

УДК 622.831:537.86

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАНА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Фельдман Э. П., Стариков Г. П., Калугина Н. А.,
Навка Е. А.

(ИФГП НАНУ, г. Донецк, Украина)

Виконані шахтні експерименти та лабораторні вимірювання модулів всебічного стиснення та зсуву вугілля доводять, що метан перерозподіляється у привибійній зоні пласта таким чином, що він скупчується в області максимуму опорного тиску, а також в зонах збільшеної пористості та пониженого модулю зсуву. Збільшення тиску метану на цих ділянках може складати від 15 до 55 % по відношенню до віддалених ділянок пласта. Обґрунтовано теоретичну модель.

Underground experiments and laboratory measurements of coal compression and shear moduli prove that methane is redistributed in the face zone of coal bed such that it is accumulated in the zone of maximum bearing pressure and also in the zones of increased porosity and decreased shear modulus. Increase in pressure in these zones can be 15–55 % in relation to coal bed distant sections. Grounds are given for the proposed abstract model.

Одним из факторов, осложняющих отработку угольных пластов, является высокая изменчивость метановыделения, приводящая нередко к интенсификации газодинамических явлений и загазированию забоев. Частота и размеры аварий, вызванных этими явлениями, в последние годы, достигли критических значений и связаны, как правило, с взрывами метана с групповыми несчастными случаями. Учитывая неизбежность, в настоящее время, подземной разработки газоносных угольных месторожде-

ний, ухудшения горно-геологических условий и роста нагрузок, приобретает высокую актуальность проблема диагностики фактического распределения давления метана в призабойной зоне угольных пластов.

В этом плане обоснован целый ряд физических моделей [1-4], посвященных оценке изменения условий газообмена между сорбционным и свободным объемами и процесса массопереноса газа вблизи обнажения. Пласт описывается как трещиноватоблочная среда, в которой массоперенос метана происходит за счет фильтрации по трещинам по закону Дарси, а движение сорбированного газа подчиняется закону Фика. Анализ полученных решений свидетельствует, что для построения эпюры распределения давления газа впереди забоя очистной или подготовительной выработки необходимо в соответствующие уравнения вводить изменения пористости и проницаемости угля по глубине призабойной зоны, которые, в свою очередь, зависят от параметров зоны опорного давления и практически им не соответствуют. Поэтому, как правило, расчетные значения распределения давления не коррелируют с эпюрой горного давления, имеющей установленный, как теоретически, так и экспериментально выраженный максимум на расстоянии 2-4 м от поверхности забоя вглубь массива.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований изменчивости распределения метана в участках угольного массива по скорости газовыделения метана из шпуров (g_n), пробуренных на глубину до 3,5 м по пласту d_4 в блоке № 10 шахты «Красноармейская-Западная № 1».

Этот пласт по всей площади шахтного поля характеризуется относительной выдержанностью, относится к тонким и средним по мощности пластам, которая колеблется от 0,60 до 2,58 м. Угол падения пласта изменяется от 3 до 8° (вне зон влияния геологических нарушений). Природная газоносность пласта d_4 находится в пределах 10,7–25,0 м³/т с.б.м., весовой выход летучих составляет $V^{daf} = 28,3–32,8$ %, коэффициент крепости угля $f = 0,8–1,2$ по шкале М. Протодряконова. Имеет место широко развитая мелкоамплитудная нарушенность в пределах шахтного поля, и в первую очередь в блоках № 2, 3, 6, 8 и 10.

Блоки № 2–5 отнесены к угрожаемым, а блоки № 6 и 8 – к опасным по выбросам угля и газа. Отдельный участок выемочного столба 4-й южной лавы пласта d_4 в блоке № 10 отнесен к угрожаемым по выбросам на основании проведенной экспертной оценки.

К анализу принимались отрезки большой (90–100 м) протяженности, которые включали участки с зонами горно-геологических нарушений (ГГН) и без них (т.е. нормальные условия залегания пласта).

Вначале был выполнен анализ изменчивости g_n в 4-м южном конвейерном штреке блока № 10 с пикета ПК 10+5,0 м по ПК 19+6,5 м, т.е. на участке длиной более 90 м. Анализируемый участок характеризуется высокой тектонической нарушенностью и наличием зон ГГН: микросбросов, взбросов, надвигов и т.д. В блоке № 10 ведется текущий прогноз выбросоопасности по начальной скорости газовыделения из шпуров g_n согласно п. 6.3.1 [5], которую измеряют на интервалах 1,5; 2,5 и 3,5 м. Анализируемый участок был разбит на 15 сравнительно однородных участков по g_n (табл. 1). По каждому шпурю определяли суммарное значение газовыделений $\Sigma g_{un,i}$ на интервалах бурения: 1,5; 2,5 и 3,5 м. Далее рассчитывали среднее арифметическое значение (текущий параметр) суммарной скорости газовыделения по шпурю $\bar{\Sigma} g_{шп,i}$ для каждого из 15 участков. Для всей анализируемой зоны ГГН установлена закономерность чередования участков с повышенными и пониженными значениями $\bar{\Sigma} g_{un,i}$, а общее среднее арифметическое значение $\Sigma g_{un,i}$ (генеральное среднее или фоновое) составило: $\bar{g}_r = 2,73$ л/мин с коэффициентом изменчивости $k_{изм} = 1,82$.

Аналогичные результаты были получены на другом участке длиной более 100 м, характеризующемся нормальными условиями залегания пласта и наличием зон ГГН различных типов с амплитудами $A = 0,50–1,0$ м. Следует отметить, что чередование зон с повышенными и пониженными значениями $\bar{\Sigma} g_{un,i}$ было обнаружено не только в зонах ГГН, но и на участке с нормальными условиями залегания пласта.

Для 3-го и 4-го конвейерных штреков пласта d_4 блока № 10 было рассчитано удельное значение средней скорости газовыделения:

$$B = \frac{\bar{\Sigma}g_{\text{шп.і}} - \bar{g}_2}{\bar{g}_r} \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты измерений газовыделения из шпуров в
 подготовительные выработки пласта d_4 блока № 10

Номер участка	Длина участка, м	Количество шпуров, шт	Средняя скорость газовой-деления на участке $\bar{\Sigma}g_{\text{шп.і}}$, л/мин
4-й южный конвейерный штрек (зоны ГГН, $\bar{g}_{\bar{a}} = 2,73$ л/мин, $k_{\text{изм}} = 1,82$)			
1	6,0	12,0	1,91
2	3,5	8,0	3,69
3	5,0	8,0	1,36
4	3,5	6,0	1,84
5	1,5	4,0	3,32
6	10,5	16,0	2,39
7	4,0	6,0	4,09
8	7,0	12,0	2,62
9	1,5	2,0	5,79
10	1,0	4,0	1,50
11	6,0	8,0	2,91
12	11,0	14,0	2,54
13	1,0	4,0	4,33
14	4,0	6,0	0,92
15	5,0	8,0	1,84
3-й южный конвейерный штрек (нормальные условия, $\bar{g}_{\bar{a}} = 2,16$ л/мин, $k_{\text{изм}} = 1,28$)			
1	3,5	8,0	1,42
2	5,5	10,0	2,37
3	2,0	6,0	1,82
4	3,5	6,0	3,62
5	1,5	4,0	1,14
6	3,0	6,0	2,79
7	1,5	4,0	1,30
8	2,0	4,0	2,64
9	3,0	6,0	3,51
10	3,0	6,0	1,38
11	10,5	14,0	2,64
12	4,5	8,0	1,92

График изменения показателя B по длине вышеуказанных выработок представлен на рисунке 1. Анализ приведенных результатов свидетельствует, что в зонах ГГН величина параметра B возрастает в среднем на 68 %.

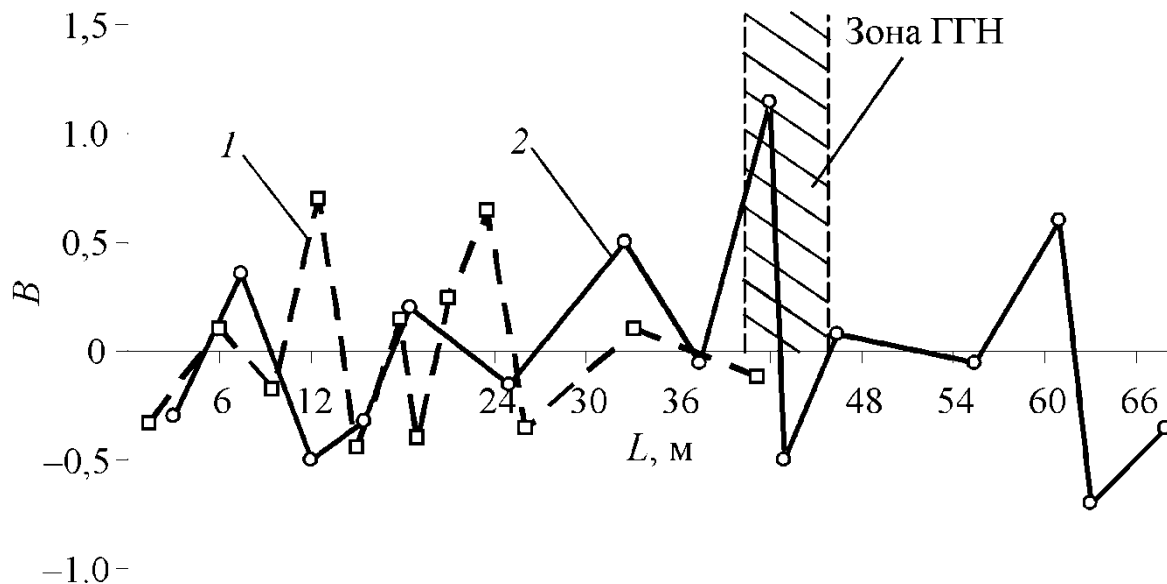


Рис. 1. Изменение показателя B по длине 3-го (кривая 1) и 4-го (кривая 2) южных конвейерных штреков блока № 10: 1 – нормальны её условия; 2 – зона ГГН

Из анализа представленных результатов следует, что существующие теоретические и экспериментальные методы не позволяют достоверно оценить степень перераспределения метана в призабойной части пласта. Ввиду этого целью настоящей работы является экспериментальное определение перераспределения метана в зоне опорного давления и теоретическое подтверждение установленных закономерностей.

Для решения поставленных задач в ИФГП НАН Украины был разработан и прошел испытания шахтный измеритель массопереноса метана [6] и нормативный документ «Правила определения газоносности угольных пластов и давления метана измерителем кинетики массопереноса (СОУ 10.1.246447077.001.2012). Результаты исследований по распределению давления метана в призабойной зоне пластов h_6^1 – Смоляниновский и k_3 – Колпаковский на шахтах им. А. А. Скочинского и Комунарская в условиях очистных и подготовительных забоев приведены в таблице 2.

Анализ представленных результатов свидетельствует, что газовая эпюра имеет максимум на расстоянии 2-3 м от поверхности забоя, фактически в области пика горного давления и снижается вглубь массива. В среднем давление метана непосредственно в призабойной зоне пласта может превышать давление на глубине 4-5 м в 1,55 раза.

Таблица 2

Результаты измерения давления метана и параметров массопереноса в призабойной зоне пластов h_6^1 и k_3

№ п/п	Место измерений	Давление метана (кг/см ²) по глубине скважины, м				Коэффициент массопереноса, м ² /с·10 ⁻⁶	Примечания
		2	3	4	5		
1	Нижняя ниша 2-й западной лавы пл. h_6^1 гор. 1300м	5,2	3,6	2,4		0,068	Газодинамические явления в виде внезапного отжима
2		2	5,9	4,1		0,016	
3		7,4	7,1	2,1		0,054	
4		3,1	5,9	5,0		0,0086	
5		7,1	14,8	10,1		0,017	
6		4,4	10,1	9,1		0,07	
7		6,1	9,1	7,7		0,009	
8		3,1	6,9	4,1		0,0056	
9		4,2	7,9	3,5		0,022	
10	11-я восточная лава пл.	10,4			3,5	0,0015	
11	k_3 , гор. 700 м	8,1			4,5	0,038	
12	Конвейерный штрек	13,5			4,8	0,0015	
13	пл. k_3	10,1			4,9	0,01	

Полученные результаты свидетельствуют, что в области предельного состояния угольного пласта (призабойная зона) инициируется несколько одновременно протекающих процессов, обеспечивающих, с одной стороны, снижение проницаемости угольного массива, с другой стороны аккумуляцию метана в

непосредственной близости от поверхности очистного или подготовительного забоев. Наличие первого процесса подтверждается результатами экспериментальных исследований степени влияния напряженно-деформированного состояния угля на его газовую проницаемость [7]. Установлено, что коэффициент фильтрации при уровне шарового тензора более 50 МПа составляет $K_{\phi} > 10^{-10}$, и фактически создает непроницаемый барьер, многократно снижающий кинетику десорбции метана из глубины пласта. Этот вывод, в общем, подтверждается результатами теоретических исследований, приведенных в начале статьи. Для оценки степени перераспределения и аккумуляции метана в зоне неоднородно распределенного давления (зона опорного давления) воспользуемся представлениями статистической физики, из которых следует, что однородным в условиях термодинамического равновесия следует считать не давление газа, а его химический потенциал. Для этого необходимо вычислить для пласта термодинамический потенциал Гиббса вместе с содержащимся в угле метаном и затем минимизировать этот потенциал по отношению к перераспределению давления газа.

Рассмотрим призабойную зону угольного пласта и обозначим через P давление метана в порах, а через P_m – внешнее (горное) давление на пласт. Для вычисления упругой энергии угольного каркаса [16] представим угольный массив в виде шарообразных областей радиуса R_2 , содержащие полости радиуса R_1 , заполненные метаном (рис. 2). Вычислим упругую энергию каркаса как сумму упругих энергий всех таких областей.

Учитывая известное [8] решение задачи о деформациях и напряжениях шара с концентрической шаровой полостью, подверженного действию внутреннего и внешнего давления, приходим к формуле для упругой энергии рассматриваемой области:

$$E_{упр} = \frac{2\pi}{R_2^3 - R_1^3} \left[\frac{(PR_1^3 - P_m R_2^3)^2}{3K} + \frac{(P_m - P)^2 R_1^3 R_2^3}{4G} \right], \quad (2)$$

где K и G – модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно.

Учтем теперь, что отношение

$$\gamma = \frac{R_1^3}{R_2^2} \quad (3)$$

имеет четкий физический смысл пористости угля.

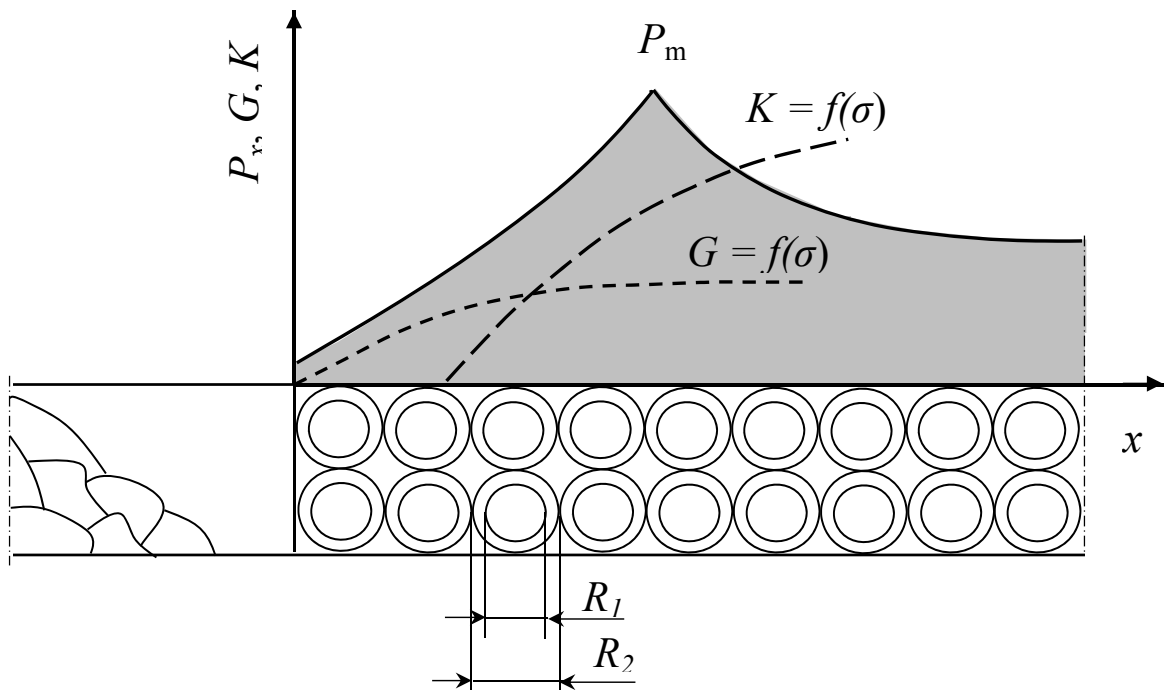


Рис. 2. Схема, характеризующая структуру зоны опорного давления

Тогда для плотности упругой энергии угля получим выражение, содержащее лишь достаточно надежно определяемые в лабораторных и шахтных экспериментах параметры:

$$\varepsilon_{упр}(P, P_m) = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right]. \quad (4)$$

Поскольку $\varepsilon_{упр}$ выражена через давление, она является упругой составляющей плотности термодинамического потенциала Гиббса газоугольного материала. Плотность потенциала Гиббса газа, находящегося в фильтрационном объеме равна

$$\varphi_g = \gamma P \ln \frac{P}{P_T}, \quad (5)$$

где P – давление метана в участке угольного пласта;

P_T – величина размерности давления, зависящая от температуры и рода газа.

Добавляя к $\varepsilon_{упр}$ плотность потенциала Гиббса газа, находящегося в порах, найдем плотность φ потенциала Гиббса рассматриваемого нами угольно-газового массива:

$$\varphi(P; P_m) = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right] + \gamma P \ln \frac{P}{P_T}. \quad (6)$$

Ввиду неоднородности пласта его упругие модули K и G , а также пористость γ могут быть разными, что обычно наблюдается при шахтных измерениях. Кроме того, при проведении горных работ становится неоднородным внешнее давление P_m . Концентрация напряжений, вызванная наличием полости (выработки) в горном массиве, в максимуме (зоне опорного давления) может в несколько раз превышать напряжения в нетронутом массиве [9]. Во всех этих случаях давление газа перераспределяется по пласту. Чтобы выяснить характер пространственного изменения давления газа в состоянии равновесия, следует минимизировать термодинамический потенциал газозольного материала по отношению к перераспределению давления газа в пласте, при условии, что отсутствуют как утечка газа из пласта, так и поступление газа в пласт. Следовательно, необходимо учесть условие сохранения суммарного количества метана в пласте. В таком случае условие термодинамического равновесия пластового газа состоит в однородности его химического потенциала μ :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \gamma \mu = const, \quad (7)$$

где $n = \frac{P}{T}$ – плотность газа, T – абсолютная температура.

Сорбция метана в блоках угольного вещества изменяет давление метана в меру его растворимости. Поскольку практически всегда растворимость метана в угле не превышает 10^{-2} , то при первичных расчетах давлений сорбцией метана допустимо пренебречь.

Использование формул (6) и (7) дает возможность в ряде практически важных случаев указать локализацию участков повышенного давления газа и оценить относительное изменение давления газа на этих участках. С этой целью заметим, что константу, стоящую в правой части (7), можно получить, считая, что при $x \rightarrow \infty$ мы переходим на нетронутый массив.

Таким способом мы получаем рабочее соотношение:

$$\begin{aligned} \ln \frac{P(x)}{P_\infty} + \frac{1}{1-\gamma} \left[\left(\frac{\gamma}{K} + \frac{3}{4G} \right) P(x) - \left(\frac{1}{K} + \frac{3}{4G} \right) P_m(x) \right] = \\ = \frac{1}{1-\gamma_\infty} \left[\left(\frac{\gamma_\infty}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_\infty - \left(\frac{1}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_{m_\infty} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Символ ∞ соответствует участку пласта, удаленному от геологической или техногенной неоднородности, сосредоточенной вблизи точки x . При использовании (8) следует иметь в виду, что упругие модули и пористость тоже могут зависеть от x .

Для оценки степени влияния горного давления и упругих характеристик угля (K , G) на распределения метана в пласте было смоделировано на установке трехосного нагружения [10-11] напряженно – деформированное состояние элемента угольного пласта, аналогичное его состоянию в зоне опорного давления. Для исследований использовались угольные образцы, отобранные на угрожаемом по внезапным выбросам угля и газа пласте k_3 – Колпаковский, отрабатываемого на глубине 650 м на шахте Коммунарская. Результаты измерений и расчета упругих модулей приведены в таблице 3.

Рассмотрим частные случаи, представляющие наибольший интерес.

1. Характеристики материала однородны, а внешнее давление неоднородно. Тогда $G = G_\infty$, $K = K_\infty$ и $\gamma = \gamma_\infty$. При рассмотрении угольного материала слагаемыми, содержащими в знаменателе модуль всестороннего сжатия K можно пренебречь в сравнении со слагаемыми, содержащими модуль сдвига G . В углях средней степени метаморфизма, согласно экспериментальным данным в таблице 3, модуль сдвига G в среднем в 5,5 раза меньше модуля K . С учетом этого обстоятельства, считая $\gamma \ll 1$ и

производя стандартное разложение логарифма в ряд, приходим к следующей оценочной формуле:

$$\frac{P(x) - P_{\infty}}{P_{\infty}} = \frac{3}{4G} (P_m(x) - P_{m\infty}). \quad (9)$$

Как было уже упомянуто, при отработке пласта k_3 – Колпаковский формируется зона опорного давления, которое на расстоянии нескольких метров от забоя может в 5÷8 раз превысить горное давление нетронутого массива, в частности $P_{m\infty} = 16,5$ МПа, а $P_m(x) \approx 162,3$ МПа (см. табл. 3), т.е. коэффициент концентрации напряжений составляет 9,2, что не противоречит результатам, представленным в работах [9, 12].

Результаты расчетов по формуле (9) свидетельствуют, что в области максимальных значений эпюры горного давления (область 4-8 в табл. 3) газовое давление повышается на 15 % по отношению к давлению в угольном массиве на глубине пласта. Таким образом, на участке в области максимальных значений опорного давления газовое давление метана повышается в среднем на 15 % по отношению к давлению на удаленных участках пласта.

В действительности повышение давления газа будет еще больше, поскольку к упругим деформациям может добавиться пластическая деформация и эффективные модули уменьшатся. При этом даже незначительное увеличение давления газа при нахождении пласта в предельном состоянии в зоне опорного давления может привести к превращению пор в трещины, а в случае высокоскоростной разгрузки – к потере устойчивости в виде ГДЯ [13].

2. Макроструктура угля и внешнее давление существенно неоднородны.

Пусть координата x отмечает участок, в котором упругие модули G и K значительно меньше соответствующих модулей в ненарушенном участке, т.е. $G \ll G_{\infty}$ и $K \ll K_{\infty}$. Чаще всего речь идет о переходной части эпюры на ее границе с областью отжима, в которой $K_{\phi} \geq 10^{-9}$ м²/с [14], либо о зоне геологического нарушения пласта.

Таблица 3

Физико-механические свойства угля пласта k_3 – Колпаковский в
 зоне опорного давления

№ п/п	Исходные данные						Расчетные данные		
	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	ξ_1 $\times 10^{-3}$	ξ_2 $\times 10^{-3}$	ξ_3 $\times 10^{-3}$	K $\times 10^3$, МПа	G $\times 10^3$, МПа	ν
1	24,2	7,1	10,2	11,44	0,37	1,68	3,27	0,72	0,4
2	66,1	17,7	22,7	21,66	0,37	5,4	3,99	1,16	0,44
3	101,1	38,8	35,4	29,29	0,56	6,15	4,87	1,21	0,45
4	136,3	55,1	48,3	31,26	2,04	6,89	5,19	1,08	0,45
5	171,4	71,4	51,3	42,63	2,78	6,89	5,81	1,08	0,45
6	167,9	71,4	48,6	42,81	2,78	6,89	5,48	1,03	0,45
7	162,6	70,9	36,0	44,19	2,78	6,8	5,01	1,03	0,44
8	153,4	69,2	23,3	45,41	2,78	3,54	4,75	1,05	0,44
9	107,4	61,5	10,7	48,53	3,37	-21,2	5,5	0,68	0,47
10	70,1	51,1	8,1	55	4,61	-28,1	5,3	0,66	0,47
11	50,8	40,1	4,4	59	5,81	-36,1	5,0	0,63	0,47
12	30,9	31,1	2,1	62	7,02	-41,2	3,4	0,32	0,42
13	22	24,9	0	75	9,6	-61,4	3,0	0	0,48

При неизменной пористости вдоль пласта и низком сдвиговом модуле, значительно меньшим модуля сжатия, из (9) нетрудно получить следующую реалистичную оценку:

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G} (P_m - P_{m\infty}). \quad (10)$$

Поскольку всегда горное давление P_m больше пластового давления метана, то из (10) следует, что в ослабленном участке пласта ($G \ll G_\infty$) давление метана превышает его давление в не-

нарушенном участке. Величина эффекта определяется отношением P_∞/G и величиной горного давления. Применительно к условиям пласта k_3 при $P_\infty = 2,5$ МПа, среднем модуле сдвига $G=200$ МПа, т.е. в 5,7 раз меньше своего значения в нетронутом массиве (см. табл. 3, пункт 12), а горное давление $P_m = 162,3$ МПа, то $P-P_\infty = 0,85$ МПа.

Если ослабление пласта происходит за счет увеличения пористости ($\gamma \gg \gamma_\infty$), то с помощью рассуждений, аналогичных ранее приведенным, получаем оценку:

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty (\gamma - \gamma_\infty)(P_m - P_\infty)}{4G (1 - \gamma_\infty)(1 - \gamma)}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что газ скапливается в участках с низким сопротивлением сдвигу и в участках с повышенной пористостью, что согласуется с шахтными исследованиями и наблюдениями [15].

В указанных местах скопления метана его давление может превышать среднее давление по пласту на 15÷55 %, что создает предпосылки для формирования зон повышенной газодинамической активности и высокой газоотдачи на этих участках. Это позволяет дать предварительные прогнозы локализации и степени критичности возможных газодинамических явлений, а также интенсивных газовыделений в шахтах.

Заключение

Идея работы состоит в учете влияния газа на упругую энергию угольного каркаса. Базируясь на этой идее, показано, что в условиях, когда газ не имеет возможности десорбироваться из угольного пласта в окружающую среду, метан распределяется так, чтобы минимизировать термодинамический потенциал системы газ - угольный каркас. В состоянии термодинамического равновесия происходит частичная компенсация внешнего давления противодействием газа. Он скапливается либо в местах ослабления материала, либо там, где внешнее давление на пласт значительно превышает горное давление. В указанных местах скопления метана его давление может превышать среднее давление по пласту на 15-55%, что создает предпосылки для возникновения аккумулялирования значительных объемов метана на этих

участках. Наша работа позволяет дать предварительные прогнозы локализации и степени критичности возможных газовыделений в шахтах.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Кузнецов С. В. Газодинамика угольного пласта, численный алгоритм, частные и приближенные решения / Кузнецов С. В., Трофимов В. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — Вып. 4. — С. 304—325.
2. Кузнецов С. В. Численный расчет волны фильтрации в сорбирующей проницаемой среде / Кузнецов С. В., Трофимов В. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — Вып. 13. — С. 206—216.
3. Кузнецов С. В. Движение газа в призабойной зоне угольного пласта при внезапных отжимах / Кузнецов С. В., Трофимов В. А. // ФТПРПИ. — 1990. — № 6. — С. 75—81.
4. Черняк И. П. Управление состоянием горных пород / Черняк И. П., Ярушин С. А. — М. : Недра, 1995. — 335 с.
5. Правила ведения горных работ на пластах склонных к газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.00174088.011-2005. — [Чинний від 30.12.2005]. — К. : Минуглепром, 2005. — 225 с. — (Стандарт Мінвуглепрому України).
6. Стариков Г. П. Обоснование способа и портативного устройства для прогноза газоносности угольных пластов / Стариков Г. П., Житленок Д. М., Шажко Я. В. // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. праць. — 2012. — Вип. 107. — С. 142—146.
7. Алексеев А. Д. Изменение трещиновато-пористой структуры и газопроницаемости угля в условиях неравномерного объемного сжатия / Алексеев А. Д., Недодаев Н. В., Стариков Г. П. // Научные сборники ИГД им. Скочинского. — 1990. — С. 19—23.
8. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т.VII: Теория упругости / Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. — М. : Физматлит, 2003. — 264 с.

9. Якоби О. Практика управления горным давлением. Пер. с ин. / О. Якоби — М. : Недра, 1987. — 566 с.
10. Алексеев А. Д. Предельное состояние горных пород / Алексеев А. Д., Недодаев Н. В. — К. : Наукова Думка, 1982. — С. 200.
11. Стариков Г. П. Особенности деформирования и разрушения углей при объемном сжатии / Стариков Г. П. // Геотехнологии на рубеже 21 века — Донецк : ДНТУ. — 2001. — Т. 4. — С. 81—87.
12. Петухов И. М. Механика горных ударов и выбросов / Петухов И. М., Линьков А. М. — М. : Недра, 1973. — 280 с.
13. Алексеев А. Д. Прогнозирование неустойчивости системы уголь – газ / Алексеев А. Д., Стариков Г. П., Чистоклетов В. Н. // Донецк : Изд-во Ноулидж, 2010. — 343 с.
14. Стариков Г. П. Влияние скорости разгрузки угольного массива на изменение трещиновато-пористой структуры угля. / Стариков Г. П., Гребенкина А. С. // Вісті Донецького гірничого інституту — 2004. — № 1. — С. 18—21.
15. Кольчик Е. И. Влияние тектонической нарушенности на условия проведения и поддержания пластовых выработок / Кольчик Е. И., Кольчик И. Е., Пилюгин В. И. — Донецк : ДУНВГО, 2006. — 184 с.
16. Алексеев А. Д. Термодинамика газоугольного массива и неоднородное распределение газов в угольных пластах / Алексеев А. Д., Фельдман Э. П., Калугина Н. А. // ЖТФ. — 2010. — № 12. — С. 57—61.