

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУППЫ ТЕЛ ПРИ ВЗРЫВНОМ МЕТАНИИ

И.Ф. Кобылкин, И.В. Марков, В.В. Селиванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: i.v.markov@yandex.ru

Рассмотрена задача метания группы тел ударной волной. Показаны результаты численного решения такой задачи в двумерной постановке с помощью пакета ANSYS Autodyn.

Ключевые слова: ударные волны, взрывное метание, компьютерное моделирование.

ON THE QUESTION OF DETERMINING KINEMATIC CHARACTERISTICS OF A CLUSTER OF SOLID BODIES SUBJECTED TO BLAST WAVE ACCELERATION

I.F. Kobylkin, I.V. Markov, V.V. Selivanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e-mail: i.v.markov@yandex.ru

A problem the blast-wave acceleration of a cluster of solid bodies is considered. Results of the numerical simulation of this problem in 2D statement using ANSYS Autodyn are presented.

Keywords: shock waves, explosive acceleration, computer simulation.

Постановка задачи. Задача о метании группы тел произвольной укладки очень проста в описании, но существенно сложна в своем решении. Плотно упакованные тела (элементы укладки), заключенные в корпус или без него, располагаются вплотную к заряду ВВ, который инициируется произвольным образом (рис. 1). Необходимо найти скорости каждого из элементов.

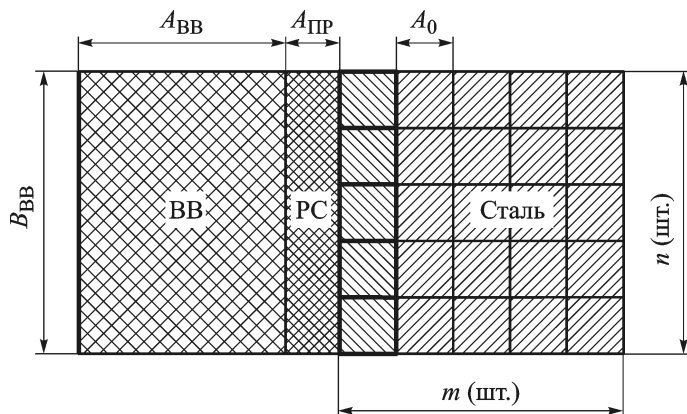


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи взрывного метания группы тел

В общем виде такая задача не имеет аналитического решения. Для получения точных значений скоростей элементов требуется численный эксперимент, который даже в простой двумерной постановке требует значительных ресурсов.

До недавнего времени применялись упрощенные подходы, в которых группа метаемых тел заменялась одной сплошной пластиной [1]. Для первоначальной оценки скорости блока это разумный подход, но в его рамках, естественно, невозможно получить индивидуальное поведение каждого элемента, особенно движущегося в периферической зоне. В таком варианте решения единственная информация – это линейная скорость участка пластины, которая принимается равной скорости элемента укладки. Однако, как показано в работе [2], часто и это значение далеко от истины в силу процессов перераспределения поперечных растягивающих напряжений в сплошном материале, вызывающих изменение скорости течения материала, что затрудняет правильный подбор момента времени для “заморозки” распределения скоростей.

Другим фактором, ограничивающим применение этого метода, является геометрия моделируемого блока. По сравнению с однослойной укладкой сплошной пластиной, замена группы метаемых тел существенно менее “плоской” формой расположения элементов лишает исследователя информации о распределении скоростей между слоями, о динамике эшелонирования потока и различии в поведении элементов с периферических зон, ближних и дальних от заряда ВВ.

С увеличением мощности персональных компьютеров и внедрением универсальных пакетов моделирования ударно-волновых процессов в совместно решаемых разнородных сетках стало возможным решение этой сложной задачи в постановке, наиболее близкой к реальности. Самым естественным путем будет использование эйлеровой сетки для расширяющихся газообразных продуктов детонации (ПД), передающих свой импульс элементам укладки, описанным индивидуальными лагранжевыми сетками. Взаимодействия между разнородными сетками должен осуществлять совместный решатель Эйлер–Лагранж (Euler-Lagrange Coupling), а между однородными – решатель контактных граничных условий (Lagrange-Lagrange Interaction Solver).

В полной постановке эта задача требует адекватности и стабильности решения контактных граничных условий при нагружении элементов ударными волнами (УВ) интенсивностью в десятки гигапаскалей.

Решение задачи в ANSYS Autodyn. В качестве основного инструмента выберем Ansys Autodyn (рис. 2).

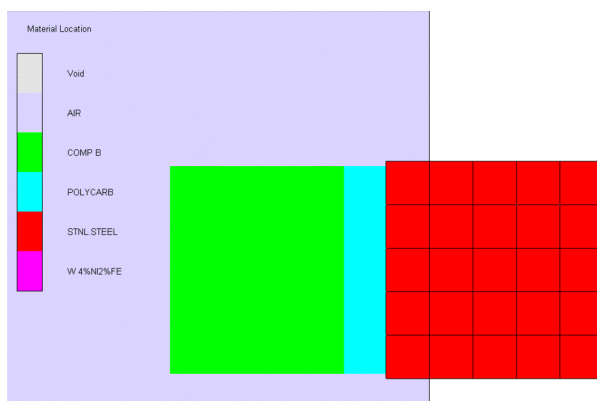


Рис. 2. Постановка задачи в ANSYS Autodyn

Сначала необходимо оговорить используемые допущения:

- 1) между элементами нет трения;
- 2) отсутствует окружающая среда (атмосфера);
- 3) продукты детонации ограничены в своем движении полупространством, в котором нет укладки.

Отсутствие трения в данном случае — это снижение требований к решателю контактных взаимодействий. В то же время вариант решения без моделирования окружающей среды хоть и снижает точность расчетов, но показывает поведение межсеточного решателя в более жестких условиях, когда приходится обрабатывать контакт сразу множества поверхностей с совершенно различными комбинациями контактных давлений и направлений распространения возмущений.

По сравнению с задачей метания сплошной пластины сложность при метании отдельных элементов заключается в наличии зазоров, которые, во-первых, могут изначально быть произвольной величины и тем самым изменить поведение группы на ударно-волновой стадии процесса, а во-вторых, по мере раскрытия в процессе разлета элементов они заполняются ПД, что приводит к перераспределению давления и сложному характеру разгона тел.

В качестве модельной возьмем задачу метания блока тел в форме параллелепипеда бесконечной длины. Таким образом, будем рассматривать движение в поперечной плоскости. Число элементов — 25 штук. Они уложены в плоскости XOY в форме квадрата 5×5 . Нумерация элементов следующая: первая цифра — это номер столбца, а вторая — номер строки.

Изначально в постановке задачи присутствовал заряд ВВ, который инициировался с левого торца по линии. Профили давления на левой границе блока элементов были записаны датчиками, а затем приведены к подобному виду. Для каждого из датчиков был рассчитан импульс, действующий на блок. Профили давления, меняющие свою

форму от центральных участков к периферическим, были заменены идентичным треугольным импульсом с пиковым давлением, соответствующим максимальному давлению на центральной точке контакта ВВ–металл.

Для элементов, нумерованных от 11 до 15 (первый столбец, выделены жирной рамкой на рис. 1), в граничных ячейках слева задавалось условие изменения давления по полученному эквивалентному профилю. Дополнительно для узлов сетки этих элементов было задано условие отсутствия перемещений по оси OY . Сделано это было для гарантии того, что узлы, воспринимающие давление, не изменят своей геометрии, импульс будет входить слева направо и в активные элементы (21...25 и далее) выйдет плоская УВ. По сути, первый столбец играет роль своеобразного фильтра, который не может существовать в природе, пропуская сквозь себя только одну из компонент потоков физических величин. Стоит отметить, в направлении оси OX узлы сетки данных элементов будут ускоряться.

Результаты проведенных расчетов. Как только УВ переходит во второй слой укладки, из-за боковой разгрузки фронт начинает изменять конфигурацию с плоского на искривленный. Сильное искажение формы периферийных элементов связано со скольжением УВ вдоль свободной поверхности (рис. 3). Затем интенсивность во фронте спадает, и фронт искривляется в этой области уже к моменту перехода в элементы третьего столбца.

Характерное время релаксации напряжений в квадратном элементе со стороны a

$$t_a = 2a/c_0,$$

где c_0 — скорость звука в несжатом материале.

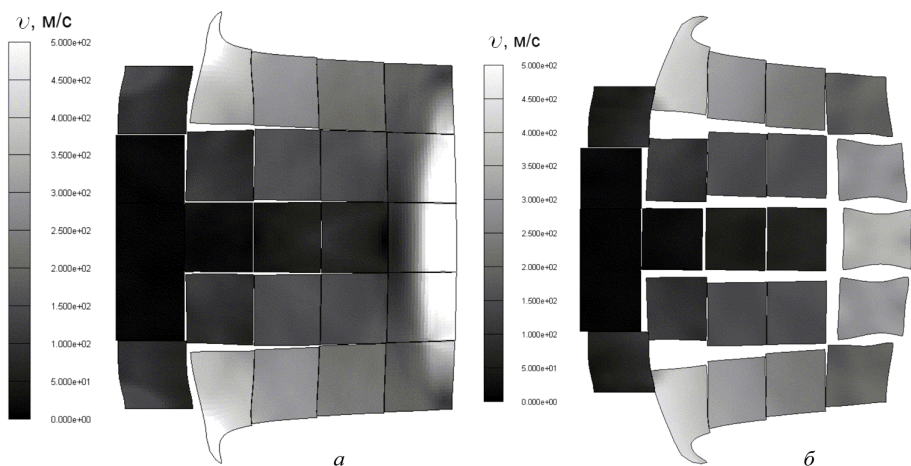


Рис. 3. Распределение массовой скорости по объему для момента времени:
 a — 8 мкс; b — 18 мкс

Для размеров и материалов, используемых в задаче, это время составляет

$$t_a = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{5800} = 1,724 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 1,724 \text{ мкс.}$$

На рис. 4 видно, что компоненты средней скорости элементов выходят на конечный уровень за аналогичное время.

За время порядка $(3 \dots 5)t_a = 5,172 \dots 8,62 \text{ мкс}$ в нестесненном элементе должны пройти релаксационные процессы и амплитуды бегущих по материалу волн сократятся в несколько раз, распределе-

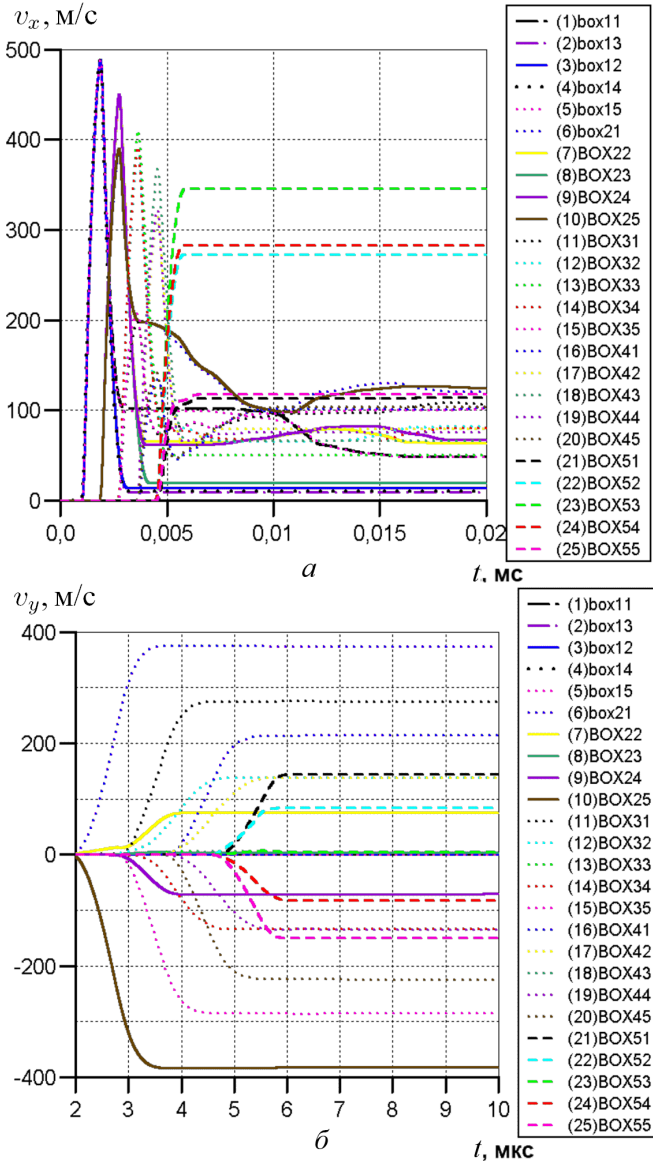


Рис. 4. Компоненты скорости элементов:

$a - v_x$; $\bar{b} - v_y$

ние скорости по элементу выравнивается. Вместе с тем весь процесс прохождения УВ по блоку и вовлечение всех элементов в движение занимает схожее время, что означает сложность волновой картины, формируемой в толще укладки. Интерес авторов направлен на изучение течения в подробностях, предоставляемых такими мощными средствами численного анализа, как ANSYS Autodyn.

Конечной целью является получение средних по объему скоростей движения элементов, которые в применяемом пакете можно вывести индивидуально для каждого из тел (см. рис. 4) с помощью инженерной методики, разработанной при изучении аналогичных задач метания в схожих постановках. Построение распределения углов разлета элементов по известным скоростям тривиально:

$$\psi_i = \operatorname{arctg} \frac{v_{y_i}}{v_{x_i}}, \text{ если } v_{x_i} > 0;$$

$$\psi_i = \operatorname{arctg} \frac{v_{y_i}}{v_{x_i}} + \pi, \text{ если } v_{x_i} < 0.$$

Выводы. Показана принципиальная возможность постановки и решения задачи метания группы тел в пакете ANSYS Autodyn, а также применения результатов счета не только непосредственно для получения кинематических характеристик элементов, но и для изучения динамики картины ударно-волновых взаимодействий, лежащих в основе процессов метания сложных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Средства поражения и боеприпасы: учебник / Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др.; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. Кобылкин И.Ф., Марков И.В., Селиванов В.В. Использование расчетного комплекса ANSYS Autodyn для оценки характеристик осколочных полей самодельных взрывных устройств. // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. Вып. 7–8. С. 19–22.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012