

13. M. S. Lopushanski Normal Regularity of Weakly Convex Sets in Asymmetric Normed Spaces // J. of Convex Analysis. 2018. Vol. 25, № 3. P. n.a.

УДК 519.63+523.68

ЭФФЕКТ КОЛЛИМАЦИИ ПРИ ПОЛЕТЕ ДВУХ ТЕЛ ДРУГ ЗА ДРУГОМ

В. Т. Лукашенко, Ф. А. Максимов (Москва, Россия)
lukashenko-vt@yandex.ru, f_a_maximov@mail.ru

Одним из механизмов разрушения метеорного тела в атмосфере является его распад на отдельные тела меньшего размера — фрагменты или осколки. Данные осколки затем продолжают свое движение как группа тел. При этом часть осколков может оказаться расположена позади лидирующих тел в области пониженного давления. Такие осколки будут иметь меньшее аэродинамическое сопротивление, а значит медленнее тормозиться. В динамике это приводит к эффекту коллимации [1] — отстающие тела начинают вовлекаться в след лидирующих, что в свою очередь может приводить к соударению тел.

В работе [2] представлен метод моделирования на системе сеток, позволяющий расчитывать обтекание различных тел в достаточно произвольных конфигурациях. В [3] представлена адаптация этого метода для решения сопряженной задачи, когда аэродинамическая и баллистическая задачи решаются параллельно. Полагается, что тела двигаются как группа вдоль заданного направления с некоторой преобладающей скоростью. Для этого значения скорости решается задача обтекания тел методом установления. Из полученного распределения давления находятся аэродинамические силы, действующие на каждое отдельное тело в конфигурации, и затем происходит переход к решению баллистической задачи — тела сдвигаются исходя из действующих на них сил и возможного небольшого отклонения их собственных скоростей от скорости преобладающего движения.

Метод [3] оказалось возможно дополнить алгоритмом для моделирования соударений между телами. Если имеются два круговых цилиндра с центрами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и радиусами R_1 , R_2 , то соударение между ними будет происходить при

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} < R_1 + R_2 + C,$$

где константа С определяется исходя из размера сеток [2], построенных для моделирования течения вблизи тел, а также максимального расчетного шага по времени Δt .

Формулы для изменения скоростей вдоль направления соударения тел $\vec{l} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$ при этом запишутся так:

$$\Delta V_1 = \frac{(n + 1) m_2 (V_2 - V_1)}{m_1 + m_2},$$

$$\Delta V_2 = \frac{(n + 1) m_1 (V_1 - V_2)}{m_1 + m_2},$$

где m_1, m_2 — соответственно масса первого и второго тел; V_1, V_2 — соответствующие проекции скоростей тел на направление \vec{l} ; параметр n отвечает за сохранение кинетической энергии тела. При $n = 1$ происходит абсолютно упругий удар (кинетическая энергия сохраняется полностью), при $n = 0$ происходит абсолютно неупругий удар без слипания тел (осреднение скоростей тел вдоль направления соударения с потерей кинетической энергии).

С помощью данного подхода была рассмотрена задача о динамике системы из двух одинаковых цилиндрических тел, расположенных друг за другом вдоль линии набегающего потока. Позади расположенного тела будет испытывать меньшее сопротивление, в результате эффекта коллимации оно должно через некоторое время столкнуться с впереди летящим телом. В случае абсолютно упругого удара тела просто обменяются кинетической энергией и отлетят друг от друга. Однако впереди летящее тело будет сильнее тормозиться потоком, а позади летящее тело по-прежнему — слабее, значит через некоторое время тела должны будут вновь столкнуться. В результате должен получиться своеобразный «маятник». В случае же абсолютно неупругого удара тела должны оставаться рядом с друг другом, продолжая полет совместно.

Расчеты подтверждают данное предположение, однако обнаруживается ряд особенностей (рис. 1 и 2). При использовании модели абсолютно упругого удара характер наблюдаемых колебаний будет сильно зависеть от начального расстояния между телами (рис. 1). При расстоянии между центрами тел в 8 радиусов наблюдалось последовательное затухание и рост амплитуды разлета тел. Если тела были расположены ближе друг к другу, то амплитуда разлета тел постепенно возрастила, несмотря на общее торможение системы. Если же тела находились значительно дальше друг от друга, то колебания имели тенденцию затухать со временем. При абсолютно неупругом ударе тела в течении длительного времени летели совместно (рис. 2), однако данное расположение тел оказалось крайне неустойчивым. Из-за малых возмущений в расчетах позади летящее тело было со временем снесено в бок по потоку.

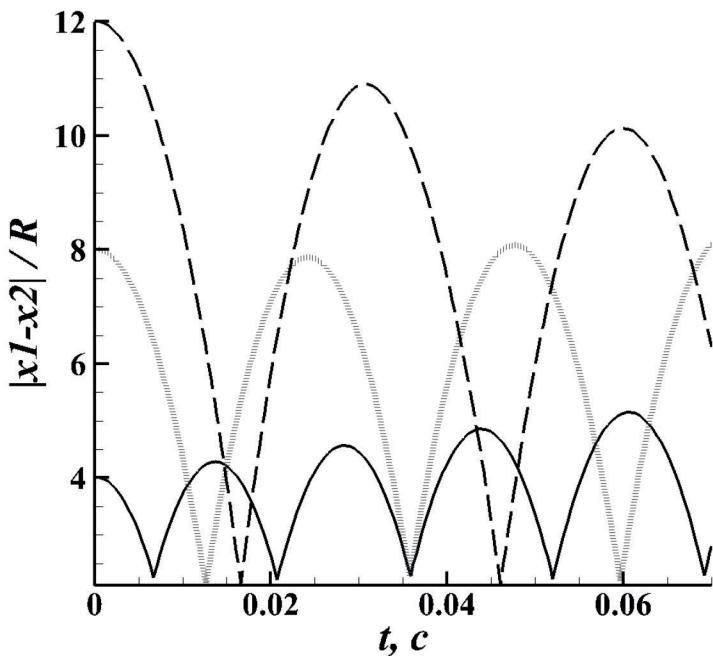


Рис. 1. Динамика тел при абсолютно упругом ударе

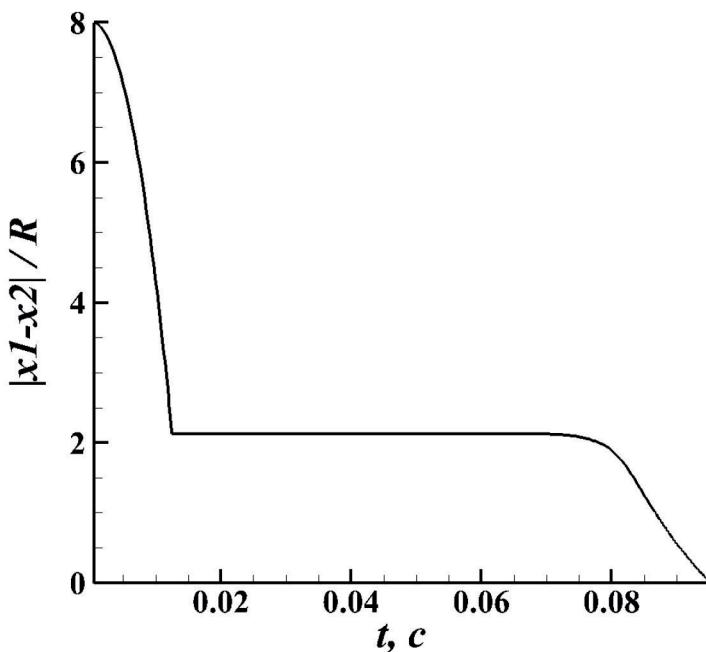


Рис. 2. Динамика тел при абсолютно неупругом ударе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барри Н. Г. Аэродинамика фрагментов метеорного тела. Эффект коллимации // Астрономический вестник. 2010. Т. 44, № 1. С. 59–64.
2. Максимов Ф. А. Сверхзвуковое обтекание системы тел // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 6. С. 969–980.
3. Лукашенко В. Т., Максимов Ф. А. Математическая модель разлета осколков метеорного тела после разрушения // Инженерный журнал : наука и инновации. 2017. Вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1669.