

М.А.КАРАСЕВ, канд. техн. наук, доцент, *karasevma@gmail.com*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

M.A.KARASEV, PhD in eng. sc., associate professor, *karasevma@gmail.com*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ

Приведены подходы к решению задач геомеханики больших размерностей, высоконелинейных задач с возможностью развития больших пластических деформаций, задач контактного взаимодействия массива самого с собой, опыт применения высокопроизводительных вычислительных систем.

Ключевые слова: численные методы, пластические деформации, высокопроизводительные системы, контактные задачи.

EFFICIENT NUMERICAL METHODS FOR GEOTECHNICAL PROBLEMS

This article give a general overview of methods to solve large scale geotechnical problems, nonlinear high deformation and plastic problems, self contact of strata and application of high performance computing.

Key words: numerical methods, plastic strain, high performance system, contact problems.

Численные методы анализа находят все большее применение при решении задач геомеханики. В статье рассмотрены вопросы практического применения современных подходов, разработанных в рамках численных методов для решения задач геомеханической направленности. Что понимается на данный момент под эффективными методами решения задач геомеханики? Это разработка математической модели, которая бы адекватно отвечала тем процессам в массиве, которые происходят при разработке месторождения, строительстве карьера, проходке тоннелей или сооружении других подземных объектов. При создании численных моделей для решения задач геомеханической направленности они должны рассматриваться в объемной постановке, с детальным описанием горно- и гидрогеологических условий; учтено начальное поле напряженного состояния массива, а при оценке отдельных участков или конструкций

подземных объектов должно быть учтено изменение поля напряженного состояния, вызванного ведением горных работ; наличие адекватных моделей материалов рассматриваемому массиву; контактное взаимодействие и высоконелинейные среды.

Сформулированные выше требования к геомеханическим моделям очевидны и всем известны. В статье рассмотрены вопросы преодоления трудностей, возникаемых при решении задач такого класса численными методами, методом конечных элементов и конечных разностей, которые на данный момент являются наиболее распространенными и проработанными.

Первая и наиболее очевидная трудность – это ограничение размерности решаемой задачи. Основным параметром, ограничивающим размерность, – объем оперативной памяти, во вторую очередь – скорость центрального процессора. В зависимости от метода решения, ограничение размерности

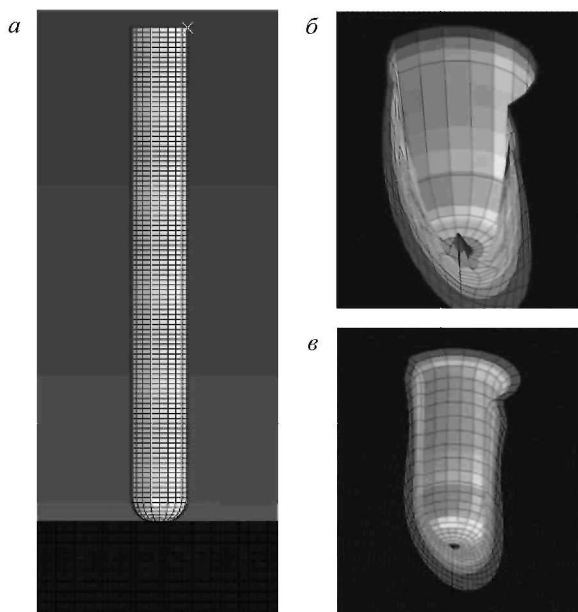


Рис.1. Применение ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) метода для решения высоконелинейных задач геомеханики

задачи для компьютера стандартной конфигурации составляет от 500 тыс. до 1 млн элементов при их линейной формулировке. Этого достаточно чтобы решать задачи среднего класса, но, например, описание в единой модели рудника с достаточной точностью невозможно. При решении высоконелинейных задач с возможностью прогрессирующего разрушения или больших пластических деформаций возникает значительное искажение конечно-элементной сетки, что в свою очередь ведет к потере точности решения или получению совершенно абсурдных результатов. Самоконтактное взаимодействие массива самого с собой, которое может проявляться при значительных деформациях, необходимо учитывать для точности результатов расчета.

Для преодоления трудностей, возникаемых при решении такого класса задач, можно использовать метод адаптивного перестроения конечно-элементной сетки для задач со значительными деформациями; метод сабмоделирования для задач значительной размерности; метод самоконтактного взаимодействия и высокопроизводительные системы. Другие методы для решения такого класса задач в статье не рассматриваются.

На рис.1, а приведена задача о погружении сваи в грунтовой массив, которая относится к классу высоконелинейных с контактным взаимодействием. Задача решалась методом конечных разностей, где погружение сваи задавалось через вынужденные перемещения. На рис.1, б приведено решение задачи при стандартном подходе без адаптивного перестроения сетки. Видно, что в процессе погружения искажение расчетной сетки значительно, что ведет к недостоверным результатам в данной области расчета. Промоделировать погружения сваи на полную глубину, применяя стандартный подход к решению данной задачи, не удалось, сходимость решения пропала уже при 20 % от полного погружения сваи. На рис.1, в показано решение задачи с использованием адаптивного перестроения сетки. Как видно, сетка остается достаточно качественной, а промоделировать погружение сваи при таком подходе удалось на всю глубину. Схожие проблемы могут возникнуть при решении задачи устойчивости откоса для случая, когда основной интерес представляет не коэффициент запаса по устойчивости, а поведение массива при потере устойчивости откоса. Без адаптивного перестроения сетки ее искажения будут значительны, а получаемые результаты не могут считаться достоверными. С адаптивным перестроением качество элементов остается в допустимом пределе. Область применения данного метода – высоконелинейные задачи механики грунтов и горных пород, задачи проникновения одного материала в другой, задачи устойчивости бортов карьера, взрывные работы и прочие динамические явления.

Применение метода сабмоделирования в первую очередь связано с ограниченностью вычислительных ресурсов. Метод заключается в рассмотрении задачи в целом, на всех этапах ведения горных работ, с ограниченным количеством зон дискретизации. Затем участки повышенного интереса рассматриваются более подробно с увеличением зон дискретизации до необходимой точности решения. При этом на интересующих участках задаются не только начальные напряжения и деформации, но и граничные

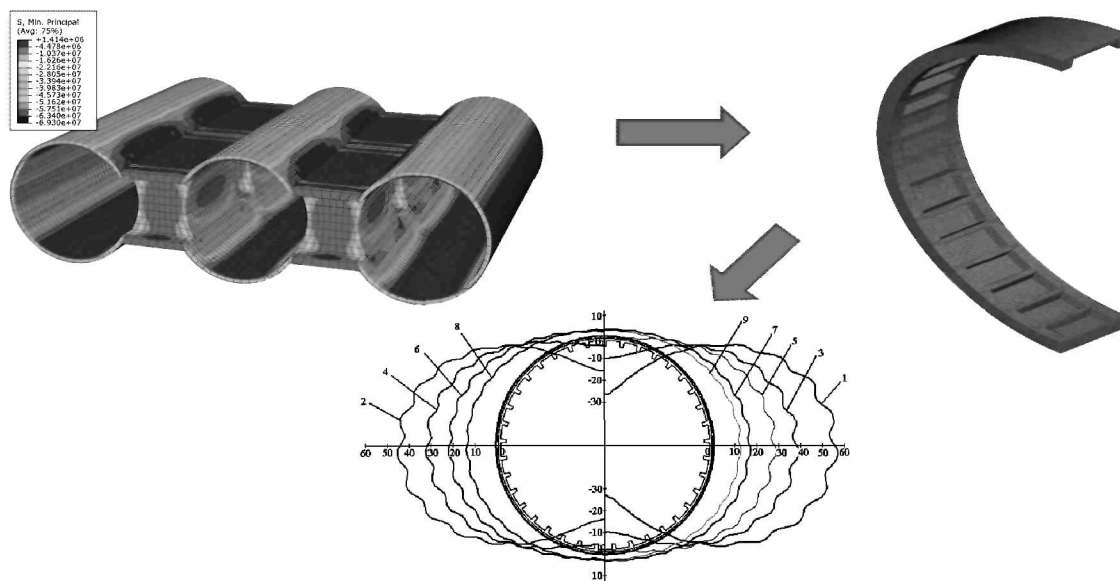


Рис.2. Пример применения метода сабмоделирования (SubModeling) для решения задач геомеханики
1-9 – зависимости напряжений в контуре обделки от свойств массива

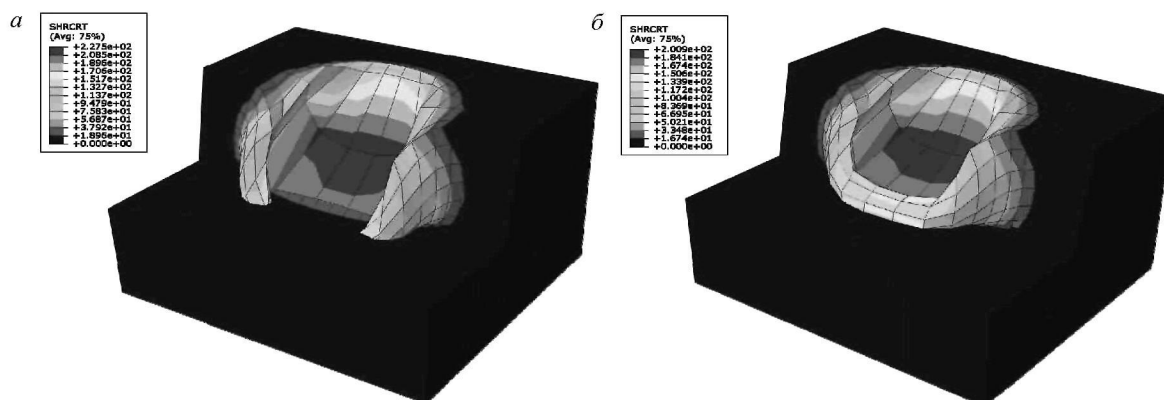


Рис.3. Самоконтактное взаимодействие в задачах геомеханики

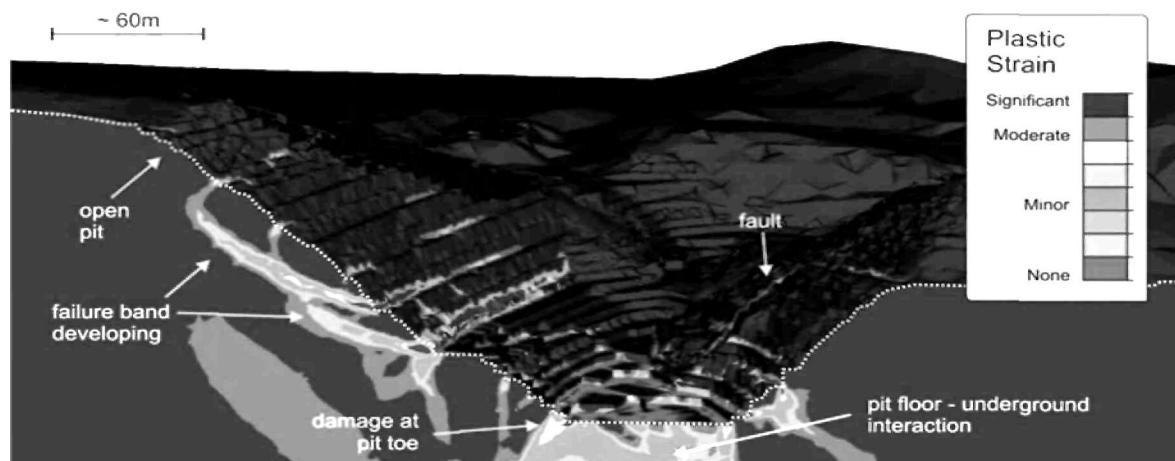


Рис.4. Применение высокопроизводительных систем для решения задач геомеханики: оценка устойчивости бортов карьера (Beck Arndt Engineering, 2004)

условия, взаимосвязанные с глобальной моделью. Таким образом, можно получить достоверную информацию о напряженно-деформированном состоянии локальной зоны моделируемого объекта. На рис.2 представлен такой подход на примере расчета обделки станции метрополитена пилонного типа. На первоначальном этапе решается задача взаимодействия обделки станции с массивом, а затем по полученному решению с уточнением геометрических особенностей конструкции обделки проводится уточненный анализ напряженного состояния крепи. Можно отметить, что на стандартных компьютерах и без метода сабмоделирования задачу с такой степенью детализации обделки тоннеля решить крайне затруднительно.

Применение метода сабмоделирования целесообразно при разработке подземного месторождения полезных ископаемых. На первом этапе получено распределение напряжений в массиве по мере ведения проходческих работ, а на втором этапе с применением метода сабмоделирования получен характер взаимодействия крепи с окружающим массивом. Необходимо отметить, что при решении задач столь большого размера обойтись без высокопроизводительных систем практически невозможно.

Класс задач геомеханики, решаемых методом сабмоделирования: детальное изуче-

ние НДС вокруг отдельных выработок и тоннелей при разработке подземных месторождений или сложных компоновочных узлов подземных сооружений; уточнение устойчивости бортов карьеров в локальной области; детальное изучение НДС конструкций подземных горных выработок.

Возможность самоконтактного взаимодействия должна быть учтена при разработке численных моделей задач геомеханики, если ожидаются значительные деформации горной массы. Данный процесс можно продемонстрировать на следующем примере. На рис.3 приведена задача устойчивости откоса. На рис.3, а приведено решение задачи без учета самоконтактного взаимодействия. Анализируя результат моделирования, можно отметить, что решение задачи физически неверно, область пластических деформаций больше, чем в задаче с учетом контактного взаимодействия (рис.3, б), а нагрузка на нижележащую породу не передается.

Основной класс задач, решаемых с помощью данного метода, это разработка месторождений полезных ископаемых методом обрушения и прогрессивное разрушение борта карьера или сети подземных горных выработок, а также задачи закладки выработанного пространства.

Область применения высокопроизводительных систем в геомеханике: детальное изучение геомеханических процессов в области рассматриваемого объекта, например карьер в объемной постановке с учетом этапности строительства (рис.4) или разработка подземного месторождения и другие сложные объекты, где необходима достаточно высокая степень дискретизации модели для получения достоверных результатов. Применение стандартных вычислительных средств может быть затруднительным вследствие невозможности получения результатов в заданные сроки и решения такого класса задач на имеющейся вычислительной технике.

Степень масштабируемости современных численных методов в коммерческих программных продуктах можно оценить по диаграмме, представленной на рис.5. Как видно, на данный момент хорошая масшта-

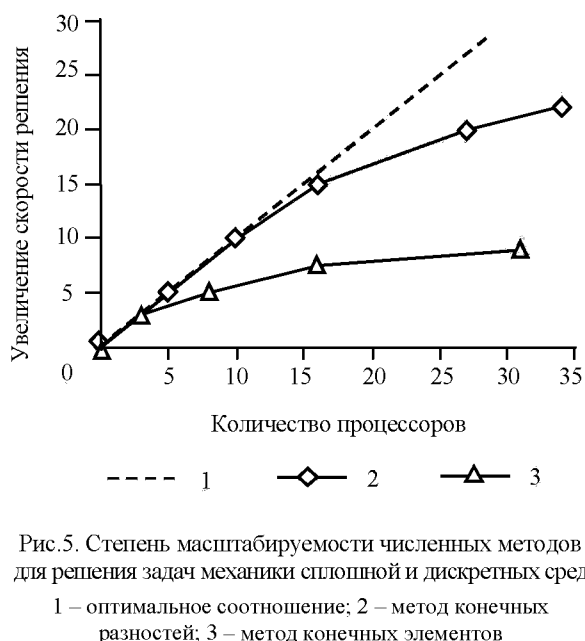


Рис.5. Степень масштабируемости численных методов для решения задач механики сплошной и дискретных сред
1 — оптимальное соотношение; 2 — метод конечных разностей; 3 — метод конечных элементов

бируемость задач при их решении методом конечных элементов достигнута лишь для восьми параллельно работающих процессоров. Метод конечных разностей обладает значительно лучшей масштабируемостью и производительность систем практически соответствует оптимальной при количестве процессоров до 20 единиц.

В заключение хотелось бы отметить, что, несмотря на всю сложность процессов, происходящих при ведении горных работ, уже сегодня можно достаточно эффективно решать задачи такого класса. Инженерам и исследователям доступны средства, основанные на численных методах расчета, в рамках которых эти задачи могут быть решены.