

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРОЧНОЙ РАСПОРНО-ПОДАТЛИВОЙ КРЕПИ С МАССИВОМ

Геомеханические аспекты управления состоянием выработки с помощью податливой крепи можно наглядно продемонстрировать на изображенной на рисунке 1 графической модели взаимодействия крепи с породным массивом [1]. Состояние массива, ослабленного выработкой, характеризуется на рисунке 1 криволинейными штрихпунктирными зависимостями, построенными в координатах $q_m — U$, где q_m — несущая способность массива, МПа, U — смещения породного контура выработки, мм. Каждая из зависимостей соответствует определенному значению безразмерного параметра $k = \sigma_c / \gamma H$ (где σ_c — прочность на одноосное сжатие породы; γH — вертикальная компонента гравитационного поля напряжений) [2], который является обратной величиной от показателя $\gamma H / \sigma_c$, принятого в качестве основного фактора, оказывающего наибольшее влияние на интенсивность проявлений горного давления, в работах проф. Ю. З. Заславского [3]. Эти кривые по своей сущности представляют собой функцию изменения давления на крепь выработки в зависимости от величины смещений ее контура.

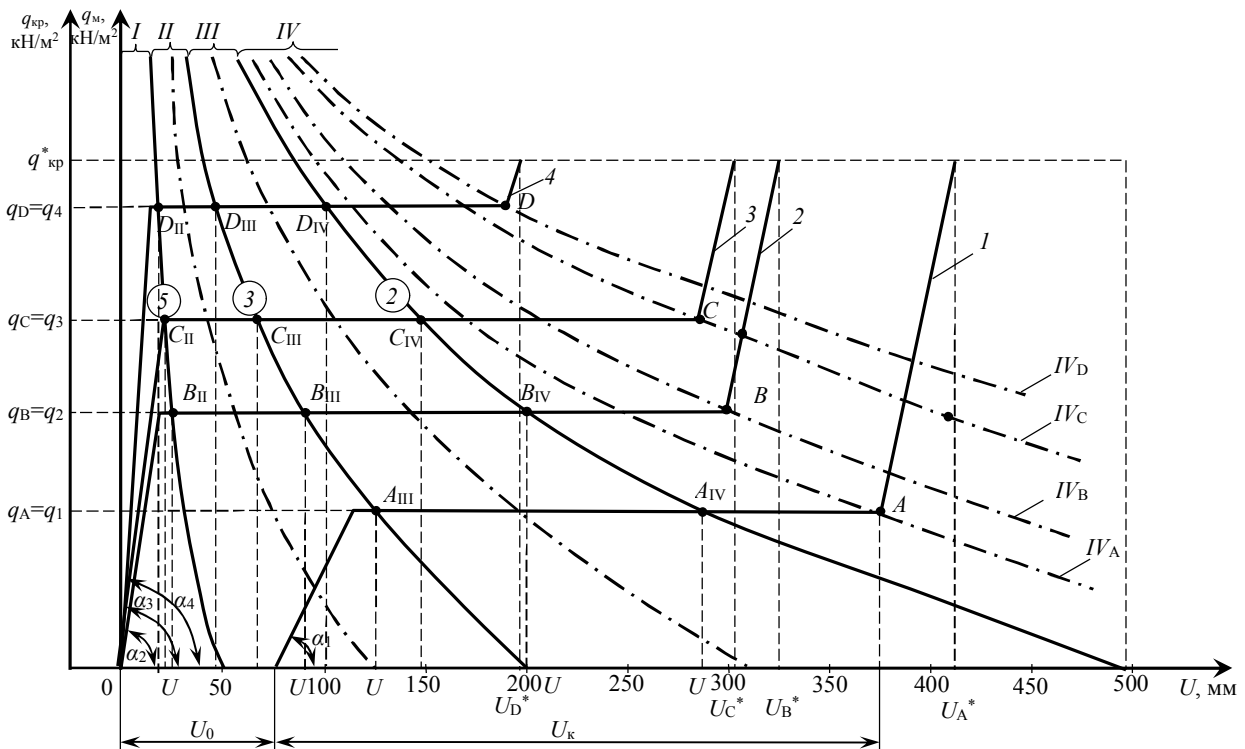


Рисунок 1 — Модель взаимодействия податливой крепи с породным массивом

Чтобы обеспечить равновесие системы «крепь — массив», несущая способность крепи $q_{кр}$ должна быть равна нагрузке q_m , действующей при определенной величине деформации. Так, согласно работе [4], для того чтобы вовсе исключить деформации пород ($U = 0$), сопротивление крепи $q_{кр}$ должно полностью соответствовать величине горного давления. Это означает, что в выработке на глубине $H = 1000$ м крепь должна иметь несущую способность $25–26$ МН/м². Естественно, это технологически не осуществимо и вряд ли целесообразно, но эта величина демонстрирует порядок цифр, соответствующих точкам пересечения зависимо-

стей, характеризующих состояние породного массива, с осью ординат. На оси абсцисс эти зависимости отсекают некоторые значения смещений пород на контуре незакрепленной выработки ($q_m = 0$), принятые в СП 91.13330.2012 [5] за критерий для классификации устойчивости пород. На графике (рис. 1) сплошными линиями выделены три кривые, которые разделяют по СП 91.13330.2012 состояние устойчивости осадочных пород на четыре категории: I — устойчивое, со смещениями незакрепленного породного контура до 50 мм; II — среднеустойчивое (свыше 50 до 200 мм); III — неустойчивое (свыше 200 до 500 мм); IV — сильно неустойчивое (свыше 500 мм), которым соответствуют, согласно [2], следующие значения параметра $k = \sigma_c/\gamma H$: свыше 5; от 3 до 5; от 2 до 3 и менее 2 (табл. 1).

Таблица 1 — Показатели, характеризующие состояние выработок для разных категорий устойчивости массива горных пород [6]

Категория устойчивости	Смещения контура выработки U , мм	Параметр устойчивости пород, $\sigma_c/\gamma H$	Размер зоны, м		
			неупругого деформирования	нарушенных пород	разрыхленных пород
I	до 50	более 5	до 1,5	0,5–0,7	–
II	от 50 до 200	от 3 до 5	1,5–3,0	0,7–1,5	0,5–1,3
III	от 200 до 500	от 2 до 3	3,0–5,0	1,5–2,0	1,3–1,6
IV	свыше 500	до 2	свыше 5	свыше 2,0	свыше 1,6

Следует заметить, что с ростом деформации пород несущая способность массива резко падает, поэтому для обеспечения равновесия системы «крепь — массив» в режиме взаимовлияющих деформаций требуется значительно меньшее сопротивление крепи $q_{кр}$. После деформации пород лишь на 3 мм, величина сопротивления крепи, которая нужна для поддержания равновесия, будет равна уже 55 % от максимальной величины горного давления, а при деформации 60 мм — только 20 % ($q_m = 5 \text{ МН/м}^2$). Если же величина деформаций пород превысит определенный порог, соответствующий тем или иным горно-геологическим условиям, то требуемое для обеспечения равновесия сопротивление крепи вновь начинает возрастать из-за зарождения процесса вывалообразования в расслоившихся приконтурных породах. В этом случае действующую нагрузку следует увеличивать на величину веса пород в своде обрушения.

Деформационно-силовые характеристики податливой крепи на рисунке 1 представлены кусочно-линейными зависимостями 1, 2, 3 и 4 в координатах $q_{кр} — U$ (где $q_{кр}$ — грузонесущая способность крепи, кН/м^2).

График 1 соответствует установке крепи без силового контакта с породным обнажением, поэтому до момента включения крепи в работу контур выработки смещается на величину U_0 , а затем крепь деформируется пропорционально увеличению нагрузки вплоть до сопротивления крепи в податливом режиме q_1 . Степень жесткости крепи предопределяется углом α наклона графика к оси U , где $C_1 = tg\alpha_1$ есть коэффициент жесткости крепи. Смещение крепи в податливом режиме представлено горизонтальным участком, равным величине конструктивной податливости U_k . После исчерпания податливости крепь будет работать с несколько иной жесткостью в жестком режиме до предельной деформации крепи U^* и предельной нагрузки $q_{кр}^*$. После достижения параметрами предельных значений, профиль крепи претерпевает значительные пластические деформации и выработка теряет свою устойчивость.

График 2 соответствует работе крепи с быстрым восприятием нагрузки q_2 , например, за счет ее предварительного распора сразу же после установки, в условиях пассивного отпора пород с той же конструктивной податливостью U_k , но с большим сопротивлением узлов при их проскальзывании $q_1 > q_2$, равным усилию распора пород. Графики 3 и 4 воспроизводят работу крепи в условиях повторных распоров с усилиями q_3 и q_4 , приближающихся по своей величине к ее предельной несущей способности $q_{кр}^*$ по условию образования пластических деформаций, но с ограниченной податливостью.

Точки A , B , C и D пересечения линий 1, 2, 3 и 4 с граничными кривыми для той или иной категории устойчивости (I, II, III и IV) соответствуют моментам равновесия системы «крепь — массив» в различных горно-геологических условиях, при этом смещения пород U_A , U_B , U_C и U_D и сопротивления крепи q_A , q_B , q_C и q_D являются характеристиками работы крепи при взаимодействии с породами в податливом режиме, а смещения U^*_A , U^*_B и нагрузка $q^*_{кр}$ являются предельными, при которых эксплуатация крепи уже невозможна.

Из анализа рисунка 1 можно сделать вывод, что процесс взаимодействия крепи и массива определяется тем обстоятельством, насколько силовые и деформационные параметры крепи соответствуют деформационным и силовым характеристикам пород в зоне разрушения.

В породах I категории устойчивости, когда смещения породного контура минимальны и не превышают величины закрепных пустот U_0 (до 50 мм), а максимум скорости смещений пород наблюдается после окончания перераспределения напряжений в призабойной части выработки, податливая крепь не работает в режиме взаимовлияющих деформаций, а играет роль ограждающей конструкции. Поэтому она может быть заменена иной, более ресурсосберегающей крепью, обеспечивающей лучшее сохранение несущей способности пород, например, анкерной. При креплении выработок податливой крепью в этих условиях зона разрушений, вызванная перераспределением напряжений в призабойном пространстве, зачастую, отсутствует, а породы могут быть нарушены на 0,5–0,7 м взрывными работами. Ограниченные размеры областей запредельного деформирования не нарушают устойчивость выработки, то есть породный массив при сформировавшемся в результате проведения выработки напряженно-деформированном состоянии может оставаться в равновесном состоянии даже без воздействия крепи. Восстановление равновесия, нарушенного проведением выработки, в этом случае завершается в течение 2–4 мес.

Породный массив, соответствующий II-й категории устойчивости (50–200 мм) попадает в предельное состояние в ходе перераспределения исходного поля напряжений, вызванного проведением выработки. В этом случае в пределах зоны влияния забоя на контуре выработки при комбайновой технологии, а при наличии трещин от взрыва на границе области взрывного разрушения, в месте наибольшей концентрации напряжений или минимальной прочности пород начинает образовываться зона запредельного их деформирования. Вначале она имеет ограниченные размеры, поэтому активный отпор смещениям разрушившихся пород мог бы привести к стабилизации деформационного процесса. Однако продолжающееся перераспределение напряжений в результате периодического подвигания забоя и отсутствия надежного контакта крепи с породами приводит, как правило, опять к нарушению равновесного состояния системы «крепь — массив». Поэтому в этих условиях потеря несущей способности пород происходит с постепенным переходом от связно-нарушенного к нарушенному состоянию на начальной стадии запредельного деформирования, а в хрупких породах оканчивается даже разрыхлением разрушенных пород. В слоистых породных массивах зона неупругих деформаций формируется в виде овала, вытянутого в направлении, перпендикулярном к плоскости напластования, с максимальным размером до 3 м. Размер зоны нарушенных пород незначителен (0,7–1,5 м) и зависит от их хрупкости, а размер зоны расслоившихся до остаточной прочности пород составляет 0,5–1,3 м (табл. 1). Геомеханические процессы, вызванные в массиве проведением выработки, стабилизируются через 3–6 мес.

При II-й категории устойчивости пород равновесное состояние массива с податливой крепью, возводимой традиционным способом, достигается на очень узком податливом участке ее работы в точке A_{III} задолго до исчерпания конструктивной податливости U_k . При введении крепи с распором область рационального взаимодействия крепи с породами существенно шире (B_{II} – B_{III} , C_{II} – C_{III} , D_{II} – D_{III}), причем несущая способность породного массива сохраняется тем больше, чем быстрее вступает крепь в работу и выше сопротивление узлов податливости при их проскальзывании.

В породах III категории устойчивости (200–500 мм) деформационный процесс потери несущей способности массива соответствует запредельной ветви диаграммы деформирова-

ния пород и может существенно различаться в зависимости от преобладания хрупких или пластических свойств. В породах, склонных к хрупкому разрушению, максимальная скорость смещения контура выработки регистрируется в пределах зоны влияния забоя. Развитие геомеханических процессов сопровождается не только разупрочнением пород, но и появлением трещин, параллельных поверхностям обнажений, разбивающих массив, совместно с природными трещинами, на отдельные блоки различных размеров. В результате развития геомеханических процессов в этих условиях непосредственно вблизи контура формируется зона интенсивного разрыхления (1,3–1,5 м), в которой породы имеют остаточную прочность и приближаются по своим свойствам к сыпучей среде. Далее в глубину массива распространяется зона нарушенных пород (1,5–2,0 м), находящихся в состоянии запредельного деформирования, а за ней следует зона неупругих деформаций (3,0–5,0 м), причем соотношение размеров этих зон определяется хрупкостью и остаточной прочностью пород. В данных условиях зона неупругих деформаций принимает более округлую форму, а размер большей полуоси достигает 4–8 м. В породах, в которых проявляются пластические свойства, скорость смещений контура выработки максимальна уже в начальный момент после их обнажения, а затем она постепенно уменьшается. Формирование зоны неупругих деформаций в пластичных породах происходит без существенного их разупрочнения с меньшей пустотностью. Временные процессы в породах III категории устойчивости завершаются за более длительный период (6–12 мес.).

Область работоспособного состояния системы «крепь — массив» при III категории устойчивости пород наиболее широка и при различной несущей способности узлов податливости крепи изменяется в диапазонах $A_{III}-A_{IV}$, $B_{III}-B_{IV}$, $C_{III}-C_{IV}$ и $D_{III}-D_{IV}$ (рис. 1). Такое состояние системы является более устойчивым, так как диапазон допустимых смещений пород достаточно широк, а действующие напряжения минимальны. В условиях неопределенности многих влияющих факторов такой подход более приемлем для обеспечения надежности горных выработок, чем жесткая крепь. Однако значительное развитие зон нарушенных пород и их разрыхление при малом сопротивлении крепи в податливом режиме и, как следствие, переход приконтурных пород в состояние, подобное сыпучей среде с малой остаточной прочностью, обуславливает в условиях III-й категории устойчивости возникновение процесса сводообразования [7]. В результате этого процесса породы свода обрушения дополнительно пригружают крепь, что может опять спровоцировать нарушение равновесного состояния.

Следовательно, в этих условиях нельзя допускать чрезмерного разрыхления пород, для этого сопротивление крепи в податливом режиме должно быть значительно выше, а податливость — ограниченной. Если предотвратить дезинтеграцию пород в зоне разрушения невозможно, то крепь должна обладать способностью активного воздействия на разрыхленные породы с целью их уплотнения и создания буферной зоны из уплотненных пород, способных противодействовать нежелательному проявлению геомеханических процессов.

В условиях IV категории устойчивости ($U > 500$ мм) в результате малой прочности пород и значительной концентрации напряжений в опорной зоне массив попадает в предельное состояние еще впереди забоя выработки, а запредельное деформирование окружающих выработку пород начинается в зажатой среде еще до их обнажения. О таком характере деформирования массива свидетельствует повышенное значение скорости смещения пород и нахождение максимума скорости непосредственно у забоя выработки, а также значительные размеры зоны неупругих деформаций (свыше 5 м). Развитие процесса смещений породного контура выработки и потери несущей способности пород в этих условиях происходит в результате расширения зоны руинного разрушения, причем процесс носит незатухающий характер, а скорость смещения пород варьирует в пределах от 1 до 10 мм/сут.

Поэтому нормальное эксплуатационное состояние выработок, закрепленных податливой крепью в породах IV категории устойчивости, может быть обеспечено только на ограниченный промежуток времени до исчерпания податливости, что на рисунке 1 соответствует точкам *A*, *B*, *C* и *D*. При этом с ростом сопротивления крепи в податливом режиме предельные

точки равновесного состояния перемещаются в область более сложных горно-геологических условий при одновременном уменьшении величины конструктивной податливости. Далее крепь работает в жестком режиме и переходит в состояние неустойчивого равновесия, когда любые, даже незначительные по величине, силовые воздействия вызывают образование вывалов, которые дополнительно пригружают крепь и могут привести к завалам выработки.

Таким образом, чтобы обеспечить равновесное состояние системы «крепь — породный массив» с помощью податливой крепи сопротивление узлов податливости и их конструктивная податливость должны соответствовать зависимости, характеризующей напряженно-деформированное состояние массива. При этом, чем меньше значение параметра $k = \sigma_c / \gamma H$ и больше прогнозируемые смещения контура выработки, тем выше должно быть сопротивление крепи в податливом режиме и меньше ее податливость. Так как стабилизировать деформационные процессы за счет податливости крепи нельзя, то крепь должна обладать распорными функциями для создания из разрушенных пород буферной зоны с повышенной плотностью, способной предотвратить дальнейшую потерю прочности приконтурных пород и образование свода обрушения. В условиях влияния очистных работ, когда выработка подвергается периодическому воздействию опорного давления, мероприятия по распору разрыхленных пород должны быть проведены до перехода системы «крепь — массив» в критическое состояние. При применении распорных средств необходимо учитывать негативное влияние несимметричной нагрузки на обеспечение равновесного состояния породного массива и крепи.

Список литературы

1. Обоснование способа и параметров обеспечения устойчивости подготовительных выработок с помощью адаптивной распорно-податливой крепи : отчет о НИР (заключит.) : ГБ №202 / Донбасский государственный технический университет ; рук. Бабиюк Г. В. ; исполн. : Леонов А. А. [и др.]. — Алчевск, 2013. — 442 с. — Библиогр. : с. 423–442. — № ГР 0112U000368. — Инв. № 0214U002013.
2. Виноградов, В. В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок : монография / В. В. Виноградов. — К. : Наукова думка, 1989. — 192 с.
3. Заславский, Ю. З. Расчет параметров крепи выработок глубоких шахт / Ю. З. Заславский, А. Н. Зорин, И. Л. Черняк. — К. : Техника, 1972. — 156 с.
4. Араунер, Х.-В. Управление горным давлением при использовании технологии заполнения закрепного пространства и набрызгбетонирования / Х.-В. Араунер // Глюкауф. — 1985. — № 2. — С. 5–9.
5. СП 91.13330.2012. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80. — Введ. 2013–01–01. — М. : ООО «Аналитик», 2012. — 58 с.
6. Шашенко, А. Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт : монография / А. Н. Шашенко, А. В. Солодянкин, А. В. Мартовицкий. — Днепрпетровск : ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. — 384 с.
7. Либерман, Ю. М. Давление на крепь капитальных выработок / Ю. М. Либерман. — М. : Наука, 1969. — 119 с.