

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В НАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ТРЕЩИНАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОЙ ПОРОУПРУГОСТИ**

**Д.Ю. Легостаев, А.Ю. Боталов, С.П. Родионов**

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, 625026, Тюмень, Россия*

Наличие трещин оказывает значительное влияние на фильтрационные потоки в пластовых системах. Обычно при гидродинамическом моделировании учитывается зависимость фильтрационных свойств трещин только от порового давления [1]. В тоже время данные лабораторных экспериментов показывают, что проницаемость трещин зависит от нормальных напряжений [2]. В работе [3] утверждается, что определяющее влияние на гидродинамические характеристики пластовых неоднородностей оказывают сдвиговые напряжения: вводится гипотеза критически напряженных разломов (*critically-stressed-fault hypothesis*), согласно которой механически активные разломы, определяемые критерием Кулона-Мора, являются гидравлически проводящими. Таким образом, для получения полного представления о фильтрационных потоках в трещиновато-пористой среде необходимо использование совместного флюидо-геомеханического моделирования.

Одним из распространенных методов моделирования фильтрации в трещиновато-пористых средах является модель дискретных трещин (*discrete fracture network*) [4]. В рамках данной модели расчетная область разбивается на две подобласти: поровую матрицу и систему трещин, между которыми имеются перетоки флюида, определяемые разностью давлений в подобластях. Трещины в данном случае рассматриваются как упрощенные объекты, размерность которых на единицу меньше, чем размерность рассматриваемой задачи. Например, для двумерной задачи трещина представляет собой линейный объект. При описании механического состояния горных пород трещина рассматривается как внутренняя граница, для которой необходимо задать граничные условия, описывающие механический контакт между берегами трещины. Для совместного описания фильтрации флюида в порах и трещинах, а также напряженно-деформированного состояния пористой среды обычно используется линейная модель Био [5, 6]. Отдельный интерес в области моделирования пороупругих сред представляют вопросы устойчивости численных схем совместного флюидо-геомеханического моделирования [7,8].

В настоящей работе в рамках модели линейной пороупругости выполнено численное моделирование фильтрации жидкости в пористой среде с трещинами. Исследовано влияние трещины на динамику порового давления и на напряженно-деформированное состояние вмещающей среды. Изучено влияние фильтрационных потоков на механическое состояние трещины. Для проведения расчетов был разработан собственный программный модуль. Корректность работы модуля проверена путем сравнения численных расчетов с известными аналитическими решениями задач пороупругости.

Для дискретизации уравнений теории упругости и фильтрации в данной работе применялся метод контрольных объемов. Решение системы уравнений пороупругости проводилось с использованием итерационного метода “фиксированных напряжений” (*fixed-stress split*), обладающего безусловной устойчивостью [7,8]. Геометрия расчетной области, содержащей систему трещин, описывалась на основе неструктурированных расчетных сеток, генерируемых с помощью свободно распространяемого пакета GMSH [9].

Подходы, используемые в работе для совместного флюидо-геомеханического моде-

лирования, позволяют определить влияние механического состояния системы трещин на ее фильтрационные свойства: учесть изменения проницаемости трещин за счет их раскрытия/схлопывания; выявить разломы, находящиеся в критически напряженном состоянии, т.е. гидродинамически активные разломы; определить потенциальные зоны разрушения горной породы.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы (проект № АААА-А17-117030610130-1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.** Подземная гидромеханика. Учебник для вузов. — М.: Недра, 1993, 416 с.
2. **Bandis S.C., Lunsden A.C., Barton N.R.** Fundamentals of rock joint deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 29, 19783, 249–268
3. **Zoback M.D.** Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2007, p. 449
4. **Karimi-Fard, M., Durlofsky, L.J. and Aziz K.** An efficient discrete fracture model applicable for general purpose reservoir simulator. *SPE Journal* 9(2), 2004, 227–236.
5. **Biot M.A.** General theory of three-dimensional consolidation. *J. Appl. Phys.* 12, 1941, 155–164.
6. **Coussy O.** Poromechanics. Chichester, England: John Wiley and Sons, 2004.
7. **Kim J., Tchelepi H.A., Juanes R.** Stability and convergence of sequential methods for coupled flow and geomechanics: Drained and undrained splits, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 200, 2011, 2094–2116.
8. **Kim J., Tchelepi H.A., Juanes R.** Stability and convergence of sequential methods for coupled flow and geomechanics: fixed-stress and fixed-strain splits, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 200, 2011, 1591–1606.
9. **C. Geuzaine and J.-F. Remacle.** Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 79, Issue 11, pages 1309-1331, 2009