



Горное дело

УДК 622.272.5:622.841.2:622.848

ПРОГНОЗ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ СВИТЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПОД ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕХАНИКИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОДОПРОВОДЯЩИХ ТРЕЩИН

В.Н.ГУСЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Исследования процессов сдвижения слоев массива горных пород при первичной их подработке показывают, что максимальная кривизна слоев имеет тенденцию к уменьшению обратно пропорционально квадрату расстояния от пласта до рассматриваемого слоя. Это проявляется через распределение вертикальных деформаций растяжения – наибольших вблизи пласта и уменьшающихся к поверхности, что (это) является следствием механизма изгиба слоев массива: кривизна нижележащих слоев больше кривизны вышележащих.

В зоне полной подработки максимальная кривизна каждого из слоев повторно подрабатываемой толщи равна максимальной кривизне поверхности, т.е. кривизна вышележащего слоя повторяет кривизну нижележащего. Следовательно, максимальная кривизна любого из слоев массива обратно пропорциональна квадрату глубины залегания пластов свиты. При этом распределение вертикальных деформаций массива качественно и количественно отличается от распределения первично подработанного массива: вертикальные деформации на порядок меньше и распределение представлено чередованием деформаций растяжения и сжатия. Такое распределение является следствием механизма изгиба слоев повторно подрабатываемой толщи и объясняет, почему высота зоны водопроводящих трещин не возрастает в этих условиях относительно образовавшейся от выемки первого пласта свиты.

Разработанная на основе таких геомеханических процессов методика прогноза развития зоны водопроводимых трещин позволяет осуществлять безопасную выемку пластов угля под водными объектами.

Ключевые слова: трещины расслоения, отслоение, нормальносекущие трещины, граничная кривизна, первичная и повторная подработка, зона водопроводящих трещин.

Как цитировать эту статью: Гусев В.Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. Т.221. С.638-643. DOI 10.18454/PMI.2016.5.638.

Введение. Извлечение полезного ископаемого из недр связано с нарушением естественного напряженного состояния массива горных пород, приводящего к развитию сдвижений и деформаций. В результате этих процессов происходит существенное изменение геомеханического состояния подрабатываемого массива (уменьшаются прочностные характеристики, увеличиваются трещиноватость и водопроницаемость горных пород). И если при этом в зону подработки попадает водный объект, то это, с одной стороны, создает опасные условия ведения горных работ, а с другой – может быть недопустимо по требованиям охраны самого водного объекта.

При ведении горных работ под водными объектами необходима разработка специального геомеханического и гидрогеологического прогноза нарушения естественного состояния массива горных пород. Прогноз является основой для установления безопасных условий извлечения пластов угля из недр, при которых исключается образование гидравлических связей между горными выработками и водными объектами, которые приводят к недопустимо большому проникновению воды или ее прорыву.

Под водными объектами понимаются не только поверхностные водотоки (реки, ручьи, каналы) и водоемы (озера, водохранилища, хранилища промышленных стоков), но и водоносные горизонты и комплексы, крупные обводненные тектонические нарушения и зоны дробления, затопленные горные выработки, незатампонированные геологоразведочные, гидрогеологические, водопонижающие и другие технические скважины [2, 16]. Таким образом, применительно к рассматриваемой проблеме под водным объектом в широком смысле слова будем понимать природные или искусственно созданные сосредоточения воды, которые потенциально являются источником прорывов воды в горные выработки.

Развитие и формирование нормальносекущих трещин, расслоений и полостей отслоения. При отработке угольных пластов нарушается естественное равновесие массива горных пород, в результате чего массив деформируется и сдвигается [1, 14, 17]. Непосредственно над выработанным пространством угольного пласта образуется зона обрушения. Породы этой зоны подвергнуты наибольшим деформациям, вследствие чего они разделены на отдельные куски и блоки нерегулярных размеров, беспорядочно обрушенные в выработанное пространство. Очевидно, что проникновение воды через такую техногенную зону будет происходить беспрепятственно. Параметры этой зоны можно приблизенно оценить по формуле профессора С.Г.Авершина [1]

$$h = m / [(k-1)\cos\alpha], \quad (1)$$

где h – высота зоны обрушения; m – вынимаемая мощность пласта; k – коэффициент увеличения пород в объеме (для каменноугольных пород колеблется от 1,1 до 1,5); α – угол падения пласта.

Двигаясь в направлении к поверхности, зона обрушения переходит в зону, где слои не потеряли своей сплошности. В этой зоне максимальная кривизна слоев уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от пласта до рассматриваемого слоя. В результате такого распределения нижележащий слой изгибается больше вышележащего, что способствует расслоению и образованию полостей отслоения (рис.1). За счет отслоений происходит разуплотнение массива. При этом максимальные разуплотнения (раскрытие полостей отслоения) наблюдаются вблизи пласта (рис.1, а) и постепенно уменьшаются к поверхности (рис.1, б). В сечениях, удаленных от забоя в сторону выработанного пространства, наблюдается некоторое закрытие отслоений, происходит частичное уплотнение массива. Отслоения на единицу длины толщи по вертикали характеризуются распределением вертикальных деформаций, получаемых вдоль оси скважины по глубинным реперам. На схеме (рис. 2) они показаны эпюрами ε_1 . Как видно из этих эпюров, максимальные разуплотнения (деформации растяжения в вертикальном направлении) наблюдаются вблизи пласта и постепенно уменьшаются к поверхности. В сечениях, удаленных от забоя в сторону выработанного пространства, наблюдается некоторое закрытие отслоений, происходит уплотнение массива. Как правило, деформации ε_1 при первичной подработке только положительные, поскольку, как уже указывалось, кривизна нижележащего слоя больше вышележащего [3, 5, 18]. При дальнейшем подвигании забоя отрицательная кривизна становится примерно равной нулю.

При изгибе слоев, расположенных выше зоны обрушения, один и тот же участок любого слоя сначала претерпевает изгиб положительной кривизны, затем изгиб отрицательной кривизны. В местах изгибов с максимальными значениями кривизны образуются нормальносекущие слой трещины. При положительной кривизне в верхней части совместно прогибающейся пачки слоя (в дальнейшем будем называть ее просто слоем), где имеет место растяжение, наблюдается образование и раскрытие трещины, а в нижней части – сжатие (см. рис.1). Затем по мере подвигания забоя этот участок слоя претерпевает изгиб отрицательной кривизны. При этом в нижней части слоя уже будут деформации растяжения с раскрытием нормальносекущих трещин, а в верхней части происходит их закрытие с образованием зоны сжатия. Таким образом, процесс развития нормальносекущей трещины происходит с нижней и верхней части слоя навстречу друг другу. Между образовавшимися соседними нормальносекущими трещинами в слое формируется блок размером a (рис.1). При дальнейшем подвигании забоя отрицательная кривизна становится примерно равной нулю (формирование участка плоского дна мульды). Этот процесс знакопеременных изгибов повторяется в слое через величину a .

Образование зоны водопроводящих трещин. Вблизи зоны обрушения, где деформации кривизны большие, нормальносекущие трещины, прорастая навстречу друг другу, разбивают слой на всю его мощность (рис.1, а). По мере удаления от пласта к поверхности, т.е. по мере уменьшения кривизны слоев, проникновение и раскрытие трещин пропорционально этому уменьшению. В результате на некотором расстоянии по нормали от пласта H_t имеется такой слой, в котором эти трещины проникли не на всю его мощность [7]. Такой слой относительно нижележащих слоев сохраняет свои водоупорные свойства и к нему приурочивается верхняя граница зоны водопроводящих трещин (ЗВТ). Максимальное значение кривизны слоя носит название *граничной кривизны* [2] и приурочено к верхней границе ЗВТ. Ниже этого слоя расположена собственно зона водопроводящих трещин, которая, как следует из вышеизложенного, состоит из двух гидравлически связанных между собою систем техногенных трещин – трещин расслоения и сквозных нормальносекущих трещин [2, 5, 8]. Если верхняя граница ЗВТ дойдет до нижней границы водного объекта, по этим каналам вода нач-

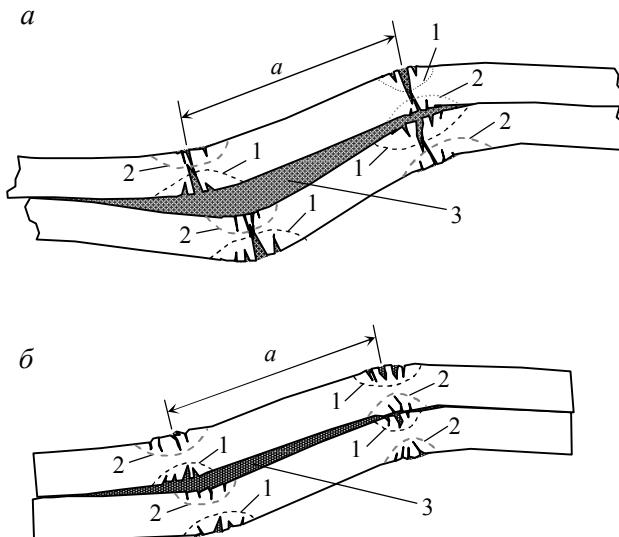


Рис.1. Схема образования техногенных трещин в слоях, расположенных вблизи пласта (а) и на некотором удалении от него (б)

1 – зона растяжения; 2 – зона сжатия; 3 – полость отслоения;
а – размер блока

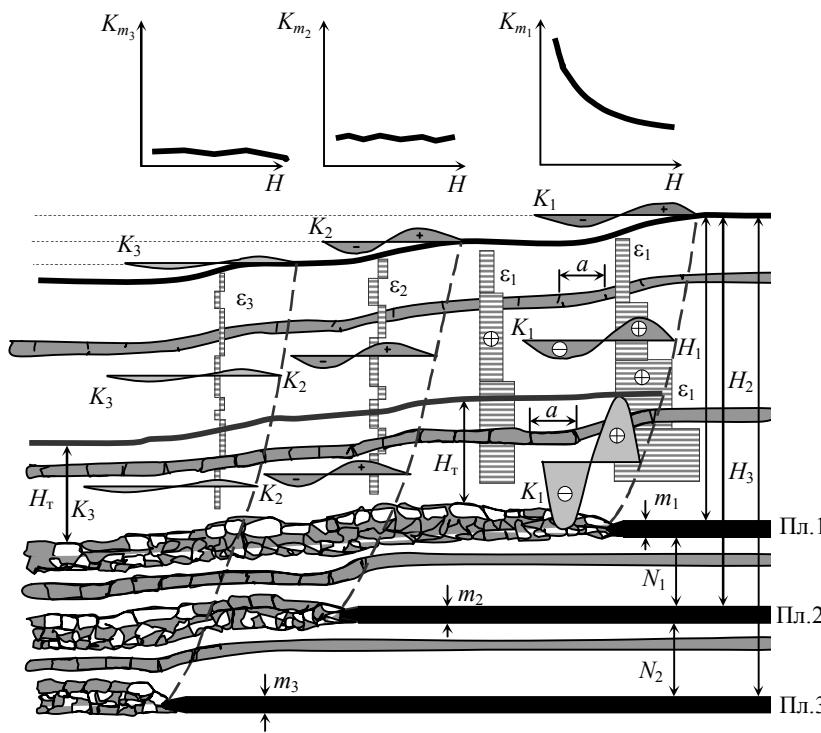


Рис.2. Геомеханическая схема образования техногенных трещин вследствие деформирования слоев массива горных пород

K_1, K_2, K_3 и $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – эпюры соответственно кривизны и вертикальных деформаций для пластов 1, 2, 3; a – блок в слое; H_1, H_2, H_3 – глубины пластов соответственно 1, 2, 3; N_1, N_2 – мощности между пластами; K_{m1}, K_{m2}, K_{m3} – максимальная кривизна слоев

кие большие, как в ЗВТ) гидравлической связи между вышележащими не будет. Так формируется зона водопроводящих трещин при выемке первого пласта свиты, т.е. в условиях первичной подработки [2, 16, 18].

Развитие ЗВТ при повторных подработках массива горных пород. При подработке массива такой структуры вторым пластом свиты в зоне полных сдвигов первого пласта процессы деформирования будут протекать следующим образом. Слои между пластами мощностью N_1 деформируются так же, как при первичной подработке. Слои над отработанным пластом 1 (см. рис.2) подвергаются повторному изгибу и, как показывают натурные наблюдения [4, 5, 16], распределение кривизны качественно отличается от получаемого при первичной подработке. В пределах повторно подрабатываемой толщи кривизна постоянна (эпюра K_2 на рис.2) и равна по абсолютной величине кривизне, получаемой на поверхности по натурным наблюдениям и по существующему методу расчета [12]. Распределение вертикальных деформаций (эпюра ε_2 на рис.2) также отличается от получаемых при первичной подработке:

- по абсолютной величине деформации на порядок меньше, чем при первичной подработке;
- эпюра представляет собой чередование положительных и отрицательных вертикальных деформаций.

Такое распределение деформаций указывает на то, что не происходит раскрытие полостей отслоения. Слои при изгибе вписываются друг в друга без зависания. Аналогичная картина будет наблюдаться при выемке пласта 3 (рис.2). Только в этом случае абсолютные значения максимальной кривизны и вертикальных деформаций будут меньше, чем при выемке пласта 2, так как $H_3 > H_2$.

Согласно [12], максимальная кривизна слоя на верхней границе ЗВТ при выемке пласта 1, называемая граничной кривизной, определится из выражения

$$K_g = \frac{c_1 m_1 F'(z)_m}{H_t^2 (\operatorname{ctg} \psi_3 + \operatorname{ctg} \delta_0)^2}, \quad (2)$$

где c_1 – коэффициент, учитывающий горнотехнические условия выемки пласта 1; m_1 – вынимаемая мощность пласта 1; $F'(z)_m$ – максимальное значение функции типовой кривой для данных условий; H_t – расстояние от пласта до слоя на верхней границе ЗВТ (высота зоны водопроводящих трещин); ψ_3, δ_0 – соответственно угол полных сдвигов и граничный угол [12].

нет поступать в выработанное пространство. Поскольку степень трещиноватости зоны увеличивается в направлении от слоя на верхней границе ЗВТ к пласту, в выработки вода будет поступать либо в виде фильтрации, либо в виде прорыва (в зависимости от того, насколько верхняя граница ЗВТ выше нижней границы водного объекта).

В слоях выше ЗВТ деформации кривизны меньше граничной кривизны, проникновение нормально-секущих трещин происходит не на всю мощность слоев, т.е. в середине слоя остается ненарушенный нормально-секущими трещинами участок (рис.1, б). По мере удаления от пласта это проникновение магистральных трещин все меньше, соответственно мощность ненарушенного водоупорного участка слоя все больше. И несмотря на то, что здесь тоже образуются расслоения за счет изгибов и полости отслоения (правда, не такие, как в ЗВТ) гидравлической связи между вышележащими слоями не будет. Так формируется зона водопроводящих трещин при выемке первого пласта свиты, т.е. в условиях первичной подработки [2, 16, 18].

Развитие ЗВТ при повторных подработках массива горных пород. При подработке массива такой структуры вторым пластом свиты в зоне полных сдвигов первого пласта процессы деформирования будут протекать следующим образом. Слои между пластами мощностью N_1 деформируются так же, как при первичной подработке. Слои над отработанным пластом 1 (см. рис.2) подвергаются повторному изгибу и, как показывают натурные наблюдения [4, 5, 16], распределение кривизны качественно отличается от получаемого при первичной подработке. В пределах повторно подрабатываемой толщи кривизна постоянна (эпюра K_2 на рис.2) и равна по абсолютной величине кривизне, получаемой на поверхности по натурным наблюдениям и по существующему методу расчета [12]. Распределение вертикальных деформаций (эпюра ε_2 на рис.2) также отличается от получаемых при первичной подработке:

- по абсолютной величине деформации на порядок меньше, чем при первичной подработке;

– эпюра представляет собой чередование положительных и отрицательных вертикальных деформаций.

Такое распределение деформаций указывает на то, что не происходит раскрытие полостей отслоения. Слои при изгибе вписываются друг в друга без зависания. Аналогичная картина будет наблюдаться при выемке пласта 3 (рис.2). Только в этом случае абсолютные значения максимальной кривизны и вертикальных деформаций будут меньше, чем при выемке пласта 2, так как $H_3 > H_2$.

Согласно [12], максимальная кривизна слоя на верхней границе ЗВТ при выемке пласта 1, называемая граничной кривизной, определится из выражения

$$K_g = \frac{c_1 m_1 F'(z)_m}{H_t^2 (\operatorname{ctg} \psi_3 + \operatorname{ctg} \delta_0)^2}, \quad (2)$$

где c_1 – коэффициент, учитывающий горнотехнические условия выемки пласта 1; m_1 – вынимаемая мощность пласта 1; $F'(z)_m$ – максимальное значение функции типовой кривой для данных условий; H_t – расстояние от пласта до слоя на верхней границе ЗВТ (высота зоны водопроводящих трещин); ψ_3, δ_0 – соответственно угол полных сдвигов и граничный угол [12].



Испытав такой величины положительную и отрицательную кривизну, слой выполаживается до кривизны близкой к нулю. В местах максимальных значений кривизны происходит раскрытие нормальносекущих трещин пропорционально величине $\sqrt{K_r}$. Такая закономерность получена из анализа результатов натурных наблюдений за сдвижением массива горных пород [1, 9], согласно которому можно записать

$$\delta_1 / \delta_2 = H_2 / H_1; K_1 / K_2 = (H_2 / H_1)^2 \text{ или } H_2 / H_1 = \sqrt{K_1 / K_2}, \quad (3)$$

где δ_1 и δ_2 – раскрытие нормальносекущих трещин в слоях, расположенных на расстоянии по вертикали соответственно H_1 и H_2 от пласта; K_1 и K_2 – соответствующая кривизна слоев, расположенных на тех же расстояниях по вертикали от пласта.

Из соотношений (3) получим

$$\delta_1 / \delta_2 = \sqrt{K_1 / K_2}, \quad (4)$$

т.е. раскрытие трещин пропорционально корню квадратному из кривизны этого слоя.

При этом, как указывалось выше, слой на верхней границе ЗВТ сохраняет свои водоупорные свойства (нормальносекущие трещины проникли не на всю мощность слоя). При повторной подработке (вывемке пласта 2) этот слой вновь подвергается знакопеременным деформациям кривизны. Поскольку в повторно подрабатываемом массиве максимальная кривизна для всех слоев пород равна соответствующей максимальной деформации земной поверхности, обусловленной отработкой рассматриваемого пласта, можно численно оценить максимальную кривизну слоя на верхней границе ЗВТ [2, 5, 13], рассчитав ее так же, как для поверхности, по рекомендуемой «Правилами охраны сооружений...» методике [12]:

$$K_{m2} = \frac{c_2 m_2 F'(z)_m}{H_2^2 (\operatorname{ctg}\psi_3 + \operatorname{ctg}\delta_0)^2}, \quad (5)$$

где c_2 – коэффициент, учитывающий горнотехнические условия выемки пласта 2; m_2 – вынимаемая мощность пласта 2; H_2 – глубина залегания пласта 2.

Исходя из формул (2) и (5), можно утверждать, что величина K_{m2} меньше величины K_r при прочих равных условиях в H_2^2 / H_t^2 раз. Соответственно нормальносекущие трещины от выемки пласта 1, находящиеся в закрытом состоянии в зоне полной отработки этого пласта, вновь раскрываются на величину, пропорциональную $\sqrt{K_{m2}}$, т.е. раскрытие этих трещин будет в H_2^2 / H_t^2 раз меньше, чем раскрытие в момент выемки пласта 1. Условий для дальнейшего проникновения нормальносекущих трещин в рассматриваемом слое в связи с этим не будет. Кроме того, слои претерпели многократные изгибы, и в слоях, расположенных выше зоны водопроводящих трещин, в местах максимальных значений кривизны, образовались «шарниры текучести». Это означает, что сквозные нормальносекущие трещины в этих слоях могут образоваться при значениях, превышающих K_r как минимум на 40 % [5]. После полной отработки пласта 2 происходит закрытие нормальносекущих трещин.

При выемке пласта 3 по аналогии с выемкой пласта 2 максимальная кривизна слоя на верхней границе ЗВТ, расположенного на расстоянии H_t от пласта 1,

$$K_{m3} = \frac{c_3 m_3 F'(z)_m}{H_3^2 (\operatorname{ctg}\psi_3 + \operatorname{ctg}\delta_0)^2}, \quad (6)$$

где c_3 , m_3 , H_3 – соответственно коэффициент, учитывающий горнотехнические условия выемки, мощность и глубина залегания пласта 3.

Поскольку $H_3 > H_2$, кривизна $K_{m3} < K_{m2}$, т.е. слой на верхней границе ЗВТ получает еще меньший изгиб относительно того, который был вследствие выемки пласта 2. Соответственно раскрытие нормальносекущих трещин будет меньше, чем от выемки пласта 2, примерно в H_3^2 / H_2^2 раз и тем более меньше, чем от выемки пласта 1 (примерно в H_3^2 / H_t^2 раз). После полной отработки пласта 3 в зоне полных сдвигений также происходит закрытие нормальносекущих трещин. Самы трещины остаются, но в закрытом состоянии. Дальнейшее их прорастание в слое возможно лишь в том случае, если раскрытие трещин от очередной отработки пласта превзойдет максимальное раскрытие (раскрытие от выемки пласта 1).



Последовательная выемка четвертого и других пластов свиты не внесет существенных изменений в рассмотренный выше геомеханический процесс.

Механизм деформирования слоев толщи горных пород и образования в них техногенных трещин рассмотрен применительно к таким горнотехническим условиям, когда каждый последующий пласт отрабатывается в зоне полных сдвигений по вышележащим отработанным пластам.

При полностью или частично совпадающих границах лав в различных пластах свиты кривизна слоев над ранее отработанным первым пластом будет возрастать пропорционально степени совпадения границ лав, соответственно этому значение граничной кривизны будет перемещаться от слоя к слою в сторону удаления от пласта. Можно с достаточным основанием предположить, что на такую же величину будет перемещаться верхняя граница ЗВТ. Отсюда следует, что для определения высоты ЗВТ при повторных подработках достаточно установить перемещение точек с граничной кривизной.

Прогноз высоты распространения ЗВТ на основе механизма образования техногенных трещин в слоях первично и повторно подработанного массива. При выемке первого пласта свиты мощностью m_1 граничная кривизна K_r будет в слое, расположенному на расстоянии H_{t_1} , что запишется следующим образом [5]:

$$K_r = 4m_1 / H_{t_1}^2. \quad (7)$$

При выемке второго (нижележащего) пласта свиты мощностью m_2 общая кривизна слоев над ранее отработанным первым пластом возрастет, вследствие чего значение граничной кривизны переместится в слой, расположенный дальше по нормали от выработанного первого пласта. Соответственно этому переместится верхняя граница ЗВТ, и ее высота относительно первого пласта достигнет величины H_{t_2} . Последняя может быть определена из условия накопления деформаций кривизны на верхней границе этой зоны в зависимости от взаимного положения нижних (верхних) границ горных работ первого и второго пластов:

$$K_r = 4m_1 / H_{t_2}^2 + 4a_2 m_2 (S_2 - S'_2 / S_2) / (H_{t_2} + N_1)^2. \quad (8)$$

При выемке третьего пласта свиты условие накопление деформаций на верхней границе ЗВТ по аналогии с (8) запишется следующим образом:

$$K_r = 4m_1 / H_{t_3}^2 + 4a_2 m_2 (S_2 - S'_2 / S_2) / (H_{t_3} + N_1)^2 + 4a_3 m_3 (S_3 - S'_3 / S_3) / (H_{t_3} + N_1 + N_2)^2. \quad (9)$$

После выемки пласта с порядковым номером n

$$K_r = 4m_1 / H_{t_n}^2 + 4 \left[\sum_{i=2}^n a_i m_i (S_i - S'_i / S_i) \right] / \left(H_{t_n} + \sum_{i=1}^{n-1} N_i \right)^2, \quad (10)$$

где K_r – граничная кривизна, которую можно определить независимо от формулы (2) по содержанию пород глинистого состава и распределению по мощности слоев в подрабатываемой толще [5, 6, 11]; H_{t_n} – высота ЗВТ над верхним пластом от совместной выемки n пластов; $a_i = q_i / q_1$, – коэффициент, учитывающий активизацию процесса сдвига при выемке второго и последующих пластов свиты; m_1, m_2, \dots, m_n – вынимаемые мощности пластов свиты; S_i – расстояние между нижними (верхними) границами горных выработок пластов первого и i -го, при котором не происходит добавки кривизны к граничной; S'_i – сближение или удаление нижних (верхних) границ выработок первого и i -го пласта в пределах S_i [5]; N_1, N_2, \dots, N_{n-1} – мощности между пластов; q_i – относительное максимальное оседание земной поверхности от выемки i -го пласта свиты; q_1 – то же при выемке первого пласта свиты.

Точно решить уравнение (10) относительно H_{t_n} не представляется возможным. Поэтому H_{t_n} можно найти либо через интерполирующие функции [2] либо из частного решения при принятии определенных условий. Так, если в уравнении (10) принять $\sum_{i=2}^{i-1} N_{i-1} = 0$ (условие слоевой выемки пласта), то решение этого уравнения относительно H_{t_n} будет следующим:

$$H_{t_n} = 2 \sqrt{m_1 + \sum_{i=2}^n a_i m_i (S_i - S'_i / S_i)} / K_r. \quad (11)$$

Для получения высоты ЗВТ относительно отрабатываемых пластов 1, 2, 3, ..., n необходимо учесть мощность между пластов (рис.2):



$$H_{B_n} = H_{T_n} + \sum_{i=2}^{n-1} N_{i-1} . \quad (12)$$

Отсюда, согласно [2, 5], безопасная глубина ведения горных работ под водным объектом для пластов 1, 2, 3, ..., n определится из следующего соотношения:

$$H_{6n} = H_{B_n} . \quad (13)$$

Выводы. Таким образом, наиболее благоприятными условиями подработки водных объектов является бесцеликовая отработка пластов свиты, обеспечивающая попадание водного объекта в зону полных сдвигений.

Уменьшение глубины разработки под водными объектами возможно путем такого взаимного расположения границ очистных выработок в различных пластах, при котором максимальная суммарная расчетная кривизна [2, 8, 10] на нижнем контуре водного объекта, обусловленная выемкой данного и ранее отработанных пластов, не будет превышать значений граничной кривизны K_r . Добиться этого можно путем изменения значений S'_i в уравнении (10) или (11). Это позволит уменьшить потери в целиках под водные объекты и снизить вредное воздействие техногенных процессов на окружающую геологическую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авершин С.Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. М.: Углехиздат, 1954. 324 с.
2. Безопасная выемка угля под водными объектами / Б.Я.Гвицман, Н.Н.Кацнельсон, Е.В.Бошенятов, Г.А.Нестеров, В.П.Самарин. М.: Недра, 1977. 175 с.
3. Бошенятов Е.В. Оценка максимальных деформаций повторно подрабатываемого массива горных пород / Е.В.Бошенятов, Б.Я.Гвицман, В.Н.Гусев // Прогноз сдвигений горных пород, деформаций сооружений, устойчивости бортоў, разрезов при разработке угольных месторождений / ВНИМИ. Л., 1984. С.16-20.
4. Гвицман Б.Я. Размер зон водопроводящих трещин при разработке свиты угольных пластов / Б.Я.Гвицман, В.Н.Гусев, А.С.Ягунов // Безопасность труда в промышленности. 1980. № 8. С.53-54.
5. Гусев В.Н. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин / Санкт-Петербург. горный институт. СПб, 1999. 156 с.
6. Гусев В.Н. К вопросу учета мощности, механических свойств и местоположения слоев толщи при их изгибе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. Т.6. С.128-129.
7. Гусев В.Н. Усовершенствование методики определения верхней границы зоны водопроводящих трещин / В.Н.Гусев, Н.Г.Никифорова // Записки Горного института. 2001. Т.146. С.46-47.
8. Исследование процесса развития техногенных трещин в подрабатываемом массиве горных пород на Старобинском месторождении / В.Н.Новокшонов, А.Ф.Данилова, В.Н.Дешковский, В.Э.Зейтц // Горный журнал. 2014. № 2. С.19-22.
9. Кацнельсон Н.Н. Новый подход к определению возможности выемки угля под водотоками и водоемами / Н.Н.Кацнельсон, Н.М.Никольская // Сб.тр. ВНИМИ. 1959. № 36. С.3-27.
10. Норватов Ю.А. Управление гидрогеомеханическими процессами при подработке водных объектов / Ю.А.Норватов, А.С.Миронов, В.Н.Гусев // Методы, технические средства маркшейдерских работ и исследование процесса сдвига горных пород / ВНИМИ. Л., 1988. С.155-160.
11. Патент 2477792 РФ, С1, МПК E21C 39/00. Способ определения высоты зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством на пластовых месторождениях / В.Н.Гусев, А.С.Миронов, Д.А.Илюхин. Опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.
12. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / ВНИМИ. СПб, 1998. 291 с.
13. Хохлов И.В. Безопасная разработка месторождений полезных ископаемых под водоемами. М.: Недра, 1971. 264 с.
14. Baron H. Schachtbeanspruchungen beim Abbau eines Schachtsicherheitspfeilers unter mächtigem Deckgebirge. Aachen, 1951. 205 с.
15. Gusev V.N. Assessment of water conducting fracture zones height by determining the boundary horizontal deformation for geological conditions of the Yakovlevski mine / V.N.Gusev, D.A.Iliukhin, A.E.Zhuravlev // Proceedings XV International ISM Congress 2013. Sep. 16-20 2013. Aachen, 2013. P.600-610.
16. Jincai Zhang. Coal mining under aquifers in China: a case study / Jincai Zhang, Baohong Shen // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004. N 41. P.629-639.
17. Lautsch H. Über die Kinematik der Bodenbewegungen beim Abbau mehrerer flacher Flöze innerhalb eines tektonischen Bereiches // Clausthal. 1971. N 4. S.121-146.
18. Zhao Wen. Mechanical mechanism of forming process of bedded rock mass structures / Zhao Wen, V.N.Gusev // China Mining Magazine (Bimonthly). 1997. Vol.6. N 4 (SUM N 32). P.52-55.

Автор В.Н.Гусев, д-р техн. наук, профессор, kmd@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).
Статья принята к публикации 18.04.2016.