

УДК 622. 831

Р.В. Дегтярь, П.И. Поляков

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОЯВЛЕНИЯ
ГАЗОВОГО ДАВЛЕНИЯ В «ГАЗОВЫХ ЛОВУШКАХ»
НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ РАЗРАБОТКИ

ИФГП НАН Украины

Розглянуто питання, пов'язані з дослідженням фільтрації газу при розробці вугільних шарів.

Ключові слова: *фільтрація газу, вугільні шари, газонасиченість*

R.V. Degtyar, P.I. Polyakov

STUDY OF PRESSURE EFFECTS IN GAS TRAPS MASSIF AT DEEP
MINING

Issues of gas filtration during coal mining are examined.

Keywords: *gas filtration, coal seams, gas saturation*

Современная газоносность угленосных толщ в значительной мере сформировалась путем пространственного перераспределения углеметаморфогенных газов. Природная газоносность угленосных отложений представлена газами угленосных толщ и газами фильтрационными, привнесенными в угленосные отложения из более глубоких зон. Это меняет представления о роли природных газов угленосных формаций. Им отводится активная роль в формировании тепловых потоков, контролирующих процессы метаморфизма и газогенерации. Природные газы находятся в сорбированном, водорастворимом и свободном состояниях. Основными факторами, определяющими метаноемкость углей и пород, являются температура (снижает сорбционные свойства), давление (повышает сорбцию), степень и тип метаморфизма, влажность, степень восстановленности и петрографический состав углей. Газоносность углей Донбасса изменяется в чрезвычайно широких пределах – от 5 до 45 м³/т с.б. м. В ряде случаев доля сорбированного газа в углях и углистых породах достигает 90–95%. Сорбированные газы содержатся в глинистых породах (аргиллиты), обладающих тонкой поровой структурой. В благо-

приятных геологических условиях эти породы включают углеводороды в свободной фазе.

В трещиновато-пористом массиве за счет его деформации формируются зоны разгрузки. Образуются фильтрационные области с повышенной проницаемостью. Вопрос о пористости углей имеет важное практическое значение, поскольку касается проблем газоёмкости и газоносности угольных пластов, решение которых позволит производить оценку давления газа на очистной забой.

Изучение физических процессов, связанных с давлением и фильтрацией газа в массиве горных пород, представляет теоретический и практический интерес. Этим определяется необходимость развития экспериментальных и аналитических методов оценки газового давления в массиве горных пород на больших глубинах. Термодинамика изменения газового состояния горного массива оказывает влияние на разрушающие процессы в массиве горных пород. Оценка скоплений свободных углеводородных газов в «ловушках» различных типов обрабатываемых выемочных столбов является приоритетным направлением.

Цель работы – исследование физических процессов проявления газового давления в «газовых ловушках» на больших глубинах.

Общая прогнозная оценка газоносности пород основывается на изучении газоносности углевмещающих пород и получения сведений о:

- коллекторских свойствах и величине газоносности основных разновидностей углевмещающих пород и общих тенденций изменения показателей коллекторских свойств и газоносности по площади и на глубину;
- возможных типах коллекторов, способных аккумулировать газ и оказывать влияние на газовыделение из пород в горные выработки;
- наличии «ловушек газа» на основе анализа литолого-фациальных особенностей угленосных отложений, учета тектонической структуры и гидрогеологических особенностей объекта;
- возможном влиянии различных геологических факторов на газоносность углевмещающих пород.

Генезис, фильтрация, формы нахождения природных газов, образование скоплений углеводородов в угленосных отложениях обусловили специфику формирования природной газоносности угленосных толщ. Фильтрация к поверхности глубинных газов закономерно приводит к образованию в угленосных толщах зон вертикальной газоносности. По мере удаления от поверхности метановой зоны наблюдается рост содержания метана до 70–95%. На больших глубинах отмечается уменьшение содержания метана до 80–85% за счет роста доли тяжелых углеводородов (ТУ). На ряде шахт («Октябрьский Рудник», им. А.Ф. Засядько, «Комсомолец» и др.) утяжеление углеводородов на глубинах 1000–1300 м вызывает появление жидких углеводородов типа легких нефтей и газоконденсатов. Углеводороды находятся в породах с пониженными фильтрационными характеристиками. Данные газы дос-

таточно прочно удерживаются в поровом пространстве капиллярными силами и гидростатическим давлением. При вскрытии поровых пространств очистными работами газы постепенно и длительно выделяются в горные выработки шахт.

Результаты исследований нарушенности угольного массива при участии больших объемов газонасыщенности в работах [1–3] поставили на первое место вопросы физики горных процессов в газонасыщенных угольных пластах при ведении очистных работ. Использование основополагающего закона Дарси о фильтрационных процессах в несплошных средах [4–6], а также закономерностей фильтрации быстрого и медленного газа, отмеченных в работах [7–8], позволяет оценить уровень газового давления в массиве горных пород. Для углепородного массива проницаемость, в силу наличия сложной системы эндогенных и экзогенных трещин, различна в разных направлениях.

В подавляющем большинстве геолого-промышленных районов Донбасса присутствуют значительные природные скопления (концентрации) свободных углеводородных газов – «ловушек газа». Такие «ловушки» представляют наибольшую опасность при выемке угля. Вскрытие их приводит к авариям, сопровождающимся гибелью людей (шахты Краснолиманская, Красноармейская-Западная №1, им. А.Ф. Засядько и др.).

Преобладание слабопроницаемых аргиллитов и алевролитов обусловило развитие региональных и локальных покрышек и газоупоров, препятствующих дегазации угленосных отложений. Стратиграфические ловушки образуются при перекрытии более древних коллекторов залегающими непроницаемыми образованиями. Структурные ловушки (антиклинальные, сводовые) формируются в сводовой части положительных пликативных структур: линейных антиклинальных складках, брахиантиклиналях, куполах, структурных выступках. Тектонические (дизъюнктивные) ловушки тесно связаны с зонами развития дизъюнктивной тектоники и развиты практически повсеместно.

Экранирующий эффект достигается за счет стыковки по плоскости сбрасывателя проницаемых и непроницаемых пород, цементации зон трещиноватости в процессе выклинивания нарушенных зон в связи с затуханием разрывов и переходом их в межслоевые дислокации. В условиях моноклиального залегания угленосных толщ этот тип ловушек приурочен к дизъюнктивам (по отношению к простиранию пород) сбросового и надвигового типа. В местах изгибов разрывных нарушений в пределах отдельных тектонических блоков этот тип ловушек образован несколькими дизъюнктивами. Литологические ловушки получили широкое распространение в условиях моноклиналей на крыльях пликативных структур в регионах развития крупной складчатости. Они связаны с изменением мощности, выклиниванием или фациальным замещением пластов-коллекторов.

В ряде угленосных районов Донбасса развитие ловушек происходит за счет экранирования проницаемых горизонтов-коллекторов эффузивными

покровами и интрузивными телами. Чаще всего имеем дело с комбинированными ловушками, образование которых обусловлено действием различных геологических факторов.

Геологоразведочные и дегазационные работы показали, что литологические ловушки на данном этапе технического развития относятся к трудноизвлекаемым. Такие ловушки располагаются в интервале глубин 220–1800 м и имеют пластовые давления на уровне гидростатических. В Донбассе четко выражена природная газовая зональность. Ниже зоны газового выветривания расположена переходная газоводонасыщенная зона, сменяющаяся глубинной зоной распространения углеводородных газов. В настоящее время средняя глубина добычи угля превышает 800 м. Большинство шахт ведут очистные работы в газовой зоне. В переходной газоводонасыщенной зоне угольные пласты газонасыщены. Характерная особенность пород-коллекторов – пониженное давление и соответственно малые дебиты газа. Постоянным фактором, осложняющим разработку угольных месторождений, является газоносность углей 5–45 м³/т (в отдельных случаях до 150 м³/т) и вмещающих пород 0,3–4 м³/м³. Среднее содержание газа составляет 10–20 м³/т. Угленосные отложения имеют исключительное значение для газообразования и газонакопления. Углегазоносные отложения характеризуются высокой газоносностью на глубинах 350–400 м, пластовым давлением свободных газов в «ловушках», близким гидростатическому, и многообразием форм этих «ловушек».

Большое разнообразие структурных элементов горного массива, различные системы трещин в совокупности образуют общую систему пористой среды. Важнейшей характеристикой последней является объемное содержание микропор и переходных пор в единице объема среды m_i . Различают пористость: абсолютную (полную) – учитываются все поры; открытую – рассматриваются поры, которые соединены между собой и заполнены извне газом без изменения их фазового состояния.

Сформировавшийся к настоящему времени взгляд на пористую структуру угля не позволяет дать ответы на ряд вопросов. К ним относится в первую очередь вопрос о максимальной величине давления газа в угле. Причина состоит в том, что до сих пор исследователи не учитывали закрытые поры, удельный объем которых в углях на порядок превышает удельный объем всех прочих пустот. Это обусловлено несплошной структурой угольного вещества. Открытые поры соединяются системой трещин и каналов, что позволяет метану достаточно быстро проникать внутрь угольной массы и столь же быстро покидать ее. Закрытая пористость углей определяется системой полостей различных размеров и конфигураций, не связанных транспортными каналами с внешней поверхностью угольного пласта. Поступление метана в такие полости (или эвакуация из них), может осуществляться исключительно путем твердотельной диффузии, что обуславливает значительную продолжительность этого физического процесса.

В трещиновато-пористом горном массиве формируются фильтрационные области с повышенной проницаемостью. Разнообразные структурные трещины образуют систему порового пространства массива. Важнейшей характеристикой трещиновато-пористого горного массива служат объемные микропоры и переходные поры в единице объема среды m_i .

Существенное влияние в проявлении давления газа оказывает газовая проницаемость. С уменьшением проницаемости ухудшаются условия фильтрации газа из угольного пласта [4–6]. Уголь характеризуется 28% закрытой и 6% открытой пористости [8], что отличает его от большинства других коллекторов газа. Вследствие такой высокой пористости часть газа находится в угле в адсорбированном состоянии. Изменение проявления горного давления вблизи очистного забоя вызывает не только движение свободного газа в сторону забоя лавы, но и десорбцию газа во всей области градиента давления. Процесс газовой выделению поддерживается в основном изменением градиента давления. Движение газа происходит двумя потоками: по субмакро- и макропорам трещин, разделяющих блоки по микроканалам сообщающихся друг с другом блоков. Основная масса газа находится в сорбированном состоянии. Фильтрационный закон устанавливает связь между скоростью фильтрации и изменением давления газа в окрестности трещиновато-пористой среды, вызывающей фильтрационное движение. Это изменение определяется градиентом давления газа. На рис. 1 представлен график экспериментальных замеров давления газа в дегазационных скважинах, пробуренных с поверхности впереди 12-й восточной и 23-й западной лавы пласта i_3^1 ш. «Суходольская – Восточная» ОАО «Краснодонуголь».

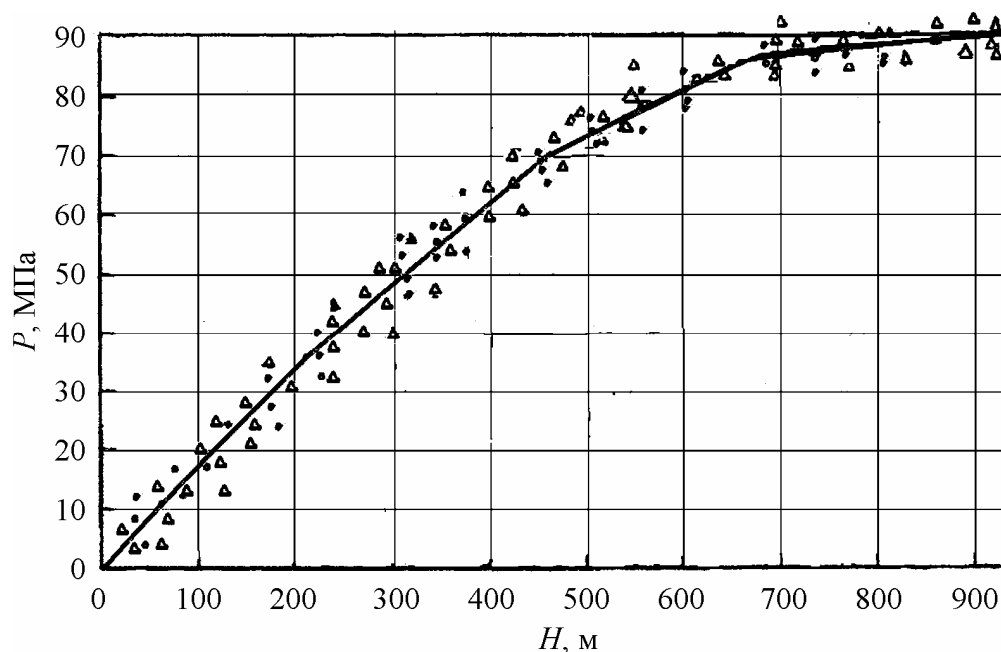


Рис. 1. Давление газа в угольных пластах в зависимости от глубины разработки шахты «Суходольская-Восточная» ОАО «Краснодонуголь» по данным шахтных замеров в скважинах: Δ – 12-й восточной, \circ – 23-й западной лавы пласта i_3^1

Рис. 2 из работы [8] подтверждает полученные нами результаты натурного измерения давления газа в угольных пластах в зависимости от глубины ниже зоны газового выветривания и выбросоопасности. Из этого рисунка видно, что верхний предел давлений в пласте находится на уровне 10 МПа (100 атм.).

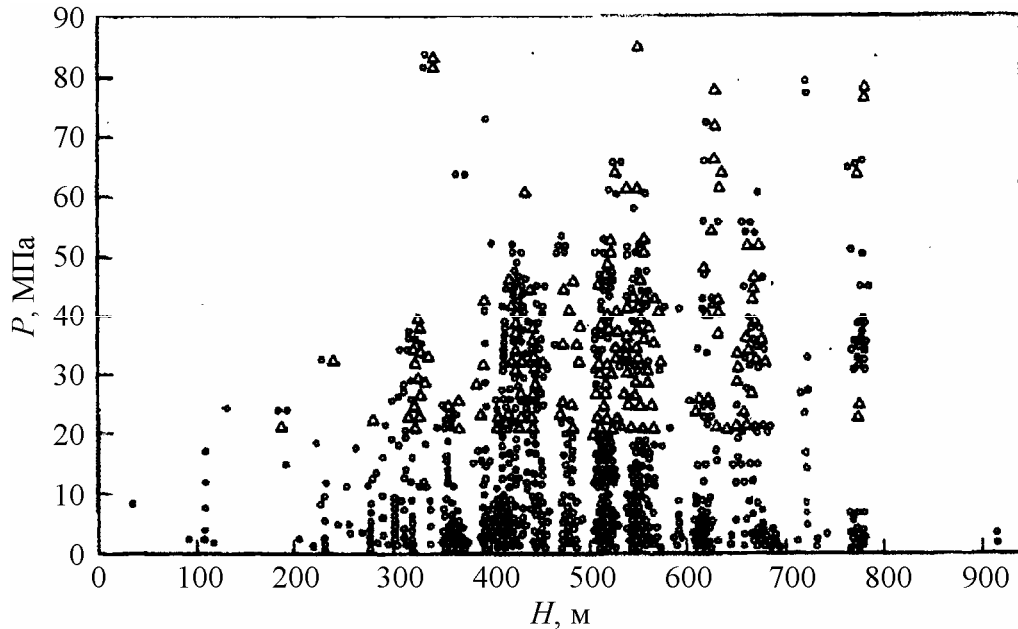


Рис. 2. Давление газа в зависимости от глубины ниже зоны газового выветривания: Δ – выбросоопасные, \circ – невыбросоопасные пласты

Оценка величины расхода газа в порах G (т/с) возможна по формуле

$$G = \frac{S \gamma_M k}{\eta P_{ат}} P \frac{dP_{г}}{dx}, \quad (1)$$

где S – площадь фильтрации газа, m^2 ; γ_M – удельный вес метана в горном массиве, t/m^3 ; η – вязкость метана, $t \cdot c/m^2$; $P_{ат}$ – давление горных пород в массиве, МПа; $P_{г}$ – газовое давление в массиве горных пород, МПа; k – газопроницаемость пород в массиве, $1/m^3$.

Давление газа в горной породе $P_{гi}$ (МПа) можно определить по формуле

$$P_{г} = \sum_{k=2}^4 \left(\frac{\partial(\rho_i m_i)}{\partial x_i} + \rho_i m_i \frac{d_k \bar{v}_{ki}}{dt} \right), \quad (2)$$

где m_i – объемное содержание микропор и переходных пор в единице объема среды, m^3 ; ρ_i – средняя плотность пород горного массива, t/m^3 ; \bar{v}_{ij} – компонента скорости перемещения газа, м/мин.

Кривая 2 рис. 3 отражает распределение давления газа, вычисленное по формуле (2). В качестве исходных приняты следующие данные: ширина лавы – 4 м; мощность пласта – 1,3 м; коэффициент сцепления угля – 0,01 МПа;

коэффициент трения угля по почве и кровле – 0,4; пористость угля – 35 %; плотность угля – $0,0013 \text{ т/м}^3$; плотность метана – $0,7168 \cdot 10^{-6} \text{ т/м}^3$; вязкость метана – $11 \cdot 10^{-11} \text{ т·с/м}^2$; давление горных пород в массиве – 125 МПа; расход газа в призабойной части забоя – $3 \cdot 10^{-8} \text{ т/с}$; газопроницаемость – $108^{1/\text{м}^3}$.

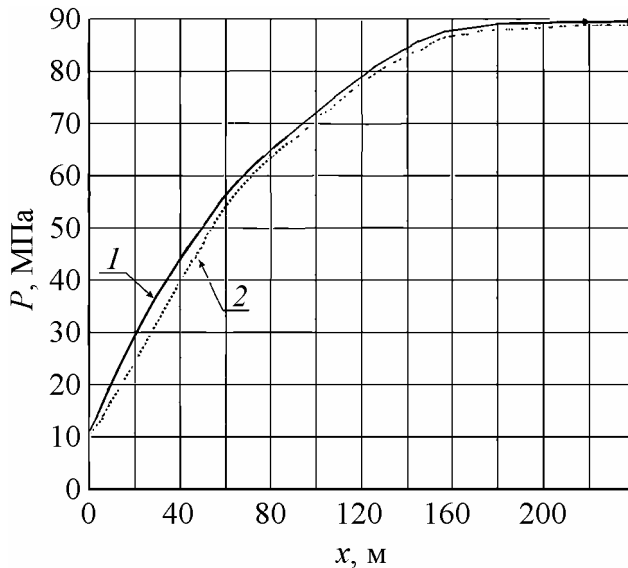


Рис. 3. Оценка давления газа в пласте i_3^1 ш. «Суходольская-Восточная» ОАО «Краснодон-уголь» впереди лав: 1 – 12-й восточной, 2 – 23-й западной

Полученные нами расчетные величины давления газа (рис. 3) имеют хорошую сходимость с экспериментальными замерами (рис. 1) в массиве горных пород на больших глубинах.

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Сорбционные свойства угля практически не влияют на величину газового давления в диапазоне $P \geq 50 \text{ МПа}$. Данный вывод не распространяется на диапазон $P < 50 \text{ МПа}$, в котором изменяется давление газа в непосредственной близости от очистного забоя в зоне разгрузки.

2. С увеличением трещиноватости и нарушением структуры угля в окрестности очистного забоя на больших глубинах возрастает давление газа. Нарушенность угля связана с концентраторами напряжений в угольном пласте и внезапной его разгрузкой в местах дизъюнктивных нарушений – «газовых ловушек». Предложенный метод позволяет оценить давление газа и образование опасных концентраций метана при ведении очистных работ.

3. Если бы общая пористость угля как коллектора газа была представлена только открытыми порами, то выделение газа носило бы мгновенный характер. Из закрытых пор газ выходит путем твердотельной диффузии, так как процесс диффузии более продолжителен во времени, чем процесс десорбции. Образование опасных концентраций газового давления может происходить на некотором удалении от источника метановыделения.

4. Метан является носителем огромных запасов внутренней энергии. Силы газового давления скованы в местах дизъюнктивных нарушений – «газо-

вых ловушках» вследствие их тонкопористой структуры и низкой газопроницаемости. Разрушение угля, вызванное горным давлением пород в процессе ведения очистных работ, способно освободить внутреннюю энергию газа и направить ее на работу внезапного выдавливания. Рост абсолютного и относительного выделения метана в выработки шахт требует обоснованного выбора и удешевления эффективных мероприятий по снижению метановыделения.

1. Христианович С.А., Кузнецов С.В. О напряженном состоянии горного массива при проведении очистных работ // Сб. горн. давл. – Л. – 1965. – № 59. – С. 95–111.
2. Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения. – М.: Наука, 1978. – 122 с.
3. Хапилова Н.С. К расчету консольно-зависающей кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. Мех. тв. тела. – 1970. – № 5. – С. 146–152.
4. Подильчук Ю.Н. К теории деформирования газонасыщенных пористых сред // Прикладная механика. – 1976. – 12, №12. – С. 42–47.
5. Эттингер И.Л., Ламба Е.Г., Адамов В.Г. Роль газа как понизителя прочности каменных углей // Доклады АН СССР. – 1954. – 99, № 6.
6. Biot M.A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid // J. Appl. Phys. – 1955. – V. 26. – № 2. – P. 182–185 (рус. перевод: Био М. Теория упругости и консолидации анизотропной пористой среды / Механика // Сб. перев. и обзоров иностр. период. лит. – 1956. – № 1 (35). – С. 140–146.
7. Ирисов С.Г. Оценка газоносности и выбросоопасности призабойной зоны по показателям десорбции // РМПИ. – 1982. – №12. – С. 41–45.
8. Василенко Т.А., Поляков П.И., Слюсарев В.В. Исследование влияния высокого давления на систему «уголь – газ» // Физика и техника высоких давлений. – 2000. – 10, № 4. – С. 133–135.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2009 года