

Библиографический список

1. Fowler A. *Mathematical Geoscience*. Springer-Verlag London Limited. 2011. – 904p.
2. McKenzie D.P. The generation and compaction of partial melts // *J. Petrol.* – 1984. – Vol. 25. – P. 713–765.
3. Morency C., Huismans R. S., Beaumont C., Fullsack P. A numerical model for coupled fluid flow and matrix deformation with applications to disequilibrium compaction and delta stability // *Journal of Geophysical Research.* – 2007. – Vol. 112.
4. Audet D.M., Fowler A.C. A mathematical for compaction in sedimentary basins // *Geophys. J. Int.* – 1992. – Vol. 110. – P. 577–590.
5. Антонцев С.Н., Кажихов А.В., Монахов В.Н. Краевые задачи механики неоднородных жидкостей. – Новосибирск: Наука, 1983. – 316 с.
6. Tokareva M.A. Solvability of initial boundary value problem for the equations of filtration in poroelastic media // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2016. – Vol. 722.
7. Эдвардс, Р. Функциональный анализ. Теория и приложения. – М.: Мир, 1969. – 1071 с.
8. Ладыженская О.А., Уралцева Н.Н. Линейные и квазилинейные уравнения эллиптического типа. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
9. Папин А.А. Существование решения «в целом» уравнений одномерного неизотермического движения двухфазной смеси. I. Постановка задачи и вспомогательные утверждения // *Сибирский журнал индустриальной математики.* – 2006. – Т. IX, № 2. – С. 116–136.
10. Папин А.А. Существование решения «в целом» уравнений одномерного неизотермического движения двухфазной смеси. II. Результаты о разрешимости // *Сибирский журнал индустриальной математики.* – 2006. – Т. IX, № 3. – С. 111–123.

УДК 519.6:539.3**Численное решение задачи консолидации Терцаги в программном комплексе Abaqus**

А.В. Устюжанова, Г.В. Кравченко
АлтГУ, г. Барнаул

В данной работе демонстрируется применение программного комплекса Simulia Abaqus для получения численного решения задачи консолидации К. Терцаги [1].

Программный комплекс Simulia Abaqus предназначен для конечно-элементного моделирования сложных конструкций и проведения прочностных расчетов инженерных задач [2]. Данный программный комплекс обладает рядом преимуществ, одно из которых – это возможность использовать разные типы анализа при решении связанных задач мультифизики в области прочности конструкций. К таким задачам относится и задача о потоке жидкости в пористой среде.

Для учебных целей существует бесплатная версия Abaqus Student Edition, которая повторяет полную версию, но с ограничением на количество узлов и элементов в сетке не более 1000.

Задача консолидации (уплотнения) пороупругой среды состоит в следующем. Исследуемая область ограничена непроницаемыми нижней и боковыми поверхностями. К верхней проницаемой поверхности прикладывается сжимающее напряжение, которое создает напор в жидкости. Скорость потока жидкости пропорциональна градиенту давления согласно закону Дарси. Рассматриваемая задача является одномерной из-за накладываемых граничных условий, в результате которых деформирование пороупругой среды происходит только в вертикальном направлении.

Рассмотрим численную реализацию задачи консолидации с помощью Abaqus. Модульный принцип, заложенный в программном комплексе Abaqus, делает более удобным и наглядным моделирование и проведение вычислительных экспериментов.

В пакете Abaqus не используются одномерные элементы, поэтому в модуле Part строится двумерная область в виде прямоугольника с размерами a , b .

В модуле Property, предназначенном для определения физических характеристик материала, задаются следующие параметры задачи: модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , удельный вес поровой жидкости γ , проницаемость k . Следует отметить, что в Abaqus под проницаемостью понимается эффективная проницаемость, единица измерения которой такая же как у скорости. Понятие «эффективной проницаемости» совпадает с термином «коэффициент фильтрации». Некоторые авторы еще используют термин «гидравлическая проводимость». Поэтому при задании значения проницаемости в программном комплексе Abaqus необходимо переводить ее в соответствующие единицы измерения. Вместо пористости материала ϕ задается значение коэф-

$$\text{фициента пустотности } e = \frac{\phi}{1 - \phi}.$$

В модуле Mesh происходит разбиение исследуемой области на конечные элементы. Программный комплекс Abaqus содержит большую библиотеку конечных элементов для разных типов анализа. Для решения рассматриваемой задачи выбирается 8-узловой прямоугольный конечный элемент CPE8P, предназначенный для моделирования напряженно-деформированного состояния пористой насыщенной среды.

В модуле Load задаются начальные и граничные условия. Нижняя граница области является неподвижной, компоненты вектора перемещения u_1 , u_2 равны нулю. На боковых границах горизонтальная компонента вектора перемещения u_1 равна нулю. На верхней границе в начальный момент времени задается прикладываемая нагрузка σ_0 .

В модуле Step создаются шаги расчетов и определяются выходные данные по результатам. Для решения рассматриваемой задачи выбирается процедура «Soils, consolidation». Выбор временного шага осуществляется согласно критерию

$$\Delta t \geq \frac{\gamma}{6Ek} (\Delta h)^2,$$

где Δh – характерный размер конечного элемента.

Для запуска вычислительного процесса применяется модуль Job. Просмотр результатов расчета и обработка полученных данных происходит в модуле Visualization.

В связи с тем, что аналитическое решение одномерной задачи консолидации К. Терцаги известно [3], данную задачу обычно применяют для тестирования компьютерных программ, реализующих численные решения задач теории пороупругости (например, [4]).

Освоение моделирования численного решения в программном комплексе Abaqus на основе задачи консолидации К. Терцаги будет полезным для дальнейшего успешного применения данного программного комплекса в численных расчетах более сложных задач теории пороупругости

Библиографический список

1. Terzaghi K. Soil mechanics in engineering practice. – John Wiley and Sons, 1996. – 592 p.
2. Нуштаев Д.В. Abaqus. Пособие для начинающих. Пошаговая инструкция. – М.: ООО «Тесис», 2010. – 78 с.
3. Coussy O. Poromechanics. – John Wiley and Sons, 2004. – 298 p.
4. Численное моделирование задач пороупругости / В.Е. Борисов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 81. – 36 с.