

Рис. 4- Влияние параметров волны давления на радиус зоны окружающих трещин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко В.А., Вольницкая Э.М. Восстановление производительности водозаборных скважин. - Л.: Недра, 1986. - 112 с.
2. Малишевский В.Т., Тарабара В.П., Цуркин В.Н., Швец И.С. Регенерация скважин на воду погружным электровзрывным устройством // Водоснабжение и санитарная техника. - 1990. - №12. - С. 13.
3. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швец И.С., Онищенко Л.И. Разрядно-импульсное оборудование для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин // Вестник национального технического университета «ХПИ». — 2002. — №7. — С. 92 – 102.
4. Сизоненко О.Н., Швец И.С., Кучернюк А.В. Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих скважин // Нефтяное хозяйство. — №12. — С.133 – 135.
5. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. - М.: Недра, 1984. - 232 с.
6. Косенков В.М. Математическая модель динамики пористых насыщенных жидкостью упруго-пластических сред при электрическом взрыве в воде // Проблемы прочности. - 1997. - №1. - С. 87-96.
7. Механический эффект взрыва в грунтах. / Под ред. И. А. Лучко. — К.: Наукова думка, 1989. — 232 с.
8. Майнчен Дж., Сак С. Метод расчета «Тензор» // Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967. — С. 185-211.

УДК 662.831.322.1

К.К. Софийский, А.В. Чернай,
Б.В. Бокий, Д.П. Силин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАПРЯЖЕННЫЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ СРЕДЫ

Робота присвячена розробці математичної моделі розрахунку процесу гідродинамічного впливу на напружені газонасичені середовища, що базується на кількісних методах вирішення задач фільтрації.

THE MATHEMATICAL MODEL OF HYDRODYNAMICAL INFLUENCE ON INTENSE GAS-SATURATED ENVIRONMENTS

The work is devoted to development of mathematical model of account of process of hydrodynamical influence on the sated gas intense environments, which is based on numerical methods of the decision of tasks of a filtration.

Гидродинамическое воздействие на напряженные газонасыщенные среды является одним из наиболее перспективных способов предотвращения

внезапных выбросов угля и газа. Сущность процесса гидродинамического воздействия заключается в приложении к свободным поверхностям угольного пласта знакопеременных нагрузок, которые, суммируясь в некоторый момент времени с силами горного давления, направленными на преодоление предела прочности угля на разрыв, совершают работу по разрушению свободных поверхностей и образованию более широкой системы трещин в пласте, способствуя тем самым дальнейшему развитию процесса воздействия. Для этого на угольный пласт бурится технологическая скважина, устье которой обсаживается металлической трубой, а затрубное пространство герметизируется цементно-песчаным раствором. На обсадную трубу устанавливается устройство для гидродинамического воздействия, через которое осуществляется подача в скважину рабочей жидкости, в качестве которой применяется техническая вода из общешахтного противопожарного става, до заданного давления. Заполнив весь объем скважины, вода устремляется в угольный пласт, заполняя трещины и поры размером более 10^{-7} м. Давление подачи P_n выдерживается в течение некоторого времени t_n . Величина t_n зависит от необходимого радиуса проникновения жидкости в пласт. Газ, находящийся в этом объеме оттесняется в глубь пласта. По истечении времени подачи T_n производится резкий сброс давления в скважине до величины меньшей пластового давления газа. Находящийся в пласте под давлением газ стремится вытеснить закачанную в прискважинную часть пласта жидкость и занять весь фильтрующий объем угля. Ввиду того, что время сброса давления меньше времени необходимого для обратной фильтрации жидкости в пласте возникают напряжения, направленные в сторону свободных поверхностей угольного пласта и стремящиеся преодолеть предел прочности угля на разрыв.

При определенном сочетании параметров подачи жидкости, физических свойств и напряженного состояния угля и вязкостных характеристик подаваемой жидкости при определенных режимах сброса давления происходит послойное разрушение угольного материала [1]. При этом существенное влияние на механизм роста трещин оказывает фильтрационная взаимосвязь системы газонаполненных трещин, обусловленная проницаемостью реального угольного пласта. Смесь разрушенного угля с рабочей жидкостью и газом выносятся через обсадную трубу в выработку. Многократное повторение циклов такого воздействия приводит к извлечению некоторой части угля из пласта, дегазации и механической разгрузке прилегающего к технологической скважине угольно-породного массива и увлажнению обработанной зоны пласта. Таким образом, осуществляется комплекс изменений в напряженно-деформированном состоянии горного массива, каждое из которых способствует снижению вероятности возникновения внезапных выбросов угля и газа при ведении горных работ.

Экспериментальный поиск оптимальных технологических параметров гидродинамического воздействия сопряжен с большими затратами времени и средств. Наличие математической модели, максимально полно описывающей этот сложный процесс, может в значительной степени снизить эти затраты. Очевидно, что такая модель может быть создана только на базе численных методов решения фильтрационных задач.

В основу математической модели положено уравнение фильтрации, которое, в случае выполнения закона Дарси, для одномерных задач имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho(p)m(p)) = \frac{1}{r^n} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \rho(p)k(p) \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где $n = 0, 1, 2$ для плоской, цилиндрической и сферической симметрий; $\rho(p)$ – плотность жидкости; $m(p)$ – пористость материала.

Разумным упрощением рассматриваемой задачи может служить предположение о неизменности плотности скелета угольного вещества при его нагружении. То есть, объем фильтрующей среды может изменяться только за счет изменения объема пор в этой среде. В этом случае можно установить функциональную связь пористости материала, на который действует подаваемая жидкость, с пористостью угольного пласта m_{nl} , не подверженного технологическим воздействиям. Эта зависимость имеет вид:

$$m = 1 - (1 - m_{nl}) \frac{1 - \frac{(1-2\nu)}{E}(\gamma H(1+2\lambda) - 3P_{nl})}{1 - \frac{(1-2\nu)}{E}(X+Y+Z-3P)}, \quad (2)$$

где γ – удельный вес вышележащих пород; H – глубина залегания угольного пласта; λ – коэффициент бокового распора; P_{nl} – пластовое давление газа; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; X, Y, Z – напряжения по осям x, y, z соответственно.

Положив $\rho(p) = const$ и учитывая зависимость (2), уравнение фильтрации (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{\partial P}{\partial t} = H(P) \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n K(P) \frac{\partial P}{\partial r} \right), \quad (3)$$

$$\text{где } H = \frac{1}{3(1 - m_{nl})} \cdot \frac{E}{1 - 2\nu} \frac{\left(1 - \frac{1-2\nu}{E}(X+Y+Z-3P) \right)^2}{\left(1 - \frac{1-2\nu}{E}(\gamma H(1-2\lambda) - 3P_{nl}) \right)}.$$

Краевые условия

$$P(r, 0) = P_{nl}, \quad r_0 \leq r < \infty, \quad P(r_0, t) = f(t) + P_{nl}, \quad P(\infty, t) = P_{nl}, \quad f(0) = 0, \quad (4)$$

где $f(t)$ – функция изменения давления на границе среды.

Так как коэффициент фильтрации газа на несколько порядков превышает коэффициент фильтрации жидкости, то в данной постановке задачи рассматривается только фильтрация жидкости, а наличие газа учитывается в начальных и граничных условиях.

Для решения поставленной задачи систему уравнений (3) и (4) необходимо дополнить условием разрыва материала, то есть критерием разрушения. Физическая картина процесса разрушения фильтрующего материала сводится к следующему. В результате сброса давления происходит обратная фильтрация флюида из пористой среды в скважину. Следовательно, имеет место перенос импульса, плотность потока которого равна дополнительным напряжениям в конденсированной среде, которые вызваны этим движением. Введем силовой критерий разрушения, учитывающий, что возникающие при движении жидкости в пласте силы, направленные на отрыв слоя угля превосходят по своему значению силы сцепления этого слоя с угольным пластом:

$$\sigma_s \geq \sigma_p, \quad (5)$$

где σ_s – величина растягивающих напряжений; σ_p – предел прочности материала на растяжение.

Кроме того силовой критерий разрушения необходимо дополнить энергетическим критерием. Будем считать, что разрушение возможно только в том случае, если в некотором сечении фильтрующего материала к моменту времени t_j величина работы сил вязкого трения превысит величину энергии, необходимой для образования свежей поверхности $2g_s$:

$$\int_0^{t_j} F_v u dt \geq 2g_s,$$

где $F_v = -m\mu \frac{\partial u}{\partial r}$ – сила вязкого трения.

В окончательном виде энергетический критерий разрушения:

$$m\mu k \int_0^{t_j} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) dt \geq 2g_s. \quad (6)$$

В случае цилиндрической симметрии силовой критерий имеет вид:

$$\sigma_s(r) = m \left[P(r) - \frac{r_0}{r} P(r_0) - \frac{1}{r_0} \int_{r_0}^r P(r) dr \right] \geq \sigma_p, \quad (7)$$

Для численного решения дифференциальных задач типа (3) и (4) чаще всего используются неявные разностные схемы, несмотря на их громоздкость и трудности реализации. Обусловлено это, в первую очередь, большой их устойчивостью к неточностям машинного вычисления и изменениям входных данных. Кроме того, ограничение на шаг по времени не является слишком жестким, что значительно ускоряет скорость расчета.

На пространственно-временной сетке введем сеточные функции давления $P_i^{j+1} = P(r_i, t_i)$ и скорости $U_i^{j+1} = U(r_i, t_i)$. Сеточный аналог уравнения (3) выберем в следующем виде:

$$\frac{P_i^{j+1} - P_i^j}{\tau} = \frac{H_i^j}{h_i r_i^n} \left\{ r_{i+1/2}^n a_{i+1/2}^j \left[\sigma \frac{P_{i+1}^{j+1} - P_i^{j+1}}{h_{i+1}} + (1-\sigma) \frac{P_{i+1}^j - P_i^j}{h_{i+1}} \right] - r_{i-1/2}^n a_{i-1/2}^j \left[\sigma \frac{P_i^{j+1} - P_{i-1}^{j+1}}{h_{i-1}} + (1-\sigma) \frac{P_i^j - P_{i-1}^j}{h_{i-1}} \right] \right\}, \quad (8)$$

где $0 \leq i \leq N$; $j \geq 0$; $h_i = 0,5(h_i + h_{i-1})$; $h_{i+1} = r_{i+1} - r_i$; $a_{i+1/2}^j = 0,5(k_{i+1}^j + k_i^j)$.

При расчете величин $a_i^j = k_i^j$, H_i^j используются аналитические формулы $k(P)$, $H(P)$, в которых P заменяется сеточным значением P_i^j .

Разностное уравнение (8) имеет второй порядок точности аппроксимации по координате и первый по времени. Если весовой множитель $\sigma = 0,5$, то порядок аппроксимации по времени – тоже второй [2].

Для решения (8) использовался метод прогонки. В качестве тестовых задач использовались аналитические решения нелинейного уравнения фильтрации, полученные с помощью интегрального метода жидкостного баланса [3].

Для примера приведем расчет гидродинамического воздействия на угольный массив при следующих условиях: $\nu = 0,18$, $E = 3,24 \cdot 10^8$ Па, $H = 10^6$ Па, $k = 4,4 \cdot 10^{-12} + 4,4 \cdot 10^{-19} P$; $T_n = 240$ с – время подачи жидкости в угольный пласт, $T_n = 0,1$ с – время сброса давления, $\lambda = 1$, $\sigma = 0,5$, $P_n = 10$ МПа – максимальное

давление жидкости в скважине.

На рис. 1 показаны результаты расчета зависимостей давления воды в порах угля $P(r)$ и дополнительных напряжений $S(r)$, которые возникают в конце подачи воды в скважину от расстояния до стенки технологической скважины. Значения величины $S(r)$ отрицательные. Это указывает на то, что дополнительные напряжения являются сжимающими.

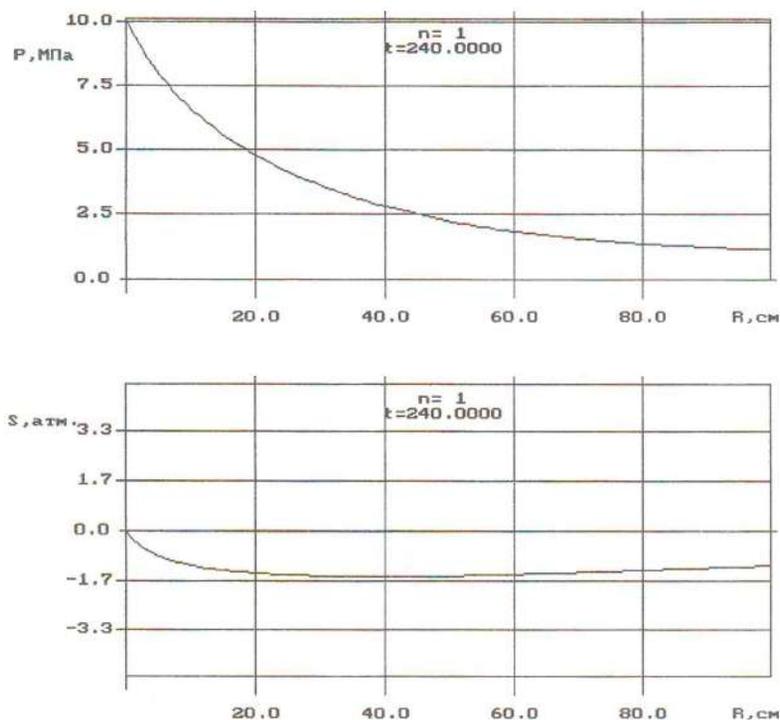


Рис. 1 - Распределение давления воды в порах угля P и дополнительных напряжений S в момент окончания ее подачи в скважину

Другая ситуация наблюдается при обратной фильтрации воды. Как видно из рис. 2, растягивающие напряжения, возникающие в конце сброса давления, превышают предел прочности угля на разрыв $\sigma_p \approx 1$ атм. В этом случае происходит послойное разрушение угля, что является необходимым условием для эффективного применения процесса гидродинамического воздействия.

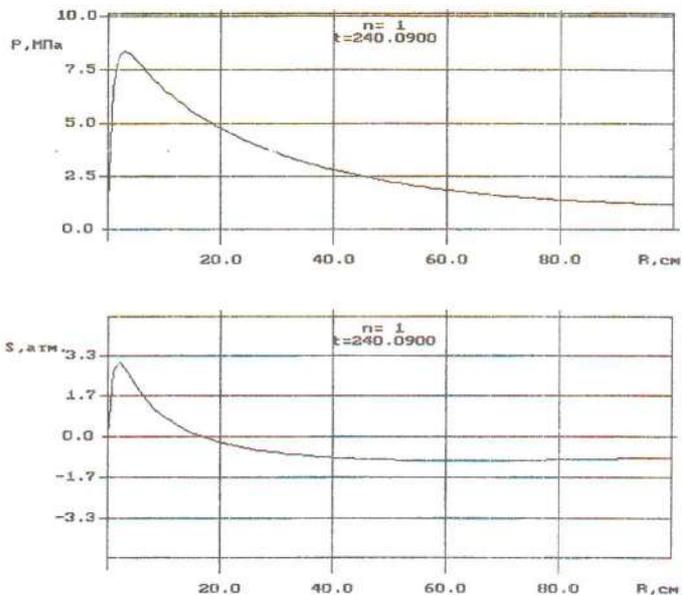


Рис. 2 - Распределение давления воды в порах угля P и дополнительных напряжений S в момент сброса давления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Софийский К.К., Калфакчиян А.П., Воробьев Е.А. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля. – М.: Недра, 1994. – 192 с.
2. Самарский А.А. Разностные схемы газовой динамики. М.: Наука, 1975. – 315с.
3. Софийский К.К., Черный А.В. Интегральный метод жидкостного баланса в задачах фильтрации флюидов в пористых средах//Материалы IV Международной научной школы–семинара "Импульсные процессы в механике сплошной среды". – Николаев: Аттол. - 2001.–С. 58–59.

УДК 622.648.6.65+532.51.012.4.001.24

А.И. Волошин, Б.В. Пономарев,
А.А. Волошин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С НАКЛОННЫМ ТРУБОПРОВОДОМ

В роботі розглянуто побудову математичної моделі та інженерного алгоритму розрахунку пневмотранспортної системи з транспортним трубопроводом, розташованим під кутом до горизонту. Модель дозволяє проводити обчислення параметрів таких систем.

MATHEMATICAL MODELING OF PNEUMOTRANSPORT SYSTEMS WITH INCLINED PIPELINE

In work the construction mathematical model and engineering algorithm of account pneumo-transport system with transport pipeline located under a corner to horizon is considered. The model allows to calculate parameters of such systems.

Используя методический подход, выполненный в работе [1] применительно к пневмотранспортным системам с горизонтальным трубопроводом, для систем