

УДК 622.41:622.822

С.П. Греков¹, И.Г. Старикова², А.Л. Иванников³

ДЕСОРБЦИЯ КАПТИРУЕМОГО МЕТАНА ИЗ СБЛИЖЕННЫХ ПЛАСТОВ И ЕГО ДИФфуЗИЯ ЧЕРЕЗ ПОРОДНЫЕ ТОЛЩИ

¹НИИГД «Респиратор»

²Институт физики горных процессов НАН Украины

³МГГУ, Россия

Рассмотрены десорбция метана из сближающихся, пластов при их дегазации и его диффузия через породные толщи в сторону выработанного пространства. Получены аналитические решения закономерностей распределения метана на выходе из группы сближающихся пластов и в породных толщах. На основе разработанной математической модели и полученных аналитических зависимостей выполнено моделирование влияния режимов работы дегазационных скважин на распределение давления и газовыделения из угольно-породного массива в обрушенную зону выработанного пространства.

Ключевые слова: метан, десорбция, диффузия, математическое моделирование, сближающиеся пласты, дегазационные скважины

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследований.

Появление высоких концентраций метана в горных выработках продолжает составлять значительную часть аварийных ситуаций в угольных шахтах. Управление дегазацией на выемочных участках является важнейшей задачей для создания нормальных и безопасных условий работы.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что, несмотря на глубокую изученность процессов десорбции, диффузии метана и дегазации угольных пластов и выработанных пространств, отсутствует комплексное рассмотрение всех процессов и установление их общих закономерностей.

Цель работы – исследование процессов десорбции, диффузии метана и дегазации угольных пластов скважинами.

Материалы исследований. Методы физического моделирования аэродинамических процессов в горных выработках и выработанных пространствах являются очень трудоёмкими и в настоящее время редко используются [1, 2]. Наиболее эффективными являются методы аналитических и численных исследований различных процессов на ЭВМ, в частности, процессов фильтрации метана через породные толщи из сближенных пластов при их дегазации и газовыделении в горные выработки.

На рис. 1 приведена схема дегазации выработанного пространства и сближенных пластов скважинами, пробуренными в купола обрушения пород.

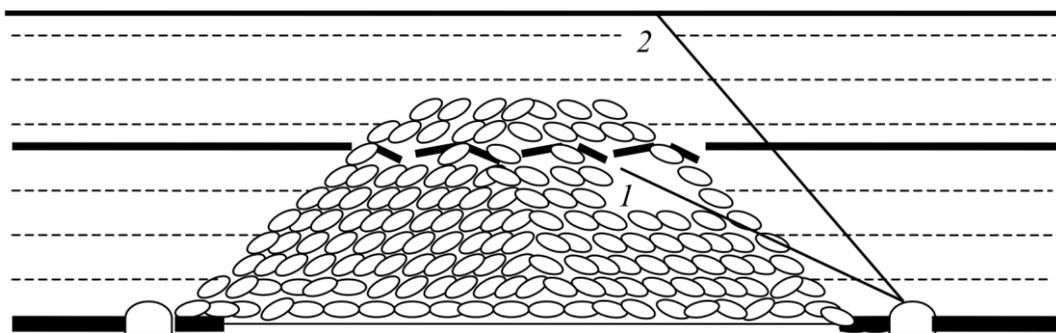


Рис. 1. Схема дегазации скважинами выработанного пространства (1) и сближенных пластов (2)

Рассмотрим влияние режимов работы скважин на газовыделение из сближенных пластов. Используем уравнение фильтрации через породную толщу [2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) + vj = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – пространственные координаты, направленные соответственно вдоль простирания разрабатываемого пласта, по восстанию пласта и по нормали к нему, м; P – давление, Па; k_x, k_y, k_z – коэффициенты проницаемости пород соответственно в направлениях x, y, z , м²; j – интенсивность внутренних источников газовыделения из сближенных пластов в единице объема, кг/(с·м³); v – кинематическая вязкость, м²/с.

Так как больше всего интересует распределение давления вглубь выработанного пространства по простиранию разрабатываемого пласта, представим при постоянных коэффициентах проницаемости часть членов уравнения (1) в конечных разностях:

$$k_x \frac{d^2 P}{dx^2} + k_y \frac{P_2 - 2P + P_3}{\Delta y^2} + k_z \frac{P_1 - 2P + P_0}{\Delta z^2} + vj = 0, \quad (2)$$

где P_2 и P_3 – давления на концах лавы по падению пласта, Па; P_1 – давление на контакте разгруженной и неразгруженной зоны по нормали к разрабатываемому пласту, Па.

В силу непроницаемости неразгруженных зон примем $P_1 = P_2 = P_3 = P$. В этом случае уравнение (2) с учетом $\Delta z = H$ принимает вид

$$k_x \frac{d^2 P}{dx^2} + k_z \frac{P_0 - P}{H^2} + vj = 0. \quad (3)$$

Здесь H – толщина разгруженной породной толщи, м. Интенсивность источников газовыделения со всех сближенных пластов в единице объема во вто-

рой зоне можно представить как [3, 4] суммарную функцию газовыделения из частиц угля в каждом пласте во времени $t = x/V$:

$$j(x) = \frac{\rho \bar{\delta}}{(\bar{\delta} - 1)HL} \sum_{i=1}^n \frac{q_{ci}}{E_{Bi}} [\exp(-x/E_{Bi}) - \exp(-\bar{\delta}x/E_{Bi})], \quad (4)$$

где ρ – плотность метана, кг/м³; $\bar{\delta}$ – отношение коэффициентов десорбции и диффузии метана; L – длина лавы, м; n – количество сближенных пластов; q_{ci} – суммарный дебит метана с i -го сближенного пласта, м³/с; x_{mi} – расстояние от забоя лавы до максимума газовыделения с i -го сближенного пласта, м; V – скорость подвигания забоя лавы, м/сут.

Подставляя выражение (4) в уравнение (3), получим

$$k_x \frac{d^2 P}{dx^2} + \frac{k_z}{H^2} (P_0 - P) + \frac{\mu \bar{\delta}}{(\bar{\delta} - 1)HL} \sum_{i=1}^n \frac{q_{ci}}{E_{Bi}} [\exp(-x/E_{Bi}) - \exp(-\bar{\delta}x/E_{Bi})] = 0, \quad (5)$$

где $\mu = \rho v$ – динамическая вязкость метана, кг/(м·с).

Примем, что при работе скважин создаётся давление $P = P_1$ в месте отбора газа. Тогда для уравнения (5) граничными условиями при работе, например, двух скважин будут условия:

$$1) \frac{dP(0)}{dx} = 0; \quad 2) P(x_1) = P_1; \quad 3) P(x_2) = P_1; \quad 4) P(\infty) = P_0, \quad (6)$$

где x_1 и x_2 – расстояние скважин от забоя лавы, м.

Очевидно, можно количество скважин увеличивать сколько угодно, создавая разрежения P_1 в месте отбора газа. Пока ограничимся двумя скважинами и одним сближенным пластом. В этом случае решение уравнения (5) с условиями (6) будем искать в виде

$$P(x) = P_0 + A_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{k_z}{k_x}} x / H\right) + A_2 \exp\left(\sqrt{\frac{k_z}{k_x}} x / H\right) + B_1 \exp(-x/x_{m1}) + B_2 \exp(-\bar{\delta}x/x_{m1}), \quad (7)$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – константы интегрирования, Па.

Константы интегрирования A_1 и A_2 найдём, используя граничные условия (6), на основании чего для первого участка ($0 < x < x_1$) найдём:

для первого участка ($0 < x < x_1$):

$$A_1 = \frac{P_1 - P_0 - B_1[\exp(x_1/H)H/x_{m1} + \exp(-x_1/x_{m1})]}{\exp(-x_1/H) + \exp(x_1/H)} - \frac{B_2[\exp(\bar{\delta}x_1/H)H\bar{\delta}/x_{m1} + \exp(-\bar{\delta}x_1/x_{m1})]}{\exp(-x_1/H) + \exp(x_1/H)},$$

$$A_2 = A_1 + H(B_1/x_{m1} + B_2\bar{\delta}/x_{m1}); \quad (8)$$

для второго участка ($x_1 < x < x_2$):

$$A_1 = \frac{(P_1 - P_2)[1 - \exp((x_1 - x_2)/H)] - B_1[\exp(-x_1/x_{m1}) - \exp(x_1/H - x_2(1/H + 1/x_{m1}))]}{\exp(-x_1/H) - \exp(x_1/H) \exp(-2x_2/H)} - \frac{B_2[\exp(-\bar{\delta}x_1/x_{m1}) + \exp(x_1/H - x_2(1/H + \bar{\delta}/x_{m1}))]}{\exp(-x_1/H) - \exp(x_1/H) \exp(-2x_2/H)},$$

$$A_2 = \exp(-x_2/H) \{P_1 - P_0 - A_1 \exp(-x_2/H) - [B_1 \exp(-x_2/x_{m1}) + B_2 \exp(-\bar{\delta}x_2/x_{m1})]\}; \quad (9)$$

для третьего участка ($x_2 < x < \infty$):

$$A_1 = \exp\left(\sqrt{\frac{k_z}{k_x}} x_2 / H\right) [P_1 - P_0 - B_1 \exp(-x_2/x_{m1}) - B_2 \exp(-\bar{\delta}x_2/x_{m1})],$$

$$A_2 = 0. \quad (10)$$

Константы интегрирования B_1 и B_2 находятся путём подстановки предполагаемого решения (5) в уравнение (3) и равны

$$B_1 = -\frac{\mu \bar{\delta} q_{c1}}{(k_x/x_{m1}^2 - k_z/H^2)(\bar{\delta} - 1)HLx_{m1}},$$

$$B_2 = \frac{\mu \bar{\delta} q_{c1}}{(k_x \bar{\delta}^2/x_{m1}^2 - k_z/H^2)(\bar{\delta} - 1)HLx_{m1}}. \quad (11)$$

Несмотря на громоздкий вид полученного решения задачи дегазации разгруженного горного массива, содержащего сближенные пласты, оно позволяет моделировать распределение давления и газовыделения в выработанное пространство при работе не только одной или двух скважин, а и любого их количества, так как коэффициенты (8)–(10) годятся для расчёта любых промежутков между внутренними скважинами на произвольных их расстояниях от забоя x_1 и x_2 . При этом может моделироваться газовыделение из любого количества сближенных пластов.

На основе разработанной математической модели и полученных аналитических зависимостей выполнено моделирование влияния режимов работы дегазационных скважин на распределение давлений и газовыделения из угольно-породного массива в обрушенную зону выработанного пространства. Моделирование выполнялось вначале при одном сближенном пласте.

Включение в работу двух скважин с вакуумом 10 кПа (рис. 2), расположенных друг от друга и от забоя на расстояниях 30 м позволило расширить зону их влияния до 100 м. Однако, как видно из рис. 2, снижение избыточного давления и, следовательно, газовыделения в этом случае незначительно.

В то же время, как показали результаты моделирования, при средней и высокой проницаемости угольно-породного массива, с помощью дегазации можно извлечь значительно большее количество метана. Как видно на рис. 3, избыточное давление при дегазации резко снижается и становится отрицательным по отношению к атмосферному давлению.

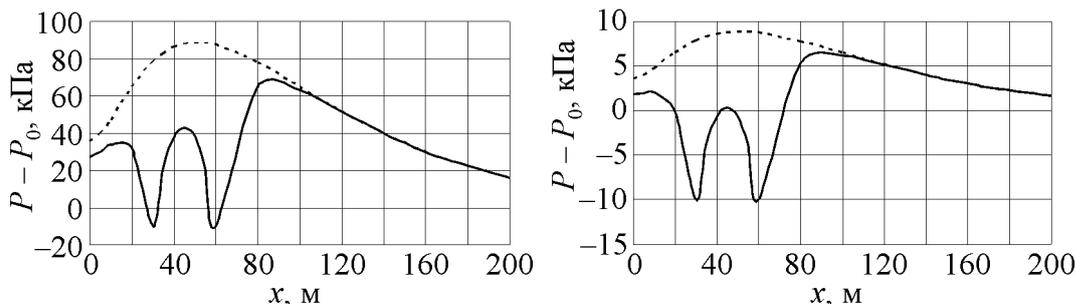


Рис. 2. Распределение избыточного давления в угольно-породном массиве со средней проницаемостью без дегазации (штриховая линия) и при дегазации двумя скважинами (сплошная линия)

Рис. 3. Распределение избыточного давления в угольно-породном массиве со средней проницаемостью без дегазации (штриховая линия) и при дегазации двумя скважинами (сплошная линия)

Это говорит о том, что в окрестности скважин образуются зоны с обратным током газов из выработанного пространства. Такая ситуация приводит к подсосам воздуха и снижает концентрацию метана в скважинах и дегазационном трубопроводе.

Пересчёт давлений на интенсивность газовыделения в выработанное пространство и в скважины (рис. 4) показывает, что при вакууме $\Delta P = 10$ кПа и при средней проницаемости $k_x = 10^{-13}$ м² угольно-породного массива работа двух скважин позволяет извлечь почти весь метан на длине до 70 м по простиранию пласта.

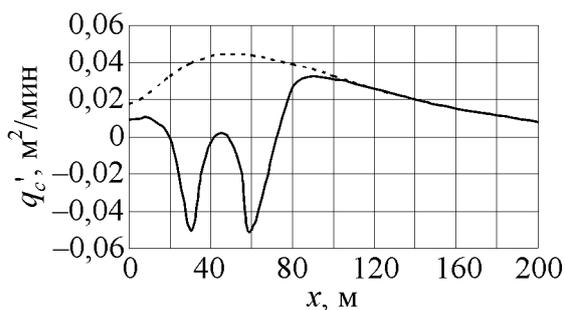


Рис. 4. Распределение газовыделения в угольно-породном массиве со средней проницаемостью без дегазации (штриховая линия) и при дегазации двумя скважинами (сплошная линия)

Как видно на рис. 4, лишь вблизи забоя на расстоянии 20 м некоторая часть метана будет поступать в выработанное пространство, минуя скважины. Зато в окрестности скважин воздух будет подсасываться к ним в радиусе 10 м. Поэтому следует определять оптимальный режим работы скважин, чтобы извлекать максимальное количество метана при минимальном подсосе воздуха.

Выводы

Получены аналитические зависимости и выполнено математическое моделирование процессов газовыделения в выработанное пространство из сближенных пластов при отсутствии и наличии дегазации, что даёт возможность определить оптимальные режимы работы скважин.

1. Пучков Л.А. Динамика метана в выработанных пространствах / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина. – М.: Изд-во МГГУ, 1995. – 313 с.
2. Морев А.М. Дегазация сближенных пластов / А.М. Морев, И.И. Евсеев. – М.: Недра, 1975. – 168 с.
3. Березовский Н.А. Математические модели процессов диффузии, сопровождаемой абсорбцией и химическими реакциями / Н.А. Березовский // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения. – Киев: Ин-т математики НАН Украины, 1998. – С. 29.
4. Греков С.П. Истечение метана из частиц угля / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, М.В. Ильк и др. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2002. – С. 74–88.

С.П. Греков, І.Г. Старікова, А.Л. Іванніков

ДЕСОРБЦІЯ КАПТОВАНОГО МЕТАНУ З ЗБЛИЖЕНИХ ПЛАСТІВ І ЙОГО ДИФУЗІЯ ЧЕРЕЗ ПОРОДНІ ТОВЩІ

Розглянуто десорбцію метану з пластів, що зближуються, при їх дегазації, і його дифузія через порідні товщі у бік виробленого простору. Отримано аналітичні вирішення закономірностей розподілу метану на виході з групи пластів, що зближуються, і в порідних товщах. На основі розробленої математичної моделі і отриманих аналітичних залежностей виконано моделювання впливу режимів роботи свердловин дегазацій на розподіл тиску і газовиділення з вугільно-порідного масиву в обрушену зону виробленого простору.

Ключові слова: метан, десорбція, дифузія, математичне моделювання, вугільні пласти, дегазаційні свердловини

S.P. Grekov, I.G. Starikova, A.L. Ivannikov

DESORPTION CAPTURED METHANE FROM CONTIGUOUS LAYERS AND DIFFUSION THROUGH ROCK STRATA

Considered desorption of methane reservoirs that converge at their decontamination and its diffusion through the thickness of rock toward the gob. Analytical solution patterns of distribution of methane output from the group of layers that converge in the pedigree sequences. Based on the developed mathematical models and analytical dependences simulations of the impact of operating modes degasification wells on the distribution of pressure and gas emission from coal-rock mass in the collapsed zone out space.

Keywords: methane, desorption, diffusion, mathematical modeling, coal seams, degasification wells