БОНДАРЕНКО Н.В.[1], КУЦЕРУБОВ В.М.[2], БОЛОТСКИХ Т.В.[3], ЮСИПУК Ю.А.[4]

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Построена математическая модель неустановившейся фильтрации газа при гидродинамической обработке угольного массива. Учитывая полученное решение и зная исходную газоёмкость угольного массива, можно в каждый момент времени провести оценку степени дегазации угля.

The mathematical model of the unset filtration of gas under the hydrodynamic treatment of coal massif has been designed. Taking into account the results we obtain and knowing the initial gas capacity of coal massif, it is possible to estimate the degree of coal degassing at moment.

После проведения гидродинамической обработки, начинается процесс газовыделения в скважину с последующим выносом его в скважину, пробуренную с дневной поверхности.

Для оценки количества газа, отданного пластом можно воспользоваться уравнениями, описывающими неустановившийся процесс фильтрации газа. Эти уравнения, учитывающие процесс десорбции газа получены в работе [1] для многокомпонентных сред и в нашем случае могут быть записаны в виде:

---

[1]**Канд. техн. наук, доцент Бондаренко Н.В. – Красноармейский индустриальный институт Донецкого национального техническкого университета**

[2] **Канд. техн. наук, доцент Куцерубов В.М. – Красноармейский индустриальный институт Донецкого национального техническкого университета**

[3] **Инженер Болотских Т.В. – Красноармейский индустриальный институт Донецкого национального технического университета**

[4] **Ассистент Юсипук Ю.А. – Красноармейский индустриальный институт Донецкого национального технического университета**

$$\Delta p^{e} = \frac{\mu}{k}\left[m + \frac{a_0 b_0 R_Г T}{\left(1 + a_0 p\right)^2}\right]\frac{1}{p}\frac{\partial p^2}{\partial t} \qquad (1)$$

$$p = \rho\, R_г\, T \qquad (2)$$

$$\bar{v} = -\frac{k}{\mu}\, grad\ p \qquad (3)$$

где Δ – оператор Лапласа, μ – вязкость газа, k – проницаемость угля, усреднённая величина которой в области гидрообработки определяется из решения предыдущей задачи; m – пористость, $R_г$ – газовая постоянная, T – температура пласта; a_0, b_0 – сорбционные постоянные Ленгмюра, определяемые для каменных углей по изотермам сорбции метана, полученными экспериментально, либо приближёнными расчётными методами по данным технического анализа проб угля.

С достаточной степенью точности можно считать, что вмещающие породы непроницаемы. Тогда процесс неустановившейся фильтрации газа в сторону обнажения будет одномерным. Обозначим через l_* границу фильтрационной области в глубине массива.

В отличие от рассмотренных ранее задач, будем считать, что в начальный момент времени внутри фильтрационной области $(0, l_*)$ возникает неизвестная граница l, на которой давление газа равно исходному пластовому давлению. Эта граница движется и с течением времени достигает границы фильтрационной области l_*. Таким образом возникают две задачи неустановившейся фильтрации газа, которые в совокупности описывают процесс газовыделения в сторону обнажения.

Для решения первой задачи формулировались следующие краевые и начальные условия:

$$p(0, t) = p_0; \qquad p(l, t) = p_* \qquad (4)$$

$$p(x, 0) = p_* \qquad (5)$$

Здесь p_0 – давление газа на обнажении; p_* - давление газа в угольном пласте в момент начала газовыделения; l – неизвестная граница. Для её определения формируется следующее кинематическое условие:

$$|v|_{x=e} = \frac{dl}{dt} \tag{6}$$

Соотношение (6) есть обыкновенное дифференциальное уравнение, решение которого определяет искомую границу l. Начальным условием уравнения (6) есть соотношение вида

$$l(0) = 0 \tag{7}$$

Решение нелинейного уравнения (1) будем стоить методом последовательных приближений. На первом шаге методом разделения переменных строится решение уравнения

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} = -\frac{\mu}{k}\left[m + \frac{a_0 b_0 R_Г T}{(1 + ap_*)^2}\right]\frac{1}{p_*}\frac{\partial p^2}{\partial t} \tag{8}$$

С неоднородными краевыми условиями (27) оно имеет вид:

$$p^2 = \frac{p_*^2 - p_0^2}{l}x + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\left(p_*^2 - p_0^2\right)}{n\pi}\sin\frac{n\pi x}{l}\exp\left(-\frac{n^2\pi^2 t}{l^2 b_*^2}\right) + p_0^2$$

(9)

Где: $$b_*^2 = \frac{\mu}{k}\left[m + \frac{a_0 b_0 R_Г T}{(1 + ap_*)^2}\right]\frac{1}{p_*}$$

Для построения решения нелинейного уравнения (1) введём обозначение:

$$\Phi(p) = \left[m + \frac{a_0 b_0 R_Г T}{(1 + ap)^2}\right]\frac{1}{p} \tag{10}$$

Подставим в функцию Ф(р) значения давления, представленные соотношением (9).

Тогда в окрестности i-й точки мы будем иметь линейные уравнения типа (8). Аналогично строятся последующие приближения. На основании теорем существования и единственности такого типа нелинейных уравнений в частных производных, построенное таким методом решение и будет решением нелинейного уравнения (1).

Зная функцию распределения давления p(x, t) в области фильтрации (0, l) неизвестную границу l определим из решения обыкновенного дифференциального уравнения (6) с начальными условиями (7).

Полученная функция распределения p(x, t) описывает процесс газовыделения в сторону обнажения до момента времени $t = t_0$, когда подвижная граница l достигает границы фильтрационной области l_*. Построенное решение позволяет определить время t_0, оценить количество выделившегося газа.

Начиная с момента времени $t = t_0$ процесс фильтрации описывается тем же уравнением движения газа (1), но с другими начальными и краевыми условиями. Их можно представит в виде:

$$p(0, T) = P_0, \qquad \left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{x=l_*=0} \tag{11}$$

$$p(x, 0) = f(x, t_0) \tag{12}$$

Здесь $T = t - t_0$; $f(x, t_0)$ – функция распределения давления газа, полученная при решении первой задачи и вычисленная в момент времени $t = t_0$ ($T = 0$), имеющая вид:

$$f(x,t_0) = \frac{p_*^2 - p_0^2}{l_*}x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\left(p_*^2 - p_0^2\right)}{n\pi} \sin\frac{n\pi x}{l_*} \exp\left(-\frac{n^2\pi^2}{l^2 b_i^2}\right) + p_0^2 \tag{13}$$

где $b_i^2 = \mu\Phi(p_i)/k$; p_i – давление газа в i-м приближении при решении первой задачи.

Решение краевой задачи (1), (11), (12) строится с помощью вышеизложенного метода. После ряда преобразований функция p(x, t) в области (0, l_*) в первом приближении запишется в виде:

$$p^2(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2l_*}\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)\pi^2 T}{4l_*^2 b^2}\right) + p_0^2$$

(14)

Где: $b^2 = \mu\Phi(p(x, t_0))/k$,

$$B_n = 4l_*\left(p_*^2 - p_0^2\right)\left((-1)^n + 0{,}5(2n+1)^2\right) \times \sum_{m=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{m^2 n^2 t_0}{l_*^2 b_i^2}\left(\left(2(m-n)-1\right)^{-1} \sin A_m\right) m^{-1}\right), \tag{15}$$

$$A_m = \left(2\left(m-n-1\right)\frac{\pi}{2}\right) - \left(2\left(m+n\right)+1\right)^{-1}\sin\frac{\left(\left(2n+k\right)+1\right)}{\pi/2}$$

Последующие приближения строятся следующим образом. Используя соотношение (14), вычисляется функция Ф(р) в каждой точке области фильтрации (0, l_*). Затем в окрестности i-ой точки, после подстановки значения функции Ф(р) в уравнение (1) имеем линейное уравнение в частных производных, решение которого формально имеет вид (14). Последующее приближение строится аналогично. Этот процесс сходится и в пределе является искомым решением сформулированной задачи. Зная функцию распределения давления p(x, t), скорость газовыделения вычисляется по формуле (3).

Таким образом, построенная математическая модель позволяет до проведения гидродинамической обработки угольного массива провести оценку его параметров и выбрать оптимальный режим нагнетания.

Учитывая решение задачи неустановившейся фильтрации газа, и зная исходную газоёмкость угольного массива, можно в каждый момент времени провести оценку степени дегазации угля, т.е. эффективности данного мероприятия.

Литература

[1] Напряжённо-деформированное состояние анизотропного массива горных пород и исследование процесса газовыделения при разработке угольного пласта. А.А. Левшин, С.И. Егоров, Н.В. Бондаренко, Донецк: ЦБНТИ, 1993

Рецензент: Заведующий отделом УСГМ ИФГП НАН Украины д.т.н. В.Н. Ревва