеют место более слабые породы по сравнению с основной, то на напряжения в прочном слое основной кровли оказывает влияние мощность слоя непосредственной кровли. С увеличением мощности непосредственной кровли напряжения в основной кровле уменьшаются, особенно по контакту с вышепежающим массивом.

Распределение напряжений в основной и непосредственной кровле качественно отличается. В основной кровле наиболее значительными являются горизонтальные напряжения. Они существенно превышают вертикальные составляющие. В непосредственной кровле вертикальные, а также касательные напряжения до двух раз превышают горизонтальные. Такой характер распределения напряжений в кровле зависит от соотношения мощности и длины зависающих консолей. При больших зависаниях кровли горизонтальные напряжения увеличиваются более значительно, чем вертикальные и касательные. Указанные закономерности подтверждаются результатами расчетов максимальных напряжений в прочном слое пород на границе зоны отжима для различных мощностей пласта и строения кровли при глубине разработки 400 м, приведенными в табл. 6.

С увеличением глубины разработки все компоненты напряжений возрастают по некоторой кривой параболического типа пропорционально росту давления массива. Однако увеличение давления происходит медленнее, чем глубины разработки, поэтому коэффициенты концентрации напряжений с глубиной уменьшаются (рис. 15).

Сопrotивление крепи способствует росту нормальных напряжений в кровле у конца перекрытия со стороны выработанного пространства при равенстве сопротивления крепи

Таблица 6

Мощность пласта, м	Отношение мощности слоев пласта в пределах зоны обрушения		Длина консоли, м		Максимальные коэффициенты концентрации напряжений в труднообрушающемся слое пород		
	непосредственной кровли	основной кровли	непосредственной кровли	основной кровли	$\frac{\sigma_x}{\gamma H}$	$\frac{\sigma_y}{\gamma H}$	$\frac{\tau_{xy}}{\gamma H}$
1,0	4,0	-	20,0	-	2,76	1,63	1,14
2,0	5,0	-	20,0	-	2,82	1,75	1,23
3,0	6,5	-	20,0	-	3,02	1,87	1,31
4,0	7,5	-	20,0	-	3,30	2,04	1,43
1,0	1,0	1,0	6,0	20,0	2,34	1,35	0,95
2,0	1,0	3,0	6,0	20,0	2,52	1,53	1,18
3,0	1,0	4,0	6,0	20,0	2,70	1,73	1,24
4,0	1,0	4,5	6,0	20,0	2,92	1,93	1,30
1,0	2,0	1,0	6,0	20,0	2,30	1,15	0,87
2,0	2,0	3,5	6,0	20,0	2,45	1,21	1,10
3,0	2,0	4,5	6,0	40,0	2,76	1,41	1,27
4,0	2,0	5,0	6,0	20,0	2,82	1,47	1,15
3,0	2,0	4,5	6,0	40,0	2,76	1,41	1,35
4,0	2,0	5,0	6,0	20,0	2,82	1,47	1,21
4,0	2,0	5,0	6,0	40,0	2,82	1,47	1,58

по рядам и обычном расположении стоек. Максимальные напряжения превышают средние значения сопротивления примерно на 30%. Напряжения в непосредственной кровле, действующие вдоль напластования, при увеличении сопротивления крепи уменьшаются, начиная от границы поддерживаемого пространства до пинии отжима угля, так как при этом уменьшаются изгибающие моменты. Напряжения в основной кровле при увеличении сопротивления крепи изменяются незначительно. Влияние сопротивления крепи на величину касательных напряжений в кровле двояко. Напряжения, возникающие за счет внутренних сил, с повышением сопротивления крепи уменьшаются. Однако непосредственно над поддерживаемым пространством, по контакту кровли с перекрытием, касательные напряжения увеличиваются.

Закономерности распределения напряжений предопределяют характер разрушения кровли.

При наличии в непосредственной кровле малопрочных пород и слабых контактов типа угольных прослоев разрушение происходит над зоной пластического состояния угольного пласта от сжимающих напряжений. При залегании в непосредственной или основной кровле прочных пород причиной их разрушения являются растягивающие напряжения вследствие недостаточных уступий для разрушения от сжатия,

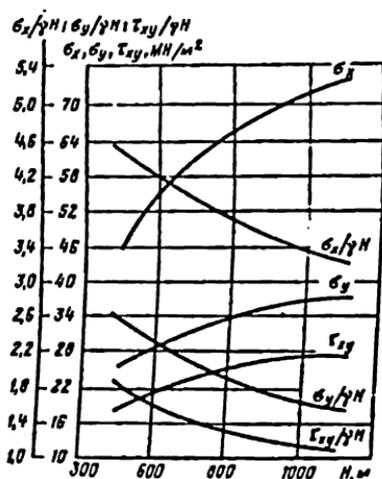


Рис. 15. Зависимость напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в труднообрушающемся слое кровли от глубины разработки

причем прочные породы образуют консоли большой длины. Это приводит, в свою очередь, к росту растягивающих, а также касательных напряжений.

Строение кровли предопределяет схему разрушения. При небольшой мощности слабых пород непосредственной кровли в связи с распоением и разрушением их в зоне опорного давления над призабойным пространством образуются блоки небольших размеров, а прочные породы основной кровли зависят на значительных площадях. Более мощные слои пород непосредственной кровли средней прочности способствуют формированию повышенной нагрузки на основную кровлю. Причем напряжения в непосредственной и основной кровле распределяются таким образом, что над призабойным пространством, в основном по линии отжима угля, образуются блоки значительных размеров. Одновременно шаг обрушения основной кровли несколько уменьшается. В результате соотношение между размерами блоков непосредственной и основной кровли уменьшается. Характерно, что чем выше мощность пласта и глубина разработки, тем более узкими и мощными будут блоки непосредственной и основной кровли. Указанные обстоятельства объясняют, почему размеры шага обрушения пород основной кровли в Кузбассе, где преобладают мощные пласты с непосредственной кровлей средней обрушаемости, меньше, чем в других бассейнах (см. табл. 2).

Повышение сопротивления крепи поддерживающего типа способствует увеличению размеров блоков разрушающейся непосредственной кровли над крепью за счет уменьшения горизонтальных и касательных напряжений. Наряду с этим при увеличении сопротивления крепи уменьшается распоение пород над поддерживаемым пространством, что также способствует увеличению несущей способности кровли и, следовательно, увеличению шага обрушения непосредственной кровли.

Повышение сопротивления призабойного ряда крепи и уменьшение расстояния от забоя до этого ряда способствует более равномерному распределению давления по перекрытию, причем нагрузка на призабойный конец перекрытия повышается. При увеличении длины перекрытия распределенная нагрузка на перекрытие уменьшается. В то же время общее требуемое сопротивление крепи повышается.

При применении крепи оградительно-поддерживающего типа характер взаимодействия кровли с крепью изменяется

по сравнению с крепями поддерживающего типа. Нагрузка на стойки уменьшается, а на перекрытие увеличивается в связи с уменьшением размеров поддерживаемого пространства. Особенность нагружения этих крепей состоит в том, что увеличиваются сосредоточенные изгибающие усилия на призабойной части перекрытия, причем с уменьшением размеров перекрытия эти усилия растут. При расположении стоек по возможности ближе к забою изгибающие усилия и нагрузка на стойки снижаются.

Следует отметить, что разрушение кровли зависит от скорости подвигания забоя. С ростом скорости подвигания уменьшается разрушение кровли в зоне опорного давления в связи с меньшим развитием трещиноватости. Шаг обрушения при этом увеличивается.

Закономерности смещений труднообрушаемой кровли отличаются в периоды до наступления предельного состояния и при разрушении пород.

В период до разрушения труднообрушаемых споев пород смещения зависят от напряженного состояния кровли и деформационных свойств пород.

Смещения, связанные с перемещением пинии забоя при ведении очистных работ, зависят от величины опорного давления, мощности споя и вязкости пород непосредственной кровли, а также от упругих свойств и мощности основной кровли. Они увеличиваются пропорционально пригрузке вышележащего массива. С увеличением вязкости пород, мощности споя пород непосредственной кровли и скорости подвигания забоя смещения уменьшаются. Чем больше жесткость основной кровли, тем меньше ее смещения при выемке угля. Указанные смещения составляют 15–30% от общей величины. Смещения зависящих консолей определяются распределением давления вышележащего массива, мощностью, длиной консоли и упруговязкими свойствами кровли, временем от момента ее обнажения, сопротивлением крепи.

Напряженное состояние непосредственной кровли является основным фактором, предопределяющим ее смещения, которые прежде всего зависят от строения кровли. В период между осадками при расположении прочных пород в непосредственной кровле они меньше. Вместе с тем предельные значения смещений, при которых происходит разрушение кровли, увеличиваются с увеличением прочности

пород. При увеличении мощности пласта, длины консоли и глубины разработки смещения увеличиваются, так как напряжения в кровле растут.

С увеличением сопротивления крепи смещения уменьшаются. Однако в связи с тем, что напряженное состояние кровли определяется в основном давлением массива, а крепь влияет только на поведение нижних слоев пород, существенного снижения смещений при увеличении сопротивления крепи не происходит.

При осадках труднообрушаемых пород над призабойным пространством смещения кровли определяются мощностью пласта, характером обрушения нижних слоев пород, длиной обрушающейся консоли, размерами поддерживаемого пространства, сопротивлением крепи. При отсутствии слабых пород в непосредственной кровле и опускании консоли в выработанном пространстве на почву они увеличиваются пропорционально росту мощности пласта.

Если в непосредственной кровле залегают легкообрушающиеся или средней обрушаемости породы, то смещения уменьшаются, причем в первом случае более значительно. Характерно, что чем ближе к забою расположены стойки крепи и меньше размеры поддерживаемого пространства, тем меньше величина смещений при осадках.

Смещения кровли в рассматриваемый период практически невозможно предотвратить с помощью крепи, и ее податливость должна соответствовать этим смещениям до момента наступления равновесного состояния кровли.

При осадках труднообрушаемых пород над крепью существенное значение имеет скорость смещений, которая может достигать больших величин. Скорость смещений в рассматриваемый период меняется в зависимости от ускорений и времени, в течение которого происходит переход кровли из одного равновесного состояния в другое.

Ускорения могут достигать ускорений свободного падения. Однако в связи с трением обрушающихся пород и сопротивлением крепи они значительно меньше. Их величины прежде всего зависят от соотношения объема разрушенных пород и сопротивления крепи, а также коэффициента трения пород и угла наклона трещин. Скорость смещений и ускорения уменьшаются с увеличением сопротивления крепи. Причем чем меньше объем разрушенных пород и больше коэффициент трения, тем меньше скорости и уско-

рения. Уменьшение угла наклона трещин приводит к снижению вертикальных и увеличению горизонтальных ускорений. Изменение вертикальных и горизонтальных ускорений зависит наряду с указанными факторами от расположения стоек крепи. С уменьшением расстояния от забоя до первого и второго ряда крепи ускорения уменьшаются.

При запегании в непосредственной кровле труднообрушающихся пород смещения и, следовательно, скорости будут больше, чем при расположении их в основной кровле. С увеличением мощности пласта и длины консоли скорости смещений также растут. При разрушении кровли блоками большой мощности нагрузка на крепь увеличивается и при этом с возрастанием ускорений увеличиваются скорости.

Время, в течение которого проявляются осадки труднообрушающихся пород, зависит от величин смещений и ускорений. С увеличением смещений время осадок растет. Чем больше ускорения, тем кратковременнее проходят осадки.

Обобщая результаты исследований, можно сделать следующие выводы о закономерностях формирования напряженно-деформированного состояния кровли и проявлениях горного давления в очистных забоях с труднообрушающимися кровлями.

1. Для оценки проявлений горного давления в очистном забое необходимо рассматривать часть массива, мощность которого не менее высоты зоны обрушения.

Напряженно-деформированное состояние кровли и проявления горного давления существенно отличаются в периоды между обрушениями прочных споев кровли и при их разрушении и обрушении в выработанном пространстве.

Напряженное состояние кровли в периоды между обрушениями прочных споев характеризуется повышенными напряжениями в окрестности очистного забоя, обусловленными способностью прочных пород зависеть на значительных площадях, образуя консоли длиной более двух размеров ширины поддерживаемого пространства.

При осадках труднообрушающегося споя происходят интенсивные деформации, а напряжения в кровле значительно снижаются. Вместе с тем усиливаются динамические проявления горного давления – смещения кровли и давления на крепь достигают максимальных значений.

2. Высота зоны обрушения увеличивается с увеличением мощности пласта и уменьшением коэффициента разрыхления

пород. В случае залегания труднообрушающихся пород в непосредственной кровле эта высота больше по сравнению с условиями, когда между угольным пластом и прочным споем пород расположены легкообрушающиеся или породы средней обрушаемости.

3. Напряжения в кровле увеличиваются с увеличением высоты зоны обрушения, мощности пласта и длины консоли труднообрушающегося споя пород. Максимальные напряжения в кровле имеют место при залегании труднообрушающегося споя пород в непосредственной кровле и предельной длине консоли. При наличии в непосредственной кровле более слабых пород напряжения как в зоне опорного давления, так и над призабойным пространством уменьшаются с увеличением их мощности. При увеличении мощности труднообрушающегося споя пород и глубины разработки напряжения в кровле увеличиваются. С повышением сопротивления крепи увеличиваются вертикальные, уменьшаются горизонтальные и касательные напряжения, а в целом напряженность кровли снижается.

4. Разрушение кровли происходит постепенно и является временным процессом. При наличии в кровле слабых пород разрушение происходит по контактам ослабления над зоной опорного давления угольного пласта от сжимающих напряжений. При залегании более прочных пород разрушение их происходит по границе зоны отжима, а причиной разрушения являются растягивающие напряжения. Причем перед разрушением кровля расплаивается по плоскостям ослабления. Размеры разрушающихся блоков и консолей увеличиваются с ростом прочности и мощности споев. С увеличением мощности пласта и глубины разработки длина блоков уменьшается. С повышением сопротивления крепи увеличиваются несущая способность непосредственной кровли и размеры разрушающихся над крепью блоков. При определенном сопротивлении крепи можно обеспечить разрушение труднообрушающихся пород непосредственной кровли за пределами поддерживаемого пространства. Повышением сопротивления крепи невозможно предотвратить разрушение по линии отжима труднообрушающихся споев пород, залегающих в основной кровле.

5. Проявления осадок труднообрушающихся пород при их разрушении над призабойным пространством и осложнения с управлением кровли имеют место, если эти спои распо-

жены в кровле на расстоянии менее 3 мощностей угольного пласта при легкообрушающихся породах и 4 мощностей пласта — при породах непосредственной кровли средней обрушаемости. С увеличением мощности угольного пласта, мощности и прочности труднообрушающихся пород сопротивление крепи, необходимое для поддержания кровли, растет. Характерно, что по призабойному ряду крепи требуется более высокое сопротивление. Причем, чем выше это сопротивление, тем более равномерно распределяется давление по перекрытию, которое обычно сосредоточивается со стороны выработанного пространства. С уменьшением длины перекрытия общая нагрузка на крепь уменьшается и увеличивается нагрузка на перекрытие.

6. В период между осадками труднообрушающихся пород смещения кровли так же, как и напряжения, увеличиваются с увеличением мощности пласта, длины консоли прочного споя, глубины разработки, а также с уменьшением мощности прочного споя. При увеличении модуля деформации, вязкости непосредственной кровли, сопротивления крепи и скорости подвигания забоя они уменьшаются. Предельные значения смещений, при которых происходит разрушение кровли, увеличиваются с увеличением прочности пород.

При осадках труднообрушающихся пород над крепью смещения кровли возрастают с увеличением мощности пласта и шага обрушения прочных споев пород и уменьшаются при приближении стоек к забою и уменьшении размеров поддерживаемого пространства.

Скорости смещений в период осадок труднообрушающихся споев пород над крепью при увеличении смещений кровли увеличиваются. С увеличением сопротивления крепи значения величин скоростей смещений уменьшаются, но при этом увеличивается продолжительность осадок.

## § 2. Закономерности обрушения кровель

Наиболее существенным показателем, определяющим интенсивность проявлений горного давления в очистных забоях с труднообрушающимися кровлями, является шаг обрушения.

Шаг первого и последующих обрушений зависит от многих факторов. Однако степень и характер влияния их изучены недостаточно. На основе данных, полученных по 580 лавам Донбасса, Кузбасса, Карагандинского и Печорского бассейнов методами математической статистики был выполнен анализ зависимости первого и последующих шагов обрушения непосредственной и основной кровли от следующих факторов: мощности и прочности непосредственной и основной кровли, мощности угольного пласта, глубины разработки, длины лавы, скорости подвигания очистного забоя, ширины поддерживаемого пространства и ширины захвата выемочного механизма. Помимо этого изучено влияние шага обрушения непосредственной кровли на шаг обрушения основной.

Так как характер разрушения кровли зависит от литологического состава кровли, то с учетом влияния этого фактора кровли подразделялись на три группы (табл. 7):

Таблица 7

Группа кровли	Породы кровли	
	непосредственной	основной
I	Глинистый сланец	Песчанистый сланец
II	Глинистый или песчанистый сланец	Песчаник
III	Песчаник	Песчаник

Мощность пород непосредственной кровли в I и II группах не превышала 4-5-кратной мощности пласта.

Имеющиеся данные анализировались с помощью ЭВМ "Минск-32" по методике [55], включающей следующие элементы:

1. Проведение анализа распределений выборки и выборочных характеристик рассматриваемых данных.
2. Анализ коэффициентов парной корреляции.
3. Установление уравнений регрессии.
4. Анализ уравнений регрессии.

Анализ распределений выборки позволил оценить представительность исходных данных. При этом осуществлялось исключение резко выделяющихся наблюдений с целью

Факторы, влияющие на шаг обрушения кровли	Группа кровли											
	I				II				III			
	$\bar{x}_i$	$s_i$	$u_i$	$\bar{x}_i$	$s_i$	$u_i$	$\bar{x}_i$	$s_i$	$u_i$	$\bar{x}_i$	$s_i$	$v_i$
Мощность, м	4,63	0,69	14,9	4,24	0,58	13,7	2,64	0,34	12,9			
Коэффициент крепости пород по М.М.Промышлякову	3,87	0,25	6,5	4,56	0,33	7,2	6,88	1,76	25,6			
Мощность, м	9,52	6,24	65,5	11,15	9,46	80,7	14,16	3,75	26,4			
Коэффициент крепости пород, м	5,47	0,48	8,8	7,48	1,51	20,2	8,38	0,40	4,8			
Мощность угольного пласта, м	1,11	0,38	34,2	1,06	0,38	35,8	1,02	0,40	39,2			
Коэффициент крепости угля	1,7	0,36	21,2	1,61	0,42	26,1	1,47	0,40	27,2			
Глубина разработки, м	446,78	266,2	58,5	390,0	185,3	47,5	330,1	147,31	43,3			
Длина лавы, м	162,52	51,06	31,4	153,9	45,90	30,2	158	51,22	32,3			
Скорость подвигания забоя, м/мес	33,70	15,04	44,6	36,9	15,45	41,8	34,25	16,6	48,5			
Ширина поддерживаемого пространства, м	4,22	0,31	7,4	3,85	0,90	23,4	3,96	0,76	19,2			
Ширина захвата выемочного механизма, м	1,18	0,46	39,0	1,20	0,41	34,2	1,22	0,43	35,5			

устранения нетипичных случаев, различного рода ошибок при сборе, записи исходных данных и т.д. В процессе обработки материала был получен ряд выборочных характеристик: средние значения  $\bar{x}_i$ , среднеквадратические отклонения  $s_i$  и коэффициенты вариации  $v_i$  всех рассматриваемых факторов, влияющих на шаг обрушения кровли (табл. 8). Из табл. 8 видно, что независимые переменные изменяются в сравнительно небольших пределах, т.е. рассеивание случайных величин не может существенно повлиять на полученные зависимости. Анализ средних значений шага первого и последующих обрушений кровли (табл. 9) показал, что эти величины в первую очередь зависят от строения и литологического состава кровли.

Таблица 9

Группа кровли	Средний шаг обрушения, м							
	непосредственной кровли				основной кровли			
	первый		последующий		первый		последующий	
	$\bar{x}_i$	$s_i$	$\bar{x}_i$	$s_i$	$\bar{x}_i$	$s_i$	$\bar{x}_i$	$s_i$
I	4,02	3,55	2,10	0,92	31,77	12,88	24,23	10,46
II	4,40	3,76	2,52	1,86	38,52	18,42	27,35	11,63
III	7,13	5,52	6,05	5,38	49,03	38,93	29,95	20,85

Из табл. 9 видно, что независимо от строения кровли даже в случае, если кровля представлена породами одного петрографического состава (группа III), имеет место последовательное обрушение с различным шагом сплосов, залегающих непосредственно над пластом, и вышележащих. Это связано с расщеплением кровли по контактам ослабления и взаимодействием непосредственной и основной кровли.

С целью определения степени влияния различных факторов на шаг обрушения кровли производился анализ коэффициентов парной корреляции (табл. 10). В табл. 10 приведены коэффициенты корреляции, значения которых больше табличных [56, 57], так как связь считается существенной, если фактические значения коэффициентов больше табличных. Знак коэффициента указывает на направление изменения за-

висямой величины при возрастании независимой переменной, а величина коэффициента корреляции — на тесноту связи. Чем больше абсолютное значение коэффициента, тем более значительным является влияние рассматриваемого фактора на шаг обрушения кровли. Очевидно, что размер первого шага обрушения непосредственной и основной кровли в последующих шагах основной практически не зависит от ширины поддерживаемого призабойного пространства, ширины захвата выемочного механизма и скорости продвижения очистного забоя. Степень влияния действующих факторов по-разному проявляется при первом и последующем обрушениях кровли. Наблюдается также различное влияние тех или иных параметров на шаг обрушения непосредственной и основной кровли. Сравнивая коэффициенты парной корреляции между шагом обрушения кровли и независимыми переменными, можно сделать вывод о степени влияния различных факторов.

Наиболее значительное влияние на шаг первого и последующих обрушений непосредственной и основной кровли оказывает мощность и прочность спагающих пород.

Влияние других факторов на первый шаг обрушения непосредственной кровли снижается в следующем порядке: мощность и прочность пород основной кровли, мощность пласта, глубина разработки, длина павы, шаг обрушения основной кровли, прочностные свойства угля.

На шаг последующих обрушений непосредственной кровли существенное влияние оказывают мощность пласта и ширина захвата выемочного механизма. Затем по степени влияния следуют мощность и предел прочности основной кровли, глубина разработки, шаг обрушения основной кровли, ширина поддерживаемого пространства и скорость продвижения, прочностные свойства угля. Последние три фактора весьма слабо коррелируют с шагом последующих обрушений непосредственной кровли, а длина павы на него не влияет.

Шаг первого и последующих обрушений основной кровли последовательно зависит от мощности и прочности пород, мощности пласта, глубины разработки, длины павы. Мощность, прочность пород и шаг обрушения непосредственной кровли играют подчиненную роль.

Наряду с исследованием степени влияния различных факторов на поведение кровли были изучены закономерности изменения шага обрушения непосредственной и основной кровли от факторов, корреляция с которыми наиболее существенна.

Таблица 10.

Факторы, влияющие на шаг обрушения кровли	Знак	Коэффициенты парной корреляции между влияющими факторами и шагом обрушения I, II и III групп кровель		
		I	II	III
Мощность непосредственной кровли	+	0,35/0,12	0,188/0,046	0,279/0,124
Коэффициент крепости непосредственной кровли	+	0,23/0,10	0,17/0,028	0,185/0,122
Мощность основной кровли	+	0,15/0,29	0,126/0,228	0,173/0,608
Коэффициент крепости основной кровли	+	0,11/0,24	0,124/0,182	0,168/0,325
Мощность угольного пласта	-	0,098/0,22	0,096/0,093	0,149/0,285
Коэффициент крепости угля	+	0,028/-	0,017/-	0,041/-
Глубина разработки	-	0,078/0,18	0,089/0,088	0,096/0,171
Длина лавы	-	0,076/0,17	0,081/0,071	0,09/0,154
Скорость подвигания забоя	+	-/-	-/-	-/-
Ширина поддерживаемого пространства	+	-/-	-/-	-/-
Ширина захвата выемочного механизма	+	-/-	-/-	-/-
Шаг обрушения непосредственной кровли	+	-/0,07	-/0,020	-/0,089
Шаг обрушения основной кровли	+	0,070/-	0,020/-	0,089/-

Факторы, влияющие на шаг обрушения кровли	Знак	Коэффициенты первой корреляции между влияющими факторами и шагом обрушения I, II и III группы кровель		
		Последующие обрушения		
		I	II	III
Мощность непосредственной кровли	+	0,37/0,168	0,40/0,19	0,324/0,183
Коэффициент крепости непосредственной кровли	+	0,25/0,150	0,21/0,01	0,247/0,150
Мощность основной кровли	+	0,17/0,29	0,11/0,35	0,183/0,432
Коэффициент крепости основной кровли	+	0,12/0,25	0,099/0,104	0,171/0,424
Мощность угольного пласта	-	0,24/0,22	0,20/0,06	0,214/0,406
Коэффициент крепости угля	+	0,02/-	0,04/-	-/-
Глубина разработки	-	0,10/0,18	0,83/0,035	0,162/0,28
Длина лавы	-	-/0,17	-/0,024	-/0,201
Скорость подвигания забоя	+	0,06/-	0,06/-	0,010/-
Ширина поддерживаемого пространства	+	0,07/-	0,06/-	0,024/-
Ширина захвата выемочного механизма	+	0,18/-	0,142/-	0,208/-
Шаг обрушения непосредственной кровли	+	-/0,09	-/0,08	-/0,100
Шаг обрушения основной кровли	+	0,090/-	0,08/-	0,100/-

Примечание. В числителе дроби представлены значения для непосредственной кровли, в знаменателе — для основной.

Для непосредственной кровли устанавливались закономерности изменения шага первого и последующих обрушений от ее мощности, мощности прочного слоя пород основной кровли и мощности пласта (рис. 16). С увеличением мощности слоя пород обрушения увеличивается (рис. 16 – сплошная линия), однако при достижении некоторого предела мощности рост прекращается. По-видимому, это связано с тем, что при достижении этой мощности происходит расхождение кровли и, следовательно, шаг обрушения остается практически постоянным. Чем больше мощность основной кровли, тем больше шаг обрушения непосредственной кровли (рис. 16 – штриховая линия). Между мощностью пласта и шагом обрушения непосредственной кровли существует обратная зависимость; с увеличением мощности пласта шаг обрушения непосредственной кровли уменьшается (рис. 16 – штрихпунктирная линия). Это объясняется снижением несущей способности угольного пласта с ростом его мощности. В связи с этим увели-

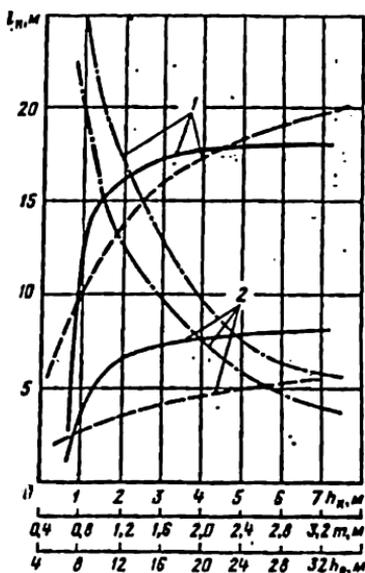


Рис. 16. Зависимость шага обрушения пород непосредственной кровли от мощности: непосредственной кровли (сплошная линия), основной кровли (штриховая линия) и пласта (штрихпунктирная линия);

1 – при первой осадке; 2 – при последующих осадках

чиваются разрушение и отжим угля, происходит более интенсивное расхождение и развитие трещин в кровле у забоя, что приводит к снижению прочности непосредственной кровли.

Как было показано выше поведение основной кровли прежде всего, зависит от мощности прочного споя, мощности пласта, глубины разработки и длины очистного забоя. Первый и последующие размеры шага обрушения прочного споя кровли увеличиваются с увеличением его мощности (рис. 17 — сплошная линия). Однако эта зависимость

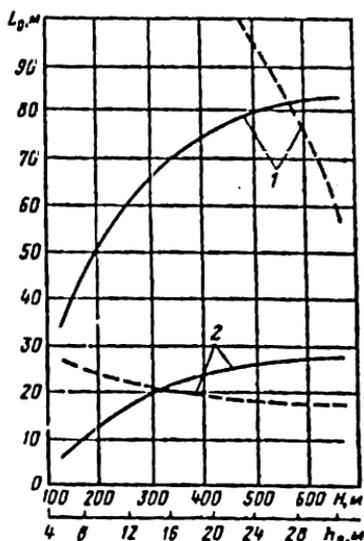


Рис. 17. Зависимость шага обрушения труднообрушающихся пород основной кровли от ее мощности (сплошная линия) и глубины разработки (штриховая линия):

1 — при первой осадке; 2 — при последующих осадках

нелинейная. За пределами определенной мощности прочного споя дальнейшее ее увеличение практически не оказывает влияния на рост шага обрушения в связи с расхождением кровли по контактам ослаблений. Глубина разработки в значительной степени влияет на шаг первого обрушения (рис. 17 — штриховая линия). Последующие обрушения основной кровли мало зависят от глубины разработки. С уве-

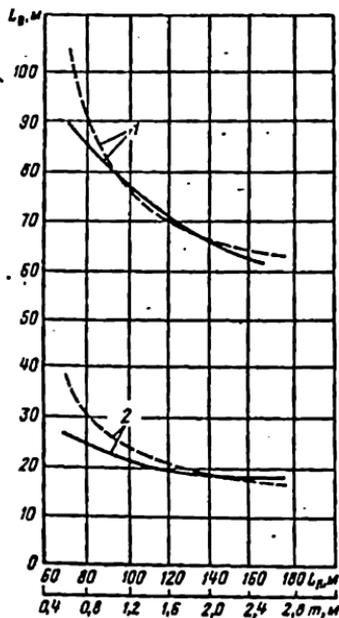


Рис. 18. Зависимость шага обрушения труднообрушающихся пород основной кровли от длины лавы (сплошная линия) и от мощности пласта (штриховая линия):

1 — при первой осадке; 2 — при последующих осадках

пичением длины очистного забоя и мощности пласта шаг обрушения кровли уменьшается. Влияние длины лавы на шаг обрушения основной кровли снижается при величинах не более 150–180 м, дальнейшее увеличение длины лавы практически не повлияет на изменение шага обрушения (рис. 18 — сплошная линия). При мощностях пласта более 3 м шаг обрушения почти не изменяется (рис. 18 — штриховая линия). Влияние мощности пласта можно объяснить тем, что при его увеличении растет высота зоны обрушения кровли в выработанном пространстве, что приводит к увеличению давления на кровлю со стороны вышележащего массива.

В процессе обработки статистического материала были получены линейные уравнения регрессии, отражающие многофакторные корреляционные связи размеров первого и последующих шагов обрушения основной кровли и позволяющие

Таблица 11

Группа кровли	Уравнения регрессии										Коэффициенты множественной корреляции R
I	$L_0^I = 22,12 + 0,401 h_0$	$+ 0,998 f_0$	$- 1,904 m$	$+ 0,839 h_N$	$+ 0,671 f_N$	$- 0,006 H$	$- 0,008 L_N$	0,747			
	$L_0^I = 12,24 + 0,532 h_0$	$+ 1,352 f_0$	$- 2,245 m$	$+ 0,718 h_N$	$+ 0,813 f_N$	$- 0,007 H$	$- 0,009 L_N$	0,783			
II	$L_0^II = 25,38 + 0,421 h_0$	$+ 0,891 f_0$	$- 2,352 m$	$+ 0,915 h_N$	$+ 0,496 f_N$	$- 0,003 H$	$- 0,006 L_N$	0,774			
	$L_0^II = 15,82 + 0,374 h_0$	$+ 0,783 f_0$	$- 2,115 m$	$+ 0,891 h_N$	$+ 0,544 f_N$	$- 0,004 H$	$- 0,007 L_N$	0,723			
III	$L_0^III = 3,4 + 0,513 h_N$	$+ 0,187 f_N$	$+ 0,08 h_0$	$+ 0,119 f_0$	$- 0,002 h_0$	$- 0,001 L_N$	$- 0,16 m$	0,681			
	$L_0^III = 2,05 + 0,447 h_N$	$+ 0,160 f_N$	$- 0,75 m$	$+ 0,683 f_0$	$+ 0,055 h_0$	$+ 0,073 f_0$	$- 0,001 H$	0,801			
	$L_0^III = 34,61 + 0,518 h_0$	$+ 0,75 f_N$	$- 2,015 m$	$+ 1,213 h_N$	$+ 0,513 f_N$	$- 0,008 H$	$- 0,008 L_N$	0,697			
	$L_0^III = 17,68 + 0,475 h_0$	$+ 0,635 f_N$	$- 1,821 m$	$+ 1,041 h_N$	$+ 0,492 f_N$	$- 0,009 H$	$- 0,007 L_N$	0,703			

Примечания: В табл. 11 обозначено:

$L_0^I, L_0^II$  — соответственно шаг первого и последующих обрушений основной кровли;  
 $L_N^I, L_N^II$  — то же непосредственной кровли;  $h_0, h_N$  — соответственно мощность осевой и непосредственной кровли;  $f_0, f_N$  — крепость пород осевой и непосредственной кровли;  $L_N, L_0$  — соответственно длина пады и ширина захвата выемочного механизма.

оценить поведение труднообрушающейся кровли в различных условиях (табл. 11).

Для непосредственной кровли, за исключением III группы кровли, такие уравнения не получены вследствие низкой множественности корреляции.

Уравнения отражают линейную зависимость типа

$$y = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + B_3 x_3 + \dots + B_n x_n,$$

где  $B_0$  — постоянная;  $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$  — коэффициенты, соответствующие независимым величинам  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , под которыми подразумеваются рассматриваемые влияющие факторы.

Проверка адекватности представления связи выбранной математической модели и значимости коэффициентов корреляции осуществлялась с помощью  $F$  — распределения Фишера [57].

## ГЛАВА IV РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ И ЭФФЕКТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

### § 1. Общая методика расчета проявлений горного давления при выборе средств и способов управления кровлей

Разработанный алгоритм обеспечивает расчет напряженно-деформированного состояния кровли и проявлений горного давления с целью выбора способов и средств управления кровлей и их параметров при соответствующих горнотехнических условиях разработки. Основным критерием соответствия является предотвращение проявлений осадок труднообрушающихся пород кровли.

Эту достигается следующими способами:

обеспечением обрушения прочного споя за крепью путем применения крепи соответствующего сопротивления, снижением прочности труднообрушаемого споя или путем искусственного обрушения кровли в выработанном пространстве;

применением крепи, которая сохранила бы свою несущую способность в период естественных или вызванных передовым торпедированием осадок прочного споя над забоем.

Управлению горным давлением с помощью крепи является наиболее рациональным с технологической точки зрения. Поэтому в конкретных горно-геологических условиях расчеты необходимо начинать с определения напряженно-деформированного состояния кровли при предельных размерах зависающих консолей труднообрушающихся пород и заданном сопротивлении крепи.

Прежде всего определяются схема и высота зоны обрушения.

При залегании в непосредственной кровле труднообрушающихся пород рассматривается схема обрушения I (см. рис. 9,а). Если в непосредственной кровле расположены менее прочные породы по сравнению с вышележащими, необходимо принимать схему обрушения II (см. рис. 9,б).

Затем, рассчитав высоту зоны обрушения, принимая длину консоли слоев пород, равной шагу обрушения, опре-

депенному методами математической статистики, и задавая сопротивлением крепи, следует рассчитать компоненты напряжений в кровле.

Напряженное состояние кровли с учетом критериев разрушения позволит оценить характер разрушения кровли. В процессе расчета определяется распределение сопротивления крепи по перекрытию. Это дает возможность установить, достаточно ли принятое сопротивление крепи для обеспечения обрушения прочного слоя за пределом поддерживаемого пространства. Рассчитав смещения кровли, можно определить необходимую податливость крепи. Расчет времени устойчивого состояния кровли позволяет оценить интенсивность разрушения и определить время, когда произойдет обрушение прочного слоя. Это особенно важно при достижении предельного пролета зависающей консоли для принятия мер по усилению крепи.

Однако может оказаться, что нельзя подобрать крепь с параметрами, которые обеспечат обрушение прочного слоя в выработанном пространстве. В частности, это может быть связано, например, с наличием слабых, разрушающихся пород непосредственной кровли, недостаточным предварительным распором при передвижке крепи и т.д. В таком случае возможно разрушение прочного слоя у забоя.

Тогда нужно определить сопротивление крепи, при котором можно обеспечить поддержание кровли при разрушении ее над крепью с рассчитанным шагом обрушения. Приняв крепь с расчетом сопротивления, следует рассчитать скорость и величину смещений кровли при разрушении прочных слоев пород. Это позволит установить необходимую скорость опускания выдвижной части крепи, а по расчетным данным о смещениях — необходимую податливость крепи.

Если в определенных условиях невозможно обеспечить соответствующие параметры крепи, следует применять другие способы управления горным давлением: искусственное обрушение прочного слоя в выработанном пространстве, разрушение его впереди забоя или снижение прочностных свойств кровли при принятых параметрах крепи.

В первом случае рассчитывается предельный размер зависания прочных пород за крепью, до которого не произойдет закоп кровли по забоям. При максимально допустимой длине консоли необходимо обрушить прочный слой за крепью.

При передовом торпедировании кровли решается вопрос

о соответствии сопротивления, скорости и величины податливости крепи заданному шагу обрушения и мощности пород, участвующих в формировании нагрузки на крепь.

Снижение прочностных свойств пород, например гидрообработкой, имеет своей целью изменить характер разрушения кровли. Поэтому нужно исследовать, до каких пределов следует снижать прочностные свойства пород кровли, в первую очередь, по контактам напастования, чтобы уменьшить размеры зависающих консолей. При значительной мощности прочного споя необходимо рассчитать, какой должна быть мощность обрабатываемой части кровли, при которой осадки вышележащего массива не будут проявляться в очистном забое.

Таким образом, настоящая методика расчета позволяет установить:

1. Напряженно-деформированное состояние кровли очистного забоя при наличии труднообрушающихся пород в основной или непосредственной кровле с учетом основных влияющих факторов.

2. Предварительный распор, номинальное общее и распределенное по перекрытию сопротивление, жесткость и податливость крепи, необходимые для предотвращения разрушения кровли над крепью и обеспечения обрушения прочного споя за пределами поддерживаемого пространства.

3. Шаг искусственного обрушения прочных пород, чтобы предотвратить резкие осадки над крепью и разрушению крепи с заданными параметрами.

4. Пределы прочности пород по контактам напастования и в массиве, до которых следует снижать прочность труднообрушающегося споя, чтобы обеспечить определенный шаг обрушения при заданном сопротивлении крепи, а также высоту зоны обработки прочного споя, необходимую для снижения интенсивности осадок прочного споя.

5. Сопротивление, скорость опускания выдвижной части и податливость крепи, при которых не происходит ее деформация в момент разлома прочного споя над крепью. При этом также рассчитывается распределение сопротивления по перекрытию.

Для реализации расчетной схемы необходимы следующие исходные данные:

1. Сведения о горно-геологических условиях разработки.
2. Информация о прочностных и деформационных свойствах пород, массива и угольного пласта.

Таблица 12

Тип по-род	Наименование	Литологический состав	Расстояние между плоскостями ослабления по направлению, м	Расстояние между трещинами, м
I	Легкообрушающиеся	Углистые аргиллиты Аргиллиты Алевролиты Аргиллиты	0,05-0,10 0,10-0,25 0,05-0,20 0,10-0,50	0,10-0,30 0,15-0,40 0,15-0,40 0,20-0,50
II	Средней обрушаемости	Алевролиты мелкозернистые Песчаники с углистым материалом по направлению Известняки мелкозернистые	0,20-0,50 0,10-0,50	0,25-0,50 0,25-0,60
III	Труднообрушающиеся	Алевролиты Песчаники мелкозернистые Известняки	0,10-0,20 0,05-0,10 0,20-0,80 0,10-1,0	0,15-0,25 0,15-0,25 0,30-1,2 0,25-1,5
IV	Весьма труднообрушающиеся	Аргиллиты алевролитистые Алевролиты Песчаники среднезернистые Известняки	0,15-0,70 Не распадаются	0,20-2,50 1,0-5,0 1,5-3,0 1,0-3,5 1,3-2,0

Продолжение табл. 12

Тип по- род	Наименование	Литологический состав	Предел прочности, МН/М <sup>2</sup>		Шаг обрушения, м		Коэффициент разрыхления пород
			на сжатие	на рас- тяжение	первый	послед- ующие	
I	Легкообруша- ющиеся	Углистые аргиллиты	До 30	До 2,5	До 4	1,30-1,35	
		Аргиллиты	20-50	2,5-4,0			
		Алевриты	20-50	2,5-5,0			
II	Средней об- рушаемости	Аргиллиты	30-60	3,0-4,5	4-10	1,20-1,25	
		Аргиллиты алевритистые	30-100	3,0-7,0			
		Алевриты мелкозерни- стые	40-120	4,0-7,0			
III	Труднообру- шающиеся	Песчаники с углистым ма- териалом по напластованию	40-120	4,0-7,0	10-20	1,10-1,15	
		Известняки мелкозернистые	40-120	4,0-7,0			
		Алевриты	80-130	7,0-8,0			
		Песчаники мелкозернистые	80-180	7,0-8,0			
		Известняки	80-180	7,0-8,0			
IV	Весьма труднообру- шающиеся	Аргиллиты алевритистые	100-200	Более	100-150	20-45	
		Алевриты	100-250	8,0			
		Песчаники среднезернистые	100-260	Более			
			8,0	Более			
		Известняки	180-240	Более			
			8,0	Более			

### 3. Параметры технологии очистных работ и средств крепления.

Глубина разработки, мощность угольного пласта, литологический состав и мощность споев пород, запегающих в массиве, приведены в производственной документации. Для правильного подхода к решению поставленной задачи необходимо иметь классификацию пород, отражающую взаимосвязь между петрографическим, минералогическим составом, структурой споев пород в массиве и их прочностными и деформационными свойствами, характером обрушения кровли в выработанном пространстве.

В работах [5, 7, 10, 58] отмечается связь литологического состава, петрографических разновидностей пород, наличия ослаблений по контактам напластования и прочности пород с шагом обрушения. Количественная связь между трещиноватостью и снижением прочности в массиве дана в работе [59]. Характер обрушения пород в выработанном пространстве также зависит от слоистости и трещиноватости кровли [60]. На основе имеющихся сведений была разработана типизация споев пород, в которой скоординированы рассмотренные взаимосвязи (табл. 12).

Данная типизация позволяет отнести породы, запегающие в непосредственной и основной кровле, а также в вышележащем массиве, к определенному типу, рассчитать мощность породного массива в кровле, влияющего на проявление горного давления в очистном забое, и прогнозировать характер обрушения кровли в выработанном пространстве.

Знание литологического состава и мощности споев пород, запегающих в массиве так же, как и значений коэффициента, учитывающего ослабление массива вследствие его расщепления и развития трещиноватости в процессе сдвижения, необходимо для расчета модуля деформации массива. На основании экспериментальных работ этот коэффициент может быть принят  $k' = 0,10-0,15$  [61].

Оценка возможности расщепления пород кровли на контактах литологических споев, а также по слабым межспоевым контактам в пределах одного споя может быть осуществлена при наличии сведений о коэффициентах сцепления и углах внутреннего трения. По данным работы [38] показатели прочности по указанным плоскостям ослабления зависят от типа контактов и литологического состава пород (табл. 13).

Таблица 13

Тип контакта	Угол внутреннего трения, градус	Коэффициент сцепления, кН/м <sup>2</sup>		
		Аргиппит	Алевропит	Песчаник
Зеркало скопления	12-14	0-35	15-200	-
Углистый прослой	15-20	5-50	15-300	50-1000
Растительные остатки	20-26	30-500	100-1200	500-20000
Мелкий растительный детрит	26-35	-	1200-2500	1200-5000

Для оценки состояния кровли вследствие наличия природной трещиноватости на основании данных, обобщенных в работе [59], разработана шкала коэффициентов ( $\phi_0$ ) природного ослабления пород в зависимости от типа пород кровли (табл. 14).

Таблица 14

Тип пород	Коэффициенты				
	$\phi_0$	$A_p \cdot 10^4$	$\bar{n}$	$\epsilon_0$	$E_n \cdot 10^4, \text{МН/м}^2$
I	0,20	0,3	1,3	0,35	1,5
II	0,35	0,35	1,2	0,15	2,4
III	0,75	0,85	1,1	0,08	3,0
IV	1,00	1,15	1,0	0,04	3,5

При поддержании кровли в забое происходит дальнейшее ее ослабление под влиянием напряжений, для учета которого предложены эмпирические коэффициенты  $A_p, \bar{n}$  (табл. 14). Коэффициенты получены путем обратного пересчета на основе обработки экспериментальных данных о состоянии кровли над забоем, шаге обрушения и времени ее устойчивого состояния от обнажения до разрушения.

Прочностные и деформационные свойства пород определяются специальными методами [62] и являются предметом специальных исследований.

В качестве критерия разрушения кровли внутри споя пород принимаются пределы прочности на сжатие, растяжение и изгиб. Эти параметры зависят от петрологического и петрографического состава пород. Пределы прочности на сжатие, характерные для различных типов пород, в соответствии с типизацией приведены в табл. 12.

Пределы прочности на сжатие  $\sigma_{сж.п}$ , растяжение  $\sigma_{р.п}$  и изгиб  $\sigma_{и.п}$  взаимосвязаны [38]:

$$\sigma_{р.п} = (0,2-0,4)\sigma_{сж.п}; \sigma_{и.п} = (2-3)\sigma_{р.п}$$

Показатели прочности углей весьма разнообразны и зависят от их метаморфизма, трещиноватости, размеров образцов. Предел прочности образцов, взятых из различных бассейнов, изменяется от 5,0 до 16,0 МН/м<sup>2</sup>. Для угольного пласта эта величина вследствие влияния масштабного фактора уменьшается примерно в 2 раза [63].

Угол внутреннего трения угля также меняется в некоторых пределах. При расчетах можно принимать средние значения  $\rho_y = 15-30^\circ$ .

Модуль деформации  $E_{п}$  в пределах одного типа пород изменяется в довольно больших пределах. Однако отклонения значений от среднего находятся в пределах измерений [59]. Поэтому при расчетах можно пользоваться средними величинами, которые в зависимости от типов пород приведены в табл. 14.

Коэффициенты Пуассона, используемые при расчетах давления массива на кровлю и координат, определяющих положение забоя относительно области восстановления напряженного состояния в выработанном пространстве, изменяются в пределах 0,3-0,5.

Сведения о пластических свойствах угля и пород необходимы для определения области пластических деформаций угольного пласта в зоне опорного давления. Значение константы пластичности в данном случае может быть определено согласно теории наибольших касательных напряжений следующим образом:

$$E = \frac{\sigma_{сж.п}}{2},$$

где  $\sigma_{сж.у}$  — предел прочности угля на сжатие.

В основе подхода при определении конвергенции пород в очистном забое заложены представления о вязком деформировании вмещающих пород на фоне развития микро- и макротрещин. Средние значения вязкости  $\mu_n$  для различных пород, полученные на основании данных, приведенных в работе [64], составляют: для песчаников  $0,45 \cdot 10^{12}$ , алевролитов —  $0,22 \cdot 10^{12}$ , аргиллитов —  $0,38 \cdot 10^{12}$  П.с.

Восстановление напряженного состояния массива в выработанном пространстве в значительной степени зависит от поведения обрушенной части массива или закладки. В качестве параметров для расчета в данном случае служат коэффициент усадки  $\epsilon_0$ , значения которого представлены в табл. 14, и предельное значение давления  $P_0$ , при котором деформация обрушенных пород или закладки практически остается постоянной. При управлении кровлей обрушением можно принять  $P_0 = 1,80 \text{ МН/м}^2$ .

Помимо рассмотренных параметров горных пород для расчетов необходимо иметь данные об удельном весе пород  $\gamma$ . Известны [62] следующие средние значения этого параметра: песчаники — 2,7, аргиллиты и алевролиты — 2,5 т/м<sup>3</sup>.

При определении параметров, характеризующих состояние разрушенной кровли, используется коэффициент трения по плоскостям полного разрушения  $f$ , а также угол наклона трещин разрушения  $\alpha$ . Эти величины несущественно отклоняются от значений  $f = 0,7$ ;  $\alpha = 70 + 80^\circ$ .

Приведенный объем сведений о прочностных и деформационных свойствах пород недостаточен для выполнения необходимых расчетов.

Исходные данные о параметрах технологии очистных работ и средств крепления: ширина захвата выемочного механизма, размеры перекрытий, начальное и рабочее сопротивление крепи, расстояние между рядами стоек могут быть получены в справочных изданиях и технической документации.

## § 2. Рекомендации по эффективному управлению горным давлением

Основной причиной неудовлетворительного управления горным давлением при труднообрушающихся кровлях явля-

ется несоответствие параметров крепи проявлениям горного давления при осадках крепи, которые обычно происходят над призабойным пространством. При давлении кровли, превышающем сопротивление крепи, раздвижность крепи исчерпывается и происходит ее посадка "на жестко", имеет место деформация перекрытий и других элементов крепи. Из-за недостаточной пропускной способности предохранительного клапана, не соответствующей режиму смещения кровли в этот период, давление в гидросистеме превышает заданную величину, что приводит к деформации цилиндров стоек.

Для поддержания кровли в призабойном пространстве и предотвращения разрушения крепи необходимо обеспечить условия, при которых труднообрушающиеся породы во время осадок разрушаются в выработанном пространстве, либо применять крепь с параметрами, соответствующими поведению кровли при осадках ее над крепью. Обеспечение разрушения прочного споя за пределами поддерживаемого пространства с помощью крепи весьма проблематично. Как показали исследования, в принципе это возможно при расположении труднообрушающихся пород в непосредственной кровле и высоком сопротивлении крепи поддерживающего типа, превышающем нормативы, установленные государственным стандартом, в 6-15 раз. Однако в случае расположения в непосредственной кровле более слабых пород разрушение их часто происходит вследствие концентрации напряжений в зоне опорного давления либо по контакту перекрытия с кровлей. Тогда из-за недостаточной жесткости системы крепь - кровля режущая опора переносится на линию забоя. Наряду с этим может иметь место разрушение вдоль границы зоны отжима вследствие недостаточного предварительного распора крепи.

Гидрообработка кровли приводит к снижению прочности и изменению поведения труднообрушающихся пород. При снижении прочности труднообрушающихся пород в 2-3 раза и весьма труднообрушающихся в 3-4 раза за счет уменьшения шага обрушения, увеличения распаиваемости и разрыхления пород при обрушении обеспечивается возможность применения серийно выпускаемых в настоящее время крепей для кровель средней обрушаемости. Мощность обрабатываемого массива должна быть равной высоте зоны обрушения (табл. 4,5). Область применения гидрообработки массива ограничена весьма трещиноватыми слабыми породами непосредственной кровли, из-за которых происходит

снижение давления жидкости, и монолитными труднообрушающимися кровлями с низкими фильтрационными свойствами пород. Кроме этого, с увеличением глубины разработки уменьшается проницаемость массива в зоне опорного давления.

Более рационален подход, при котором обеспечивается поддержание кровли при разрушении труднообрушаемого слоя пород над крепью. Это означает, что в заданных горно-геологических условиях при принятом способе управления кровлей и типе крепи податливость и скорость перемещения выдвинутой части крепи в момент разрушения кровли должны соответствовать величине и скорости смещения кровли, а сопротивление крепи быть достаточным для поддержания кровли после перехода в новое состояние равновесия.

При выборе параметров крепи следует иметь в виду мощность пласта, шаг обрушения прочного слоя породы, строение и характер обрушения кровли.

С увеличением мощности пласта и шага обрушения прочных слоев и с уменьшением мощности более слабых пород непосредственной кровли рекомендуется повышать сопротивление крепи. Соответственно при увеличении мощности пласта и шага обрушения кровли нужно повышать податливость крепи и пропускную способность предохранительного клапана, так как при этом увеличиваются величина и скорость смещений кровли. Наиболее значительными эти величины будут при расположении труднообрушаемого слоя мощностью более высоты зоны обрушения в непосредственной кровле и отсутствии слабых межспоевых контактов.

При наличии в непосредственной кровле более слабых пород требуемые сопротивление, податливость и скорость перемещения выдвинутой части крепи уменьшаются в связи с тем, что сказывается влияние подбунивания труднообрушающихся пород основной кровли при обрушении непосредственной кровли.

На рис. 19 приведена номограмма, позволяющая определить величину необходимого сопротивления крепи, смещения и скорости смещений при осадках кровли над поддерживаемым пространством по данным о мощности пласта  $m$ , шаге обрушения труднообрушающихся пород  $L_0$ , отношении мощности непосредственной кровли к мощности пласта  $h_n/m$ . Для этого нужно отметить точки  $A$  и  $B$  по значениям  $L_0$ ,  $h_n/m$  и  $m$  и затем провести через них линию, которая в точках пересечения со шкалами  $P$ ,  $v_c$ ,  $v'$  дает

соответствующие значения сопротивления крепи, величины и скорости смещения, по которым выбираются параметры крепи: сопротивление, податливость и соответствующая пропускная способность предохранительного клапана.

Из номограммы видно, что диапазон изменения величин проявлений горного давления, а следовательно, и параметров крепи при труднообрушающихся кровлях может быть довольно значительным.

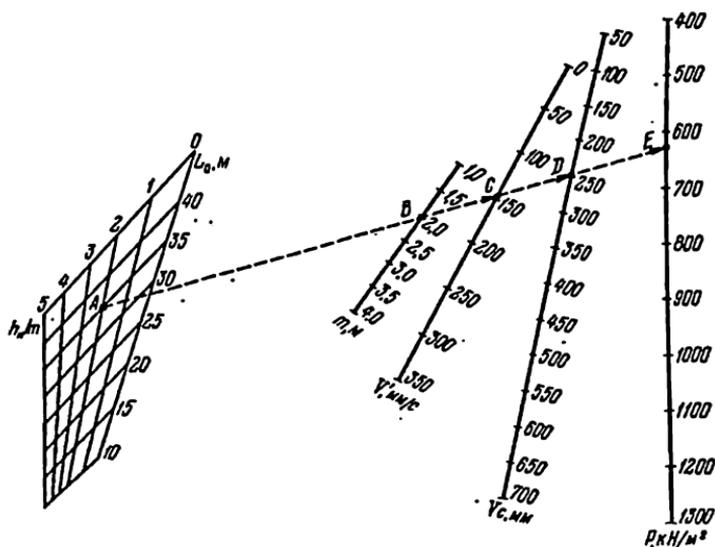


Рис. 19. Номограмма для определения параметров крепи

Например, сопротивление крепи, необходимое для поддержания кровли, при мощности пласта 1, 2, 3 м может изменяться соответственно от 350 до 400, от 500 до 650, от 900 до 1150 кН/м<sup>2</sup>. При этом наиболее существенное значение имеет шаг обрушения труднообрушающейся кровли, на величину которого оказывают влияние многие факторы. Он может быть определен по номограмме (рис. 20), отражающей зависимость шага обрушения труднообрушающихся пород от мощности пласта  $m$ , мощности непосредственной кровли  $h_n$ , мощности  $h_0$  и прочности  $\sigma_{сж.п}$  труднообрушающегося слоя пород, глубины разработки  $H$  и длины очистного забоя  $L_0$ . Для определения шага обруше-

ния по известным значениям  $t$  и  $h_{\text{н}}$ ,  $h_0$  и  $\sigma_{\text{сж.п}}$ ,  $H$  и  $L_{\text{п}}$  отмечаются точки А, В, С и находится четвертая точка D — вершина параллелограмма ABCD. В точке D читаем искомое значение шага обрушения.

По ряду причин выбор крепи с соответствующими параметрами может быть ограничен. Кроме этого, при слабых породах почвы крепь с высоким сопротивлением будет вдавливаться в почву.

В таком случае необходимо применять передовое торпедирование кровли. Тогда шаг торпедирования определяется по известным параметрам имеющихся крепей, мощности

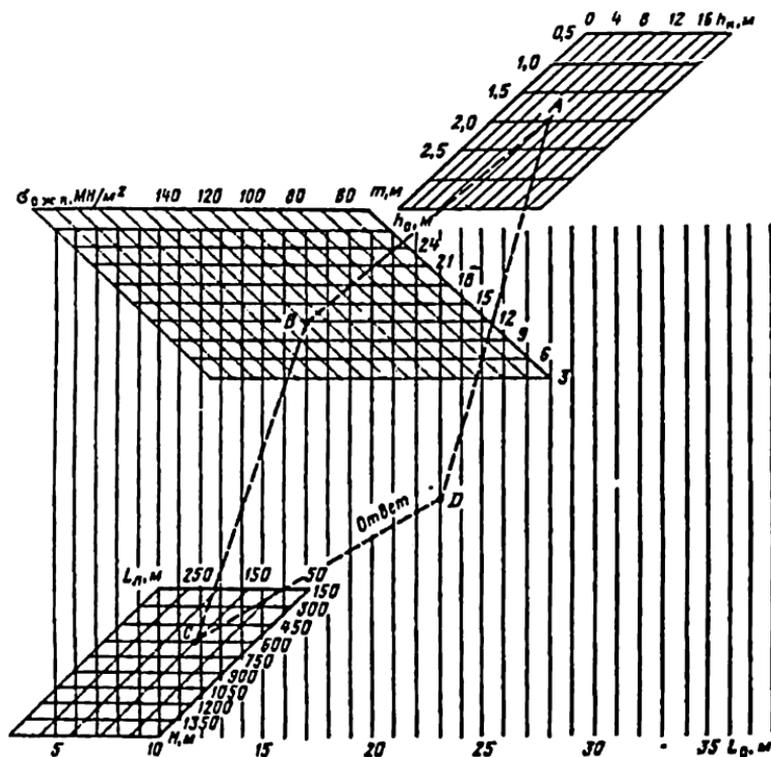


Рис. 20. Номограмма для определения шага обрушения кровли

паста и отношению мощности более слабых пород непосредственной кровли к мощности паста (см. рис. 19). Максимальное превышение взрывных скважин над пастом должно быть не менее высоты зоны обрушения (табл. 4, 5). Ограничивающим фактором применения передового торпедирования являются слабые, неустойчивые породы непосредственной кровли.

Дальнейшее повышение эффективности управления горным давлением при труднообрушающихся кровлях возможно при условии применения крепей с соответствующими параметрами, совершенствования их конструкции и прочности с целью обеспечения поддержания кровли и сохранения работоспособности крепи.

Прежде всего необходимо повышать предварительный распор крепи для предотвращения расхождения непосредственной кровли и снижения динамических явлений. Предварительный распор крепи должен быть не менее 80% рабочего сопротивления.

При расположении в непосредственной кровле пород устойчивых и средней устойчивости, а также труднообрушающихся следует применять крепи поддерживающего типа. Для повышения сопротивления призабойной части перекрытия при равномерном сопротивлении крепи по рядам необходимо стремиться к приближению первого ряда стоек механизированной крепи к забою на расстояние до  $1/3$  размеров поддерживаемого пространства, либо обеспечить повышение сопротивления этого ряда до 30% по сравнению с последним. Прочность перекрытия следует рассчитывать из условия среднего удельного давления на призабойную часть и давления, превышающего среднее в 2,5 раза со стороны обрушенных пород, так как нагрузка на перекрытие сосредоточивается со стороны выработанного пространства.

Крепи оградительно-поддерживающего типа обеспечивают более надежное поддержание призабойного пространства, имеют увеличенную раздвижность, больше возможностей для передвижения с активным подпором и обеспечения хорошей защиты рабочего пространства от обрушенных пород. Поэтому рекомендуется их применение при неустойчивых породах непосредственной кровли, особенно на пастах мощностью более 2,0 м. Расположение призабойных стоек должно осуществляться таким образом, чтобы они находились примерно на середине поддерживающей части перекрытия,

что обеспечивает равномерную передачу усилий на кровлю. Прочность поддерживающей части перекрытия, на которой сосредоточена основная нагрузка, должна рассчитываться из условия, что давление на нее превысит среднее удельное в 2 раза, но в верхней части ограждения и в соединении с основанием возможны значительные изгибающие усилия. Давление на ограждающую часть можно принимать средним. Для предотвращения опрокидывания крепи на забой сопротивление призабойной стойки должно быть в 1,2-1,3 раза выше расчетного сопротивления секции крепи.

Таким образом, при выборе способов и средств управления кровлей в очистных забоях с труднообрушаемыми породами в кровле угольного пласта необходимо учитывать, что в отличие от обычных условий крепь работает в различных режимах: пониженных нагрузений и смещений. кровли в периоды между осадками прочных слоев пород и весьма значительных при их обрушении. Для эффективного управления горным давлением при управлении кровлей полным обрушением параметры крепи нужно выбирать исходя из наиболее сложных условий, возникающих при осадках труднообрушающихся слоев над призабойным пространством, учитывая мощность пласта, строение и шаг обрушения кровли. Повышение сопротивления крепей при труднообрушаемых кровлях нельзя считать эффективным без выполнения комплекса вышеуказанных требований к другим параметрам крепи. Наряду с этим следует совершенствовать способы разрушения прочных слоев в массиве с целью снижения проявлений горного давления при осадках кровли, особенно при больших мощностях пласта и труднообрушающихся породах непосредственной кровли.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\bar{k}_n$  — коэффициент интенсивности осадок основной кровли,  
 $h_0$  — мощность пород основной кровли,  
 $f_0$  — коэффициент крепости пород основной кровли,  
 $m$  — мощность пласта,  
 $\bar{h}_n$  — мощность пород непосредственной кровли,  
 $\bar{k}_n$  — коэффициент разрыхления пород непосредственной кровли,  
 $\gamma$  — удельный вес пород,  
 $H$  — глубина разработки,  
 $\frac{\sigma_y}{\gamma H}, \frac{\sigma_x}{\gamma H}, \frac{\tau_{xy}}{\gamma H}$  — коэффициенты концентрации напряжений,  
 $x_i$  — средние значения,  
 $s$  — среднеквадратические отклонения,  
 $v_i$  — коэффициенты вариации,  
 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$  — коэффициенты уравнений регрессии,  
 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  — независимые переменные,  
 $L_0^1$  — первый шаг обрушения основной кровли,  
 $l_0^1$  — первый шаг обрушения непосредственной кровли,  
 $L_0$  — шаг последующих обрушений основной кровли,  
 $l_n$  — шаг последующих обрушений непосредственной кровли,  
 $L_n$  — длина павы,  
 $l_3$  — ширина захвата выемочного механизма,  
 $h_{н.кр}$  — мощность непосредственной кровли при обрушении,  
 $h_{0.кр}$  — мощность основной кровли при обрушении,  
 $h_{пл}$  — расстояние между плоскостями ослабления кровли по напастованию,  
 $k_0$  — коэффициент разрыхления основной кровли,  
 $\nu$  — коэффициент Пуассона,  
 $L_p$  — расстояние от разрезной печи,  
 $L_3$  — расстояние от забоя над пластом,  
 $E_n$  — модуль деформации пород,  
 $E_k$  — модуль деформации кровли,  
 $E_n$  — модуль деформации непосредственной кровли,  
 $E_0$  — модуль деформации основной кровли,  
 $I_k$  — осевой момент инерции кровли,  
 $I_n, I_0$  — осевые моменты инерции непосредственной, основной кровли,

$E_m$  — модуль деформации массива,  
 $\lambda^*$  — коэффициент, учитывающий разрыхление пород в выработанном пространстве,  
 $k'$  — коэффициент ослабления массива трещиноватостью,  
 $P_0, \epsilon_0$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие деформацию обрушенных пород,  
 $k_{ср}$  — средний коэффициент разрыхления пород при обрушении,  
 $h_{кр}$  — высота зоны обрушения,  
 $l_p$  — размеры зоны отжима,  
 $\rho_y$  — угол внутреннего трения угля,  
 $L$  — длина консоли труднообрушающегося споя кровли,  
 $l$  — длина консоли непосредственной кровли,  
 $\sigma_{сж.у}$  — предел прочности угля на сжатие,  
 $q_1$  — сопротивление перекрытия на призабойном конце,  
 $q_2$  — сопротивление перекрытия крепи со стороны выработанного пространства,  
 $q$  — распределенное по перекрытию сопротивление призабойной крепи,  
 $P_n$  — сопротивление посадочной крепи,  
 $R_1, R_2$  — сопротивление крепи по первому и второму рядам от забоя,  
 $a_1, a_2$  — расстояние от призабойного конца перекрытия до первого и второго ряда крепи,  
 $b$  — длина перекрытия,  
 $R_r$  — сопротивление призабойных стоек,  
 $a_i$  — расстояние от призабойного конца перекрытия до соответствующего ряда крепи,  
 $r$  — число рядов крепи,  
 $l_{пл}$  — длина пластической зоны угля,  
 $k$  — коэффициент пластичности угля,  
 $h$  — мощность споя пород кровли,  
 $M_k$  — изгибающий момент,  
 $Q_k$  — поперечная сила,  
 $q_k', q_k''$  — интенсивность нагрузки,  
 $\tau_b$  — касательные напряжения на контакте с вышележащим слоем пород,  
 $\tau_n$  — касательные напряжения по нижнему контакту,  
 $\sigma_x$  — горизонтальные напряжения,  
 $\sigma_y$  — вертикальные напряжения,  
 $\tau_{xy}$  — касательные напряжения,  
 $C$  — сцепление пород по контактам напластования,  
 $\rho_n$  — угол внутреннего трения пород по контактам напластования,

$\sigma_{сж.п}$  — предел прочности пород на сжатие,  
 $\phi_0$  — коэффициент ослабления пород естественной трещиноватостью,  
 $\rho_n$  — угол внутреннего трения пород вне контактов напластования,  
 $\sigma_{н.п}$  — предел прочности пород на изгиб,  
 $\sigma_{р.п}$  — предел прочности пород на растяжение,  
 $\phi_1$  — коэффициент ослабления пород, учитывающий развитие трещиноватости под влиянием действующих напряжений,  
 $A_p, \bar{n}$  — эмпирические коэффициенты для расчета ослабления пород трещиноватостью,  
 $u_{кр}$  — смещения кровли при поддержании призабойного пространства,  
 $t_n$  — время поддержания кровли в призабойном пространстве,  
 $t_y$  — время устойчивого состояния кровли,  
 $\mu_n$  — коэффициент вязкости пород,  
 $\alpha_n$  — наклон непосредственной кровли, почвы,  
 $N_B$  — модуль вязко-упругого слоя пород,  
 $R_{т\text{кр}}, R_{т\text{поч}}$  — максимальная величина нагрузки на слой пород непосредственной кровли или почвы,  
 $k_{y.o}$  — коэффициент упругого основания,  
 $v_{под}$  — скорость подвигания забоя,  
 $\nu_0$  — коэффициент Пуассона упругого основания,  
 $u_{конв}$  — общая конвергенция вмещающих пород,  
 $u_{кр,y}$  — упругое смещение кровли,  
 $u_{оч}$  — смещения при очистной выемке угля,  
 $g$  — ускорение силы тяжести,  
 $Q$  — равнодействующая сопротивлений крепи,  
 $c$  — координата припожения равнодействующей сопротивлений крепи,  
 $f$  — коэффициент трения пород,  
 $v_c$  — вертикальные смещения центра тяжести разрушенной кровли,  
 $u_c$  — горизонтальные перемещения кровли,  
 $v''_c, v'_c$  — вертикальные ускорения и скорости смещений,  
 $u''_c, u'_c$  — горизонтальные ускорения и скорости смещений,  
 $u_1, u_2$  — смещения кровли по первому и второму рядам крепи,  
 $t_p$  — время от момента разрушения кровли до перехода в новое равновесное состояние.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каталог пологих угольных пластов с труднообрушаемыми кровлями в угольных бассейнах СССР*. Л., ВНИМИ, 1976.
2. *Временная инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения труднообрушаемой кровли на выемочных участках*. Л., ВНИМИ, 1976.
3. *Горно-геологические и горнотехнические условия разработки крутых и наклонных угольных пластов в Кузбассе* / А.К. Коврижин, Р.И. Ненашева, Ю.Н. Кулаков и др. — В кн.: *Совершенствование разработки угольных пластов Прокопьевско-Киселевского месторождения Кузбасса с применением комплексной механизации*. Прокопьевск, КузПИУИ, 1972, с. 5—24.
4. *Хорин В.И., Микляев Е.И., Коровкин Ю.А.* Определение понятий "трудноуправляемые" кровли и оценивающих их факторов. — В кн.: *Краткие тезисы докладов к Всесоюзному семинару по управлению труднообрушаемыми кровлями механизированными крепями*. Л., ВНИМИ, 1973, с. 17—20.
5. *Руководство по применению способа управления труднообрушаемыми кровлями гидрообработкой породного массива в Печорском бассейне*. Воркута, ПечорНИИпроект, 1975, 55 с.
6. *Руководство по управлению труднообрушаемыми кровлями методом передового торпедирования*. Караганда, КИИУИ, 1974.
7. *Васильев П.В., Иванов К.И., Карнышев А.Д.* Управление кровлей на пологих пластах. М., Госгортехиздат, 1962.
8. *Методика предварительного выявления угольных пластов с тяжелыми и неустойчивыми кровлями*. Л., ВНИМИ, 1973.
9. *Глушихин Ф.П.* Трудноуправляемые кровли в очистных забоях. М., Недра, 1974.
10. *Давидяц В.Т.* Совершенствование способов и средств управления кровлей на шахтах Донбасса. М., Недра, 1969.
11. *Сдвигание горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений* / А.Г. Акимов, В.П. Земисев, И.И. Кашельсон и др. М., Недра, 1970.
12. *Краваченко В.И.* Предупреждение завалов очистных забоев. М., Недра, 1970.
13. *Метод принудительной первой посадки труднообрушающейся кровли* / Е.И. Микляев, А.П. Туров, Т.К. Фими и др. Уголь, 1966, № 10, с. 17—21.
14. *Проявление горного давления при применении механизированных крепей* / Ю.А. Семенов, М.М. Мукушев, А.К. Бекбулатов и др. М., Недра, 1974.
15. *Гурьянов В.В.* Изучение закономерностей смещения прочных труднообрушаемых пород при разработке пологих пластов Игитинского месторождения. — *Технология и экономика угледобычи*, 1966, № 8 (114), с. 49—50.
16. *Шишкин В.П., Гусельников Л.М.* Исследование проявлений горного давления в очистных забоях с труднообрушаемыми кровлями в Печорском бассейне. — В кн.: *Краткие тезисы докладов к Всесоюзному семинару по управлению труднообрушаемыми кровлями механизированными крепями*. Л., ВНИМИ, 1973, с. 12—13.
17. *Садыков И.М.* Исследование резких осадок кровли в очистных выработках пологих пластов Донбасса. — *Труды ВНИМИ*, 1961, № 40, с. 38—43.
18. *Исследование силовых параметров механизированных крепей типа ОМКТ в условиях Кузнецкого бассейна* / А.М. Ильштейн, В.Ф. Крылов, В.М. Страхов и др. — В кн.: *Технология и механизация подземной добычи угля*. М., Недра, 1971, с. 38—56.
19. *Горохов В.Т.* Результаты исследований разрушения кровли пласта "Журицкий" при выемке его на полную мощность. — В кн.: *Краткие тезисы докла-*

дов к Всесоюзному семинару по управлению труднообрушаемыми кровлями механизированными крепями. Л., ВНИМИ, 1973, с. 36–37.

20. *Канлыбаева Ж.М.* Закономерности сдвижения горных пород в массиве. М., Наука, 1968.

21. *Хорин В.Н., Микляев Е.И., Коровкин Ю.А.* Основные результаты исследований взаимодействия механизированной крепи повышенного сопротивления типа М-87Д с трудноуправляемой кровлей и обоснование выбора рабочего сопротивления. — В кн.: Краткие тезисы докладов к Всесоюзному семинару по управлению труднообрушаемыми кровлями механизированными крепями. Л., ВНИМИ, 1973, с. 7–10.

22. *Семенов Ю.А., Бекбулатов А.К.* Исследования влияния осадок основной крепи на работу механизированных комплексов. Труды ВНИМИ, 1969, № 73, с. 49–45.

23. *Коврижин А.К., Крылов В.Ф., Запреев С.Н.* Управление кровлей в очистных забоях на шахтах Кузбасса. М., Недра, 1969.

24. *Микляев Е.И., Коровкин Ю.А., Дьяченко Э.К.* Исследование взаимодействия механизированной крепи повышенного сопротивления с трудноуправляемой кровлей. — Уголь, 1974, № 3, с. 9–14.

25. *Козина А.М.* Методика решения практических задач управления горным давлением на крупномасштабных моделях из эквивалентных материалов. М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1977.

26. *Хаимова-Малькова Р.И.* Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М., Наука, 1970.

27. *Малкис Н.И.* Методическое руководство по изготовлению низкоомодульных оптически чувствительных материалов-эпоксигелей для поляризационно-оптического метода исследования напряжений. М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1970.

28. *Баренблатт Г.И., Христианович С.А.* Об обрушении кровли при горных выработках. — Изд. АН СССР, ОТН, 1955, № 11, с. 73–86.

29. *Либерман Ю.М.* К вопросу об опорном давлении впереди очистного забоя. — В кн.: Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 1, с. 86–95.

30. *Христианович С.А., Кузнецов С.В.* О напряженном состоянии горного массива при проведении очистных работ. — В кн.: Горное давление. Л., ВНИМИ, 1965, № 59, с. 95–111.

31. *Руппенейт К.В.* Давление и смещение горных пород в лавах пологопадающих пластов. М., Углетехиздат, 1957.

32. *Грицко Г.И., Власенко Б.В.* Экспериментально-аналитический метод определения напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, Наука, Сиб. отд., 1976.

33. *Комиссаров С.И.* Исследование деформированного и напряженного состояния горного массива при очистной выемке пологих угольных пластов. — Уголь, 1972, № 10, с. 23–29.

34. *Кузнецов Г.Н.* О механизме взаимодействия боковых пород и крепи в очистных выработках пологопадающих угольных пластов. — В кн.: Исследования горного давления применительно к механизированным крепям. М., Углетехиздат, 1954, с. 187–195.

35. *Борисов А.А.* Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. М., Недра, 1954.

36. *Указания по особым требованиям к крепям на пластах с тяжелыми кровлями.* Л., ВНИМИ, 1970.

37. *Хатилова Н.С.* Задача об обрушении консольно зависящей кровли. — Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1970, № 1, с. 13—18.
38. *Кузнецов С.Т.* О направлениях совершенствования механизированных крепей и приемов активного управления кровлей при их применении. М., ЦНИИУгля, 1970.
39. *Ягодкин Г.И., Гладких Е.Ф.* Аналитическое исследование динамики кровли очистных забоев. М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1968.
40. *Проявление горного давления в очистных выработках при применении механизированных крепей / С.Т. Кузнецов, А.А. Орлов, Ф.П. Глушихин и др.* М., Недра, 1966.
41. *Хорин В.Н.* Критерии, характеризующие взаимодействие механизированных крепей с породами кровли. — Уголь, 1971, № 6, с. 46—50.
42. *Казьмин В.М.* Вероятностный метод анализа контактного взаимодействия забойных крепей с боковыми породами. М., Наука, 1974.
43. *Катков Г.А.* Распределение напряжений в кровле при работе механизированных крепей. — Горнорудные машины и автоматика, 1966, № 3, с. 34—38.
44. *Мельников Е.А., Савельева Н.Г.* Развитие и достижения в области управления горным давлением. — В кн.: Технология разработки месторождений полезных ископаемых, т. 12. М., ВИНТИ, 1976, с. 5—67.
45. *Фёдоров В.И.* Сопротивление материалов. М., Наука, 1970.
46. *Либерман Ю.М., Хаимова-Малькова Р.И.* Исследование напряженно-деформированного состояния закладочного массива. — Технология добычи угля подземным способом, 1972, № 7, с. 17—18.
47. *Руппенейт К.В., Либерман Ю.М.* Введение в механику горных пород. М., Госгортехиздат, 1960.
48. *Хатилова Н.С.* Определение шага обрушения консольно зависящей кровли. — Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1970, № 3, с. 93—96.
49. *Тимошенко С.П.* Теория упругости. М., ОНТИ, 1937.
50. *Мельников Э.Ф.* Особенности управления кровлей в зависимости от ориентировки трещиноватости и направления выемки. — Труды ЛГИ, Л., Недра, 1966, с. 58—63.
51. *Качанов Л.М.* Теория ползучести. М., Физматгиз, 1960.
52. *Барановский В.И., Весков М.И.* и др. Метод прогнозирования устойчивости капитальных и подготовительных выработок и вмещающих пород. М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1970.
53. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел, т. 2. М., Мяр, 1969.
54. *Николаи Е.П.* Теоретическая механика. М., Гостехиздат, 1956.
55. *Дукарский О.М., Закурдаев А.Г.* Статистический анализ и обработка наблюдений на ЭВМ "Минск-22. М., Статистика, 1971.
56. *Большаев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М., Наука, 1965.
57. *Нальмов В.Н., Чернова Н.А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., Наука, 1965.
58. *Васильев П.В., Малинин С.И.* Влияние основных геологических факторов на поведение пород в горных выработках. М., Госгортехиздат, 1960.
59. *Либерман Ю.М.* Давление на крепь капитальных выработок. М., Наука, 1969.
60. *Андрушкевич С.Г.* К вопросу классификации пород кровли пологопадающих пластов Донбасса. — В кн.: Сдвигание горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР. М., Углетехиздат, 1958.

61. Руппенейт К.В., Давыдова Н.А. Обоснование инженерного метода определения давлений на междукамерные целики. — В кн.: Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 1, с. 75–78.
62. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильиницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин и др. М., Недра, 1969.
63. Чирков С.Е. Влияние масштабного фактора на прочность углей. М., Наука, 1969.
64. Исследование прочности и деформируемости горных пород / А.И. Берон, М.Ф. Кунтыш, М.П. Мохначев и др. М., Недра, 1973.

## Оглавление

Предисловие . . . . .	3
Глава I. Проявления горного давления в очистных выработках с труднообрушающимися кровлями . . . . .	5
§ 1. Общие сведения о труднообрушающихся кровлях . . . . .	5
§ 2. Способы и средства управления горным давлением . . . . .	14
§ 3. Экспериментальные исследования проявлений горного давления и взаимодействия механизированных крепей с кровлей . . . . .	22
Глава II. Расчет проявлений горного давления при труднообрушающихся кровлях . . . . .	38
§ 1. Выбор методики расчета проявлений горного давления . . . . .	38
§ 2. Расчет напряженно-деформированного состояния кровли в период между осадками труднообрушающихся пород . . . . .	47
§ 3. Аналитическое определение смещений вмещающих пород до разрушения кровли . . . . .	64
§ 4. Определение скоростей и величин смещений при осадках труднообрушающихся кровель . . . . .	67
§ 5. Расчет сопротивления крепи при разрушении кровли . . . . .	71
Глава III. Закономерности проявлений горного давления . . . . .	74
§ 1. Проявления горного давления . . . . .	74
§ 2. Закономерности обрушения кровель . . . . .	90
Глава IV. Рекомендации по расчету и эффективному управлению горным давлением . . . . .	102
§ 1. Общая методика расчета проявлений горного давления при выборе средств и способов управления кровлей . . . . .	102
§ 2. Рекомендации по эффективному управлению горным давлением . . . . .	110
Условные обозначения . . . . .	117
Список литературы . . . . .	120

АЛЕКСАНДР АРТЕМОВИЧ ЖУРЛО

### ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ С ТРУДНООБРУШАЮЩИМИСЯ КРОВЛЯМИ

Редактор издательства *М.В. Чуваева*

Технический редактор *Л.С. Гладкова*

Корректор *А.Г. Кудряцева*

ИБ № 1255

---

Сдано в набор 07.05.80. Подписано в печать 19.09.80. Т — 03006  
Формат 84x108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,51.  
Уч. изд. л. 6,48 Тираж 1460 экз. Заказ 860, /6392-10 Цена 95 коп.

---

Издательство "Недра", 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
г. Тула, по. Ленина, 109

