УДК 628.398

Моделирование в коде GeRa тепловой конвекции в пористых средах с учетом переменной вязкости

Ф.В. Григорьев[1,3], И.В. Капырин[1,2]

[1]Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
[2]Институт вычислительной математики РАН
[3]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Часто при геомиграционном моделировании пренебрегают зависимостью вязкости жидкости от различных факторов и для простоты расчета принимают ее за константу. Однако, во многих работах (например, [1]) показано, что при наличии больших градиентов температуры переменная вязкость жидкости значительно влияет на картину течения. Целью данной работы являлось внедрение в расчетный код GeRa [2] сопряженной модели фильтрации, массопереноса, теплопереноса и переменной вязкости для учета этого явления.

Система уравнений, описывающая данную модель, выглядит следующим образом [3]:

1. Уравнение фильтрации:

$$\rho S\frac{\partial h}{\partial t}-\varphi\rho_0\beta\frac{\partial T}{\partial t}+\varphi\sum_{i=1}^{N_{comp}}\kappa_{vol,i}\frac{\partial C_i}{\partial t}+\nabla(\rho\vec{u})=\rho_s q_s,$$

2. Уравнение теплопереноса:

$$\varepsilon\frac{\partial T}{\partial t}+\nabla\left(\vec{u}T\right)-\nabla\left[\Lambda\nabla T\right]=QT_s,$$

3. Уравнение массопереноса:

$$\varphi\frac{\partial C_i}{\partial t}+\nabla\left(\vec{u}C_i\right)-\nabla\left(D\nabla C_i\right)=C_{s,i}q_s,\ i=1,\ldots,N_{comp},$$

4. Закон Дарси:

$$\vec{u}=-K\left(\nabla h+\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\nabla z\right),$$

5. Зависимость плотности от температуры и концентраций примесей:

$$\rho=\rho_0(1-\beta(T-T_0))+\sum_{i=1}^{N_{comp}}\kappa_{vol,i}C_i,$$

6. Влияние переменной вязкости:

$$K=\frac{k\rho_0 g}{\mu(T,C)}.$$

Здесь ρ – плотность жидкости, ρ_0 – плотность жидкости без примесей при референтной температуре, S – коэффициент упругой емкости, h – напор, φ – пористость, β – коэффициент теплового расширения жидкости, $\kappa_{vol,i}$ – коэффициент объемного расширения для i-й примеси, $\vec{u}$

– скорость фильтрации, ρ_s – плотность жидкости источника, q_s – интенсивность источника, $\varepsilon = \dfrac{\varphi\rho_0 c^{\mathrm{f}} + (1-\varphi)\rho^{\mathrm{rock}} c^{\mathrm{s}}}{\rho_0 c^{\mathrm{f}}}$ – коэффициент тепловой емкости пласта, $\Lambda = \dfrac{\lambda + \varphi\rho_0 c^{\mathrm{f}} D_C}{\rho_0 c^{\mathrm{f}}}$ – коэффициент температуропроводности пласта, $Q = \dfrac{q_s \rho_s}{\rho_0}$ – приведенная интенсивность источника, ρ^{rock} – плотность твердой матрицы без учета пор, c^{f} – удельная теплоемкость жидкости, c^{s} – удельная теплоемкость породы, λ – тензор теплопроводности, D_C – тензор дисперсии, T_S – температура источника, D – тензор диффузии-дисперсии, K – тензор фильтрации, k – тензор проницаемости, $\mu(T,C)$ – динамическая вязкость жидкости (функция от температуры и концентрации примеси).

Для численного решения системы в расчетном коде GeRa реализована схема расщепления по физическим процессам:

1. Расчет плотности и вязкости по температуре и концентрациям примесей с предыдущего шага по времени;

2. Решение уравнения фильтрации, нахождение напора;

3. Вычисление потоков по закону Дарси;

4. Решение задач теплопереноса и массопереноса.

Эти шаги могут выполняться либо единожды на шаге по времени (явное сопряжение моделей), либо итерационно, до достижения сходимости (неявное сопряжение). Дискретизация задач проводится с помощью метода конечных объемов (МКО). Адвективная подзадача может решаться явной противопотоковой схемой, либо схемой высокого разрешения. Во втором случае это – TVD-схемы MUSCL типа. Задачи диффузии, теплопроводности и фильтрации решаются полностью неявными схемами, причем дискретизация диффузионного оператора в рамках МКО может осуществляться либо по двухточечной схеме, либо по многоточечной О-схеме [4].

Модель протестирована на решении задачи о каверне [5]. Показано соответствие результатам, полученным кодом SEAWAT V4. На примере модели соляного купола [6] показано влияние переменной вязкости на процесс геомиграции.

Литература

1. *Guo, Z.L. and Zhao, T.S.* Lattice Boltzmann simulation of natural convection with temperature-dependent viscosity in a porous cavity // Progress in Computational Fluid Dynamics. – 2005. – Vol. 5. – Nos. ½. – pp.110–117.

2. *Капырин И.В., Иванов В.А., Копытов Г.В., Уткин С.С.,* Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения радиоактивных отходов // Горный журнал. – 2015. – № 10, С. 44–50.

3. *Diersh, H.-J. G., Kolditz, O.,* Coupled groundwater flow and transport: 2. Thermohaline and 3D convection sistems, Advances in Water resources 21 (1998) 401-425.

4. *Aavatsmark I., Barkve T., Boe O., Mannseth T.,* Discretization on unstructured grids for inhomogeneous, anizotropic media. part I: Derivation of the methods, SIAM. J. Sci. Comput. - 1998. - Vol. 19, no. 5. - Pp. 1700–1716.

5. *Dausman, A.M., Langevin, C.D., Thorne Jr., D.T., and Sukop, M.C.,* 2010, Application of SEAWAT to Select Variable-Density and Viscosity Problems: U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2009-5028, 31 p.

6. *Jamshidzadeh Z., Tsai F. C., Ghasemzadeh H., Mirbagheri S., Barzi M., Hanor J.* Dispersive thermohaline convection near salt domes: A case at Napoleonville Dome, southeast Louisiana, USA // Hydrogeol. J. – 2015. – Vol. 23. – No. 5. – pp. 983–998