

К ВОПРОСУ ГЕНЕРАЦИИ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Эффективность конечно-элементного моделирования геомеханических процессов существенно зависит от качества дискретной модели, позволяющей представить физическую область в виде расчетной сетки. Расчетная сетка определяет не только погрешность численного решения, но и такие важнейшие характеристики вычислительного процесса, как время счета и необходимый объем памяти вычислительной системы. Как известно, создание расчетных сеток является одним из трудоемких этапов решения задач математического моделирования и чревато высокой вероятностью внесения трудно обнаруживаемых ошибок /1-5/.

Моделирование задач геомеханики осложнено неоднородностью структуры массива, разнообразием моделей поведения и разрушения горных пород, зависимостью свойств пород от различных факторов. При решении двумерных задач геомеханики исследуемая область разбивается на мелкие треугольные элементы. Для решения трехмерных задач можно использовать тетраэдр, в котором для его 4 узлов следует выбрать порядок индексации узлов и построить конечно-элементную модель тела. Степень точности определяется количеством простых тетраэдральных элементов. Увеличение количества элементов приводит к увеличению числа уравнений, что повышает требования к вычислительным ресурсам вычислительной машины. К примеру, если трехмерная область требует сетку размерностью $120 \cdot 120 \cdot 120 = 1728000$ узловых точек, то общее число уравнений оказывается равным $1728000 \cdot 3 = 5184000$, так как должны быть определены три компоненты перемещений в каждой узловой точке. При таком увеличении размера сетки ее использование методом конечных элементов требует оптимизационных алгоритмов, повышая трудоемкость ее программной реализации. Кроме того, к сетке для метода конечных элементов предъявляется ряд особых требований: треугольники не должны быть сильно вытянутыми, так как наличие таких треугольников отрицательно сказывается на точности результатов расчета. Во-вторых, должен быть учтен характер работы конструкции и ее геометрия, т.е. в местах концентрации напряжений сетка должна сгущаться /2-4/.

При программной реализации метода конечных элементов фактически создают три модуля /1, 5/:

1. Программный модуль, называемый *предпроцессор*, отвечающий за формирование конечно-элементной сетки, задание физико-механических свойств материалов, определение граничных условий.
2. Программный модуль, называемый *процессор*, отвечающий за формирование матрицы жесткости, решение системы уравнений, выполнение итерационного решения при выбранной среде.
3. Программный модуль, называемый *постпроцессор*, отвечающий за вывод результатов расчетов в графическом, наиболее информативном виде, построение поверхности обрушения, оценка устойчивости массива горных пород.

В настоящее время при создании программных систем широко практикуется использование с адаптацией для собственных программ открытых кодов свободно распространяемых пакетов в качестве внешних предпроцессоров, процессоров и постпроцессоров /4/. Они могут подключаться как библиотеки программных ресурсов. Наличие свободно распространяемых пакетов позволяет значительно сократить время разработки программ. В качестве предпроцессоров (генераторов расчетных сеток или мешеров) известны программные продукты: для построения двумерных сеток - Triangle, для построения двумерных и трехмерных сеток - GMSH, NETGEN, TETGEN и т.д. /6-8/. Например, пред/постпроцессор GMSH (рис. 1) предназначен для построения параметризованных твердотельных моделей, получения сеток, а также для визуализации результатов расчета. GMSH никаких расчетов не выполняет и может быть использован только в комплекте с другими программами – процессорами, такими, как Code-Aster, CCX/Calculix, IMPACT, GETDP и т.д. Другой известной программой-мешером является NETGEN. Программа NETGEN поддерживает импорт STEP и IGES и позволяет сохранять сетку во многих специальных "сеточных" форматах. Другой известной программой, которую можно использовать вместе с GMSH, является Calculix (рис. 2). Программа Calculix - открытый, свободно распространяемый конечно-элементный пакет для моделирования нелинейностей, решения задач статики, динамики и т.д. /8/.

Calculix состоит из двух модулей предпроцессора CalculiX GraphiX (CGX) - Preprocessor и постпроцессора CCX Postprocess. Каждый из этих модулей вызывается в командном окне. В строку ввода в окне Calculix необходимо ввести команду, следуя правилам, отображаемым в окне. Например, при вводе команды: *cgx -b beam.fbd* появится окно графического предпроцессора CGX, в котором выполняется построение объекта и создание расчетной схемы. Затем в командном окне вводится список команд для задания параметров расчета с

помощью постпроцессора CCX. На рис. 3 приведено окно с результатами расчетов.

К открыто распространяемым пакетам относится и программа (предпроцессор/процессор /постпроцессор) Impact, которая поддерживает импорт сетки из GMSH через форматы .msh и поверхностной сетки – через .stl. Этот пакет для функционирования требует загрузки виртуальной машины Java и 3D-библиотек графической системы Open GL. Имеет графический интерфейс, представленный на рис. 4, с редактируемой библиотекой свойств. Impact относится к классу программ для выполнения нелинейного динамического анализа, конечно-элементную модель в Impact можно решить в динамической постановке, задав только закон изменения действующих нагрузок, граничных условий и т.д. /9/.

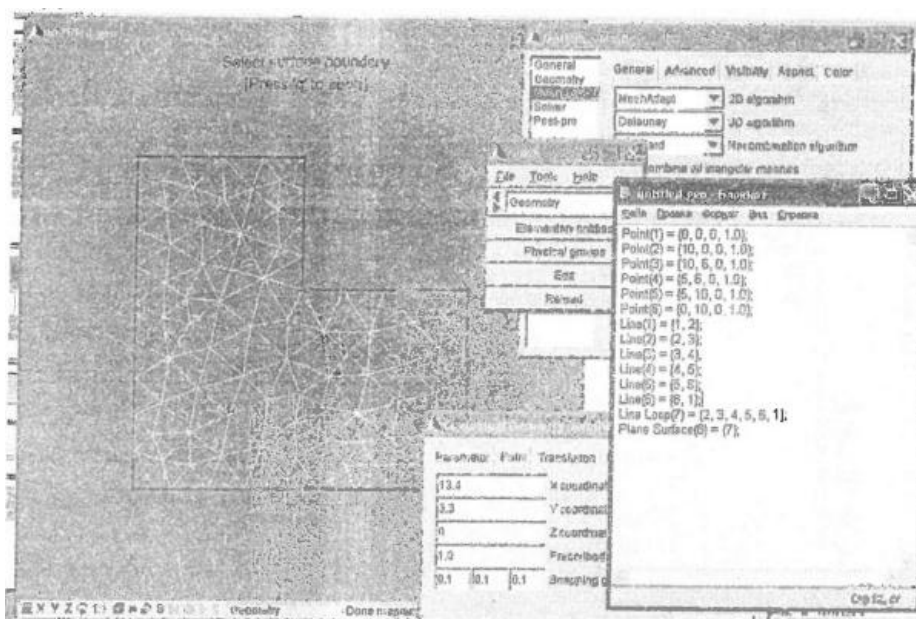


Рис.1. Рабочее окно генератора расчетной сетки GMSH

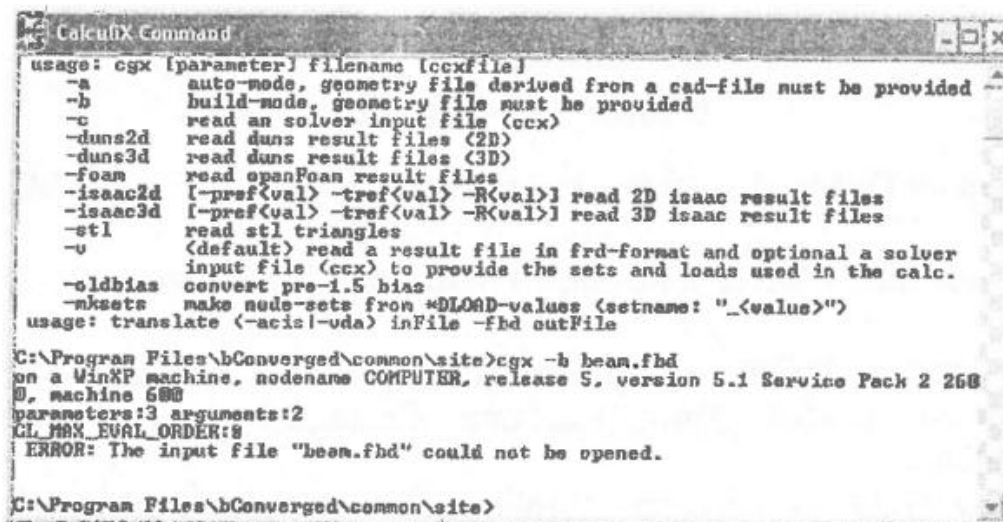


Рис.2. Командное окно программы Calculix

Таким образом, для повышения эффективности конечно-элементного моделирования геомеханических процессов вполне естественным является использование внешних генераторов для построения сеток, адаптирующихся к собственной разработке программы вычисления напряжений, и вывод результатов.

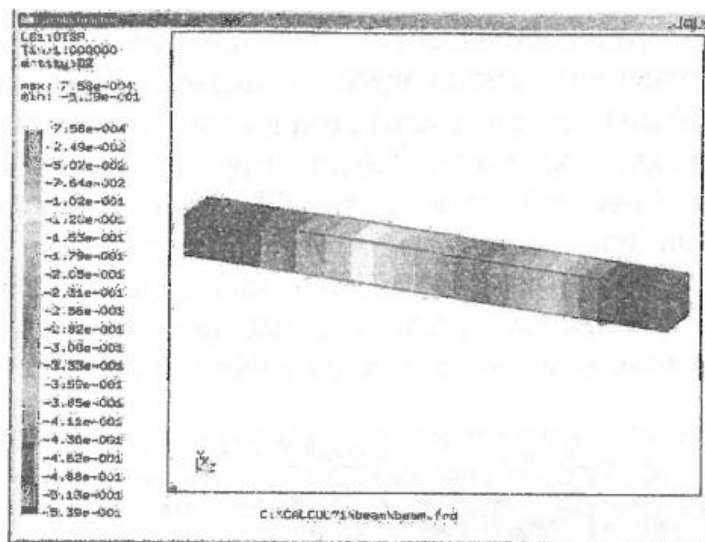


Рис. 3. Графическое представление результатов расчета в Calculix



Рис. 4. Окно программы Impact

Список литературы

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 395 с.
2. Фадеев А.В. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 224 с. 3. Jim Ruppert: A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation, NASA Ames Research Center, Submission to Journal of Algorithms,¹ 1994.
3. Ivanov E.G. Automatic Parallel Generation of Three-Dimensional Unstructured Grids for Computational Mechanics // Вычислительные технологии. – 2006. – Т.11. – № 1. – С. 3-17.

5. Усманов С.Ф. Прогнозирование устойчивости бортов высокогорных карьеров на основе моделирования напряженно-деформированного состояния. – Бишкек: КРСУ, 2009. – 172 с.

6. 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 1309-1331,² 2009.

7. <http://www.hpfem.jku.at/netgen/>

8. <http://www.calculix.de>

9. <http://impact.sourceforge.net/>