

**Ю.В. Шувалов, Г.И Коршунов, А.В. Монтиков,
Р.С. Истомин, А.М. Суфияров, Е.П. Ютяев**

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УГЛЕНОСНОМ МАССИВЕ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Приведены данные натурных исследований загазирования выработок, исходя из условия повышения глубины разработки угольного пласта, повышения нагрузки на очистной забой на примере шахт Воркутского месторождения. В связи с увеличением глубины газодинамические процессы рассматривались в привязке к геомеханическим. С этих позиций уточняется причины увеличения газовой нагрузки и ее распределения по источникам.

Ключевые слова: загазирование, источники метановыделения, обрушение кровли, повышение нагрузки на забой.

Основные угольные бассейны страны – Кузнецкий, Печорский, с подземным способом добычи угля, стоят перед проблемой существенного (на порядок) повышения нагрузки на очистные забои и, соответственно, скорости их подвигания. заставляя владельцев шахт и руководителей производства принимать срочные меры для обновления добычных комплексов и машинного парка в целом, совершенствовать организацию производства, технику безопасности и планировать работу добычных участков с учетом новых требований. Особую озабоченность вызывают вопросы проветривания выработок добычных участков и предотвращения взрывов газа и пыли в них, являющихся одними из главных опасностей даже сегодня.

В этой ситуации научно обоснованный прогноз газодинамики выработок и выработанного пространства является необходимым условием достижения поставленной цели [1].

Характерной особенностью подземной добычи угля сегодня и, особенно, в перспективе, является пони-

жение горных работ с переходом на глубокие горизонты (более 600–800 м), где интенсифицируются геомеханические и газодинамические процессы, грозящие многими опасными явлениями (горные удары, обрушения и другие динамические проявления горного давления, сложные аэро- и газодинамические явления и т.д.).

В этом отношении Печорский бассейн является хорошей моделью данной ситуации, связанной с постепенным переходом горных работ на глубинах 200–400 м до 800–1000 м и более и появлением всех тех негативных явлений, о которых сказано выше [2].

Физическая модель газодинамики выработанного пространства и выработок добычных участков шахт характеризуется следующими процессами:

1. природной метаноносностью толщи, экспоненциально увеличивающейся с понижением горных работ на глубинах более 600 м на $1,5(2,0) \text{ м}^3/\text{т}$ на 100 м глубины (6 %/100 м), линейным повышением давления газа с градиентом 5–7 атм/100 м [1];

2. газовыделением из отбитого угля, составляющем около 5–10 % в общем балансе газовыделения на участке до 5–7 м³/мин при общем абсолютном газовыделении на участке 50–70 м³/мин. Относительная газообильность выемочного участка около 50 м³/т (13–80 м³/т);

3. газовыделением из вмещающих пласт пород, в которых имеются газосодержащие пласты и пропластки 0,1–0,6 м (до 22 в подрабатываемой толще мощность которой 300 м) с соотношением газовыделения из подрабатываемых пород 65–70 %, надрабатываемых 20–30 % в общем газовом балансе добычного участка;

4. газовыделением из ранее отработанных блоков в результате развития систем трещин и поступления газа из вышележащих, ранее неразгруженных (при отработке данного столба) слоев и перетоке газа в зону близлежащую от разрабатываемого пласта, а также разгруженную часть массива действующего добычного участка.

Газодинамические процессы в горном массиве и выработках добычных участков определяются главным образом геомеханическими процессами в подрабатываемом и надрабатываемом горном массиве. Длительными наблюдениями на шахтах и моделированием процессов деформации пород вокруг разрабатываемого пласта установлены основные закономерности и характеристики геодинамических процессов.

По мере отработки пласта в подрабатываемом массиве формируются три достаточно четко различимые по свойствам зоны, а именно:

I – зона беспорядочного обрушения пород;

II – зона блочного разрушения пород;

III – зона интенсивного развития трещиноватости.

Из анализа работ, посвященных промышленному отсосу газа из выработанных пространств скважинами и газовой динамике, величина зоны обрушения для пластов «Первый», «Двойной» (Воркута) находится в пределах (10÷11)м, а зона интенсивного развития трещиноватости – 25м (m – мощность разрабатываемого пласта, м). При полном обрушении кровли распространение зоны влияния с разрывом сплошности породных слоев по нормали от разрабатываемого пласта составляет, в зависимости от величины опережения лавы, от 30- до 60-кратной вынимаемой мощности пласта.

Для Воркутского месторождения (пласт «Четвертый», $m = 1,6 - 1,9$ м, $H = 800$ м) зона беспорядочного обрушения составит $H_{обр} = 8 - 10$ м, зона блочного обрушения $H_{бл} = 10 - 20$ м и зона трещин расслоения $H_{тр} = 30 - 40$ м.

По простирацию пласта сдвигание пород приводит к образованию четырех зон: I – сжатия, II – расширения, III – повторного сжатия, IV – постепенного уплотнения пород (рис. 1).

Расчеты для типичных условий Воркутского месторождения дают значения проницаемости пород в зоне блочного обрушения равные $1,71 \cdot 10^{-11} - 2,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$. Первое число относится к $h = 1,5$ м, второе – к $h = 11,5$ м.

Проницаемость зоны трещин, соответственно составляет – $2,6 \cdot 10^{-18} - 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ и $6 \cdot 10^{-15} - 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$.

Как показывает анализ, фактическое изменение проницаемости в этих зонах подчиняется более сложному закону, значительно отличающемуся от монотонного.

Это положение хорошо иллюстрируется графиками (рис. 2), характеризующими изменение проницаемости

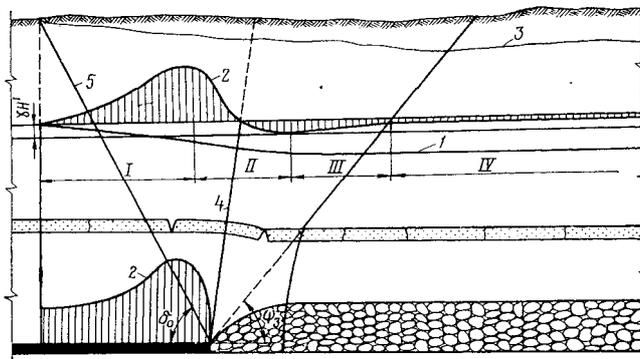


Рис. 1. Зоны сдвижения и напряженного состояния пород по простиранию: 1 – кривая оседаний; 2 – эпюра напряжений по нормали; 3 – кривая оседания поверхностей; 4 – линия перегиба; 5 – граница мульды оседания

сближенных пластов по простиранию. Их проницаемость по сравнению с начальной резко возрастает в разгруженной зоне. Причем при возрастании расстояния до сближенного пласта максимум проницаемости сдвигается вглубь выработанного пространства от забоя. Например, при $z = 40$ м зона максимальной проницаемости расположена на расстоянии 30 м от забоя, а при $z = 70$ м ее удаленность от забоя увеличивается до 55 м.

На рис. 3 приведены результаты расчетов изменения проницаемости

подработанного пластом «Четвертым» горного массива.

Натурными исследованиями установлен характер изменения интенсивности поступления газа в выработки в зависимости от расстояния отхода лавы от разрезной выработки (длины отработанной части столба) и числа отработанных столбов. Характер процессов является аналогичным как для пласта Четвертого, так и Мощного (рис. 4).

Процессы газовыделения из выработанного пространства в участковые выработки (конвейерный штрек) носят ярко выраженный экстремумно-асимптотический характер, формирование которого связано с недостаточным развитием трещиноватости в породах подрабатываемой толщи и влиянием на этот процесс первой зоны опорного давления вблизи лавы, постепенным ее развитием за лавой с достижением экстремума между первой и второй зонами опорного давления (ближе к второй) и затуханием во второй зоне с достаточной

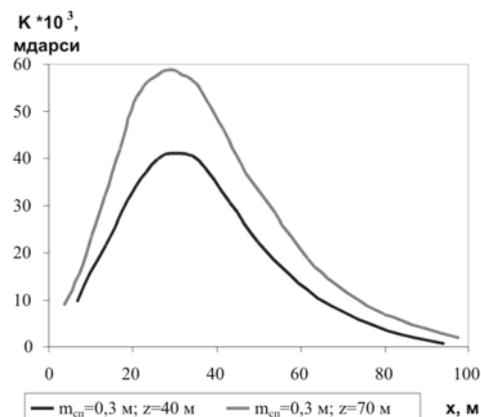
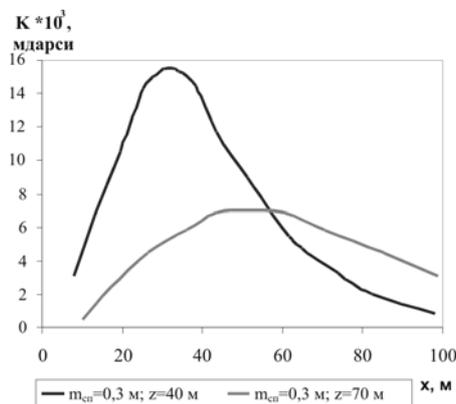


Рис. 2. Изменение проницаемости сближенных пластов

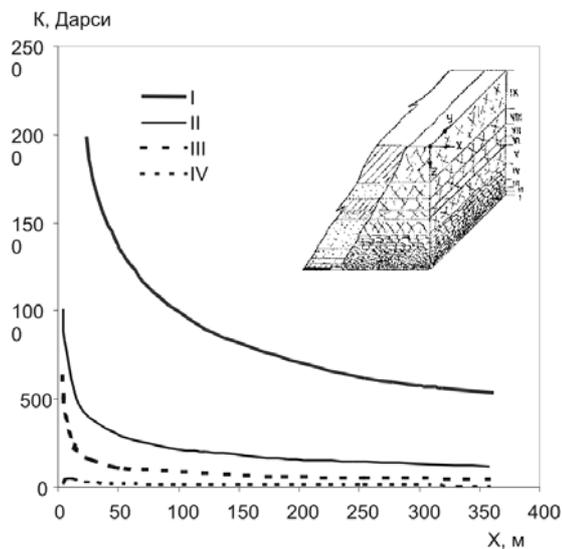


Рис. 3. Изменение проницаемости массива (I – IV – слои пород выработанного пространства)

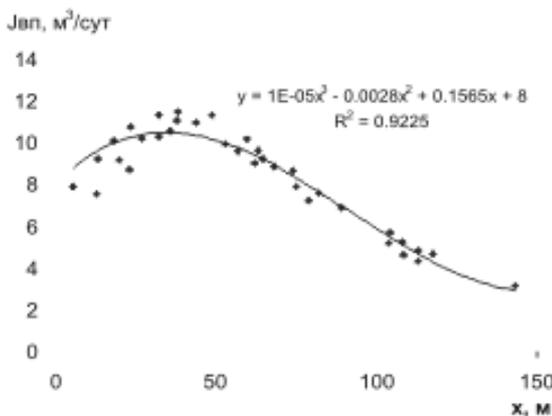


Рис. 4. Изменение интенсивности поступления метана в выработанное пространство по мере удаления от лавы

последующей стабилизацией по мере удаления от нее.

Эту закономерность можно проиллюстрировать результатами натуральных наблюдений на шахтах ОАО «Воркутауголь» (рис. 4), где в полной мере отражен характер газовыделения из выработанного пространства.

Значение экстремума кривой, а следовательно, и общее поступление газа из выработанного пространства определяется указанными ранее факторами – отходом лавы от разрезной выработки и общей площадью отрабатки пласта. При этом роль последнего фактора менее значительна, что также можно объяснить геомеханическими процессами и фильтрацией газа в выработанном пространстве, протекающими в более медленном темпе, нежели в непосредственной близости от движущегося забоя.

Менее исследованным, но более важным в связи с реорганизацией технологии добычи, является влияние скорости подвигания лавы на газодинамические процессы в выработанном пространстве и выработках участка.

Этот вопрос исследовался применительно к динамическим явлениям на шахтах ОАО «Воркутауголь». Было установлено, что мнения различных авторов, работы которых анализировались, о влиянии скорости подвигания лавы на характер проявления горного давления, носят противоречивый характер [4-12].

На основании этих данных можно сказать, что при прочих равных условиях, увеличение скорости подвигания очистного забоя вызывает уменьшение нагрузки на крепь и сопровождается ее увеличением в периоды обрушений основной кровли. Это объясняется тем, что при увеличении скорости подвигания уменьшается конвергенция вмещающих пород, но, в то же время, возрастает шаг обрушения, главным образом, основной кровли.

В зоне разгрузки за крепью лавы горное давление проявляется в виде деформаций и обрушений непосредственной и основной кровель. По данным ДонУГИ, с увеличением скорости подвигания очистного забоя с 3 до 20 м/сут высота зоны беспорядочного обрушения уменьшается с $(3 - 4)m$ до $(0,5 - 0,7)m$, где m – вынимаемая мощность пласта.

В случае возрастания скорости подвигания очистного забоя увеличивается шаг как первичной, так и последующих (вторичных) осадков основной кровли. Это приводит к увеличению скорости опускания кровли, возрастанию интенсивности нагружения крепи при вторичных осадках и к динамическому характеру нагрузок на крепь.

В работах [12, 13] высказываются предположения о существовании рациональных (целесообразных) скоростей подвигания забоя в интервале от 5 до 10 м/сут в зависимости от горно-геологических условий. При указанных скоростях подвигания отсутствовали динамические нагрузки на крепь. Однако в этих исследованиях не учитывалась взаимосвязь длины лавы и скорости подвигания забоя.

На основе анализа результатов исследований можно сделать вывод о том, что при выборе способа управления горным давлением в очистных забоях, подвигаемых со скоростью 20 и более метров в сутки, необходимо учитывать следующие особенности:

- увеличение скорости подвигания очистного забоя способствует накоплению упругой энергии в краевой части пласта, что может привести к горным ударам;

- увеличение шага обрушения основной и непосредственной кровель при повышении скорости подвигания очистного забоя приводит к резким,

динамическим нагрузкам на крепь при вторичных обрушениях, в определенных условиях возможны завалы лав.

Представляют интерес исследования Ю.А.Федченко [14] о влиянии скорости подвигания лавы на геомеханическое состояние горного массива вблизи ее, характеризующееся такими параметрами, как: расстояние от забоя до максимума напряжений в зоне опорного давления (первой) – X_{cp} м, размер зоны опорного давления – Q м, коэффициент концентрации напряжений K_k , шаг обрушения основной кровли – r_{cp} м, шаг обрушения непосредственной кровли – r_1 м, высота зоны интенсивного обрушения h_1 м, высота зоны блочного обрушения – h_2 м, высота зоны крупноблочного разрушения пород – h_3 м. В таблице приведены результаты исследований для лавы длиной 200 м, глубины работ 400 м, мощности пласта 3,0 м, с углом падения 10° .

Приведенные данные подтверждают сказанное ранее о увеличении со скоростью подвигания лавы шагов обрушения непосредственной и основной кровли, повышении концентрации напряжений на забое и сокращении высоты зон разрушения пород кровли.

На основании натуральных наблюдений в лавах пласта Четвертого (шахта «Заполярная») при отработке столбов 124,24 и 324-Ю с удалением от монтажной камеры от 10 до 850 м и в лавах пласта Мошного (шахта «Комсомольская») при отработке столбов 141, 241 и 341-с с удалением от монтажной камеры от 26 до 1390 м, были установлены зависимости средней относительной метанообильности от скорости подвигания лавы и расстояния ее до монтажной камеры (рис. 5, 6).

Влияние скорости подвигания лавы на геомеханическое состояние массива

Скорость подвигания м/сут	X_{cp} м	Q м	K_k	r_{cp} м	r_1 м	h_1 м	h_2 м	h_3 м	Σh м
2	7,0	40,1	1,5	32,5	6,2	10,3	5,7	25,1	41,1
4	4,3	29,3	1,79	38,6	7,4	8,9	4,4	25,1	38,4
6	3,1	23,6	1,93	42,7	8,2	7,8	3,9	25,1	36,8
8	2,5	20,0	2,01	45,9	8,8	7,1	3,5	25,1	35,7
10	2,0	17,6	2,07	48,5	9,3	6,5	3,2	25,1	34,8
12	1,2	15,8	2,11	50,8	9,8	6,0	3,0	25,1	34,1

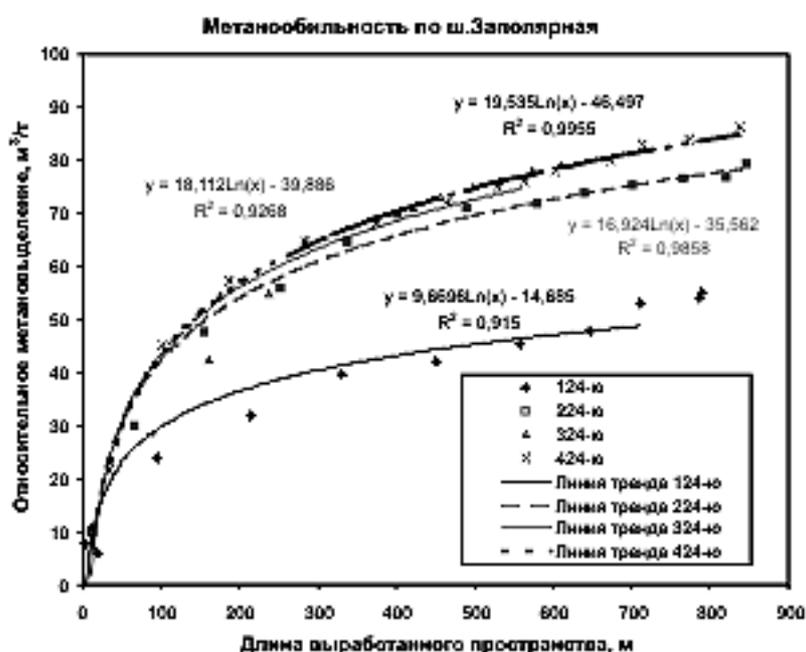


Рис. 5. Динамика относительной метанообильности выемочных участков 124-ю, 224-ю, 324-ю и 424-ю на шахте «Заполярная»

Характерной особенностью отработки пласта Мощного, по сравнению с Четвертым, было относительно стабильное подвигание лавы (длина лавы 95 м в столбе 141-с и 241-с, 118 м в столбе 341 с) около 90 м/мес, т.е. более 3 м/сут. При этом максимальные среднемесячные скорости подвигания не превосходили 4,5 м/сут (столб 141-с) и 4,0 м/сут в столбах

241-с и 341-с. Это позволило выявить типичный характер изменения удельного газовыделения с асимптотическим его ростом по мере удаления от разрезной выработки, точкой перегиба на расстоянии около 500 м от нее и зависимостью роста по мере углубления работ и общей площади выемки – 50 % рост от I-го столба ко II-му и 25 % рост от II-го к III-му.

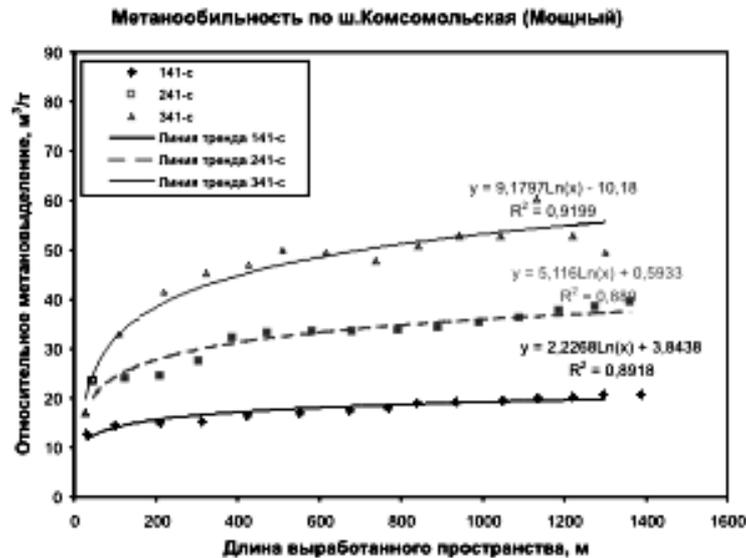


Рис. 6. Динамика относительной метанообильности выемочных участков 141-ю, 241-ю, 341-ю на шахте «Комсомольская»

Также зафиксировано влияние скорости подвигания лавы на удельное газовыделение, с изменением последнего в два раза медленнее по сравнению с изменением скорости подвигания лавы (в процентном отношении).

Более сложным оказался характер изменения удельного газовыделения при выемке пласта Четвертый. Это было связано с существенным изменением скорости подвигания лав при отработке каждого из четырех примыкавших друг к другу столбов (I-IV).

Средняя скорость отработки первого столба (I) была около 87 м/мес (~3 м/сут), а ее максимальные значения доходили до 4,5 м/сут; второго столба около 70 м/мес (2,5 м/сут, максимальная до 3,5 м/сут, третьего — около 67,5 м/сут (около 2,2 м/сут с максимальной до 3,0 м/сут) и для четвертого — 56 м/мес (менее 2,0 м/сут с максимальной 3,0 м/сут). Таким образом, скорость отработки столбов сократилась, при переходе от I-го к

IV-му почти на 30 %, что повлекло за собой существенное снижение удельного газовыделения, особенно сказавшееся на III-м и IV-м столбах, где средние значения его были близки к уровню отработки III-го столба (приrost около 5 % на каждый столб).

Более значительные изменения скорости подвигания лав пласта Четвертый при отработке каждого из столбов (до 3–5 и более кратных значений) способствовали также закономерным изменениям удельных газовыделений с полутора- и двукратными изменениями по абсолютным значениям, т.е. также с двукратным замедлением их темпа по сравнению с изменением скорости подвигания и отставанием по фазе протекания процесса в пределах месяца.

В заключении можно оценить роль каждого из трех газодинамических составляющих газовый баланс выработок добычного участка при повышении скорости подвигания очистного забоя.

Угольный пласт, как дегазированный (Мощный, Тройной), так и недегазированный (Четвертый) повысят пропорционально скорости подвигания забоя V_3 свою газоотдачу непосредственно в забое при отбойке и на конвейере, а также при доставке угля по участковым выработкам. Суммарное повышение может составить

$$\Delta q_3 = V_3 \cdot \Delta q_3^{V_3=1}$$

где V_3 – скорость подвигания забоя, м/сут, $\Delta q_3^{V_3=1}$ – удельное газовыделение из пласта $\text{м}^3/(\text{сут}\cdot\text{м})$.

Поступление газа из вмещающих подрабатываемых $q_{\text{п}}$ и надрабатываемых $q_{\text{н}}$ пород в выработанное пространство и в участковые выработки с утечками воздуха из лавы снизится в связи с уменьшением зоны разгрузки пород, связанной с повышением прочности основной кровли при сокращении времени нагрузки на нее пропорционально повышению скорости V_3 , увеличением шага обрушения. Величина изменения $\Delta q_{\text{п}}$ и $\Delta q_{\text{н}}$ ориентировочно может быть оценена, исходя из зависимости шага обрушения основной кровли $L_{\text{ок}}$ от скорости подвигания забоя как

$$\Delta q_{\text{п}} = \Delta q_{\text{п}}^{V_3=1} \frac{L_{\text{ок}}^{V_3=1}}{L_{\text{ок}}^{V_3}}; \quad \Delta q_{\text{н}} = \Delta q_{\text{н}}^{V_3=1} \frac{L_{\text{ок}}^{V_3=1}}{L_{\text{ок}}^{V_3}},$$

где $\Delta q_{\text{п}}^{V_3=1}$, $\Delta q_{\text{н}}^{V_3=1}$, – удельные газовыделения из подрабатываемых и надрабатываемых пород при скорости подвигания забоя $V_3=1$ м/с, соответственно; $L_{\text{ок}}^{V_3=1}$, $L_{\text{ок}}^{V_3}$ – шаг обрушения основной кровли при скорости подвигания $V_3=1$ и V_3 , соответственно.

Поступление газа в выработанное пространство действующего очистного

забоя со стороны ранее отработанного столба Δq_c увеличится в связи с участием в формировании его газового режима (давления и содержания газа) более удаленных от вынутаго пласта слоев породного массива, деформация которых происходила после завершения посадки основной кровли в квазистационарном режиме.

Количество поступающего при перетоке из ранее отработанного столба газа может быть оценено повышением его удельного поступления $\Delta q_c^{V_3=1}$ при скорости подвигания лавы $V_3 = 1$ м/сут и величиной шага обрушения основной кровли

$$\Delta q_c = \Delta q_c^{V_3=1} \frac{L_{\text{ок}}^{V_3}}{L_{\text{ок}}^{V_3=1}}.$$

В целом, роль первого и третьего источников в общем газовом балансе добычного участка могут не только компенсировать снижение поступления газа от второго, но и превалировать над ним, о чем свидетельствуют результаты наблюдений в лавах шахт Воркутского месторождения, где суммарный объем поступления газа в выработки добычного участка Δq оценивается, при повышении скорости движения забоя, как

$$\Delta q = 0,5 V_3 \cdot \Delta q^{V_3} \approx \Delta q_3 + \Delta q_{\text{п}} + \Delta q_{\text{н}} + \Delta q_c$$

Приведенные результаты подтверждают мнение специалистов [2] о необходимости интенсификации дегазации выработанного пространства действующего участка со стороны ранее отработанного столба, а также разрабатываемого пласта, особенно при его значительной мощности.

1. Шувалов Ю.В., Павлов И.А., Веселов А.П. Комплексное использование ресурсов и регулирование газового режима шахт Воркутского месторождения. – СПб.: МАНЭБ. – 2006, 392 с.
2. Зуев В.А., Моисеев С.А., Наумов А.В., Горин Ю.А., Осипов А.Н. Дегазация выработанного пространства и старых выемочных полей. Безопасность труда в промышленности. 2009. № 3, с.32-34.
3. Гусев В.Н. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин. СПб.: Изд-во СПГИ, 1999, 186 с.
4. Кузмиц А.С., Бетанели К.П. и др. Создание шахт нового технико-экономического уровня. – М.: Недра, 1976. – С. 179-180.
5. Коврижин А.К. Управление кровлей в очистных забоях на шахтах Кузбасса. – М.: Недра, 1965. – С. 51-53.
6. Коврижин А.К. Влияние скорости подвигания очистной линии забоев на проявления горного давления // В кн. Технология и экономика угледобычи. – М.: ЦНИЭИуголь, 1963. – С. 43-51.
7. Давидянц В.Т. Работы ДонУГИ за 20 лет по вопросам управления горным давлением. – Донецк, 1968. – С. 27-40.
8. Дудкин Н.М. Обоснование параметров разработки тонкого пласта, залегающего в сложных горно-геологических условиях. – Алма-Ата: Наука, 1979. – С. 12-27.
9. Белов В.П. Исследование проявлений горного давления в очистных забоях на наклонных пластах средней мощности в шахтах Кузбасса и выбор типа механизированной крепи и ее основные параметры для этих условий // Автореф. дисс. на соискание уч. ст. кандидата технических наук. – М., 1970. – С. 3-10.
10. Куликов В.И. Исследования взаимодействия основной и непосредственной кровли при различных скоростях подвигания очистного забоя // Автореф. дисс. на соискание уч. ст. кандидата технических наук. – М., 1969. – С.10-11.
11. Науменко В.И. Исследования проявления горного давления в очистных забоях с целью установления основных параметров средств механизации крепления при струговой выемке // Автореф. дисс. на соискание уч. ст. кандидата технических наук. – М., 1968. – С. 15-16.
12. Кузнецов Ю.Н. Исследование процесса деформирования кровли очистных забоев в условиях различных скоростей подвигания // Автореф. дисс. на соискание уч. ст. кандидата технических наук. – М., 1966. – С. 11-15.
13. Виткалов В.Г. Обоснование параметров очистных работ и механизированной крепи при высоких скоростях подвигания / Автореф. дисс. на соискание уч. ст. кандидата технических наук. – М., 1982.
14. Федченко Ю.А. Влияние природного, технологического и человеческого факторов на безопасность высокопроизводительных очистных забоев. Уголь, 2006, № 7, с.26-28. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шувалов Ю.В. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой БП и РГП
 Коршунов Г.И. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой БП
 bpirgr@spmi.ru,
 Монтиков А.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры РМПИ, rmpi@spmi.ru,
 Истомин Р.С. – аспирант, bpirgr@spmi.ru,
 Санкт-Петербургский государственный горный институт,

Суфияров А.М. – горный инженер, специалист ООО «СПб-Гипрошахт»,
 Ютяев Е.П. – кандидат технических наук, технический директор ОАО «СУЭК-Кузбасс»,
 geosecurlab@mail.ru.

