

# Взаимодействие крепи горных выработок с приконтурными породами в условиях образования областей их предельного равновесия



М. В. БАРАБАШ,  
инж.  
(ООО «ДТЭК»)

Рассмотрены тенденции формирования гипотез о взаимодействии крепи горных выработок с вмещающим породным массивом. Проанализирована теоретическая база для формирования основных положений возникновения и протекания геомеханических процессов вокруг горных выработок. Исследована зависимость влияния соотношения глубины поддержания выработки и среднего расчетного сопротивления сжатию близлежащего массива. Это позволило прогнозировать развитие нагрузки на крепь с учетом ее податливости.

**Ключевые слова:** крепь, выработка, породный массив, взаимодействие, предельное состояние, нагрузка, податливость.

**Контактная информация:** kovalevska\_i@yahoo.com

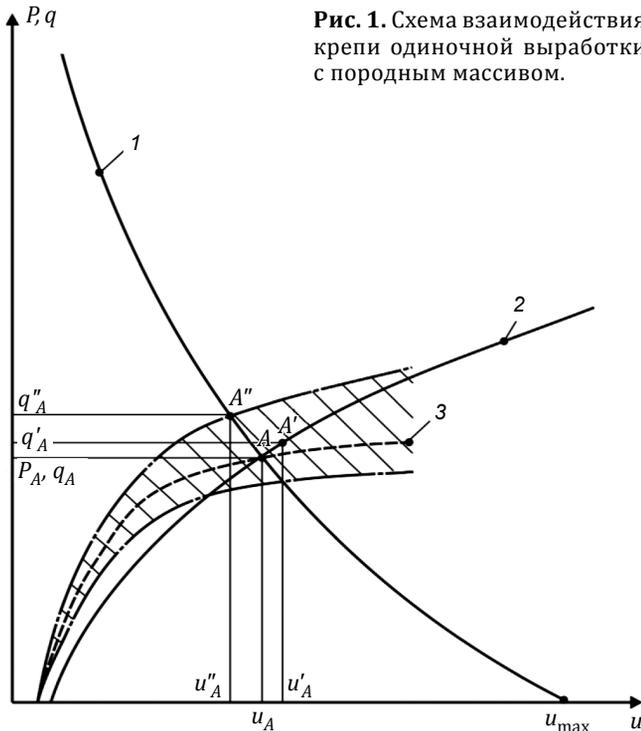
**Введение.** Развитие взглядов и формирование гипотез о взаимодействии крепи горных выработок с вмещающим породным массивом имеет более чем вековую историю [1–3]. К настоящему времени сложились определенные представления о параметрах протекания процесса нагружения разных типов крепей с учетом режима их работы [4]. Под понятием «режим работы крепи» понимают [5] связь реакции отпора  $q$  крепи с ее перемещением  $u$  под воздействием нагрузки (по существу, податливость крепи). Эту связь называют деформационно-силовой характеристикой крепи и представляют в виде функции  $q(u)$ .

**Научные предпосылки.** Данная функция ранее рассматривалась в работе [4] в двухпараметрической постановке (параметры  $q$  и  $u$ ), а затем, в ходе развития представлений о взаимодействии породного массива и крепи, были предложены более общие: трехпараметрическая (третий параметр – периметр поперечного сечения выработки) постановка [5] и четырехпараметрическая схема [6], где используется также и продольная координата выработки. Исследовались условия поддержания горной выработки вне зоны влияния очистных работ, в которых интенсивность проявлений горного давления существенно ниже, чем в непосредственной близости от лавы. Кроме того, области нарушенных пород вокруг одиночной выработки достаточно локальны по сравнению с зонами активных сдвижений углевмещающего массива при ведении очистных работ. Тем не менее, на наш взгляд, природа возникновения и протекания геомеханических процессов имеет общую осно-

ву вне зависимости от условий поддержания выработок, например:

- формирование зон разгрузки и повышенного горного давления в окрестности выработки;
- образование областей разупрочненных и разрушенных пород, их взаимодействие с крепью и целостным массивом;
- развитие расслоения по плоскостям ослаблений, по мощности литологической разности и по плоскостям напластований смежных литотипов;
- разбиение породного слоя на блоки трещинами, перпендикулярными плоскостям ослаблений и напластований, а также взаимодействие этих блоков при взаимном перемещении относительно друг друга;
- увеличение объема разрыхляющихся пород в стесненных условиях деформирования (генерирует повышенное горное давление с необходимостью его перераспределения);
- зональность изменения механических свойств породного массива и его структурных преобразований в окрестности выработки.

Это далеко не все общие позиции с точки зрения ме-



**Рис. 1.** Схема взаимодействия крепи одиночной выработки с породным массивом.

ханизма формирования горного давления на крепь, но и их достаточно, чтобы использовать закономерности, полученные для одиночных выработок, в процессе изучения тенденций связи режимов работы крепи с устойчивостью выемочных выработок, поддерживаемых в зоне влияния очистных работ.

Такой подход обусловлен двумя причинами: во-первых, закономерности проявлений горного давления и процесса взаимодействия породного массива с крепью для одиночных выработок изучены более полно; во-вторых, процессы взаимодействия массива с крепью для одиночных выработок подвержены влиянию меньшего количества факторов, а путь познания от простого явления к более сложному представляется наиболее перспективным в соответствии с классическими канонами философской мысли.

**Основные результаты исследований.** В свете изложенного рассмотрена схема (для простоты – двухпараметрическая) взаимодействия крепи выработки с окружающим породным массивом в условиях образования областей его предельного состояния. Акцент на эти области сделан из-за повышенного интереса именно к условиям интенсивного проявления горного давления.

Известны [4–6] две тенденции в формировании нагрузки на крепь, которые проиллюстрированы на рис. 1 двумя зависимостями:

- процесс деформирования породного массива в полость выработки (рис. 1, кривая 1), имеющий тенденцию к снижению нагрузки  $P$  (соответственно реакции крепи  $q$ ) при увеличении ее податливости  $u$ . В ситуации при некотором значении податливости  $u_{\max}$  нагрузка на крепь исчезает; закономерность 1 отражает процесс перераспределения напряженно-деформированного состояния (НДС) вокруг выработки, когда избыточный объем пород, находящийся в запредельном состоянии, перемещается в направлении наименьшего сопротивления и если ему не «мешать» с помощью реакции крепи, то возможно наступление «виртуального» равновесного состояния  $P = 0$  при  $u = u_{\max}$ ;

- процесс потери устойчивости части объема пород, находящихся в предельном или запредельном состоянии (см. рис. 1, кривая 2). Для восстановления их устойчивости необходима реакция крепи, которая имеет тенденцию к росту с увеличением податливости, так как в условиях квазисвободного деформирования породного массива происходит распространение неустойчивых объемов пород по его глубине.

Две взаимно противоположные тенденции определяют существование минимальной нагрузки на крепь  $P_A$  (на рис. 1 показана в виде точки  $A$  на пересечении кривых 1 и 2), для определения которой необходимо, чтобы деформационно-силовая характеристика крепи  $q(u)$ , которая представлена кривой 3 на рис. 1, проходила через точку  $A$ . По канонам математического анализа точка  $A$  с параметрами податливости  $u_A$  крепи при ее реакции  $q_A$  отражает единственное оптимальное решение задачи минимизации нагрузки на крепь. Достичь такого оптимального решения на практике невозможно по разным конструктивным и технологическим причинам, которые дают некоторый разброс значений  $q(u)$ . Поэтому более корректно говорить о некотором диапазоне колебаний деформационно-силовой характеристики крепи, показанном на рис. 1 заштрихованной областью разброса значений функции  $q(u)$ .

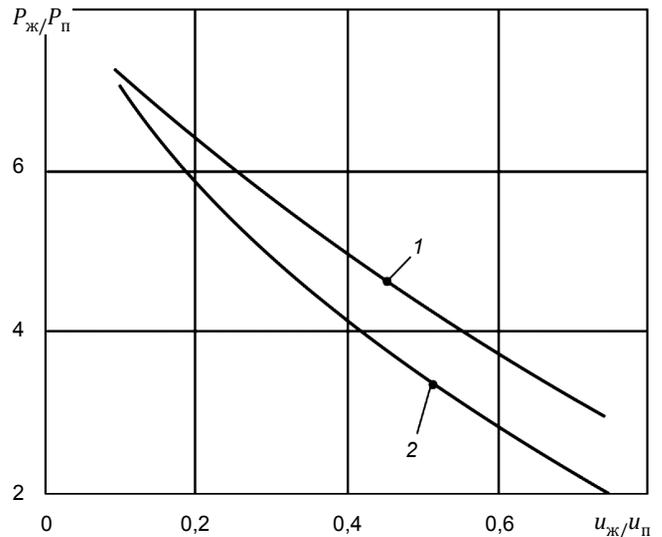
В пределах интервала колебания функции выделены точки  $A'$  и  $A''$ , приближенные к точке  $A$  оптимального значения; они очерчивают области вариаций рациональных значений ре-

акции  $q'_A - q''_A$  крепи при ее податливости  $u''_A - u'_A$  (см. рис. 1). Точка  $A'$  определяется пересечением вертикали при повышенной податливости  $u'_A$  (вертикаль проходит через точку пересечения нижней границы  $q(u)$  с кривой 1) кривой 2, так как увеличенная податливость крепи (по сравнению с оптимальной) ведет к росту нагрузки в соответствии со второй тенденцией и к ее снижению согласно первой, в данном случае не доминирующей. При ограниченной податливости  $u''_A$  (точка  $A''$ ) степень влияния обеих тенденций изменяется диаметрально противоположно: повышенная нагрузка  $q''_A$  показана кривой 1.

Таким образом, изложенная схема взаимодействия крепи с окружающим породным массивом позволяет выбрать рациональные интервалы вариации реакции крепи  $q'_A - q''_A$  и ее податливости  $u''_A - u'_A$  при известных зависимостях (кривые 1 и 2 на рис. 1) поведения разупрочняющегося близлежащего массива и образования области неустойчивых пород. Также следует уточнить, что во времени развитие геомеханических процессов (по параметрам  $q$  и  $u$ ) целесообразно исходя из устойчивости выработки, чтобы деформационно-силовая характеристика крепи (кривая 3) располагалась выше кривой 2; тогда в любой момент крепь способна удержать устойчивые породы.

Изложенные данные отражены (в известной мере) в нормативно-технической документации [7], где приведены методики расчета нагрузки на крепь в зависимости от ее податливости, т. е. учтено влияние деформационно-силовой характеристики крепи на процесс нагружения в конкретных горно-геологических условиях. Особый интерес представляет оценка степени влияния конструктивной податливости крепи на изменение так называемой нормативной нагрузки, по которой в последующем рассчитываются ее требуемые параметры.

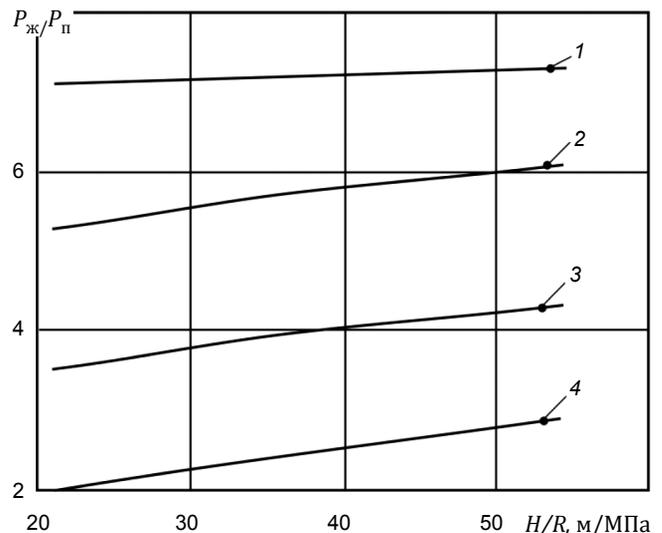
При рассмотрении указанного взаимовлияния в качестве примера взяты четыре значения отношения конструктивной податливости условно-жесткой  $u_{ж}$  и условно-податливой  $u_{п}$  крепей:  $u_{ж}/u_{п} = 0,1; 0,25; 0,5$  и  $0,75$ . Для этих значений построены графики соотношения  $P_{ж}/P_{п}$  нормативной нагрузки на более жесткую  $P_{ж}$  и более податливую  $P_{п}$  крепи в зависимости от геомеханических условий поддержания выработки, которые в нормативных документах характеризуются глубиной  $H$  размещения вы-



**Рис. 2.** Зависимость соотношения нагрузки  $P_{ж}/P_{п}$  на жесткую и податливую крепи от соотношения  $u_{ж}/u_{п}$  их податливости: 1 -  $H/R = 21$  м/МПа; 2 -  $H/R = 54$  м/МПа.

работки и средним расчетным сопротивлением сжатию  $R$  близлежащего породного массива.

Результаты расчетов отражены на рис. 2 и 3. Они интерпретируются следующим образом. Закономерности взаимосвязи соотношений  $P_{ж}/P_{п}$  и  $u_{ж}/u_{п}$  достаточно стабильны независимо от параметра  $H/R$  и характеризуют общую тенденцию к снижению нагрузки на крепь при увеличении ее податливости. Так, при высокой



**Рис. 3.** Влияние геомеханического параметра  $H/R$  на соотношение  $P_{ж}/P_{п}$  нагрузки на жесткую и податливую крепи: 1 -  $u_{ж}/u_{п} = 0,1$ ; 2 -  $u_{ж}/u_{п} = 0,25$ ; 3 -  $u_{ж}/u_{п} = 0,5$ ; 4 -  $u_{ж}/u_{п} = 0,75$ .

жесткости крепи ( $u_{ж}/u_{п} = 0,1$ ) на нее формируется нагрузка  $P_{ж}$ , превышающая в 7,1–7,3 раза нагрузку  $P_{п}$  на податливую крепь (типа рамной крепи из спецпрофиля СВП); в процессе увеличения податливости (до  $u_{ж}/u_{п} = 0,75$ ) соотношение указанных нагрузок снижается до 2–2,95.

Нижние значения приведенных интервалов соответствуют более благоприятным условиям поддержания выработки ( $H/R = 21$  м/МПа), а верхние – интенсивному проявлению горного давления ( $H/R = 54$  м/МПа). Тем не менее относительное отклонение параметра  $P_{ж}/P_{п}$  составляет 3–32 % для такого широкого диапазона изменения горно-геологических условий поддержания выработки. Более того, проявляется тенденция к уменьшению отклонений с ростом разницы в податливости сравниваемых крепей. Постоянство закономерностей, видимо, указывает на их достаточную объективность при прогнозировании развития нагрузки на крепь с учетом податливости.

Таким образом, в соответствии с выполненным анализом формирования нагрузки на крепь выработки вне зоны влияния очистных работ можно констатировать наличие существенного влияния режима работы крепи на данный процесс. Сложившиеся к настоящему времени представления о взаимодействии крепи с породным массивом (в условиях образования областей неустойчивого равновесия) достаточно полно раскрывают механизм протекания явления и обобщают как производственный опыт, так и результаты аналитических исследований.

Мнение о существовании некоторого рационального режима работы крепи будет весьма полезно при изучении геомеханических процессов вокруг подготовительной выработки, находящейся в зоне влияния очистных работ. Поэтому дальнейшие исследования должны быть выполнены с учетом оценки связи деформационно-силовой характеристики крепежной системы выемочной выработки со степенью ее устойчивости в период прохождения очистного забоя на участке от зоны опорного давления до

зоны стабилизации процессов сдвижения надугольной толщи позади лавы.

**Выводы.** На основе анализа и исследования теоретической базы для формирования основных положений возникновения и протекания геомеханических процессов вокруг горных выработок получены закономерности изменения нагрузки на жесткую и податливую крепи на базе решения задачи взаимодействия крепи с приконтурным породным массивом в условиях образования областей его предельного состояния. Исследована зависимость влияния соотношения глубины поддержания выработки и среднего расчетного сопротивления сжатию близлежащего массива, что позволило прогнозировать развитие нагрузки на крепь с учетом ее податливости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление / М. М. Протодьяконов. – М.: Госгортехиздат, 1933. – Ч. 1. – 94 с.
2. Ростовцев Д. С. Основные вопросы теории и практики в области управления кровлей по данным заграницы и СССР и их значение с точки зрения общих интересов народного хозяйства / Д. С. Ростовцев // Материалы по вопросу управления кровлей. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – С. 8–140.
3. Руппeneйт К. В. Давление и смещение горных пород в лавах пологопадающих пластов / К. В. Руппeneйт. – М.: Углетехиздат, 1957. – 228 с.
4. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений / Н. С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – 270 с.
5. Симанович Г. А. Управление режимами взаимодействия породного массива с крепью горных выработок на основе регулирования ее деформационно-силовой характеристикой: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.02; 05.15.11 / Симанович Геннадий Анатольевич. – Днепропетровск, 1993. – 408 с.
6. Ковалевская И. А. Геомеханика взаимодействия элементов системы «горный массив – упрочненные породы – крепь подземных выработок» / И. А. Ковалевская. – Днепропетровск: НГА Украины, 2003. – 234 с.
7. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів охорони: СОУ 10.1.00185790.011:2007. – Донецьк: ДонВУГІ, 2008. – 114 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України. Стандарт).