

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ ПАКЕТАХ ABAQUS, ANSYS, MSC.MARC

А.А. Наседкина, А.В. Наседкин, *д.ф.-м.н., проф.*
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Моделирование гидроимпульсного воздействия на угольный пласт математически представляет собой совместное решение задач распространения жидкости в пористой среде и деформации пористой среды. В данной работе рассматриваются возможности для проведения связанного анализа в конечно-элементных пакетах ANSYS, MSC.Marc и [ABAQUS](#), отмечены достоинства и недостатки предоставляемых моделей.

Метод гидроимпульсного воздействия является одним из способов интенсификации газовыделения из угольных пластов. Метод направлен на повышение трещиноватости и разрушение пласта, что позволяет увеличить выход метана и в дальнейшем его утилизировать. Гидроимпульсное воздействие осуществляется путем нагнетания в пласт воды через скважину, пробуренную с земной поверхности, до давления, которое не превышает геостатическое. Закачиваемая жидкость перемещается вглубь пласта, оттесняя и сжимая метан, находящийся первоначально в порах в связанном сорбированном состоянии. При достижении давлением величины гидроразрыва в пласте появляются трещины, и метан высвобождается из связанного состояния в поровом пространстве. Таким образом, нарушение структуры угольного пласта приводит к газоотдаче в зоне дегазации. Главной целью моделирования процесса является определение радиуса воздействия скважины.

Аналитическая модель метода требует совместного решения нескольких задач [1]: задачи фильтрации воды в угольный пласт со связанным газом в порах и обратной фильтрации воды с освобожденным газом при резком сбросе давления и задачи разрушения угля вблизи скважины.

В [2] была предложена модель гидравлического расчленения угольного пласта. В данной модели рассматривался процесс нестационарной фильтрации воды в угольный пласт при переменных коэффициентах фильтрации и пористости. Предполагалось, что пористая среда не сжимаема. Из уравнения неразрывности и закона Дарси было выведено уравнение фильтрации для определения давления как функции координат и времени. Полученная начально-краевая задача в осесимметричной постановке оказалась аналогичной задаче теплопроводности, где неизвестной функцией является температура. Благодаря этой аналогии задача была рассчитана с использованием конечно-элементных технологий как нелинейная нестационарная задача теплопроводности.

Моделирование гидроимпульсного воздействия отличается от предыдущего случая тем, что учитывается напряженное состояние среды. Таким образом, возникает проблема совместного решения двух уравнений: уравнения фильтрации и уравнения движения. Начальная стадия процесса гидрорасчленения пласта до развития трещин может моделироваться в рамках связанной теории пороупругости [3,4]. В основе построения модели лежит представление об угольном пласте как о двухфазной пористой среде, состоящей из твердой фазы скелета и жидкой фазы фильтрующегося в порах флюида. В модели предлагается связанный анализ для твердой и жидкой фаз, то есть совместное решение нестационарных уравнений деформации пористого тела и фильтрации жидкости в пористой среде. Важно отметить, что процесс гидродинамического воздействия характеризуется нелинейной зависимостью коэффициента фильтрации угля от давления жидкости, что делает модель нелинейной.

В данной работе исследуется возможность проведения связанного анализа (coupled analysis) распространения жидкости в пористой среде и деформации пористой среды в конечно-элементных пакетах ANSYS, MSC.Marc и ABAQUS.

Конечно-элементный пакет ANSYS [5]. Программный комплекс ANSYS позволяет решать связанные задачи типа задач о температурных напряжениях, однако, как было описано выше, задача фильтрации при этом должна быть представлена как температурная задача. Такое представление не возможно, если вместо закона Дарси берется более сложная зависимость скорости фильтрации жидкости от давления.

В стандартных средствах пакета ANSYS нет и модели пороупругости, и лишь с использованием аналогии между задачами пороупругости и термоупругости задача гидрорасчленения пласта может быть изучена в рамках модели нелинейной нестационарной термоупругости.

В отличие от ANSYS, конечно-элементные пакеты MSC.Marc и ABAQUS позволяют решать задачи механики пористых сред напрямую.

Конечно-элементный пакет MSC.Marc [6]. В MSC.Marc рассматривается система жидкость-почва (fluid-soil). Жидкость, распространяющаяся в пористой среде, предполагается слабо сжимаемой.

Для описания поведения пористой среды принимается принцип *эффективных напряжений*, при котором общее напряжение \mathbf{y} представляет собой сумму эффективного напряжения \mathbf{y}' и напряжения давления в порах $p \mathbf{I}$:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}' - p \mathbf{I}. \quad (1)$$

После подстановки общего напряжения в уравнение движения среды последнее принимает вид:

$$\nabla \cdot \mathbf{y}' - \nabla p + \mathbf{f} = \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (2)$$

где \mathbf{f} – вектор плотности внешних массовых сил, ρ – плотность среды, $\ddot{\mathbf{u}}$ – ускорение.

Жидкость распространяется в среде по закону Дарси, который сформулирован здесь с учетом силы тяжести, когда скорость жидкости \mathbf{u}_f имеет дополнительный компонент, направленный по вертикали:

$$\dot{\mathbf{u}}_f = -\frac{K}{\mu}(\nabla p + \rho_f \mathbf{g}), \quad (3)$$

где K – проницаемость среды, μ – вязкость жидкости, ρ_f – плотность жидкости, \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения.

Уравнение неразрывности для потока жидкости в пористой среде выражается формулой:

$$n\dot{\rho}_f + \nabla \cdot (\rho_f \dot{\mathbf{u}}_f) = 0, \quad (4)$$

где n – пористость среды.

Подстановка в (4) выражения для скорости фильтрации жидкости (3) и предположение о сжимаемости жидкости

$$K_f \dot{\rho}_f = \rho_f \dot{p} \quad (5)$$

где $K_f = \beta_f^{-1}$ – модуль объемного сжатия жидкости, β_f – сжимаемость жидкости, дает итоговое уравнение фильтрации:

$$n\beta_f \dot{p} + \nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} (\nabla p + \rho_f \mathbf{g}) \right) = 0. \quad (6)$$

Полученное уравнение (6) вместе с (2) образует систему для определения неизвестных перемещений \mathbf{u} и давления p . Линеаризованная система является нелинейной и несимметричной. Для решения используется полная схема Ньютона-Рафсона. Недостаток модели, предлагаемой пакетом Marc, состоит в том, что проницаемость, пористость, вязкость и сжимаемость не могут зависеть от перемещения и давления. В рассматриваемой же модели гидроимпульсного воздействия проницаемость (коэффициент фильтрации) носит переменный характер.

Конечно-элементный пакет ABAQUS [7]. В пакете [ABAQUS](#) рассматривается наличие двух флюидов в пористой среде: смачивающей жидкости ("wetting liquid"), которая считается относительно несжимаемой, и другого относительно сжимаемого флюида, которым часто выступает газ. В случае частично насыщенной среды в пустотах одновременно присутствуют оба флюида, а в случае насыщенной среды пустоты заполнены смачивающей жидкостью.

Пористая среда моделируется сеткой конечных элементов, которая привязана к твердой фазе, поток жидкости может проходить через эту сетку. Механическая часть модели основана на принципе эффективных напряжений, записанном с учетом давлений двух флюидов:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}' - (\chi p_w + (1 - \chi) p_a) \mathbf{I}, \quad (7)$$

где p_w – давление смачивающей жидкости, p_a – давление другого флюида, коэффициент χ отвечает за насыщенность среды. Однако, в модели используется упрощенный принцип эффективных напряжений в предположении, что давлением несмачивающего флюида можно пренебречь:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}' - \chi p_w \mathbf{I}. \quad (8)$$

Состояние пористой среды определяется уравнением равновесия и уравнением неразрывности. В отличие от пакета Marc, где учитывались силы инерции, в ABAQUS представлена квазистатическая модель.

Уравнение неразрывности в ABAQUS имеет традиционный вид (4), но для описания распространения жидкости в пористой среде предлагается две зависимости: закон Дарси и закон Форкхеймера (Forchheimer). Закон Дарси

$$sn \mathbf{v}_w = -\mathbf{k} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{x}}, \quad \phi = z + \frac{p_w}{g \rho_w} \quad (9)$$

или, в другой форме,

$$sn \mathbf{v}_w = -\mathbf{k} \cdot \frac{1}{g \rho_w} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (10)$$

применим для малых скоростей потока жидкости \mathbf{v}_w .

Здесь s – насыщенность, n – пористость, \mathbf{k} – проницаемость, имеющая размерность скорости, ϕ – пьезометрический напор. Закон Дарси является частным случаем закона Форкхеймера, который характеризует случай больших скоростей:

$$sn \mathbf{v}_w (1 + \beta \sqrt{\mathbf{v}_w \cdot \mathbf{v}_w}) = -\mathbf{k} \cdot \nabla \phi, \quad \phi = z + \frac{p_w}{g \rho_w} \quad (11)$$

Получаемая в результате нелинейная система из уравнения равновесия пористой среды и уравнения неразрывности для потока жидкости решается прямым методом.

Сравнение конечно-элементных пакетов MSC.Marc и ABAQUS показывает, что в них реализованы примерно одинаковые модели пористых сред, но пакет [ABAQUS](#) предоставляет более широкие возможности (случай быстрых течений, ненасыщенных и насыщенных сред).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Одинцев В.Н.* Отрывное разрушение массива скальных горных пород. М.: ИПКОН РАН, 1996. 166 с.
2. *Наседкина А.А., Труфанов В.Н.* Конечно-элементное моделирование процесса гидродинамического расчленения многослойного угольного пласта // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2006. № 1. С. 61-70.
3. *Nasedkin A.V., Nasedkina A.A., Trufanov V.N.* Some models for hydrodynamic influence on a multi-layer coal seam // Proc. First Int. Congress of Serbian Society of Mechanics. Kopaonik, Serbia, April 10-13, 2007. Ed. D. Sumarac, D. Kuzmanovic. Belgrade: Serbian Society of Mechanics, 2007. P. 641-646.
4. *Nasedkina A.A., Nasedkin A.V., Iovane G.* A model for hydrodynamic influence on a multi-layer deformable coal seam // Computational Mechanics. 2008. V.41, No.3. P. 379-389.
5. ANSYS. Theory Ref. Version 11.0.
6. MSC.Marc. Theory and User Information. Version 2007.
7. ABAQUS. Analysis User's Manual. Theory Manual. Version 6.7.