

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ
В ПОРОУПРУГИХ СРЕДАХ С ФИЗИЧЕСКИМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ**

© 2011 г.

А.А. Наседкина

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

nasedkina@math.rsu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Рассмотрены фильтрационные и связанные пороупругие задачи для моделирования гидродинамического воздействия на угольный пласт с целью извлечения метана. Методика решения нестационарных нелинейных пороупругих задач состоит в применении поротермоупругой аналогии, обезразмеривания и метода конечных элементов.

Ключевые слова: геомеханика, пористая среда, фильтрация, пороупругость, связанные задачи, метод конечных элементов.

Предварительная дегазация угольных пластов очень важна для подготовки месторождений к эффективной разработке. Кроме того, угольный метан может использоваться как нетрадиционный источник энергии. Одним из способов извлечения метана является метод гидродинамического воздействия на угольный пласт, которое осуществляется путем нагнетания в пласт воды под большим давлением через скважину, пробуренную с земной поверхности. Жидкость перемещается вглубь пласта, оттесняя и сжимая метан в порах. Когда давление достигает давления гидроразрыва, в пласте появляются трещины и метан высвобождается из связанного состояния в поровом пространстве. Нарушение структуры угольного пласта приводит к газоотдаче в зоне дегазации.

В основе построения математической модели лежит представление об угольном пласте как о двухфазной пористой среде, состоящей из твердой фазы скелета и жидкой фазы фильтрующегося в порах флюида. В общем случае предполагается связанный анализ для твердой и жидкой фаз, то есть совместное решение уравнений деформации пористого тела и фильтрации жидкости в пористой среде. В упрощенном случае можно рассматривать только процесс фильтрации в предположении, что угольный пласт не деформируется.

Исследование проводилось на примере трехслойного угольного пласта Краснодонского месторождения Восточного Донбасса, состоящего из слоев угля, глинистого и песчанистого сланцев, то есть пород, имеющих различные фильтрационные и механические свойства. Процесс гидродинамического воздействия характеризуется

нелинейной зависимостью коэффициента фильтрации угля от давления жидкости, что делает модель нелинейной. Предполагается, что коэффициент фильтрации постоянен, пока значение давления в пласте меньше давления гидроразрыва. По достижении давлением значения давления гидроразрыва происходит резкий скачок коэффициента фильтрации. Далее коэффициент фильтрации линейно возрастает с течением времени до некоторого максимального значения. Предполагается также, что на границе скважины давление линейно возрастает от исходного значения пластового давления до некоторого максимального значения, достигнутого в момент прекращения закачивания воды в угольный пласт.

На первом этапе моделирования была рассмотрена чисто фильтрационная задача для недеформируемой пористой среды. Уравнение фильтрации для неизвестной функции давления было выведено из уравнения неразрывности и линейного закона Дарси. Были поставлены начально-краевые задачи для осесимметричного и трехмерного случая. Трехмерный случай был рассмотрен для трехслойного угольного пласта, пересеченного слоем пород повышенной газоносности (зоной флюидизации). Применение аналогии между уравнением фильтрации и уравнением теплопроводности позволило решить нелинейные нестационарные задачи фильтрации как задачи теплопроводности в конечно-элементном комплексе ANSYS. По результатам расчетов получены картины и графики распределения давления в угольном пласте в различные моменты времени и в различных точках расчетной зоны. По графикам распре-

деления давления был определен размер зоны дегазации.

На следующем этапе моделирования была рассмотрена более сложная связанная модель фильтрации жидкости в пористой среде и деформации пористого тела. Приведем здесь систему уравнений насыщенной пороупругой среды с единичным тензором Био:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} - \nabla \cdot (\mathbf{c} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{I} p) = \rho \mathbf{f}, \quad (1)$$

$$\mathbf{I} \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{1}{M} \dot{p} - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}}{\rho_f g} \cdot \nabla p \right) = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ – вектор перемещений, $p = p(\mathbf{x}, t)$ – поровое давление ρ – плотность, \mathbf{c} – тензор упругих жесткостей четвертого ранга, \mathbf{f} – вектор плотности массовых сил, $\boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2$ – тензор деформаций; \mathbf{K} – тензор коэффициентов фильтрации второго ранга, ρ_f – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения; $M^{-1} = N^{-1} + K_f^{-1} \phi$; N^{-1} – обратный модуль Био, связывающий изменение пористости с изменением давления при постоянной деформации, K_f – модуль объемного сжатия для жидкости; ϕ – пористость.

Система (1), (2) представляет собой связанную систему дифференциальных уравнений с различным порядком производных по времени и с сильно отличающимися по величине значениями материальных параметров и физических модулей. При моделировании явлений гидрорасчленения пород и их разрушения модули фильтрации принимаются зависящими от порового давления $\mathbf{K} = \mathbf{K}(p)$, аналогично модули упругости могут зависеть от деформаций, что делает систему (1), (2) нелинейной. Для постановок задач пороупругости к (1), (2) добавляются краевые и начальные условия, что приводит в итоге к связанным нестационарным нелинейным начально-краевым задачам геомеханики пороупругих сред. Начально-краевая задача для трехслойного угольного пласта ставится в осесимметричной постановке.

Численное решение нелинейной нестационарной задачи пороупругости проводится по методу конечных элементов с помощью комплекса ANSYS. До недавнего времени в ANSYS отсутствовали возможности прямого решения связанных нестационарных задач термоупругости (1), (2) с соответствующими краевыми и начальными условиями. Однако в версии ANSYS 10.0 появился конечный элемент PLANE223, содержащий опции конечно-элементного моделирования полностью связанных

динамических задач термоупругости, что позволяет теперь, пользуясь поро-термоупругой аналогией, решать в ANSYS связанные нелинейные задачи геомеханики пороупругих сред. Для расчетов задач пороупругости в ANSYS следует также принять во внимание, что в задачах геомеханики значения модулей упругости, коэффициентов фильтрации и пористости имеют существенно различные порядки и отличаются от соответствующих величин (кроме модулей упругости) задач термоупругости. В связи с этим для улучшения сходимости численных методов решения проводится обезразмеривание задачи.

Результаты расчетов связанной пороупругой задачи позволяют получить двумерные картины распределения давления пласте, перемещений и механических напряжений. Было проведено сравнение результатов расчетов связанной и чисто фильтрационной задачи. Результаты расчета показали, что учет механических напряжений не оказывает большого влияния на распределение порового давления в пласте, но позволяет уточнить результаты решения фильтрационной задачи. Также было определено, что учет связанности процессов фильтрации и деформации в угольном пласте не оказывает заметного влияния на распределение порового давления, т.е. решения для порового давления мало отличаются для связанной и для несвязанной задач. Однако решение связанной задачи может быть полезным для дальнейшего анализа концентраций напряжений, распространения трещин и других важных геомеханических эффектов.

Кроме того, было проведено исследование влияния входных данных на распределение порового давления в пласте по результатам решения связанной задачи пороупругости. Анализ результатов позволил определить оптимальные характеристики процесса гидродинамического воздействия.

Список литературы

1. Наседкина А.А., Труфанов В.Н. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2006. №1. С. 61–70.
2. Наседкина А.А., Труфанов В.Н. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2006. №3. С. 14–22.
3. Nasedkina A.A., Nasedkin A.V., Iovane G. // Computational Mechanics. 2008. V. 41, No 3. P. 379–389.
4. Наседкина А.А., Наседкин А.В., Иоване Ж. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. №4. С. 23–32.

**MODELING THE TRANSIENT FILTRATION PROCESSES IN POROUS MEDIA
WITH PHYSICAL NONLINEARITIES***A.A. Nasedkina*

Filtration and poroelastic problems for the simulation of hydrodynamic influence on a coal seam for methane extraction are considered. The technique of solving nonlinear transient poroelastic problems consists in applying porothermoelastic analogy, nondimensionalization and finite element method.

Keywords: geomechanics, porous medium, filtration, poroelasticity, coupled problems, finite element method.