

УДК 622.8

Закономерности формирования техногенного газового месторождения при отработке угольных пластов

Приведены результаты моделирования обрушений пород основной кровли в лаве, на основании которых можно определить пространственные и коллекторские параметры техногенных газовых залежей, а также вероятные пути миграции свободного метана в подработанных пространствах действующих и закрытых шахт.

Высокие потребности Украины в газе и его цена на мировых рынках указывают на «угольный» метан как на возможный энергоноситель. Однако его добыча из весьма газонасыщенных подработанных массивов, в том числе закрытых шахт, далеко не всегда целесообразна [1]. Одной из причин такого положения является отсутствие надежной информации о пространственном расположении техногенной залежи в подработанном массиве, а также о местах скопления в ней метана.

Подработка породного массива, обусловленная выемкой угля, приводит к тому, что в недрах создается полость, которая полностью или частично заполнена потерявшими связность обрушенными породами и в перспективе может рассматриваться как аккумулятор подвижного метана. Влияние этой полости на вмещающие газосодержащие породы проявляется в гораздо большей степени и на гораздо большем удалении от места разрушения, чем, например, при гидроразрыве. В этом и заключается основное отличие техногенных газовых коллекторов от природных: последствия выемки угольных пластов значительно более масштабны как в пространственном отношении, так и в смысле влияния на геомеханическое со-

стояние вмещающих газонасыщенных пород. Такое влияние выражается в интенсивном газоразделении из этих пород, что свидетельствует о постоянной подпитке подработанной части массива вследствие десорбции газа с последующим его скоплением в зонах повышенной проницаемости. Достаточное условие образования техногенного газового месторождения – наличие экранирующей поверхности, препятствующей неконтролируемым утечкам из него метана на соседние горизонты или на поверхность.

Однако эффективность работы добычных дегазационных скважин, в том числе смежных, заложенных в одинаковых горно-геологических условиях, может весьма различаться [1, 2]. Это связано с отсутствием надежных данных о пространственном расположении, размерах и конфигурации техногенного коллектора в привязке к пространству подработанного массива при невысокой достоверности оценки запасов и обоснованности мест заложения газодобывающих скважин. Кроме того, представляется крайне затруднительным прогнозировать скорость пополнения фильтрационного объема подработанного массива вследствие десорбции метана, поскольку предварительно необхо-



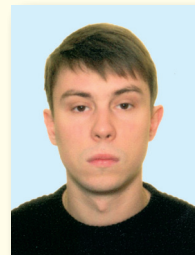
А. Н. ШАШЕНКО,
доктор техн. наук
(Национальный горный университет)



Н. В. ХОЗЯЙКИНА,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)



Е. В. КУХАРЕВ,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)



А. Ю. ЕРЕМЕНКО,
инж.
(ГП «Донуглереструктуризация»)

димо установить степень нарушенности этого массива и изменение его проницаемости на разных удалениях от отработанного пласта. Апробированные в нефтегазовой отрасли методики определения значений проницаемости пород для оценки продуктивности газодобывающих скважин, заложенных в подработанном массиве угольных шахт, неприменимы.

Современные представления о формировании в подработанных породных массивах техногенных коллекторов газа основаны на известных исследованиях влияния защитных пластов и интерпретации этих результатов в рамках различных модификаций довольно устаревшей гипотезы консольных балок. При этом изначально предполагается, что конфигурация коллектора зависит исключительно от мощности отработанного пласта и определяется максимальным интервалом разгрузки [1].

Вместе с тем установлено [3], что в течение некоторого периода между контуром полости, образованной вследствие установившегося обрушения, и обрушенными породами существует свободное пространство. Это дает основание полагать, что размеры и конфигурация техногенного коллектора обусловлены неупругим деформированием пород вокруг сформировавшейся полости, а смещения на ее контуре определяют характер взаимодействия обрушенных пород с частью подработанного массива, сохранившего устойчивость. Размеры области упругопластического деформирования реального структурно неоднородного породного массива, ослабленного подземной полостью произвольного очертания, достаточно корректно могут быть определены путем численного моделирования [4].

Исходными данными моделирования являются, в числе прочих, пространственная конфигурация полости обрушенных пород и ее размеры. Некоторые из пространственных параметров зоны беспорядочного обрушения – ядра техногенного месторождения – априори известны. Снизу ядро ограничено почвой отработываемого пласта, с боков – подготовительными

выработками, бутовыми полосами, целиками различного назначения и др. Таким образом, итогом решения задачи о пространственных параметрах ядра является определение его верхней границы, а именно формы и высоты свода обрушения.

В настоящей работе рассмотрена физическая модель обрушения пород кровли в лавах пологих угольных пластов, сформированная на основе современных представлений о геомеханических процессах, протекающих в кровлях подработываемых пластов [5]. Собственно модель представлена на рис. 1. Ее суть заключается в следующем.

После отработки столба в пространстве выработанного угольного пласта, начиная от его почвы, образуется массив обрушенных пород. Между обрушенными и необрушенными породами находится область пониженных напряжений 4 (см. рис. 1), в пределах которой в зависимости от мощности вынимаемого пласта, степени метаморфизма, структуры и текстуры пород кровли, ее физико-механических и ряда других параметров имеется либо пустое пространство, либо максимально разрыхленные породы, нагрузка на которые со стороны вышележащих пород практически отсутствует.

Со временем массив вышележащих пород приходит в движение, которое достигнет поверхности 5 с образованием мульды сдвижения, ограниченной углами δ_0 сдвижения по падению и простираанию и максимальным оседанием η_{II} . Область упругопластического деформирования в границах 3, 4 представляет ту часть техногенной газовой залежи, где нарушенный горными работами вмещающий массив сохранил устойчивость. Именно объем газоносных пород этой области определяет запасы техногенного месторождения, степень их нарушенности – интенсивность десорбционных процессов, а проницаемость – темпы скопления свободного метана в области обрушенных пород. Фактически схема, представленная на рис. 1, отражает заключительную стадию формирования техногенного месторождения метана.

Первая стадия соответствует первичному обрушению пород кровли над выработанным пространством. Как следствие образуется криволинейный свод естественного равновесия 1, форма которого определяет закономерности обрушения пород кровли при дальнейшей отработке пласта (зарождение газовой залежи). Последующие стадии 2, 3 являются результатом установившихся обрушений, когда в основной кровле угольного пласта формируются породные блоки обрушения, размеры которых определяются прежде всего структурой и прочностью вмещающих пород (формирование залежи). Заключительная стадия отражает геомеханические процессы сдвижения, которые продолжают развиваться после полной отработки

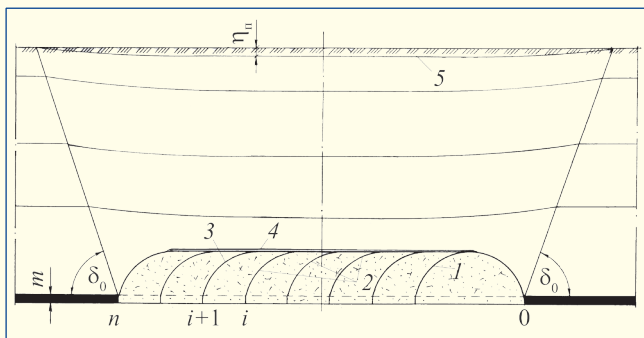


Рис. 1. Модель заключительной стадии формирования техногенного месторождения метана.

РАЗРАБОТКА ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

столба и затрагивают всю толщу пород выше зоны обрушения вплоть до поверхности (образование залежи).

Моделирование первой стадии начинается с операций на поисковой численной модели (рис. 2), представляющей собой нетронутый массив. На ее элементах, отождествляющих отработанный угольный пласт, имитируется полость прямоугольного сечения – аналога лавы и выработанного пространства.

Исследуемый породный массив представлен весомой упругой плоскостью, нагруженной нормальной равномерно распределенной нагрузкой $k_{\sigma} \rho H$ по верхней границе и по боковым границам равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью $\lambda \rho H$. Здесь k_{σ} – коэффициент пригрузки, который позволяет учитывать неравномерность нагружения каждого сечения лавы в зависимости от его расстояния до местоположения дополнительной концентрации напряжений; ρ – плотность горной породы; H – глубина заложения выработки; λ – коэффициент бокового распора; l_i – пошаговый отход лавы от разрезной печи.

Непосредственное экспериментирование заключается в варьировании некоторых параметров модели, причем остальные ее параметры неизменны. В данном случае варьируется продольный размер этой полости, посредством чего имитируется отход лавы от разрезной печи (см. рис. 2).

Расчеты с применением метода конечных элементов (подробно изложено в работе [5]) на каждом шаге изменения позволяют получить количественную оценку параметров напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и посредством эквивалентных напряжений σ_e установить зоны разрушения, в которых действующие напряжения превысили предел прочности.

На модели этим зонам отвечают те, в которых выполняется условие

$$\sigma_e > R_{\text{сж}} k_c \quad (1)$$

где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности породы на одноосное сжатие;

k_c – коэффициент структурного ослабления массива [6].

Однако факт разрушения породного массива в некоторой точке еще не свидетельствует о факте обрушения пород кровли. Обрушение пород будет соответствовать моменту, когда длина пролета обнажения достигнет некоторой критической величины $a_{\text{кр}}$. На модели при достижении критического пролета $a_{\text{кр}}$ размеры области разрушенных пород совпадут с размерами свода естественного равновесия.

Таким образом, обрушению пород кровли в выработанное пространство очистной выработки как свершившемуся событию наряду с разрушением пород

кровли должно соответствовать некоторое интегральное условие (критерий), подтверждающее нарушение целостности «выработка–массив» как единой системы. Этим условием будет потеря запаса прочности массива пород, оконтуренных сводом естественного равновесия. В рассматриваемых горно-геологических условиях для генерального $a_{\text{кр}}$ и установившегося a обрушения эти критерии имеют вид:

$$a_{\text{кр}} = \sum R_{\text{сж}i} k_{ci} h_i / (2 \rho_{\text{ср}} \sum h_i), \quad (2)$$

$$a = 10 R_{\text{сж}} k_c^p h \sin \alpha_i / (\rho h - 10 R_{\text{сж}} k_c^p), \quad (3)$$

где $R_{\text{сж}i}$, k_{ci} и h_i – предел прочности на одноосное сжатие, коэффициент структурного ослабления и мощность i -го слоя пород кровли;

$\rho_{\text{ср}}$ – среднее значение плотности вмещающих горных пород;

k_c^p – коэффициент структурного ослабления при растяжении, $\alpha = 60^\circ$ [5].

По результатам компьютерного моделирования процесса обрушения достаточно просто определить элементарную область, внутри которой одновременно выполняются точечное (1) и интегральные (2) – (3) условия прочности. Моделирование процесса установившегося обрушения по всей длине столба с учетом возможных изменений мощности отдельных нависающих слоев основной и непосредственной кровли позволяет определить параметры газоаккумулирующей полости – ядра месторождения. Соответственно трансформируется и базовая поисковая модель. Последняя преобразуется в модель с полостью, оконтуренной сверху границей 3 (см. рис. 1) – криволинейной поверхностью вида, близкого к параболическому. Вокруг этой полости формируется область

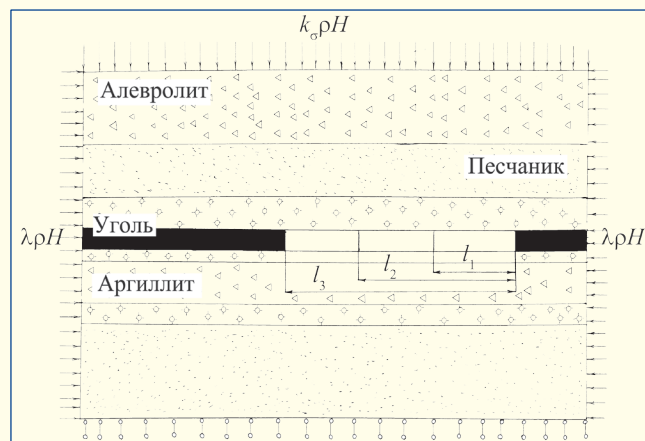


Рис. 2. Поисковая модель с имитацией отхода лавы от разрезной печи на примере отработки пласта l_8 (горизонт 550 м) на ОДО «Шахта «Белозерская».

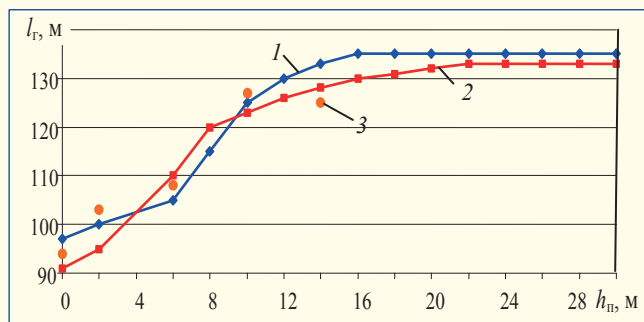


Рис. 3. Зависимость шага l_r генерального обрушения от мощности h_p слоя песчаника в кровле, полученные: 1 – на основе расчетных схем; 2 – путем моделирования на эквивалентных материалах; 3 – на базе фактически измеренных величин.

упругопластического деформирования, размеры которой определяют пространственные параметры и запасы потенциального месторождения, что является предметом дальнейших исследований.

На пространственные размеры области обрушения существенное влияние оказывает структура залегающих в кровле угольного пласта горных пород. Установлено, что шаг первичной посадки является нелинейной функцией мощности залегающего в кровле прочного породного слоя (рис. 3). Зависимость прослеживается до тех пор, пока мощность этого слоя не превышает некоторый предел, после чего высота обрушения и мощность прочного нависающего слоя становятся независимыми величинами. С возрастанием мощности слоя прочных пород увеличиваются углы полных сдвижений, а форма свода изменяется от параболической до трапецевидной. Определяющее влияние на конфигурацию ядра месторождения оказывает такой параметр, как расстояние от отработываемого пласта до существенно прочного слоя.

Учитывая специфику решаемой задачи, это может указывать на то, что с уменьшением мощности прочного слоя отрыв пород при обрушении может произойти несколько выше линии его контакта с более слабыми вышележащими породами, что влечет за собой существенные изменения формы свода обрушения и, следовательно, конфигурации газовой залежи.

При наличии в кровле мощного слоя прочных пород на размеры свода обрушения влияет также непо-

средственная кровля, в частности, ее мощность. Зависимость имеет нелинейный характер. Она проявляется только в некотором интервале мощностей непосредственной кровли, а вне этого интервала на размеры обрушения определяющее влияние оказывает залегающий выше крепкий породный слой. Внутри этого интервала влияние непосредственной кровли весьма существенно, и погрешность в оценке пространственных размеров ядра месторождения может составить более 25 %, если не учитывать это обстоятельство.

Выводы. Пространственные параметры и конфигурация техногенной газовой залежи, образованной в горном массиве в результате его подработки, однозначно определяют размеры зоны упругопластического деформирования вокруг полости обрушенных пород, ограниченной сверху сводом естественного равновесия. Современные технологии компьютерного моделирования с достаточной степенью точности дают возможность установить геометрические параметры свода, что является начальным этапом к определению пространственного расположения техногенной газовой залежи, а также вероятные пути миграции свободного метана в подработанных пространствах шахт.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Звягильский Е. Л. Добыча метана из угольных месторождений Донбасса (обзор) / Е. Л. Звягильский, В. В. Бокий, О. И. Касимов. – Донецк: Ноулидж, 2011. – 150 с.
2. Гуня Д. П. Показатели фильтрации метана в подработанном углепородном массиве на шахте им. А. Ф. Засядько / Д. П. Гуня // Геотехническая механика. – 2008. – Вып. 76. – С. 143 – 147.
3. Шевелев Г. А. Фильтрация газа в шахтах / Г. А. Шевелев, В. Г. Перепелица. – К.: Наукова думка, 2002. – 295 с.
4. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1967. – 221 с.
5. Хозяйкина Н. В. Обрушение пород в лавах пологопадающих пластов / Н. В. Хозяйкина. – Днепропетровск: НГУ, 2012. – 127 с.
6. Шашенко А. Н. Деформируемости и прочность массивов горных пород: монография / А. Н. Шашенко, Е. А. Сдвижкова, С. Н. Гапеев. – Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.