

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАЛОГО МЕТЕОРНОГО ТЕЛА В СЛЕДЕ БОЛЕЕ КРУПНОГО ТЕЛА

В. Т. Лукашенко, Ф. А. Максимов (Москва, Россия)

lukashenko-vt@yandex.ru, f_a_maximov@mail.ru

Представлен метод моделирования, позволяющий рассматривать динамику группы тел летящих со сверхзвуковой скоростью с учетом соударений между отдельными телами. При помощи данного метода проведено численное исследование задачи о возможных колебаниях малого метеорного тела при его попадании в след от более крупного метеороида. Результаты вычислений при различных значениях плотности малого тела показывают, что существует режим, когда малое тело совершает колебания и периодически соударяется с лидирующим телом, однако устойчивость данной конфигурации тел зависит от режима течения.

Ключевые слова: моделирование, метеороид, фрагменты, соударения, колебания.

NUMERICAL STUDY OF OSCILLATIONS OF A SMALL METEOR BODY IN THE TRACE OF LARGER BODY

V. T. Lukashenko, F. A. Maksimov (Moscow, Russia)

lukashenko-vt@yandex.ru, f_a_maximov@mail.ru

A modeling method is presented that allows one to consider the dynamics of a group of bodies flying with supersonic speed, taking into account collisions between individual bodies. Using this method, a numerical study is carried out for the problem of possible oscillations of a small meteoroid when it falls into the trail from a larger meteoroid. The results of calculations for various values of the density of a small body show that there is a mode when a small body oscillates and periodically collides with a leading body, however the stability of this configuration of bodies depends on the flow regime.

Keywords: modeling, meteoroid, fragments, collisions, oscillations.

Введение

При полете в атмосфере метеорное тело испытывает значительные нагрузки под воздействием увеличивающегося скоростного напора и теплового нагрева, что приводит к постепенному разрушению и распаду тела на отдельные фрагменты [1, 2]. В результате образовывается достаточно сложная система из фрагментов, которые в ряде случаев оказываются достаточно близки по своим размерам и параметрам [3]. Данные фрагменты продолжают свое движение совместно, при этом со временем будет происходить перестройка их конфигурации.

В работе [4] было проведено моделирование динамики двух сферических тел при помощи постановки сопряженной задачи с исследованием эффекта коллимации — затягиванием меньшего фрагмент в след большего лидирующего тела. При этом был сделан общий вывод о характере поведения системы из двух фрагментов метеорного тела: если фрагменты имеют близкие размеры, то они должны разойтись в поперечном

направлении и впоследствии двигаться независимо друг от друга; если же один из образовавшихся фрагментов оказывается более крупным, то он становится лидирующим, а меньшие фрагменты затягиваются в его след, реализуется модель иглы с постепенным отставанием малых фрагментов от лидирующего. Целью данной работы является более подробное изучение эффекта коллимации, чтобы выяснить, возможна ли реализации конфигурации, когда меньшее тело удерживается непосредственно вблизи лидирующего большего тела без отставания вдоль направления движения.

Метод расчета

Авторами был реализован метод сопряженного расчета [5] с использованием системы сеток. Изначально рассчитывается аэродинамическая картина обтекания, находится распределение давления на поверхности тел. После этого тела сдвигаются согласно уравнениям движения за малый промежуток времени Δt , картина течения перерасчитывается за данный интервал времени. Находится новое распределение давления на поверхности тел, итерационным методом прослеживается динамика системы на больших временных интервалах.

Представленный метод был дополнен алгоритмом для моделирования соударений между телами [6]. Считается, что соударение между телами происходит, когда фрагменты подлетают близко друг к другу. В плоском случае, когда тела имеют форму круговых цилиндров с радиусами R_i и R_j , соударение моделируется при условии

$$\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} < R_i + R_j + C,$$

где (X_i, Y_i) - координаты центра масс i -го тела; константа C подбирается в зависимости от размера сеток тел, а также заданного максимально возможного смещения тел за шаг времени Δt . То есть, между телами всегда присутствует тонкая воздушная прослойка. Моделирование типа удара задается при помощи коэффициента восстановления удара k , значение которого зависит от реальных свойств веществ соударяющихся тел [7].

Результаты

В работе [6] было показано, что конфигурация совместного полета двух одинаковых тел, расположенных на прямой вдоль направления полета, реализуется, однако оказывается неустойчивой к малым возмущениям. В данной работе рассматривается полет системы из двух фрагментов

разного размера и состава. Бралось лидирующее тело железного состава с радиусом $R = 0.027$ м (и соответственно массой $m = 1$ кг); радиус отстающего тела задавался $R_0 = 0.02025$ м при варьируемой плотности. Изначально тела располагались близко друг к другу с расстоянием между центрами масс вдоль направления движения $\Delta X_0/R = 3$ и со смещением отстающего тела в бок $\Delta Y_0/R = 1$ для имитации начального возмущения. Все расчеты проводились для полета со скоростью 2 км/с на высоте 10 км над поверхностью Земли.

Результаты расчетов показали, что реализуются три варианта поведения системы. Если плотность отстающего близка или больше лидирующего, то тела расходятся в поперечном направлении. Если плотность отстающего тела мала, то данное тело будет постепенно отходить от лидирующего. В промежуточном случае отстающее тело будет осуществлять колебания около лидирующего. На рис.1 представлены характеристики данных колебаний для малого тела с массой $m_0 = 0.4$ кг.

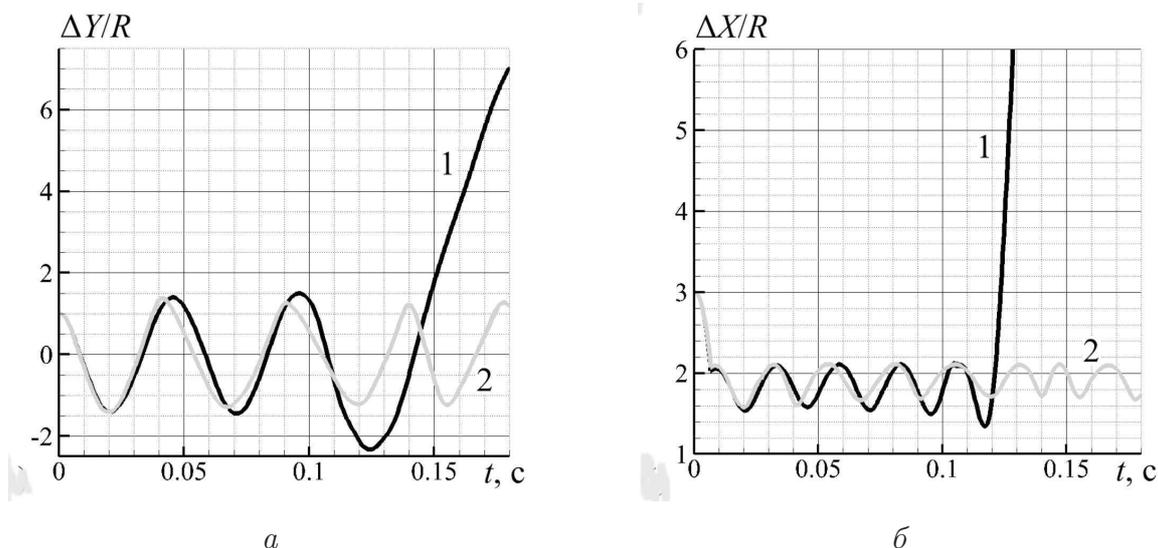


Рис. 1. Поперечные (а) и продольные (б) колебания малого тела с радиусом $R_0/R = 0.75$ и массой $m_0/m = 0.4$ в следе лидирующего тела при 1 – установленном режиме течения; 2 – неустановившемся режиме течения

Устойчивость данных колебаний меняется в зависимости от характеристик течения. При квазистационарном полете (линия 1) амплитуда данных колебаний носит расходящийся характер с выбросом при $t > 0.12$ с отстающего тела в бок на ударную волну от лидирующего тела. При нестационарном режиме (линия 2) малое тело удерживается в следе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. Аэродинамика болидов. М.: Наука. Физматлит, 1995. 240 с.

- [2] *Стулов В. П.* О разрушении и распаде метеорных тел в атмосфере // Доклады Академии Наук. 2008. Т. 421, № 4. С. 486–489.
- [3] *Borovichka J., Toth J, Igaz A., Spurny P., Kalenda P., Haloda J., Svoren J., Kornos L., Silber E., Brown P., Husarik M.* The Kosice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit // Meteoritics & Planetary Science. 2013. V. 48, № 10. P. 1757–1779.
- [4] *Барри Н. Г.* Аэродинамика фрагментов метеорного тела. Эффект коллимации // Астрономический вестник. 2010. Т. 44, № 1. С. 59–64.
- [5] *Лукашенко В. Т., Максимов Ф. А.* Математическая модель разлета осколков метеорного тела после разрушения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Т. 69, № 9. С. 1–13.
- [6] *Лукашенко В. Т., Максимов Ф. А.* Моделирование соударений двух одинаковых осколков метеорного тела, расположенных друг за другом // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. Т. 90, № 6. С. 1–14.
- [7] *Тригуба А. М., Штагер Е. В.* Приближенные способы оценки коэффициента восстановления при соударении упругих тел // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 91–93.