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

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Проведена оценка основных параметров гидродинамического воздействия в зависимости от темпа и времени нагнетания, а также физико-механических свойств, глубины залегания угольного пласта. С этой целью построена математическая модель двухкомпонентной упругой насыщенной среды.

In article the analysis of basic parameters of hydrodynamic effect depending on the rate and time of water infusion and also physical and mechanical properties, depth of bedding of coal seam. For this purpose the mathematical model of the two-component elastic saturated environment has been designed.

При разработке газоёмких угольных пластов возникает опасность выделения большого количества газа в выработанное пространство. Одним из мероприятий по снижению газовыделения является предварительная дегазация угольного массива с помощью скважин, пробуренных с дневной поверхности до пересечения угольного пласта с последующим бурением по пласту.

Известно, что в нетронутом угольном пласте даже с большой метаноёмкостью проницаемость очень мала. Поэтому для изменения величины проницаемости предлагается гидрообработка угольного

---

[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**

массива в режиме гидрорасчленения. Для определения ее параметров рассматривалась следующая задача.

Имеется угольный пласт, содержащий свободный газ в микро-макропорах и трещинах, давление которого равно $P_{пл}$. В угольном пласте вглубь массива пробурена скважина, длина которой во много раз превосходит её диаметр. В скважину нагнетается несжимаемая жидкость с постоянным расходом, равным Q. Считаем, что угольный скелет является изотропным по механическим свойствам и жидкость движется плоско-радиально. Угольный массив находится в гидростатическом поле сжимающих усилий интенсивности q (коэффициент бокового распора считаем равным единице). Скважина находится далеко от дневной поверхности и поэтому влияние движения жидкости на перераспределение напряжений в угольном скелете носит локальный характер. Математически задача может быть сформулирована как плоская задача теории упругости (в рамках плоской деформации) для плоскости с круговым отверстием радиуса r_c, моделирующим скважину. Плоскость на бесконечности сжимается усилиями q и равномерно распределённой по контуру отверстия сжимающей нагрузкой ($-P_н$), равной по величине давлению жидкости в скважине.

Сжимающие усилия q представим в виде:

$$q = -\gamma H(1 - m) - mp_{пл}, \qquad (1)$$

где: H – глубина проведения скважины;

γ – удельный вес пород;

m – пористость угля.

Обозначим через G_1 область, обработанную жидкостью, а через G_2 – область, дополняющую G_1 до плоскости. Считаем, что угольный массив изотропен по проницаемости. Тогда граница области G_1 представляет собой окружность неизвестного радиуса r_b.

При решении задачи будем учитывать возможность изменения коэффициента сопротивления b (величина, обратная проницаемости) в зависимости от деформации угольного скелета.

Считаем, что до нагнетания жидкости в нетронутом угольном массиве коэффициент сопротивления b есть величина постоянная и равная b_0. В процессе нагнетания несжимаемой жидкости и деформации угольного скелета он изменяется и имеет вид:

$$b = b_0 + \beta e + \alpha e_r, \tag{2}$$

где: $e = e_r + e_\theta$; α; β – коэффициенты, характеризующие влияние компонент деформации угольного скелета e_r, e_θ на проницаемость.

Уравнения, приведённые в третьей главе работы [1], и описывающие фильтрацию жидкости и напряжённо-деформированное состояние области G_1, в полярной системе координат (r, θ) для рассматриваемой задачи запишутся в виде:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - m_0 \frac{dp}{dr} = 0\,,$$

$$\frac{d}{dr}(rv_r) = 0\,,\ (b_0 + \beta e + 2\alpha e_r)v_r = -\frac{dp}{dr} \tag{3}$$

Где: $m_0 = m(1 - m)$.

Соотношения, связывающие компоненты напряжений угольного скелета с компонентами деформации, возьмём в виде закона Гука для изотропной среды:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda e + 2\mu e_r\,, \\ \sigma_\theta &= \lambda e + 2\mu e_\theta\,. \end{aligned} \tag{4}$$

Коэффициенты λ , μ связаны с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν известными соотношениями:

$$\lambda = E\nu / (1 + \nu)(1 - 2\nu); \qquad \mu = E / 2\,(1 + \nu). \tag{5}$$

Так как задача осесимметрическая, то величины, характеризующие напряжённо-деформированное состояние, являются только функциями текущей координаты r и, следовательно, компоненты деформации e_r, e_θ связаны со смещением u известными формулами [1], которые в полярной системе координат имеют вид:

$$e_r = \frac{du}{dr}, \qquad e_\theta = \frac{u}{r}, \qquad e_{r\theta} = 0\,. \tag{6}$$

Сформулируем граничные условия. Считаем, что при движении жидкость полностью вытесняет свободный газ. На границе раздела газ-жидкость ($r = r_b$) давление жидкости можно полагать равным давлению газа в нетронутом угольном пласте. Таким образом, при решении задачи имеем следующие граничные условия.

В области G_1:

$$\begin{aligned} &\sigma_r = -p_н, \quad p = p_н \quad при \quad r = r_c, \\ &\sigma_r = \sigma_b, \quad p = p_{пл} \quad при \quad r = r_b. \end{aligned} \tag{7}$$

В области G_2:

$$\begin{aligned} &\sigma_r = \sigma_b, \quad при \quad r = r_b, \\ &\sigma_r = q, \quad при \quad r = \infty. \end{aligned} \tag{8}$$

Неизвестная величина σ_b определяется из условия непрерывности компонент напряжений σ_e на границе областей G_1 и G_2, т.е.

$$\sigma^1_\theta = \sigma^2_\theta \text{ при } r = r_b, \tag{9}$$

Проинтегрировав систему уравнений (3) с учетом граничных условий (7, 8) получим аналитическое решение поставленной задачи в области G_1 в виде:

$$\begin{aligned} &e_r = k_1 C_1 r^{k_1-1} + k_2 C_2 r^{k_2-1} - b_0/2(\beta+\alpha) \\ &e_\theta = C_1 r^{k_1-1} + C_2 r^{k_2-1} - b_0/2(\beta+\alpha) \end{aligned}. \tag{10}$$

$$\begin{aligned} &\sigma_r = \sum_{j=1}^{2}\left[\lambda\left(k_j+1\right)+2\mu k_j\right]C_j r^{k_j-1} - \frac{b_0(\lambda+\mu)}{(\beta+\alpha)}, \\ &\sigma_\theta = \sum_{j=1}^{2}\left[\lambda\left(k_j+1\right)+2\mu\right]C_j r^{k_j-1} - \frac{b_0(\lambda+\mu)}{(\beta+\alpha)}, \end{aligned} \tag{11}$$

$$p = p_н + \sum_{j=1}^{2} M_j C_j \left(r_c^{k_j-1} - r^{k_j-1}\right). \tag{12}$$

Коэффициент M_j имеет вид:

$$M_j = C[\beta(k_j + 1) + 2ak_j]/(k_j - 1).$$

В области G_2 решение имеет вид:

$$\sigma_r = q - (q - \sigma_b)\left(\frac{r_b}{r}\right)^2,$$
$$\sigma_\theta = q + (q - \sigma_b)\left(\frac{r_b}{r}\right)^2. \qquad (13)$$

Таким образом, полученные соотношения (10-13) описывают напряжённо-деформированное состояние угольного скелета, распределение давления и поле скоростей жидкости в процессе нагнетания.

В решение вошли неизвестные величины r_b, C, C_1, C_2, σ_b, $p_н$.

Неизвестные величины r_b и $p_н$ определим из системы двух уравнений, одно из которых учитывает тот факт, что количество жидкости, принятой пластом, равно количеству закачанной за время t жидкости с заданным темпом закачки Q. Второе является кинематическим условием продвигания границы обработанной области вглубь угольного массива и имеет вид:

$$v_n\big|_{r=r_b} = \frac{dr_b}{dt},$$
$$r_b\big|_{t=0} = r_c. \qquad (14)$$

$$\frac{r_b}{r_c} = \sqrt{1 + Qt / r_c^2 \pi m L}\,. \qquad (15)$$

Используя соотношение (14,15) определим неизвестную постоянную C

$$C = Q/2\pi mL. \qquad (16)$$

Удовлетворяя граничным условиям (7) и учитывая условие (9), получим систему четырёх уравнений для определения неизвестных постоянных C_1, C_2, σ_b, $p_н$, вида

$$\sum_{j=1}^{2}\left[\lambda\left(k_j+1\right)+2\mu k_j\right]\cdot C_j r_c^{k_j-1}-\frac{b_0(\lambda+\mu)}{(\beta+\alpha)}=-p_н,$$
$$\sum_{j=1}^{2}\left[\lambda\left(k_j+1\right)+2\mu k_j\right]\cdot C_j r_c^{k_j-1}-\frac{b_0(\lambda+\mu)}{(\beta+\alpha)}=q_b, \qquad (17)$$
$$\sum_{j=1}^{2}\left[\lambda\left(k_j+1\right)+2\mu\ \right]\cdot C_j r_c^{k_j-1}-\frac{b_0(\lambda+\mu)}{(\beta+\alpha)}=2q-\sigma_b,$$
$$p_н=\sum_{j=1}^{2}M_j C_j\left(r_c^{k_j-1}-r_b^{k_j-1}\right)=p_{пл}$$

Построенное решение позволяет оценить давление гидроразрыва в зависимости от физико-механических свойств пласта. Действительно, при плоской деформации компонента напряжения σ_z связана с компонентами σ_r, σ_θ соотношениями вида:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \qquad (18)$$

Следовательно, давление жидкости, при котором имеет место гидроразрыв, может быть определено из соотношения [2].

$$P_{max} = |\sigma_z(r_0)| + \sigma_p + p_{пл}, \qquad (19)$$

где σ_z определяется по формуле (21) с учётом постороннего решения, вычисленное при $r = r_c$, так как наибольшее давление жидкости имеет место на контуре скважинами; σ_p – прочность угля на растяжение. При постоянной проницаемости формула (22) имеет вид:

$$P_{\max}=\frac{(1-\nu)(1-m)}{1-\nu-m}\left[2\nu\left(\gamma H-P_{пл}\right)+\sigma_p\right]+P_{пл} \qquad (20)$$

Эта формула позволяет определить критическое давление жидкости для конкретного угольного пласта в зависимости от физико-механических свойств угля. Это позволяет управлять процессом нагнетания жидкости в заданном режиме.

Полученные результаты позволяют в первом приближении выбрать оптимальный режим гидрообработки в зависимости от свойств массива и режима нагнетания жидкости в скважину.

Литература

[1] Левшин А.А., Егоров С.И., Бондаренко Н.В. Основные уравнения механики анизотропного массива горных пород. – Донецк, ЦБНТИ, 1993, 58с.

[2] Христианович С.А., Желтов Ю.П. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта. – Изв. АН СССР, Отдел техн. наук, 1955, №5, с. 3-41.

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