

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В НАПРЯЖЕННОМ УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Розглянуто рух робочої рідини і газу у напруженому вугільному пласті на початковому етапі проведення гідродинамічної дії.

LAWS OF MOVEMENT OF A WORKING LIQUID AND GAS IN THE INTENSE COAL LAYER AT HYDRODYNAMICAL INFLUENCE

The movement of a working liquid and gas in the intense coal layer on the initial stage of realization of hydrodynamical influence is considered.

Превышение допустимых норм содержания метана в рудничной атмосфере является сдерживающим фактором повышения темпов ведения подготовительных и очистных работ, особенно в высоконагруженных лавах и при их подготовке. Снижение поступления метана в горные выработки в процессе проведения пластовой выработки или при выемке угля в лаве может быть достигнуто с помощью применения гидродинамического воздействия, повышающего интенсивность дегазации горного массива и эффективность этой дегазации.

Существующие математические модели гидродинамического воздействия не учитывают в полной мере изменение проницаемости угольного пласта в процессе воздействия. Решение уравнений движения рабочей жидкости и газа в различные периоды воздействия с учетом этого изменения позволяет определять наиболее рациональные параметры применяемого воздействия в зависимости от конкретных горно-геологических условий.

Целью работы является нахождение основных закономерностей движения рабочей жидкости и газа в поровой среде угольного вещества с учетом изменения фильтрующего объема.

Установление с помощью этих закономерностей параметров гидродинамического воздействия, обеспечивающих необходимую интенсивность и степень дегазации горного массива, связана с выполнением ІГТМ НАН України научно-исследовательских работ 1.3.5.74 «Механіка гірських порід, техніка та технології безпечного видобування вугілля високонавантаженими лавами» и 1.3.5.93 «Створити науково-технічні основи інтенсифікації дегазації вуглепородного масиву із застосуванням гідродинамічної дії через свердловини».

Рассмотрим некоторый объем угольного пласта V_0 . Масса жидкости (флюида) в этом объеме есть $\int \rho dV$, где ρ – плотность жидкости, а интегрирование производится по объему V_0 . Через элемент df поверхности, ограничивающей рассматриваемый объем, в единицу времени проходит количество

жидкости $\rho \vec{v} d\vec{f}$, где $\vec{v}$ – скорость движения жидкости (флюида). Вектор $d\vec{f}$ по абсолютной величине равен единичной площади элемента поверхности и направлен по внешней нормали к ней. Тогда произведение $\rho \vec{v} d\vec{f}$ положительно, если жидкость вытекает из объема и отрицательно, если жидкость втекает в него. Полное количество жидкости, вытекающей в единицу времени из объема V_0 определяется выражением $\oint \rho \vec{v} d\vec{f}$, где интегрирование производится по всей замкнутой поверхности, охватывающей рассматриваемый объем.

С другой стороны, уменьшение количества жидкости в объеме V_0 можно записать в виде $-\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV$.

Приравнявая оба выражения, получаем

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = -\oint \rho \vec{v} d\vec{f}.$$

Интеграл по поверхности преобразуем согласно формуле Остроградского в интеграл по объему:

$$\oint \rho \vec{v} d\vec{f} = \int \operatorname{div} \rho \vec{v} dV.$$

В результате этих преобразований можем записать:

$$\int \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} \right) dV = 0.$$

Поскольку данное равенство имеет место для любого объема, то должно быть равно нулю подынтегральное выражение, то есть, получаем, так называемое, уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0. \quad (1)$$

Применим уравнение (1) к фильтрации жидкости в поровую среду. Для этого, во-первых, сделаем замену $\rho = \rho(p)m(p)$, где $\rho(p)$ – истинная плотность жидкости; $m(p)$ – действительная пористость фильтрующего материала.

Во-вторых, воспользуемся законом фильтрации жидкости (газа) Дарси $\vec{v} = -k(p) \operatorname{grad} P$, где $k(p)$ – коэффициент фильтрации, являющийся функцией давления.

В этом случае уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} [\rho(p)m(p)] = \operatorname{div} [\rho(p)k(p)\operatorname{grad} P]. \quad (2)$$

Для одномерных задач уравнение (2) имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho(p)m(p)] = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \rho(p)k(p) \frac{\partial p}{\partial r} \right], \quad (3)$$

где $n=0; 1; 2$ для плоской, цилиндрической и сферической симметрий соответственно.

Большинство явлений, проявляющихся при гидродинамическом воздействии на горный массив, обусловлено таким качеством материала, как пористость. Количественной характеристикой пористости является отношение объема пор к общему объему материала. Очевидно, что пористость зависит от напряженного состояния, в котором находится материал. Разумным упрощением рассматриваемой задачи может служить предположение о неизменности плотности скелета вещества при нагружении. Другими словами, объем рассматриваемой среды может изменяться только за счет изменения объема пор.

Выделим из угольного пласта некоторый элементарный объем dV , который представим в виде $dV = dV_n + dV_{ск}$, где dV_n — объем порового пространства; $dV_{ск}$ — объем скелета твердого вещества.

Если этот объем находится в ненагруженном состоянии, т.е. $\sigma_{ij} = 0$, то истинная (начальная) пористость вещества определяется выражением

$$m_0 = \frac{dV - dV_{ск}}{dV}.$$

В нагруженном состоянии выделенная область вещества займет объем dV' . Учитывая условие несжимаемости скелетного материала, представим выражение для пористости нагруженного вещества при $\sigma_{ij} \neq 0$ в виде

$$m = \frac{dV' - dV_{ск}}{dV'}. \quad (4)$$

Из механики сплошных сред [1] известно, что в первом приближении изменение объема при деформировании представимо в виде

$$dV' = dV(1 + \varepsilon_{ii}), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{ii} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ — сумма главных значений тензора деформации.

Это выражение является инвариантом, поэтому формула (5) будет справедлива в любой системе координат.

Подставив (5) в (4), получим

$$m = \frac{m_0 + \varepsilon_{ii}}{1 + \varepsilon_{ii}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) устанавливает связь пористости деформированного материала с истинной пористостью вещества, т.е. не подверженного каким-либо воздействиям.

Дальнейшее рассмотрение задачи будем проводить в приближении теории упругости. Воспользуемся обобщенным законом Гука, записанном в произвольной системе координат [2]:

$$\varepsilon_{ii} = \left(\frac{1+\nu}{E} \sigma \right)_{ij} - \delta_{ij} \left(\frac{\nu \sigma}{E} \right)_{kk},$$

где ν — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга.

Из этого уравнения следует, что

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= -\frac{\sigma_x}{E_x} + \nu_y \frac{\sigma_y}{E_y} + \nu_z \frac{\sigma_z}{E_z}; \\ \varepsilon_y &= \nu_x \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\sigma_y}{E_y} + \nu_z \frac{\sigma_z}{E_z}; \\ \varepsilon_z &= \nu_x \frac{\sigma_x}{E_x} + \nu_y \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\sigma_z}{E_z}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\nu_x, \nu_y, \nu_z, E_x, E_y$ и E_z — коэффициенты Пуассона и модули Юнга в направлении осей x, y и z соответственно.

В приближении изотропности свойств рассматриваемого материала или при усреднении величин ν и E из (7) получаем

$$\varepsilon_{ii} = -\frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

Таким образом,

$$dV' = dV \left[1 - \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \right].$$

В нетронутом состоянии в угольном пласте имеют место соотношения

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \gamma H - P_{nl}; \\ \sigma_y &= \lambda \gamma H - P_{nl}; \\ \sigma_x &= \lambda \gamma H - P_{nl},\end{aligned}\tag{8}$$

где γ – удельный вес вышележащих пород; H – глубина залегания угольного массива; P_{nl} – пластовое давление; λ – коэффициент бокового распора

В процессе ведения горных работ напряженное состояние (8) изменяется, и, в общем случае, учитывая движение флюида в поровом пространстве при гидродинамическом воздействии, представимо в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= Z - P; \\ \sigma_y &= Y - P; \\ \sigma_x &= X - P,\end{aligned}$$

где X , Y и Z – напряжения по осям x , y и z соответственно, являющиеся функциями координат и времени; P – давление флюида в угольном пласте.

Для нетронутого пластового состояния можно ввести пластовую пористость m_{nl} , которая равна

$$m_{nl} = \frac{m_0 - \frac{1-2\nu}{E} [\gamma H (1+2\lambda) - 3P_{nl}]}{1 - \frac{1-2\nu}{E} [\gamma H (1+2\lambda) - 3P_{nl}]}\tag{9}$$

Так как на практике приходится пользоваться не величиной m_0 , а m_{nl} , то установим функциональную связь пористости материала, подверженного технологическим воздействиям, с пористостью нетронутого пласта – $m(m_{nl})$. Исключая m_0 из уравнений (6) и (9), имеем

$$m = 1 - (1 - m_{nl}) \frac{1 - \frac{1-2\nu}{E} [\gamma H (1+2\lambda) - 3P_{nl}]}{1 - \frac{1-2\nu}{E} (X + Y + Z - 3P)}.\tag{10}$$

Таким образом, получена функциональная зависимость пористости материала от напряженного состояния (X , Y и Z) и давления флюида (P) при гидродинамическом воздействии на этот материал.

Вывод уравнения движения жидкости в такой среде основан на предположении о не сжимаемости жидкости, которое для процессов гидродинамического воздействия является вполне обоснованным. Предположив $\rho(P) = \text{const}$ и учитывая зависимость (10), уравнение фильтрации (3) можно преобразовать к виду

$$\frac{\partial P}{\partial t} = A \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n k(P) \frac{\partial P}{\partial r} \right], \quad (11)$$

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

В случае, когда $k(P) = k = \text{const}$ уравнение (11) принимает вид

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\chi^2}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \frac{\partial P}{\partial r} \right], \quad (12)$$

где $\chi^2 = kA$ — коэффициент пьезопроводности.

В общем случае уравнения (11) и (12) являются нелинейными и для их решения наиболее целесообразно использовать численные методы.

Описание движения газа в поровой среде принципиально отличается от описания фильтрации жидкости. Это обусловлено в основном необходимостью учета сжимаемости газа. В первом приближении следует в качестве уравнения состояния газа использовать уравнение изотермы

$$\frac{P}{\rho} = \text{const} = \frac{1}{B},$$

где B — константа.

В этом случае плотность фильтрующегося материала, входящая в уравнение фильтрации (3), является линейной функцией по отношению к давлению

$$\rho = BP. \quad (13)$$

Подставив (13) в левую часть уравнения (3), получим

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) = B \frac{\partial P}{\partial t} \left[P \frac{\partial m}{\partial P} + m \right].$$

Используя функциональную зависимость $m(P)$ (10), находим

$$\frac{\partial m}{\partial P} = 3(1 - m_{nl}) \frac{1 - \frac{1-2\nu}{E} [\mathcal{H}(1+2\lambda) - 3P_{nl}]}{\left[1 - \frac{1-2\nu}{E} (X+Y+Z - 3P)\right]^2}.$$

Учитывая предыдущие выкладки, получаем выражение для левой части уравнения (3)

$$B \frac{\partial P}{\partial t} \left\{ 1 - (1 - m_{nl}) \frac{\left[1 - \frac{1-2\nu}{E} (X+Y+Z)\right] \left\{1 - \frac{1-2\nu}{E} [\mathcal{H}(1+2\lambda) - 3P_{nl}]\right\}}{\left[1 - \frac{1-2\nu}{E} (X+Y+Z - 3P)\right]^2} \right\}. \quad (14)$$

Правую часть уравнения (3) представим в виде

$$B \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n P k(P) \frac{\partial P}{\partial r} \right], \quad (15)$$

Приравнявая (14) и (15), получаем

$$\frac{\partial P}{\partial t} = C \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n P k(P) \frac{\partial P}{\partial r} \right], \quad (16)$$

где

$$C = \frac{\left[1 - \frac{1-2\nu}{E} (X+Y+Z - 3P_{nl})\right]^2}{1 - (1 - m_{nl}) \left[1 - \frac{1-2\nu}{E} (X+Y+Z)\right] \left\{1 - \frac{1-2\nu}{E} [\mathcal{H}(1+2\lambda) - 3P_{nl}]\right\}}.$$

В случае $k(P) = k = const$ уравнение (16) приобретает вид

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\chi^2}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n P \frac{\partial P}{\partial r} \right). \quad (17)$$

Как видим, уравнения (16) и (17) принципиально отличаются от соответствующих уравнений фильтрации жидкости (11) и (12) и являются нелинейными.

Таким образом, с помощью предложенной математической модели численно решается задача о движении рабочей жидкости и газа в угольном пласте на начальной стадии воздействия.

Дальнейшее развитие теории дегазации горного массива с применением гидродинамического воздействия может получить при приближенном решении уравнений фильтрации, в результате которого могут быть получены численные значения глубины проникновения жидкости в угольное вещество в зависимости от условий применения способа и параметров воздействия.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1978. – 246 с.
2. Илюкович Б.М. Введение в теорию пластичности. – Киев: Вища школа, 1983. – 159 с.

УДК 622.26

Канд. техн. наук **Є.О. Воробйов**, канд. техн. наук **М.О. Ніколенко**,
инж. **І.О. Марченко** (АІДонНТУ),
д-р техн. наук **К.К. Софійський** (ІГТМ НАНУ)

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВИКОРИСТАННЯ ПУСТОЇ ПОРОДИ В ЯКОСТІ ЗАКЛАДКИ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ШАХТ ЦРД

В статті приводиться аналіз состояния использования шахтной породы. Предложена новая конструкция ограждения призабойного пространства от выработанного пространства очистной выработки, использование которой обеспечивает внедрение разработанной технологии закладки породой выработанного пространства. Приведены положительные результаты испытания технологии в шахтных условиях.

ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE USE OF GOB IN QUALITY LOAD OF MOUNTAIN MAKING OF THE CENTER REGION OF DONBAS MINES'S

In the article is pointed analysis of the state of the use of mine breed. Offered new construction of being barriering of area from the worked space of the cleansing making, the use of which provides introduction of the developed technology of book-mark by the breed of the worked space. Resulted positive results of test of technology in mine terms.

Як показує практика, робота гірничих підприємств викликає зміни в навколишньому середовищі, які характеризуються: відходами пустої породи та підробкою земної поверхні. На поверхні шахт Центрального району Донбасу (ЦРД) і територіях збагачувальних фабрик знаходиться біля 100 відвалів, в яких розташовано більше 200 млн. т породи, кількість якої збільшується на 2,0 млн. т на рік, які забруднюють навколишнє середовище.

Збільшення глибини розробки вугільних пластів супроводжується погіршенням умов проведення гірничих робіт у зв'язку з підвищенням температури гірничих порід та появою газодинамічних явищ.

Виконані дослідження [1] дозволяють зробити оцінку негативного впливу виділеного тепла із відпрацьованого простору на тепловий режим виробничої ділянки, температура вентиляційного струменю підвищується на 40-50%.