

И.Е.ШИПОВСКИЙ, канд. техн. наук, Таврический нац. ун-т,
ivan@corp.crimea.ua

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА С ГОРНОЙ ПОРОДОЙ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ.

В рамках механики сплошной среды рассматривается численное описание динамического поведения материалов горных пород в технологических процессах резания материала исполнительным органом шахтного оборудования. Основное внимание уделяется методике для численной реализации контактного взаимодействия инструмента.

Изучение состояния взаимодействующей системы «инструмент – горная порода» включает необходимость осмысления большого числа физико-математических аспектов. Схематизация процесса, ввиду невозможности учета всех факторов, дает возможность поставить практически приемлемую для решения задачу. Конечной целью исследования любой прикладной задачи является оптимизация того или иного процесса, конструкции и т.д. Большая трудоемкость экспериментальной проверки каждого варианта набора исходных параметров не устраивает практиков и обуславливает разрыв между научными исследованиями и реальными задачами. В связи с этим важным является создание методик, позволяющих быстро получить оценочные характеристики изучаемого процесса.

Напряжения, действующие на контактных поверхностях режущего инструмента, необходимы для обоснованного выбора инструментального материала и для расчетов инструмента на прочность. Данные о величине и направлении сил резания пород необходимы для проектирования породоразрушающих машин, оснастки, а также технологических систем автоматического регулирования. Эти данные можно получить, используя численное моделирование.

При численном решении задач о взаимодействии резцового инструмента с различными препятствиями для выявления основных качественных и количественных особенностей происходящих процессов необходим строгий учет контактного взаимодействия двух или более различных тел либо сред. Если в одномерной постановке его можно осуществить достаточно легко на основе известных методов численного моделирования ударных явлений [1,2], то в двумерном и трехмерном случаях возникает ряд специфических трудностей. Рассмотрим некоторые из них, например, для двумерной задачи контакта двух

тел [3].

Допустим, что сеточное разбиение рассматриваемых тел таково, что в начальный момент времени их границы совпадают друг с другом вдоль контактной поверхности. Однако значительное число процессов динамического контакта сопровождается такими эффектами, как проскальзывание границ взаимодействующих тел, изменение протяженности этих границ, образование на них участков свободной поверхности. Численное моделирование таких явлений лагранжевыми методами предполагает, что граничные узлы, принадлежащие различным телам, должны в процессе расчета смещаться относительно друг друга. Вследствие этого через некоторое время после начала расчета невозможно совместить вплотную две границы, каждая из которых в большинстве численных методов представляет собой ломаную линию из отрезков, последовательно соединяющих граничные узлы сетки. Поэтому неизбежно приходится мириться с существованием зазоров между поверхностями либо с их взаимным пересечением, либо с тем и другим вместе. Несовпадение граничных узлов двух контактирующих тел вызывает значительные трудности при динамической аппроксимации силовых краевых условий. Это связано с дискретностью задания напряжений, характерной для численных методов, и в результате с невозможностью непосредственно определить усилия, действующие на тот или иной участок границы одного тела со стороны другого.

Все вышеперечисленное приводит к тому, что часто ограничиваются заданием на контактной поверхности условия полного прилипания. Это, хотя и значительно упрощает расчет, в некоторых случаях не позволяет даже качественно правильно описать происходящие процессы. Поэтому необходимо использовать алгоритмы, которые дают возможность решить задачу в полном объеме.

Препятствия, указанные выше, преодолеваются в таких алгоритмах по-разному. Широкое распространение получил алгоритм, разработанный при решении задачи о взаимодействии газовой среды с поверхностью металлической пластины [1]. Несимметричное рассмотрение контактирующих границ в нем, особенно при описании взаимодействия твердых деформируемых тел, приводит к искажению конечного результата. Другой недостаток рассматриваемого метода заключается в том, что вид используемых в нем аппроксимирующих положений существенно, зависит от конфигурации и взаимного положения границ двух тел. Поэтому необходимо заранее предусматривать ход вычислений в задачах, где сетки значительно деформируются и перемещаются в ходе расчета. Данное обстоятельство создает заметные трудности при программной реализации методики и для каждого варианта такой реализации ограничивает круг решаемых задач.

Многие авторы при численном моделировании контакта применяют алгоритмы, основанные на разделении взаимодействующих тел на области, одна из которых принимается скользящей по другой. В случае проникания в процессе счета узла скользящей области внутрь расчетной сетки, определяющей поверхность скольжения, узел сносится на эту поверхность по нормали к ней. Расстояние, на которое смещается узел, определяет изменение скорости снесенного узла. Изменение импульса этого узла передается близлежащим узлам поверхности, на которую произведен снос [4].

Подобные алгоритмы обладают несимметрией по отношению к контакту из-за априорного задания скользящей поверхности и поверхности, по которой идет скольжение. Опыт показывает, что в алгоритмах, основанных на сносе узлов, важно производить перемещение узла на поверхность тела из материала с большей плотностью. А также важно, чтобы эта поверхность была вогнутой во избежание возникновения нефизических значений ускорений узлов и неопределенностей в определении направления сноса.

В алгоритме симметричного расчета контактных границ [3] на каждом шаге по времени вычисляются предварительные значения координат и скоростей граничных узлов для каждого тела в отдельности, причем на контактной границе предполагается отсутствие сил реакции, что позволяет избежать трудностей с динамической аппроксимацией силовых краевых условий. Затем выбирается такое значение откорректированной скорости, чтобы один или, если это возможно, несколько из перечисленных выше узлов в конце шага по времени оказывались в точности на соответствующих участках границы, а остальные не проникали внутрь другого тела.

Таким образом, в результате действия предлагаемого алгоритма границы двух тел, не пересекаются, примыкают, насколько это возможно, друг к другу, хотя между ними и могут существовать незначительные локальные зазоры.

Как показывает практика, предлагаемые алгоритмы расчета контакта в значительной степени зависимы от формы поверхностей и от различий в плотности материалов, а также в величине шага разбиения расчетных сеток взаимодействующих тел. Эти моменты вынуждают до начала расчета определять дополнительные условия его проведения, что значительно снижает эффективность алгоритмов и рамки их применимости. Вопрос о создании достаточно эффективного универсального алгоритма описания контактных взаимодействий остается не закрытым.

Расчеты, проводившиеся для исследования высокоскоростного удара [5], показали, что хорошие результаты при численном модели-

ровании контактного взаимодействия дает алгоритм, основанный на специальной достройке счетных ячеек вокруг контактных узлов. Достройка проводится с целью обеспечения сквозного счета на контактной поверхности. Применение такого алгоритма в рассматриваемом в работе случае устраняет трудности, указанные выше и устраняет зависимость от различия в шагах разбиения расчетных сеток взаимодействующих тел и от величины их плотности.

При разбиении областей расчета в трехмерном случае на элементы в форме тетраэдра граничные поверхности состояются из набора плоских треугольников, определенным образом ориентированных в пространстве. Параметры, определяемые в расчетных узлах, зависят только от состояния прилегающих к узлу конечных элементов. Для идентификации прилегающих к контактным узлам конечных элементов, прежде всего, определяются зоны взаимодействующих тел, вступающие в процессе взаимодействия в контакт. Для этого производится привязка узлов контактной поверхности инструмента к соответствующим близлежащим треугольникам поверхности породы.

В первоначальный момент взаимодействия считается, что узлы породы имеют ту же скорость, что и контактные узлы резца. За шаг по времени Δt происходит перемещение узлов согласно скоростям, которые в них определены. Далее рассчитываются все величины без учета контактного взаимодействия. После этого выполняется процедура коррекции скоростей контактных узлов, обеспечивающая соблюдение непрерывности нормальной к контакту составляющей скорости и осуществляющая свободное скольжение без трения в касательных к контакту направлениях. При необходимости учета трения можно легко учесть трение между контактными поверхностями, корректируя на втором этапе алгоритма не только нормальные, но и касательные составляющие соответствующих скоростей с учетом коэффициента трения.

В области породы вокруг точки расположения контактного узла достраиваются так называемые фиктивные конечные элементы, равные по объему прилегающим к этому узлу конечным элементам резца. По объемам достроенных элементов находится масса материала породы M^T сосредоточенная в точке расположения узла резца на контактной поверхности породы.

Вводится локальная правая ортогональная система координат, один из единичных ортов которой \hat{n} - нормаль к поверхности соответствующего контактного треугольника породы, к которому «привязан» рассматриваемый узел резца, два других орта \hat{t} , \hat{k} ортогональные касательные направления в плоскости треугольника. В достроенных таким образом фиктивных элементах средние напряжения опре-

деляются интерполяцией по напряжениям в элементах породы, попавших в достроенные фиктивные элементы. Нормальные к контакту составляющие скорости и силы в контактном узле резца вычисляются по напряжениям в примыкающих к нему элементах резца и по напряжениям, определенным в соответствующих фиктивных элементах. Силы, действующие в точке расположения узла резца со стороны породы, определяются с учетом различия размеров разбиения расчетных сеток резца и породы. Составляющие сил, действующих на контактный узел резца со стороны породы, можно выразить в виде

$$\begin{aligned} F_n^P &= (F_x \cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, x) + F_y \cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, y) + F_z \cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, z))^P \\ F_t^P &= (F_x \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, x) + F_y \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, y) + F_z \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, z))^P \\ F_k^P &= (F_x \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, x) + F_y \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, y) + F_z \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, z))^P \\ F_n^T &= (F_x \cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, x) + F_y \cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, y) + F_z \cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, z))^T \\ F_t^T &= (F_x \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, x) + F_y \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, y) + F_z \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, z))^T \\ F_k^T &= (F_x \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, x) + F_y \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, y) + F_z \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, z))^T \end{aligned}$$

где $(\overset{\mathbf{r}}{n}, x_i), (\overset{\mathbf{r}}{t}, x_i), (\overset{\mathbf{r}}{k}, x_i)$ – углы между ортами локальной системы координат и направляющими осей декартовой системы координат; индексы T, P – означают принадлежность величины к точке породы, где расположен контактный узел резца; узлу породы; узлу резца соответственно;

$$\cos(\overset{\mathbf{r}}{n}, x_i) = (b/Z)^n; \cos(\overset{\mathbf{r}}{t}, x_i) = (c/Z)^n; \cos(\overset{\mathbf{r}}{k}, x_i) = (d/Z)^n;$$

$$Z = \text{sgn}(a^n) (\sqrt{b^2 + c^2 + d^2})^n$$

Выражения a, b, c, d есть площадь соответствующего треугольника контактной поверхности и его проекции на координатные плоскости [5]. Остальные величины находятся из условий ортогональности.

Приращение нормальной составляющей скорости на контакте определяется из рассмотрения силового воздействия на систему (узел резца + точка породы, где расположен этот узел) от окружающих ее конечных элементов резца и фиктивных достроенных элементов

$$\Delta U_n^P = \Delta U_n^T = \frac{F_n^P + F_n^T}{M^P + M^T} \Delta t.$$

Расчет по этому выражению обеспечивает непрерывность нормальной составляющей вектора скорости на контакте.

Приращения касательных составляющих скоростей вычисляются независимо с обеих сторон от поверхности контакта

$$\Delta U_t^P = \frac{F_t^P}{M^P} \Delta t, \quad \Delta U_k^P = \frac{F_k^P}{M^P} \Delta t,$$

$$\Delta U_t^T = \frac{F_t^T}{M^T} \Delta t, \quad \Delta U_k^T = \frac{F_k^T}{M^T} \Delta t$$

Данные условия отвечают отсутствию трения на контакте. Приращения скоростей в направлениях осей, координат будут

$$\Delta u = \Delta U_n \cos(\vec{n}, x) + \Delta U_t \cos(\vec{t}, x) + \Delta U_k \cos(\vec{k}, x),$$

$$\Delta v = \Delta U_n \cos(\vec{n}, y) + \Delta U_t \cos(\vec{t}, y) + \Delta U_k \cos(\vec{k}, y),$$

$$\Delta w = \Delta U_n \cos(\vec{n}, z) + \Delta U_t \cos(\vec{t}, z) + \Delta U_k \cos(\vec{k}, z)$$

Интерполяцией по найденным приращениям составляющих скоростей в точках породы, где расположены контактные узлы реза, определяются приращения скоростей узлов контактной зоны породы: ΔU_i^{Π} .

Таким образом, значения скоростей на контакте находятся из выражений

$$\left. \begin{aligned} (U_i^P)_n^{n+3/2} &= (U_i^P)_n^{n+1/2} + \Delta U_i^P \\ (U_i^{\Pi})_n^{n+3/2} &= (U_i^{\Pi})_n^{n+1/2} + \Delta U_i^{\Pi} \end{aligned} \right\},$$

чем обеспечивается выполнение контактных граничных условий.

Считается, что граница контакта не выдерживает растягивающих напряжений, поэтому на той части поверхности, где появляются растягивающие напряжения, вводится свободная поверхность.

Список использованной литературы

1. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. - М.:Мир, 1967. - С.212- 263.
2. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.:Наука, 1984. - 520 с.
3. Иващенко К.Б. Алгоритм расчета контактных границ при взаимодействии деформируемых твердых тел // Проблемы прочности.-1989.-№12.С. 79-82.
4. Johnson G.R. Three-dimensional analysis of sliding surfaces during high velocity impact //Trans ASME.-J. Appl. Mech. -1977.-44,№ 4.-P.771-773.
5. Корнеев А.И., Николаев А.П., Шиповский И.Е. Приложение метода конечных элементов к задачам соударения твердых деформируемых тел.//Труды 7 Всесоюзной конф. "Численные методы решения задач теории упругости и пластичности".- Новосибирск: «Наука».-1982.-С.122-129.
6. Шиповский И.Е., Локшина Л.Я. Метод расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов //Труды Международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» -Новосибирск: ИГД СО РАН,1999.-С.152-156.

Поступила в редколлегию 07.11.2001 г.