

УДК 622.831

ПРОГНОЗ ВЫБРОСООПАСНОСТИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА ПО ВЕЛИЧИНЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ

Сирота Д. Ю., к.т.н., доцент кафедры ФПиСГ КузГТУ,
Кошкин А.С., студент группы ФПс-191, V курс

Научный руководитель: Сирота Д. Ю., к.т.н., доцент.
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Аннотация. В заметке рассматривается метод прогноза газодинамических явлений, основанный на измерении давления газа на обнажённой поверхности выработки. Величина давления определяется количеством десорбированного газа из элемента объёма угольного массива. В основу положена теоретические разработки, предложенные А.Т. Айруни.

Для обоснования была рассмотрена простейшая физико-математическая модель десорбции газа из шарообразных угольных частиц; разработаны программы численного решения полученных уравнений; разработаны программа решения нелинейного уравнения.

Ключевые слова. Прогноз газодинамических явлений; десорбция газа; численные методы; уравнения математической физики.

Введение. Одним из природных факторов, неблагоприятно влияющих на эффективность деятельности угольных шахт, является высокая природная газоность угольных пластов, которая обуславливает наиболее опасные проявления сил горного давления – внезапные выбросы угля и газа. С увеличением глубины разработки угольных пластов повышается частота интенсивность суфлярных выделений рудничных газов и внезапных выбросов газа и угля.

Выбросы происходят из угольных пластов с высокой газоностью при давлении газа свыше 1 МПа, имеющих изменчивую структуру и пачки тектонически препарированного угля и обладающих слабой механической прочностью. Таким образом, для прогнозирования времени возникновения внезапного выброса необходимо увязать временное изменение давления в угольном массиве и процесс отрыва газа от угольного вещества.

Рассмотрим физический процесс массопереноса при неравновесных сорбционных процессах, происходящим в угольном веществе, которые влияют на ряд газодинамических ситуаций при разработке угольных пластов [1].

В основе описания лежит следующая модельная фрактальная структура угольного вещества. Основу угольного вещества составляют сорбционные

частицы, их совокупность образует суперсорбционные частицы, которые окружены переходными порами и каналами; совокупность суперсорбционных частиц формирует фильтрационно-сорбционные частицы, которые так же окружены порами и каналами; совокупность же последних образует исследуемую частицу угольного вещества. При этом размеры первичных сорбционных частиц весьма мало – менее 1 мкм; а количество первичных микропор велико – 10^{18} 1/г.

Первая модель. Предположим, что угольная частица состоит только из суперсорбционных частиц шарообразной формы. В этом случае количество газа, выделившееся из единицы объема угля в процессе десорбции будет определяться по формуле:

$$\Delta Q = \frac{3}{R^3} \int_0^R [C(r,0) - C(r,t)] \cdot r^2 dr, \quad (1)$$

где величина $C = C(r,t)$ – концентрация сорбированного газа в частице в произвольный момент времени и пространства. С течением времени эта величина уменьшается с некоторого начального состояния до нуля.

Предполагая, что сорбционная частица имеет шарообразную форму, закономерное измерение концентрации $C(r,t)$ подчинено уравнению диффузии в сферической системе координат [2]:

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 C(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right], \quad (2)$$

где $D = 4,32 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент диффузии, м²/сут; начальные и граничные условия определяются общими выражениями $C(r,0) = \varphi(r)$, $C(R,t) = \psi(t)$ при этом должно выполняться условие $\varphi(R) = \psi(0)$. Далее будем использовать уравнение сорбции Ленгмюра $C(R,t) = abp(t)/[1+ap(t)]$, где $a = 0,01$ 1/МПа, $b = 21,15$ мл/г [1].

Решение (2) построим, следуя [2]. Сделав вспомогательную замену $W = r \cdot C$, получим базовое одномерное уравнение теплопередачи с начальными и краевыми условиями, решение которого разбирается, например, в курсе уравнений математической физики специальности 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства» КузГТУ [3]:

$$\frac{\partial W(r,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W(r,t)}{\partial r^2}, \quad W(0,t) = 0, \\ W(R,t) = R \cdot \psi(t), \quad W(r,0) = r \cdot \varphi(r). \quad (3)$$

Здесь возможны три случая задания начальных и граничных условий.

Случай 1. Постоянная начальная концентрация во всём объёме шара $\varphi(r) = \varphi_0$ и $\psi(t) = \psi_0$, при этом $\varphi_0 > \psi_0$, чтобы движение газа происходило из частицы в окружающую среду.

Случай 2. Переменная начальная концентрация во всём объёме шара $\varphi(r) > \psi_0$, где по-прежнему $\psi(t) = \psi_0$.

Случай 3. Произвольные, но положительные функции $\varphi(r)$, $\psi(t)$, при этом по-прежнему $\varphi(r) > \psi(t)$.

Поставленные задачи удобнее решать численно. Зададим две равномерные сетки по времени и пространству: $r_i = h_r(i-1)$, $t_j = h_t(j-1)$, $i, j = 1, 2, \dots, N, M$, где правые границы сеток $R = 0,0375$ м и $T = 2$ сут. В случае ситуации 1 положим $\varphi_0 = 1,0$ мл/г и $\psi_0 = 0,001$ мл/г. Непосредственное решение уравнения (3) будем производить по неявной схеме Крэнка-Николсон, которая обладает вторым порядком точности, абсолютно устойчива и позволяет рассматривать произвольные шаги h_r и h_t . Расчётная схема для перехода от i -го временного слоя к $i+1$ имеет вид:

$$\sigma W_{j-1}^{i+1} - 2(\sigma + 1)W_j^{i+1} + \sigma W_{j+1}^{i+1} = 2(\sigma - 1)W_j^i - \sigma(W_{j-1}^i + W_{j+1}^i), \quad (4)$$

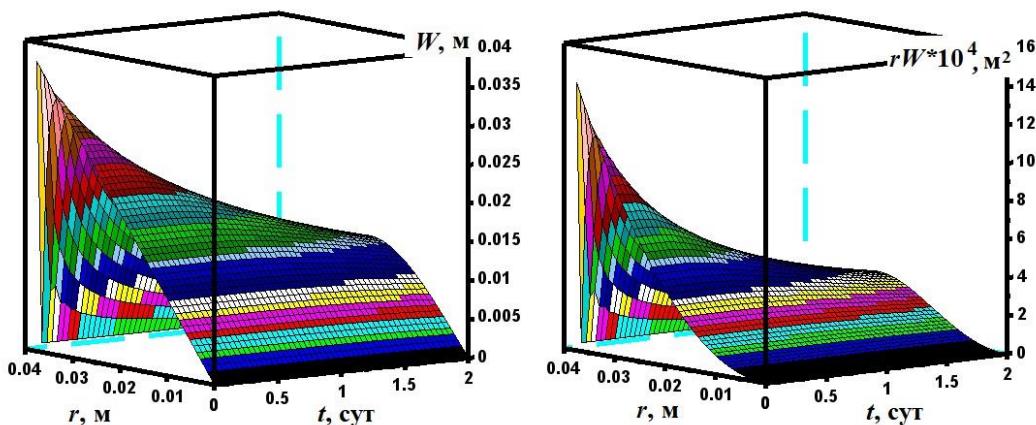
где $\sigma = h_t \cdot D \cdot h_r^{-2}$, нижний индекс соответствует сетке по пространству, а верхней – по времени.

Схема (4) представляет собой трёхдиагональную систему уравнений, решение которой будем производить методом прогонки Томаса. Расчётные программы указанных алгоритмов были разработаны в рамках курса «Уравнения математической физики» и имеют вид готовых программных единиц на встроенным языке программирования Matlab/Scilab [3].

Далее для каждого поперечного сечения, которое будет соответствовать фиксированному моменту времени, произведём вычисление определённого интеграла из (1). Поскольку мы ограничены в использовании только рассчитанными значениями функции $rW(r, t)$, то будем использовать 5-ти точечную формулу Ньютона-Котеса-Буля:

$$U(t) = \int_0^R C(r, t) r^2 dr = \int_0^R rW(r, t) dr = \\ = \frac{2h_r}{45} \sum_{i=1}^{n-4} [7 \cdot (F_i + F_{i+4}) + 32 \cdot (F_{i+1} + F_{i+3}) + 12 \cdot F_{i+2}], \quad F_i = r_i \cdot W_i. \quad (5)$$

Приведём поверхности двух функций: $W(r, t)$ и $rW(r, t)$.



– рисунок 1.
Поверхности решения уравнения (3)

Анализируя обе поверхности, можно сделать следующие выводы:

1) Поверхности соответствуют ситуации несогласованности начальных и краевых условий, что отражается в наличии скачка (разрыва) при $r = R$.

2) Происходит уменьшение значений функции в два раза за 2 суток процесса теоретической десорбции.

3) Так как функция распределения начальной концентрации вынужденно должна содержать убывающий тренд значений на интервале $0,001 \leq \varphi_0 \leq 1,0$, то максимальное значение функция $W(r, t)$ достигнет при равномерном распределении давления. Таким образом, рассматривать случай 2 нет необходимости. Он будет заведомо хуже в плане продуктивности газоизделия. Учитывая формулу Ленгмюра, получим значения для начального и граничного давлений: $p_o = 4,96$ МПа и $p_k = 0,005$ МПа.

Вторая модель. Предположим, что угольная частица состоит из фильтрационно-сорбционных частиц шарообразной формы, окружённых транспортными каналами, истечение газа из которых при изменении давления вокруг частиц определяется законом ламинарного движения.

Если указанные частицы образуют только внешнюю поверхность фильтрационно-сорбционных частиц, то давление газа в этом случае меняется не мгновенно на границе частицы, как выше, а по закону вида

$$p(t) = p_k + (p_o - p_k) \exp(-t/k_\Phi), \quad (6)$$

где в нашем случае $p_o = 4,96$ МПа и $p_k = 0,005$ МПа, $k_\Phi = 1,6898 \cdot 10^{-3}$ сут.

Если же суперсорбционные частицы заполняют весь объём фильтрационно-сорбционных частиц, то (8) трансформируется в

$$p(t) = p_k + (p_o - p_k) \exp(-t/k_\Pi), \quad (7)$$

где в нашем случае $p_o = 4,96$ МПа и $p_k = 0,005$ МПа, $k_\Pi = 0,01597$ сут.

Таким образом, начальные и граничные условия уравнения (3) дополняется выражением $C(R, t) = abp(t)/[1 + ap(t)]$, где $a = 0,01$ 1/МПа, $b = 21,15$ мл/г, а $p(t)$ определяется по формуле (8). Можно отметить, что $\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p_k$, а $p(0) = p_o$, а значит с течением времени отличие второй модели от первой будет уменьшаться. Здесь можно дать примерные оценки временного интервала, после которого произойдёт указанное событие. Из равенства $\exp(-t/k) \approx 10^{-6} \Rightarrow t \approx 13,8155 \cdot k$, при $k = k_\Phi$ получим $t_\Phi = 0,023$ сут, а при $k = k_\Pi$ получим $t_\Pi = 0,221$ сут. Так же можно отметить, что отличие механизмов (6) и (7) при заданных параметрах давления будет проявляться лишь в первые 2,5 часа от начала процесса десорбции. Таким образом, в первые полчаса процесса имеет смысл различать условия (6, 7), в первые 5 часов имеет смысл только модель (7), а после этого остаётся существенной только базовая первая модель.

Заметим, что в [1] А. Т. Айруни рассматривает аналитическое решение предложенного уравнения с учётом условий (6, 7). При этом допускается неоправданное использование оценок сверху без какого-либо анализа вносимых погрешностей. Существенное влияние использование такого сорта оценок

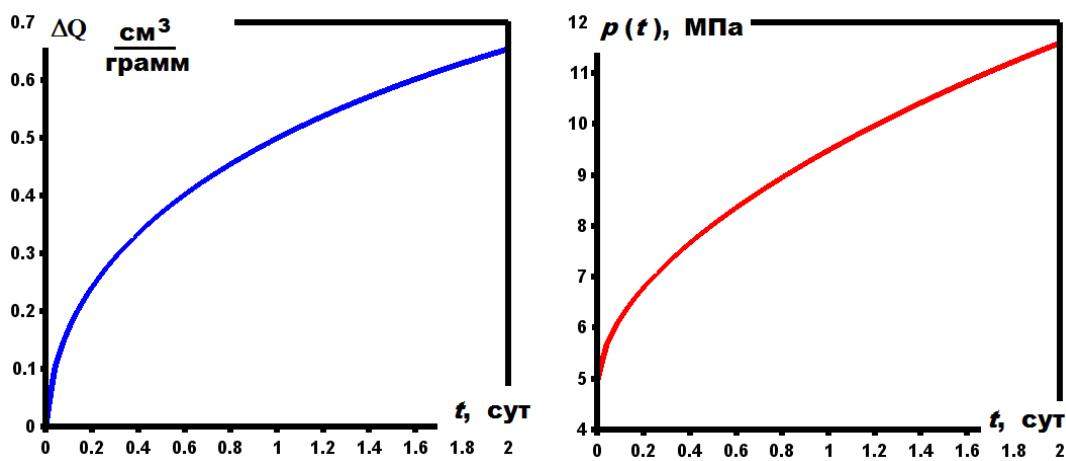
приводит к неоправданному различию условий (6, 7) и влиянию этих условий на окончательное решение.

Критерием безопасности по газовому фактору является неравенство $p(t) < p_{kp}$, где $p_{kp} = 1$ МПа для маломощных пластов, а для мощных пластов $p_{kp} = 1,9$ МПа – для мягких углей; $p_{kp} = 4,3$ МПа – для крепких углей; $p_{kp} = 7,6$ МПа – для антрацитов. Для определения давления будем использовать его взаимосвязь с количеством выделенного газа:

$$p(t) = p_o \exp[(1-\mu)\rho_y \Delta Q / \mu], \quad (8)$$

где μ – пустотность выбранного объема, $\rho_y = 1,3$ – плотность угля, г/см³.

Приведём графики количества выделенного газа по формуле (1) и кривую давления по формуле (8) (рисунок 2).



– рисунок 2.

Графики количества выделенного газа и изменения давления

Таким образом, определение времени достижения критического давления сводится к решению уравнения $p(t) = p_{kp}$. Несмотря на внешнюю простоту этого уравнения, оно содержит неустранимые недостатки в виде определения набора параметров: начальное и краевое давление p_o и p_k МПа, пустотность μ , которые существенно влияют на конкретное решение указанного уравнения.

Список литературы

1. Айруни, А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. – М. «Наука», 1987 г. – 310 с.
2. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики. – М. «Высшая школа», 1970 г. – 722 с.
3. Сирота, Д. Ю. Уравнения математической физики: учебное пособие для студентов специальности 21.05.05 "Физические процессы горного или нефтегазового производства" / Д. Ю. Сирота ; Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. Кемерово: КузГТУ, 2022. 1 файл (6,04 Мб). ISBN 978-5-00137-341-4.