

УДК 622.831:622.28

Литвинский Г. Г.

Донбасский государственный технический университет

E-mail: ligag@ya.ru

ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРЕПИ С ГОРНЫМ МАССИВОМ

Рассмотрены основные деформационно-силовые режимы работы крепи: жесткий и податливый. Даны их обобщенные характеристики в виде функциональной связи определяющих работу крепи геомеханических параметров: несущей способности и смещений периметра. Для суждения о характере сопротивления крепи смещениям предложен коэффициент жесткости крепи, который меняется от 0 для податливой до ∞ для жесткой крепи. Рассмотрены характерные особенности изменения деформационно-силовых показателей крепи во времени. Чтобы оценить суммарное сопротивление крепи внешним воздействиям со стороны массива, введено понятие работоспособности крепи. Показано, что податливая крепь даже легкой конструкции намного превосходит по работоспособности мощные жесткие крепи. Для оценки параметров взаимодействия крепи с горным массивом сравниваются возможные расчетные схемы. Даны рекомендации по выбору расчетных методик горной крепи.

Ключевые слова: *крепь, геомеханические параметры, деформации, несущая способность, деформационно-силовая характеристика, податливость, жесткость, нагрузка на крепь, работоспособность, расчетные схемы.*

1 Актуальность и цель исследований

Добыча большинства сырьевых ресурсов из недр Земли осуществляется подземным и открытым способами, причем совокупный объем добычи превышает 10 млрд т и ежегодно возрастает на 3...5 %. Соответственно, это требует интенсивного сооружения и обустройства подземных горных выработок различного назначения, протяженность которых составляет десятки тысяч километров. На достигнутых глубинах разработки устойчивость различных выработок обеспечивают горные крепи и обделки многочисленного рода конструкций, которые должны вступать в деформационно-силовое взаимодействие с окружающим горным массивом и целенаправленно изменять его поведение для обеспечения эксплуатационной устойчивости породного контура.

Крепи горных выработок в зависимости от своего назначения, технологии возведения и горно-геологических условий применения могут характеризоваться большой совокупностью технико-экономических

показателей, взаимно дополняющих или иногда плохо сопоставимых друг с другом. Описанию истории развития, технических параметров, расчетных методов и экономических показателей горных крепей посвящены многочисленные публикации и монографии, число которых превышает несколько тысяч [1–13 и др.]. Несмотря на это, до сих пор четко не выработан общий подход по классификации и ранжированию таких обобщенных результативных показателей, которые позволяют сопоставить самые разные конструкции крепи с общих позиций, что затрудняет их объективную оценку и обоснованный выбор. Поэтому актуальны исследования, направленные на устранение этих пробелов.

Целью исследования является изыскание и формулирование обобщенных показателей, характеризующих особенности взаимодействия крепи и массива горных пород и позволяющих оценить их геомеханическую эффективность.

Объектом исследований являются горные крепи подземных горных выработок,

предмет исследований — параметры взаимодействия конструкций крепи с массивом горных пород.

Основными **задачами исследований** являются:

– обоснование системы результативных показателей, характеризующих геомеханическое взаимодействие горной крепи с окружающим выработку массивом горных пород;

– раскрытие наиболее характерных зависимостей изменения во времени деформационно-силовых показателей крепи при различных режимах ее работы;

– исследование влияния крепи на геомеханическое поведение массива горных пород вокруг выработки и учет условия контакта крепи с массивом горных пород;

– выявление требований к конструкциям крепи с позиций геомеханики.

2 Основные режимы работы и параметры крепи

Наиболее общим показателем горной крепи, отражающим главные особенности ее работы по противодействию проявлениям горного давления, можно считать режим ее деформационно-силового взаимодействия с окружающим выработку массивом горных пород (режим работы).

Для описания режима работы любой крепи в целом, независимо от ее конструктивных особенностей, необходимо знать ее геомеханические параметры в виде деформационно-силовых характеристик.

Геомеханическими параметрами крепи являются её отпор q (синонимы — несущая способность, реакция крепи) и податливость U (антоним — жёсткость) конструкции. Отпор крепи q отражает её силовой, а податливость U — деформационный показатель взаимодействия с массивом.

Графическое или аналитическое представление связи между грузонесущей способностью q и податливостью U крепи называют её **деформационно-силовой характеристикой (ДСХ)**.

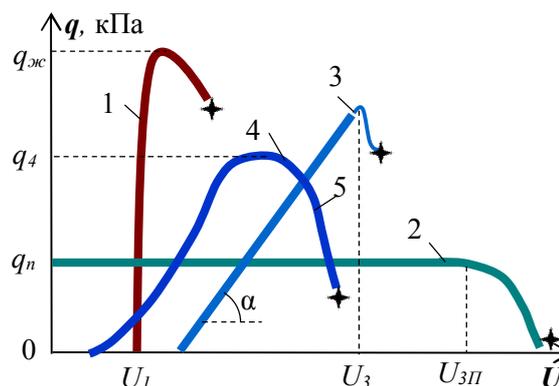


Рисунок 1 — ДСХ крепи с разными режимами работы: 1, 2 — идеально жесткие и податливые; 3, 4 — линейным и нелинейным сопротивлением

С позиций горной геомеханики ДСХ полностью характеризует крепь и избавляет от необходимости рассмотрения особенностей её конструкции. Именно эти характеристики наиболее полно отражают геомеханические показатели взаимодействия крепи с горным массивом при любых проявлениях горного давления.

В аналитической форме уравнение ДСХ крепи имеет вид

$$U = f(q) \text{ или } q = f(U). \quad (1)$$

Эти зависимости определяют экспериментально на стендах по испытанию крепи в специализированных лабораториях или получают с использованием расчётных методов.

В зависимости от ДСХ различают два предельных (идеализированных) режима «работы» (взаимодействия с массивом) крепи: жёсткий и податливый (рис. 1). Крестиком на графиках показано разрушение крепи.

Жёсткий режим работы создается, когда крепь после контакта с массивом полностью останавливает или ограничивает возможные перемещения породного контура, с которым она контактирует. Например, если при проходке жёсткую крепь устанавливают с некоторым отставанием от забоя выработки, то породы после некото-

рого начального перемещения до установки крепи оказываются «жёстко» зафиксированы и это записывается равенством $U = U_0 = Const$, тогда как нагрузка на крепь начинает нелинейно возрастать во времени $q = f(t)$ от нуля до некоторого конечного значения $q_{жс}$ (рис. 1, линия 1).

В этом случае режим заданных смещений определяется в виде допустимых (фиксированных) крепью подвижек породного контура. На рисунке 1 режим заданных смещений $U_{жс}$ представлен линией 1, которая показывает, что вначале породный контур сместился на величину $U_{жс}$, затем, после контакта с крепью, смещения пород остановились и начала возрастать нагрузка на крепь q . При достижении нагрузки предельного уровня $q_{жс}$ происходит деформация крепи, т. е. она переходит в запредельный режим деформации, теряя свою несущую способность.

Податливый режим крепи представлен линией 2 (рис. 1) и характеризуется конструктивно заданным отпором крепи $q_{пл} = Const$. Уровень допустимых нагрузок регулируется жесткостью податливых устройств, в рамной стальной крепи — с помощью натяжения гаек в узлах податливости. Такой режим работы крепи называют режимом заданных нагрузок, при постоянном значении которых увеличиваются смещения породного контура, контактирующего с крепью. Когда смещения массива, которые передаются на крепь, достигают предела конструктивной податливости крепи $U_{пл}$, несущая способность крепи падает $q < q_{пл}$, крепь переходит в запредельный режим работы и разрушается.

Сравнивая оба режима работы — податливый и жёсткий, — можно видеть, что для каждого необходимо задать как минимум по одному геомеханическому параметру: для жёсткой крепи — $U_{жс}$, для податливой — $q_{пл}$, которые «отслеживаются» каждой крепью в процессе её взаимодействия с массивом. Однако эти исходные параметры дополняются предельными значениями нагрузки $q_{жс}$ для жёсткой кре-

пи и предельной податливости $U_{пл}$ для податливой, после достижения которых нормальная эксплуатация крепей невозможна.

Режим линейно возрастающего сопротивления крепи представлен графиком 3 (рис. 1), когда до момента контакта крепи с породами контур сместился на величину U_0 , а затем смещения крепи $U(t)$ линейно растут пропорционально росту нагрузки q вплоть до предельной деформации крепи $U = U_3$. Степень «жёсткости» крепи определяется углом наклона α графика ДСХ к оси U . Численно коэффициент жёсткости крепи $k_{жс}$ равен

$$k_{жс} = \operatorname{tg}(\alpha), \text{ причём } 0 \leq k_{жс} < \infty, \quad (2)$$

где α — угол наклона линии 3 к горизонтальной оси U .

Крепь линейно возрастающего сопротивления (линия 3) описывается тремя параметрами: начальными допустимыми перемещениями до установки крепи U_0 , предельно допустимыми смещениями крепи U_3 , которые соответствуют предельной несущей способности крепи $q_{жс}$.

Чем больше коэффициент жесткости $k_{жс}$, тем ближе ДСХ крепи к жёсткому режиму работы, тем меньше крепь деформируется под действием горного давления. Для идеально податливой крепи $k_{жс} = 0$, для идеально жесткой $k_{жс} \rightarrow \infty$.

Наиболее общий случай ДСХ крепи представлен линией 4 с переменным коэффициентом жёсткости $k_{жс}$, в каждой точке графика он равен производной

$$k_{жс} = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{dq}{dU}. \quad (3)$$

3 Особенности работы крепи во времени

При достижении предельных значений $q_{жс}$ для жёсткой крепи или $U_{пл}$ для податливой конструкция переходит в запредельное состояние, т. е. её расчётная схема претерпевает изменения: появляются пластические или хрупкие шарниры, происходит местная или полная потеря устойчивости, заклинивание податливых соедине-

ний, разрушения отдельных элементов, что меняет режим работы крепи.

Часто расчётная схема крепи в процессе взаимодействия с массивом меняется несколько раз. Так, в арочной стальной крепи по мере её нагружения последовательно сменяется этап жёсткого режима (до срабатывания узлов податливости) режимом заданной нагрузки, т. е. податливой работы. Затем появляется в наиболее напряжённом участке первый пластический шарнир, и арка из 2-шарнирной статически неопределимой становится 3-шарнирной статически определимой, причём её несущая способность может даже возрастать. Возможны и последующие этапы изменения расчётной схемы, чему способствует меняющийся контакт конструкции с окружающим массивом пород.

Тем не менее всегда на конечной стадии ДСХ крепи содержит «падающую» ветвь, у которой $k_{жс} < 0$. Это значит, что при увеличении деформаций U грузонесущая способность крепи q уменьшается. Иногда отрицательный коэффициент жёсткости $k_{жс}$ называют модулем спада. При $k_{жс} \rightarrow -\infty$ «падающая» ветвь резко обрывается вниз, а это значит, что крепь хрупко внезапно разрушается, представляя наиболее опасную форму аварии. Поэтому чем более пологая эта ветвь ДСХ, тем более безопасна крепь даже в период своего разрушения. К сожалению, запредельной стадии работы крепи, несмотря на многочисленные случаи отказов, до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

На рисунке 2 показаны графики изменения во времени отпора и деформации крепи разных режимов работы. Здесь достаточно наглядно видны различия между жёстким $q_{жс}(t)$, $U_{жс}(t)$ (линии 1) и податливым $q_{п}(t)$, $U_{п}(t)$ (линии 2) режимами работы крепи.

Анализ графиков показывает, что чем больше жёсткость крепи $k_{жс}$, тем меньшие смещения пород она допускает. Промежуточное положение занимает крепь нарастающего сопротивления (линии 3).

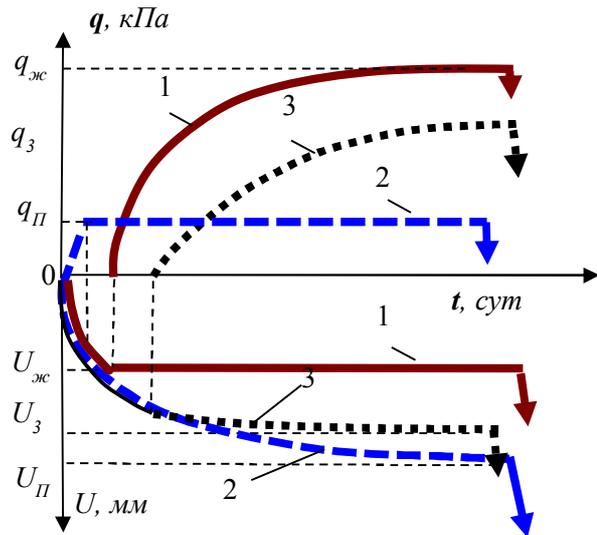


Рисунок 2 — Изменение параметров q и U у крепей с разными ДСХ во времени t

В реальных конструкциях крепи их ДСХ различны в зависимости от условий взаимодействия с массивом, особенностей контакта с породой (сцепление, проскальзывание, толщина забутовки, её качество и т. д.), закономерностей распределения внешних нагрузок на крепь и их изменения во времени.

Поэтому у одной и той же крепи могут быть разные ДСХ по разным направлениям нагружения, при разных условиях контакта с массивом. Это заметно затрудняет оценку режима работы крепи, которая по одному направлению может быть податливой (например, по вертикали), а по другому (с боков) — жёсткой. Отсюда следует полезность использования еще одной функции, характеризующей конструкцию крепи при ее взаимодействии с окружающим массивом: функцию изменения жесткости крепи по угловой координате θ , показывающей поведение крепи по разным направлениям ее нагружения $k_{жс}(\theta)$. Этот параметр следует сделать обязательным при указании технической характеристики крепи любой конструкции.

4 Работоспособность крепи

Важной обобщённой геомеханической характеристикой крепи является её работоспособность, которая даёт количественную оценку работы, производимой конструкци-

ей крепи в процессе её противодействия проявлениям горного давления (4).

Поэтому представляет интерес определение работоспособности крепи при ее взаимодействии с массивом. Работоспособность конструкции характеризует работу противодействия крепи при ее смещении под воздействием внешней нагрузки. Ее удобно определять непосредственно из графика ДСХ каждой крепи — это будет не что иное, как площадь под этим графиком (рис. 1). Аналитически работоспособность крепи определяется по формуле

$$A(U) = \int_0^U q(x) dx, \quad (4)$$

где x — текущее значение смещений U , $0 \leq x \leq U$.

Как следует из определения работоспособности, она зависит от её грузонесущей способности (отпора) q и податливости U . Абсолютно жёсткая крепь (рис. 1, линия 1), у которой под графиком нет площади, поскольку $U=0$, обладает нулевой работоспособностью $A(0)=0$.

Чем больше податливость крепи U при её взаимодействии с массивом, тем большую она совершает работу в процессе противодействия смещениям пород в выработку. Поэтому оказывается так важно обеспечить необходимую податливость конструкции крепи, что, как правило, позволяет избежать необходимости чрезмерного повышения её отпора, чего достигают за счёт увеличения материалоемкости при установке мощных крепей.

Рассмотрим показательный пример. Мощная монолитная железобетонная крепь ствола диаметром 8 м и толщиной 400 мм с несущей способностью (отпором) до $q=10$ МПа под действием нагрузки за счёт упругого обжатия даёт податливость в пределах $U=0,01$ м. Тогда её работоспособность равна

$$A(U) = 0,5 \cdot U \cdot q = 0,5 \cdot 0,01 \cdot 10^6 = 5 \text{ кДж},$$

где множитель 0,5 учитывает упругую работу крепи, когда её отпор увеличивает-

ся по линейному закону от 0 до $q=10$ МПа).

Для сопоставления возьмём обычную податливую рамную кольцевую крепь из спецпрофиля, у которой несущая способность всего $q=0,05$ МПа (т. е. в 200 раз меньше), зато податливый режим даёт смещения $U=0,3$ м. Работоспособность такой податливой крепи равна (коэффициента 0,5 в формуле нет, поскольку здесь $q=Const$)

$$A(U) = U \cdot q = 0,3 \cdot 0,05 \cdot 10^6 = 15 \text{ кДж}.$$

Приведённое сравнение показывает, что податливая рамная крепь лёгкой конструкции с позиций работоспособности превосходит мощную жёсткую крепь в 3 раза.

Однако следует отметить, что зачастую все же приходится, не считаясь с затратами, применять жёсткие конструкции крепи, исходя из технологических требований к горной выработке (например, в камерах, где установлено стационарное оборудование и жесткие требования к соблюдению габаритных размеров).

В наиболее общем случае следует учесть особенности взаимодействия крепи с массивом горных пород. Для этого следует воспользоваться диаграммой, на которой отражаются деформационно-силовые характеристики крепи и массива (рис. 3).

5 Геомеханика взаимодействия крепи и массива пород

Диаграмма взаимодействия крепи и массива представляет собой графики ДСХ крепи и массива, наложенные друг на друга. На рисунке 3 показано несколько типов крепи: жёсткая 2, податливая 3, возрастающего сопротивления ОС.

Деформационно-силовая характеристика массива горных пород представлена линией 1 и состоит из различных участков:

– AB , где массив по мере разгрузки разрушается, снижая прочность, начиная с точки A , где она равна σ_∞ , до 0 в точке B ;

– BE , где массив по мере разгрузки интенсивно дробится и увеличивает свой объём

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

ём (за счёт дилатансии), смещения контура выработки существенно возрастают;

– EF характеризует неустойчивое состояние крепи, когда наличие над выработкой большой зоны разрушенных пород вызывает запредельные деформации контура выработки при увеличении нагрузки на крепь.

Получить истинную характеристику ДСХ массива вокруг выработки (кривую I , или A, B, E, F) достаточно сложно и это является предметом изучения науки о горном давлении. Как видно из графика, характеристика массива нелинейная, с постепенно снижающейся крутизной (иначе — жёсткостью), т. е. углом наклона к оси U . Под жёсткостью массива понимают крутизну кривой I , т. е. производную $k_{жс} = \partial q / \partial U < 0$.

Уменьшить нагрузку на жёсткую крепь можно за счёт увеличения начальных смещений пород $U_{жс}$, что достигается за счёт временной задержки возведения крепи после проведения выработки. За этот промежуток времени породный массив успевает деформироваться, что отображается на его ДСХ смещением точки B влево по кривой ДСХ.

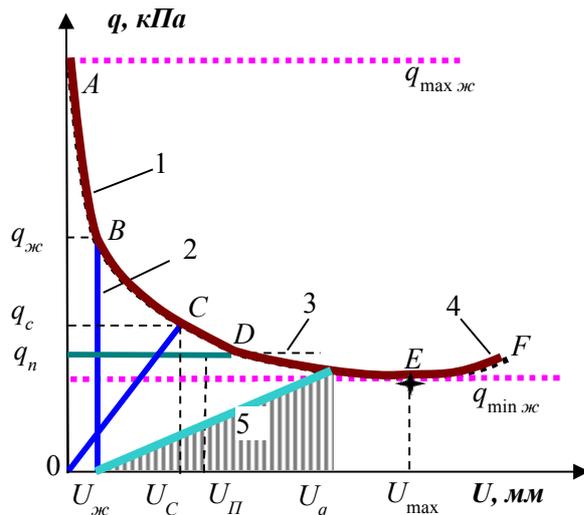


Рисунок 3 — Диаграмма взаимодействия массива с крепью при разных её ДСХ

Такое смещение породного контура $U_{жс} = U_0$, которое происходит до момента установки крепи, часто называют термином «технологическая податливость» в отличие от «конструктивной» податливости, которая реализуется в конструкции крепи посредством особых узлов соединения элементов, позволяющих сократить периметр крепи.

Точка встречи ДСХ крепи и ДСХ массива отображает устойчивое равновесие системы «массив — крепь» и достигаемые при этом параметры взаимодействия массива и крепи (U, q).

Из встречных ДСХ системы «крепь — массив» можно вывести следующие закономерности:

– чем более жёстким является режим работы крепи, тем большую нагрузку со стороны массива с заданной ДСХ она испытывает; чем меньше податливость $U_{жс}$ жёсткой крепи (линия 2 на рис. 3), тем больше необходим её отпор $q_{жс}$;

– у предельно жёсткого массива $k_{жс} \rightarrow -\infty$ и нагрузка на крепь нулевая $q \rightarrow 0$ независимо от её ДСХ, т. е. выработку можно не крепить, при этом почти отсутствуют деформации породного контура;

– у абсолютно податливого массива жёсткость равна $k_{жс} \rightarrow 0$, это приводит к постоянной высокой нагрузке на крепь, равной q_{max} независимо от её ДСХ;

– чем больше жёсткость установленной крепи, т. е. больше наклон её ДСХ к оси U , или меньше «технологическая податливость», т. е. начальное смещение пород, тем выше нагрузка на эту крепь;

– чем меньше сопротивление податливости $q_{П}$ у податливой крепи, тем большие смещения $U_{П}$ породного массива происходят в выработку, тем больше выработка «теряет» площадь своего поперечного сечения, т. е. ухудшаются её эксплуатационные показатели;

– при достижении смещений контура некоторого критического значения U_{max} нагрузка на крепь достигает своего минимума q_{min} , а далее, после точки E на ДСХ

нагрузка начинает увеличиваться по мере роста смещений за счёт роста веса разрушенных пород в зоне запредельного деформирования.

Как следует из графиков рисунка 3, нагрузка на крепь и смещение контура во многом зависят от начальных смещений U_0 , которые произошли до установки крепи, и от ДСХ крепи, т. е. её жёсткости. Так, линия 5 для менее жёсткой крепи пересекает ДСХ массива (линия $ABDF$) на участке снижения нагрузки и значительных деформаций.

Нагрузку на крепь можно определить по точке пересечения ДСХ крепи и массива с учётом начальных смещений, что описывается равенством¹

$$U(q) = U_0 + U_q. \quad (5)$$

Большую важность приобретает вопрос оценки минимально возможной нагрузки на крепь q_{\min} после образования зоны запредельного деформирования в кровле выработки. Из графиков на рисунке 3 становится ясным, что нельзя допустить, чтобы эффективный отпор крепи q_{ef} в выработке был меньше этого нижнего предела. Решение задачи по определению необходимого эффективного отпора крепи в зависимости от минимальной нагрузки q_{\min} [14] даёт следующие зависимости по её оценке:

$$q_{ef} > q_k \pm q_{\min} = q_k \pm \frac{\gamma a}{\mu - 1}, \quad (6)$$

где q_k — конструктивный отпор крепи, Па;

γ — объёмный вес пород, кг/м³;

a — половина ширины выработки, м;

μ — параметр устойчивости пород, вычисляют согласно [15] по формуле

$$\mu = 2 \frac{(k_\varphi - 1)p + \sigma_c^M}{2p - \sigma_c^M}, \quad (7)$$

где $k_\varphi = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)$ — параметр угла внутреннего трения φ пород;

p — давление вышележащей толщи горных пород, Па;

σ_c^M — прочность пород массива на одноосное сжатие, Па.

В формуле (6) знак (–) берут при определении эффективного отпора крепи в кровле, а знак (+) следует брать для почвы выработки. Именно это значение эффективного отпора крепи q_{ef} следует считать воздействием крепи на разрушенные породы вокруг выработки и использовать при расчётах.

6 Расчётные схемы взаимодействия крепи с массивом

В процессе исторического развития методов расчёта крепи горных выработок расчётные модели и схемы претерпели заметное изменение и усложнение. Среди известных расчётных схем, с учётом их исторического развития, можно отметить следующие.

– Конструкция крепи представлена в виде рамы на жёстком основании, у которой различные элементы (стойки, верхняк, лежень и др.) соединены либо жёстко, либо посредством идеальных шарниров. Внешние вертикальные и боковые нагрузки на крепь со стороны массива имеют равномерное распределение и неизменную интенсивность. Расчёты сводят к вычислению внутренних усилий в элементах крепи, определению опасных сечений и выбору их прочных размеров по допустимым напряжениям.

– На основании предыдущей была использована более совершенная расчётная схема, в которой определение прочных размеров элементов производят с учётом их предельных состояний: по их напряжениям или предельным деформациям, хотя здесь также не учитывались деформации крепи.

– Следующим принципиально важным улучшением расчётной схемы стали пред-

¹Это уравнение впервые было предложено и решено проф. Ф. А. Белаенко (ДГИ, 1955) и сыграло важную роль при изучении горного давления.

ложения по учёту пассивного отпора пород вокруг выработки, что нашло отражение в методе «Метрогипротранса» (метод Бодрова — Матэри, г. Москва, 1936), разработанном в период строительства метро для расчёта обделок тоннелей, когда крепи рассматривают как статически неопределимую систему, а окружающую породу — как упругое основание Винклера — Шведлера, способное воспроизводить «пассивный» отпор пород (1936).

– В связи со сложностью и большой трудоёмкостью расчётов были предложены многочисленные приближённые методики, в которых пассивный отпор заранее задают в виде эпюр различного очертания (эллипс, квадратная или кубическая парабола и т. д.), что было оправдано с практических позиций, но всё же являлось шагом назад в развитии предыдущего метода (1950–1980).

Однако все предложенные методы имели общий недостаток: в них нет обоснования определения величины и направления активных нагрузок со стороны пород.

Поэтому современное направление развития расчётных методик преследует цель учесть полное деформационно-силовое взаимодействие массива с крепью, когда нагрузки уже затруднительно разделить на активные и пассивные, а по мере развития горного давления они могут сменять друг друга.

В настоящее время достоверных методов расчёта крепи с учётом её реального взаимодействия с массивом не существует в силу значительной сложности задачи определения горного давления и исходных данных для расчёта, имеющих вероятностный характер (деформационные и прочностные свойства массива с учётом неоднородности его структуры, свойства крепи, влияние случайных технологических факторов и пр.).

Поэтому чаще всего используют расчётные схемы 3–4 этапов сложности, когда активная нагрузка на крепь задаётся на основании расчётных параметров проявлений горного давления или эмпирических

натурных замеров, а крепь рассчитывается как конструкция, взаимодействующая с породами, которые подчиняются закону линейно деформируемого основания.

Основной деформационной характеристикой пород при взаимодействии с крепью является коэффициент постели (отпора) $k_{П}$. Он показывает, какой величины напряжение — нормальное σ_n или касательное τ_{nt} — надо приложить к породе, чтобы она получила единичное — соответственно нормальное u_n или касательное γ_{nt} — смещение. Таким образом, следует различать два вида коэффициентов отпора: нормальный $k_{П\sigma}$ и касательный $k_{П\tau}$. Соответственно получаем

$$k_{П\sigma} = \sigma_n / u_n; k_{П\tau} = \tau_{nt} / \gamma_{nt}, [\text{МПа/м}]. \quad (8)$$

Кратко остановимся, как следует выбирать коэффициенты постели при расчёте крепи. В первую очередь следует различать показатели пород с разной степенью нарушенности или разрушения. Например, породы на контуре выработки обычно подвержены значительному растрескиванию и их жёсткость существенно уменьшается. Если порода разрушена и играет роль заполнения строительных зазоров за крепью («забутовка» закрепного пространства), то её деформационная жёсткость, которую отражает коэффициент отпора, окажется сниженной на несколько порядков.

Коэффициент нормального отпора $k_{П\sigma}$ в строительных расчётах обычно оценивают по известной формуле Б. Г. Галёркина:

$$k_{П\sigma} = E_{\infty} / (R(1 + \nu)) \infty, \quad (9)$$

где E_{∞} — модуль деформации массива, МПа; с учётом трещин и разрушения $E_{\infty} = 0,01 \dots 0,1E$, Па;

E — модуль упругости пород, слагающих массив, Па;

R — радиус крепи горной выработки, м;
 ν — коэффициент Пуассона пород, $\nu = 0,2 \dots 0,4$.

В зависимости от технологии возведения различных конструкций крепи между кре-

пью и породой образуется строительный зазор в виде пустого пространства, которое следует заполнять (забучивать) кусками мелкой породы (забутовкой) или строительным раствором. Тогда коэффициент нормального отпора колеблется в значительных пределах, а в условиях заполнения забутовки строительным раствором в среднем этот коэффициент равен $k_{Пт} \approx 0,1 \dots 0,4 k_{Пб}$. Чем более плотно зазор за крепью заполнен, тем выше коэффициенты постели продольного и поперечного отпора.

При тщательном тампонировании закрепного пространства твердеющим раствором эти коэффициенты отпора могут повышаться вплоть до $E_{\infty} = (1 \dots 8) 10^3$ МПа и более. На практике эти механические показатели пород в закрепном пространстве следует уточнять с помощью методов интроскопии и геофизическими исследованиями.

Таким образом, эффективная работа крепи зависит не только от совершенства ее конструкции, но и во многом от особенностей технологии ее возведения (тщательности заполнения закрепного про-

странства, времени и отставания от забоя выработки, правильности соблюдения технологических регламентов и пр.). Только в этом случае будут достаточно достоверными выводы, полученные в результате применения математических моделей и расчетных методов.

Выводы

Выполненный обзор существующих геомеханических параметров, характеризующих основные показатели работы крепи, показал необходимость их упорядочения и дополнения. Самыми общими геомеханическими параметрами крепи являются ее деформационно-силовые характеристики (ДСХ) для разных наиболее ожидаемых видов нагрузок. По ним можно с достаточной для практики достоверностью определить жесткость и работоспособность крепей любых конструкций. Такие показатели позволят произвести сопоставление, оценку и обоснованный выбор наиболее оптимального в конкретных горно-геологических условиях варианта крепления для подземной горной выработки.

Список источников

1. Агрикола Г. *О горном деле и металлургии в двенадцати книгах* / под. ред. С. В. Шухардина. 2-е изд. М. : Недра, 1986. 294 с.
2. Протодьяконов М. М. *Давление горных пород и рудничное крепление*. М.—Л. : Гостехиздат, 1930. 104 с.
3. *Горная энциклопедия*. М. : Сов. энциклопедия, 1985. Т. 2. 575 с.
4. Булычев Н. С., Абрамсон, Х. И. *Крепь вертикальных стволов шахт*. М. : Недра, 1978. 301 с.
5. Chudek M., Rulka K. *Konstrukcje siatkobetonowe w budownictwie podziemnych copalen*. Katowice : Shlas, 1975. 315 s.
6. Шишов Е. Л., Тюрин К. М. *Железобетонные ребристые тубинги для крепления стволов шахт*. Харьков : Металлургиздат, 1958. 150 с.
7. Баклашов И. В., Картозия Б. А. *Механика подземных сооружений и конструкции крепей* : учебник для вузов. 3-е изд., стер. М. : Студент, 2012. 543 с.
8. Каретников В. Н., Клейменов В. Б., Нурджихин А. Г. *Крепление капитальных и подготовительных выработок* : справочник. М. : Недра, 1989. 571 с.
9. Ерофеев Л. М., Мирошникова Л. А. *Повышение надежности крепи горных выработок*. М. : Недра, 1988. 245 с.
10. Литвинский Г. Г., Гайко Г. И., Кулдыркаев, Н. И. *Стальные рамные крепи горных выработок*. К. : Техника, 1999. 216 с.
11. Булат А. Ф., Виноградов В. В. *Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт*. Днепрпетровск : Институт геотехнической механики НАН Украины, 2002. 372 с.

12. Petar Jovanović. *Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorijsa*. Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. T. 2. 316 s.

13. *SME mining engineering handbook* / Hartman H. L. [et al.]. 2nd ed. Sacramento, California : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992. 2161 p.

14. Литвинский Г. Г. Обоснование минимального отпора крепи в горной выработке // Сборник научных трудов ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2017. Вып. 6 (49). С. 15–25.

15. Литвинский Г. Г. Статика разрушения и деформирования пород вокруг горной выработки // Сборник научных трудов ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2017. Вып. 7 (50). С. 19–30.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГЭМС ДонГТУ Корнеевым С. В.,
к.т.н., доц. каф. ГПБ, проректором по цифровой трансформации
в образовательной деятельности ДонГТУ Шульгиным П. Н.**

Статья поступила в редакцию 01.10.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*Литвинский Гарри Григорьевич, д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологии и промышленной безопасности
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: ligag@ya.ru*

Litvinsky G. G. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, e-mail: ligag@ya.ru)

THE MAIN MODES OF OPERATION AND GEOMECHANICAL PARAMETERS OF THE INTERACTION BETWEEN THE LINING AND THE ROCK MASSIF

The main deformation and force modes of lining operation are considered: rigid and malleable. Their generalized characteristics are given in the form of a functional connection of geomechanical parameters that determine the work of lining: bearing capacity and perimeter displacements. To judge the nature of the resistance of lining to displacements, the stiffness coefficient of lining is proposed, which varies from 0 for a malleable to ∞ for a rigid lining. The characteristic features of change in the deformation-force parameters of lining over time are considered. In order to estimate the total resistance of lining to external influences from the massif, the concept of the working capacity of lining is introduced. It is shown that the malleable lining of even light construction is much superior in performance to powerful rigid linings. To evaluate the parameters of the interaction between the lining with the rock massif, possible calculation schemes are compared. Recommendations on the choice of calculation methods of lining are given.

Key words: lining, geomechanical parameters, deformations, bearing capacity, deformation-force characteristic, malleability, stiffness, load on the support, operability design schemes.

References

1. Agricola G. *Twelve books on mining and metallurgy*. eds S. V. Shukhardina. 2nd ed. [O gornom dele i metallurgii v dvenadcati kniga. pod. red. S. V. Shuhardina. 2-e izd]. M.: Nedra, 1986. 294 p. (rus)
2. Protod'yakonov M. M. *Rock pressure and mine fixtures* [Davlenie gornyykh porod i rudnichnoe kreplenie]. M.-L.: Gostekhizdat, 1930. 104 p. (rus)
3. *Mining encyclopedia* [Gornaya enciklopediya]. M.: Sovetskaya enciklopediya, 1985. Vol. 2. 575 p. (rus)
4. Bulychev N. S., Abramson, Kh. I. *Lining of the vertical shafts of mine* [Krep' vertikal'nykh stvolov shakht]. M.: Nedra, 1978. 301 p. (rus)
5. Chudek M., Rulka K. *Konstrukcje siatkobetonowe w budownictwie podziemnych copalen*. Katowice : Shlas, 1975. 315 p.

6. Shishov E. L., Tiurin K. M. Reinforced concrete ribbed tubing for shaft attachment [Zhelezobetonnye rebristyie tyubingi dlya krepleniya stvolov shakht]. Khar'kov: Metallurgizdat, 1958. 150 p. (rus)
7. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mechanics of underground structures and fasteners: textbook. 3rd ed., stereotype. [Mekhanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepej : uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., ster]. M.: Student, 2012. 543 p. (rus)
8. Karetnikov V. N., Klejmenov V. B., Nuzhdikhin A. G. Fixation of capital and preparatory workings: handbook [Kreplenie kapital'nyh i podgotovitel'nyh vyrabotok: spravochnik]. M.: Nedra, 1989. 571 p. (rus)
9. Erofeev L. M., Miroshnikova L. A. Increase of mine lining reliability [Povyshenie nadezhnosti krepj gornyx vyrabotok]. M.: Nedra, 1988. 245 p. (rus)
10. Litvinsky G. G., Gaiko G. I., Kudyrkaev, N. I. Steel frame joints of mining workings [Stal'nye ramnye krepj gornyx vyrabotok]. K.: Tekhnika, 1999. 216 p. (rus)
11. Bulat A. F., Vinogradov V. V. Anchoring of coal mine workings. [Oporno-ankernoie kreplenie gornyx vyrabotok ugol'nyh shakht]. Dnepropetrovsk.: Institute of Geotechnical Mechanics of NAS of Ukraine, 2002. 372 p. (rus)
12. Petar Jovanović. Proektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija. Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. Vol. 2. 316 p.
13. Hartman H. L. [et al.]. SME mining engineering handbook. 2nd ed. Sacramento, California : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992. 2161 p.
14. Litvinsky G. G. Rationale for minimum bearing reaction of lining to mine workings [Obosnovanie minimal'nogo otpora krepj v gornoj vyrabotke]. Scientific works collection of DonSTU. Alchevsk. 2017. Iss. 6 (49). Pp. 15–25. (rus)
15. Litvinsky G. G. Statics razrusheniya i deformirovaniya porod vokrug gornoj vyrabotki [Statika razrusheniya i deformirovaniya porod vokrug gornoj vyrabotki]. Scientific works collection of DonSTU. Alchevsk. 2017. Iss. 7 (50). Pp. 19–30. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinsky Garry Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
 Donbas State Technical University,
 Alchevsk, Lugaansk People's Republic, Russia,
 e-mail: ligag@ya.ru