

Влияние эффекта коллимации на динамику двух осколков метеорного тела одного размера

© В.Т. Лукашенко

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, 123056, Россия

Исследована задача о сверхзвуковом полете двух осколков метеорного тела одного размера в рамках плоской двумерной постановки с помощью многосеточного метода моделирования динамики системы тел. Изначально тела были расположены друг за другом с небольшим смещением позади расположенного тела перпендикулярно направлению движения. В качестве варьируемого параметра выступала плотность отстающего тела. Соударения между телами рассчитывали согласно формулам абсолютно неупругого удара без слипания тел. Показано, что существует три различных режима динамики системы: разлет тел с продавливанием лидирующего в поперечном направлении, колебания отстающего тела в следе лидирующего тела, постепенное отставание позади расположенного тела от лидирующего тела. При этом колебания отстающего тела в зависимости от его плотности носят либо расходящийся характер с выбросом позади расположенного тела на головную ударную волну от лидирующего тела, либо затухающий характер с выбросом в область дальнего следа лидирующего тела. Конфигурация совместного полета тел непосредственно друг за другом не реализуется.

Ключевые слова: моделирование, динамика, метеорное тело, разрушение, осколки, сверхзвуковой полет, эффект коллимации

Введение. При полете в атмосфере происходит постепенное разрушение метеорных тел и их распад на отдельные фрагменты [1, 2]. В качестве одного из наиболее вероятных механизмов распада выделяют деление тела на группу близко расположенных осколков, которые подобны друг другу по своим параметрам [3, 4]. Динамика таких групп из осколков метеорного тела во многом зависит от конфигурации, образующейся в результате распада. И тем не менее можно выделить ряд закономерностей. В [5] сформулировано следующее обобщение: если метеорное тело разрушается на небольшое количество близких по своим размерам частей, то вероятнее всего они разойдутся в поперечном направлении. В случае выделения среди осколков одного наиболее крупного фрагмента он становится лидирующим, а меньшие фрагменты вовлекаются в его след. Отметим, что это не дает полной картины динамики двух тел. Если они расположены друг за другом, то лидирующее тело будет испытывать значительно большее аэродинамическое сопротивление. В таком случае позади расположенное тело может быть захвачено в область следа лидирующего тела, и между ними может произойти соударение. Данное явление получило название эффекта коллимации [5], его влия-

ние на динамику тел после их столкновения практически не изучено в связи с большим количеством неизвестных параметров и необходимостью моделирования повторных соударений между телами.

При исследовании полета фрагментов метеорных тел широкое распространение получили методы, основанные на расчете динамики тел с помощью базы параметров аэродинамического взаимодействия тел при их всевозможных относительных положениях [6, 7]. Альтернативой данному подходу является решение сопряженной аэродинамической и баллистической задач [8]. В этом подходе задается начальное положение тел, затем рассчитывается динамика тел исходя из их реально занимаемого положения по ходу движения. В [9] был разработан и протестирован многосеточный метод моделирования динамики тел, основанный на решении сопряженной задачи. В [10] данный метод успешно удалось дополнить алгоритмом для расчета соударений между телами. При этом изучали задачу о совместном полете двух полностью идентичных тел в симметричной постановке при расположении тел непосредственно друг за другом. Показано, что такая конфигурация оказывается крайне неустойчивой, и при накоплении возмущений происходит нарушение симметрии и постепенное проскальзывание тел относительно друг друга с дальнейшим разлетом тел в поперечном направлении.

Цель настоящей работы — изучение динамики двух тел с расположением одного из них в ближнем следе от другого, лидирующего тела. При этом возникает эффект коллимации: позади расположенное тело затягивается в область пониженного давления, и между телами происходит соударение. Основная задача — проанализировать, как эффект коллимации влияет на дальнейшее движение тел при различных значениях плотности позади расположенного отстающего тела. В частности, может ли реализовываться устойчивый полет двух осколков метеорного тела друг за другом, когда отстающее тело имеет менее плотный состав.

Метод моделирования. В связи с трудоемкими вычислениями рассмотрена плоская двумерная задача. Форма метеорного тела и его осколков неизвестна в общем виде, поэтому при моделировании в первом приближении данные тела представлены как тела малого удлинения, приближенно соответствующие сфере [11, 12], в двумерном случае — соответствующие круговым цилиндрам. Состояние каждого цилиндрического тела полностью определяется координатами центра масс (X, Y) , радиусом тела R , массой тела m и вектором его скорости $\vec{V} = (V_x, V_y)$. Таким образом, изначально конфигурация системы из n тел в пространстве можно представить следующим образом:

$$\left(X_i^0, Y_i^0, R_i, m_i, V_{xi}^0, V_{yi}^0 \right), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где нижний индекс i — номер тела в системе; верхний индекс — начальный момент времени $t = 0$.

При этом полагается, что существует направление преобладающего движения тел, вдоль которого двигается система (обычно задаваемое вдоль оси Ox). Характерное время для процесса разлета системы из двух-трех тел ($n = 2, 3$) составляет не более 0,1 с. На данных временных интервалах процессами испарения и уноса метеорного вещества с поверхности тел можно пренебречь [13]. В связи с этим в настоящей работе форма и масса тел считаются постоянными и рассмотрены только газодинамические аспекты разлета метеорных тел.

При заданной начальной конфигурации (1) решается задача об обтекании системы тел многосеточным методом [14]. Вблизи поверхности каждого обтекаемого тела строятся специальные сетки, жестко связанные с данными телами, на которых численно решаются уравнения Навье — Стокса в приближении тонкого слоя. Течение газа вдали от поверхности тел моделируется программой на отдельной сетке, на которой численно решаются уравнения Эйлера. Устанавливается взаимный обмен информацией между сетками путем линейной интерполяции значений газодинамических переменных в узлах, находящихся в области наложения сеток друг на друга. Задается равномерный поток газа с постоянной скоростью, который обтекает систему тел. Из решения задачи обтекания находят полные аэродинамические силы $\vec{F}_i^t = (F_{xi}^t, F_{yi}^t)$, действующие на каждое из тел набора $i = 1, \dots, n$ в данный момент времени t .

Далее решается баллистическая задача. В соответствии с уравнениями движения [9] проводится перерасчет состояния системы через малый интервал времени Δt :

$$\begin{aligned} X_i^{t+\Delta t} &= X_i^t + (V_{xi}^t - V_{xcp}^t) \Delta t, & V_{xi}^{t+\Delta t} &= V_{xi}^t + \frac{F_{xi}^t}{m_i} \Delta t, \\ Y_i^{t+\Delta t} &= Y_i^t + (V_{yi}^t - V_{ycp}^t) \Delta t, & V_{yi}^{t+\Delta t} &= V_{yi}^t + \frac{F_{yi}^t}{m_i} \Delta t. \end{aligned} \quad (2)$$

Иными словами, каждое тело перемещается на расстояние, соответствующее смещению данного тела в системе с учетом перемещения всей системы в среднем $\overline{V}_{cp}^t = \sum_{i=1}^n \overline{V}_i^t / n$. На шаг интегрирования по времени Δt накладываем ограничение на максимально возможное перемещение каждого тела в системе [9]. Получается новая конфигурация системы в момент времени $t + \Delta t$.

Алгоритм расчета соударений между телами рассмотрен в [10]. Считается, что между i -м и j -м телами происходит столкновение, когда они подходят близко друг к другу:

$$\sqrt{(X_i^t - X_j^t)^2 + (Y_i^t - Y_j^t)^2} < R_i + R_j + C, \quad (3)$$

где C — расчетная константа.

Данное условие фактически означает, что между телами всегда имеется тонкая воздушная прослойка. Формулы изменения скоростей вдоль направления соударений \vec{l} , проходящего через центры сталкивающихся тел, имеют вид:

$$\Delta V_i = \frac{(1+k)m_j(V_{lj} - V_{li})}{m_i + m_j}; \quad \Delta V_j = \frac{(1+k)m_i(V_{li} - V_{lj})}{m_i + m_j}. \quad (4)$$

Здесь V_{li} и V_{lj} — соответствующие проекции скоростей; параметр k — коэффициент восстановления удара, его значение зависит от внутренней структуры и состава сталкивающихся тел [15, 16].

Динамика двух тел одного размера. Представленный метод моделирования динамики с алгоритмом расчета соударений (1)–(4) был применен для решения задачи о полете системы из двух тел одного размера. Брали тела, имеющие форму круговых цилиндров радиусом $R = 0,027$ м и шириной 0,054 м. Массу лидирующего тела m_1 задавали фиксированной ($m_1 = 1$ кг). Массу отстающего тела m_2 варьировали от 0,25 кг до 1 кг. Соотношение плотностей тел при этом изменялось в пределах $\rho_2 / \rho_1 \in [0,25; 1]$. Все расчеты проводили для тел, летящих в начальный момент в одном направлении с скоростью 2000 м/с на высоте 10 км. Параметры атмосферы были взяты в соответствии с данными таблицы стандартной атмосферы (ГОСТ 4401–81 «Межгосударственный стандарт. Атмосфера стандартная. Параметры»).

Первоначально тела располагались с расстоянием $\Delta X/R = 3$ между их центрами и со смещением отстающего тела на $\Delta Y/R = 1$ для создания искусственного возмущения системы. Распределение давления по отношению к атмосферному давлению p_a вместе с линиями тока при данном положении тел показано на рис. 1, а. Ввиду взаимодействия позади расположенного тела с вихревой областью лидирующего тела реализован эффект коллимации — отстающее тело втягивается в область пониженного давления в следе лидирующего тела, и между телами происходит соударение. На рис. 1, б отображен момент соударения двух тел при $\rho_2 / \rho_1 = 1$ с учетом условия (3). Между телами имеет место видимая воздушная прослойка, однако согласно расчетному алгоритму происходит перерасчет скоростей вдоль линии

соударения по формулам (4). В настоящей работе коэффициент восстановления удара k задавался равным нулю. Это условие соответствует абсолютно неупругому удару между телами, что отвечает наибольшей устойчивости расположению тел рядом друг с другом (поскольку отсутствуют инерционные силы, которые стремятся растолкнуть тела вдоль линии, проходящей через их центры). Однако полагалось, что тела не слипаются друг с другом, т. е. кинетическая энергия, потерянная при ударе, уходит на разрушение перемычки между телами. В реальности это приближение может соответствовать соударению тел, которые имеют достаточно рыхлый состав и пористую структуру.

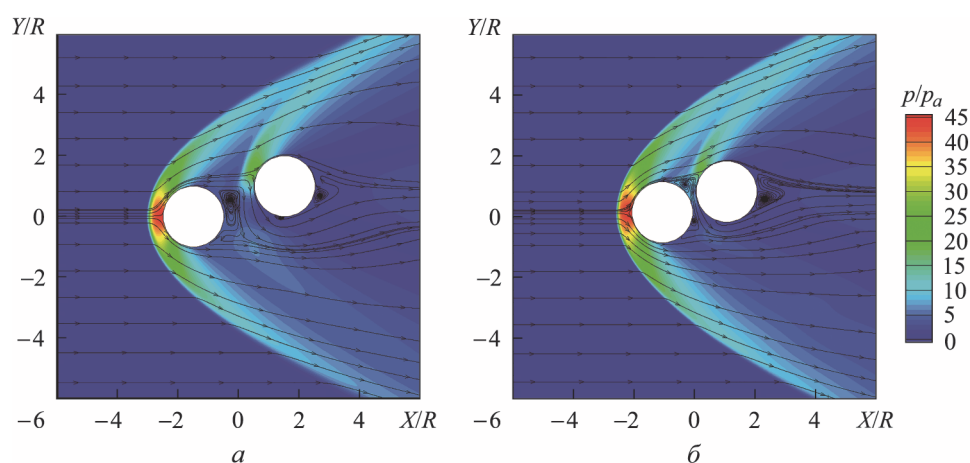


Рис. 1. Распределение давления и линий тока в моменты времени, соответствующие соударению двух идентичных тел:

$a — t = 0, 0; b — t = 0,006 \text{ с}$

В ходе исследования было проведено 30 расчетов с различными значениями массы отстающего тела m_2 и отношениями плотностей ρ_2 / ρ_1 . При этом были выделены характерные режимы динамики тел:

- разлет тел с продавливанием лидирующего в поперечном направлении;
- колебания отстающего тела в следе лидирующего тела;
- постепенное отставание позади расположенного тела от лидирующего тела.

Для того чтобы показать изменение динамики тел, рассмотрим характерные примеры поведения тел по мере уменьшения ρ_2 / ρ_1 . При небольшом отличии в плотности тел ($\rho_2 / \rho_1 \sim 1$) динамика системы должны быть аналогична полету двух идентичных тел друг за другом с возмущением позади расположенного тела, который рассматривался в [10]. Отстающее тело затягивается в след лидирующего тела, происходит соударение этих тел, затем — проскальзывание тел отно-

сительно друг друга с продавливанием лидирующего тела в поперечном направлении. Расчеты, хорошо согласующиеся с данными результатами, показывают, что подобная динамика тел сохраняется вплоть до $\rho_2 / \rho_1 = 0,75$. На рис. 2, *а* приведено распределение давления с траекторией относительного движения отстающего тела 2 по отношению к лидирующему телу 1, на рис. 2, *б* — изменение боковой компоненты скорости со временем.

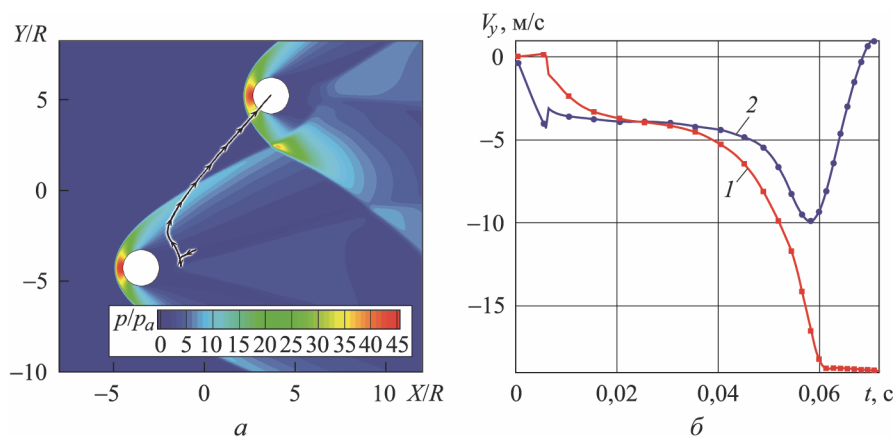


Рис. 2. Эффект коллимации и разлет тел в поперечном направлении при $\rho_2 / \rho_1 = 0,75$:

а — распределение давления; *б* — изменение боковой компоненты скорости V_y ; 1 — лидирующее тело; 2 — отстающее тело; \longrightarrow — траектория относительного движения отстающего тела по отношению к лидирующему телу

Характерной особенностью динамики тел в данном случае является то, что тела фактически выходят на состояние неустойчивого равновесия (нижняя точка траектории на рис. 2, *а*). Однако развитие неустойчивости приводит к постепенному отлету лидирующего тела в поперечном направлении со скоростью около 20 м/с. Отстающее тело при этом набирает небольшую скорость (1 м/с) отлета в противоположную сторону. Отметим, что при $\rho_2 / \rho_1 < 1$ после разлета тел происходит постепенное отставание тела 2 с меньшей массой, и в результате оно попадет на линию ударной волны от лидирующего тела 1. При взаимодействии двух ударных волн будет образована маховская конфигурация с тройной точкой, в дальнейшем тело 2 будет сноситься вдоль линии ударной волны от лидирующего тела 1 и удерживаться на ней за счет увеличения давления в поддонной области.

По мере дальнейшего уменьшения ρ_2 / ρ_1 появляется режим расходящихся поперечных колебаний. В этом случае первоначального взаимодействия тел оказывается недостаточно для того, чтобы сразу вытолкнуть отстающее тело за линию ударной волны лидирующего тела. В результате отстающее тело отбрасывается обратно в след ли-

дирующего тела, и вследствие эффекта коллимации возникает возвратное движение отстающего тела по отношению к лидирующему с повторным столкновением тел. Давление вдоль траектории отстающего тела по отношению к лидирующему, а также изменение поперечной компоненты скоростей тел при $\rho_2 / \rho_1 = 0,62$ показаны на рис. 3.

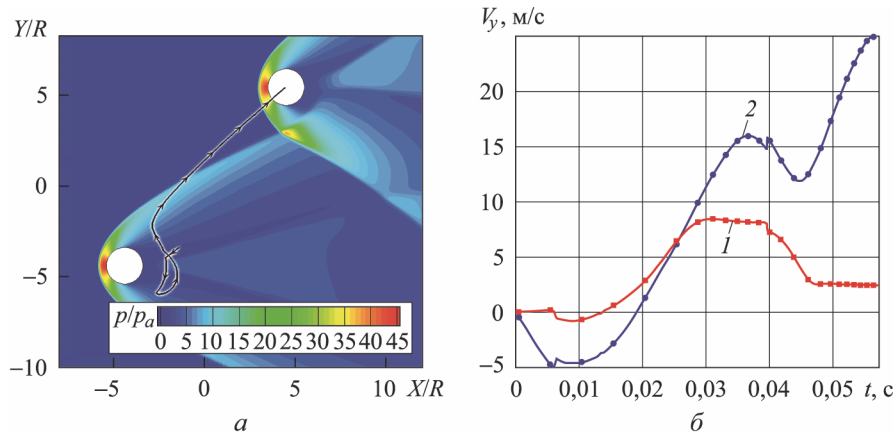


Рис. 3. Поперечные колебания с выбросом отстающего тела за линию ударной волны при $\rho_2 / \rho_1 = 0,62$:

a — распределение давления; b — изменение боковой компоненты скоростей V_y ; 1 — лидирующее тело; 2 — отстающее тело; \longrightarrow — траектория относительного движения отстающего тела по отношению к лидирующему телу

Сначала происходит захват отстающего тела в след лидирующего ($0 < t < 0,006$ с) с соударением тел при $t = 0,006$ с. После этого происходит постепенное проскальзывание тел относительно друг друга с взаимодействием ударных волн и образованием области повышенного давления [10], стремящейся вытолкнуть оба тела ($0,006 < t < 0,025$ с). Однако в отличие от ситуации с разлетом тел в поперечном направлении, при $t = 0,025$ с наблюдается переключение движения системы с выбросом отстающего тела обратно в область ближнего следа лидирующего тела — данный момент соответствует точке крайнего нижнего положения отстающего тела на траектории относительного движения (см. рис. 3, a). Промежуток времени $0,025 < t < 0,039$ с соответствует возвратному движению отстающего тела с повторным соударением тел при $t = 0,039$ с; а $0,039 < t < 0,048$ с — обратному процессу с образованием области повышенного давления между телами. Давление стремится вытолкнуть позади расположенное тело обратно в область следа лидирующего тела. Со временем набираемой отстающим телом боковой скорости оказывается достаточно, чтобы это тело вышло за линию ударной волны от лидирующего тела. При $t > 0,045$ с происходит разлет тел в поперечном направлении с уста-

новлением скорости разлета для отстающего тела 25 м/с, для лидирующего тела — 2,5 м/с. Таким образом, в данном режиме происходит постепенное увеличение кинетической энергии отстающего тела в следе.

Возможен альтернативный режим поперечных колебаний с выбросом отстающего тела в область дальнего следа лидирующего тела. Траектория отстающего тела по отношению к лидирующему, а также изменение поперечной компоненты скоростей тел при $\rho_2 / \rho_1 = 0,5$ показаны на рис. 4. Тело, расположенное позади, не способно догнать и вновь столкнуться с лидирующим телом. Тела постепенно разлетаются в продольном направлении. При этом происходит последовательное отражение позади расположенного тела от кромок ударной волны лидирующего тела по мере отставания.

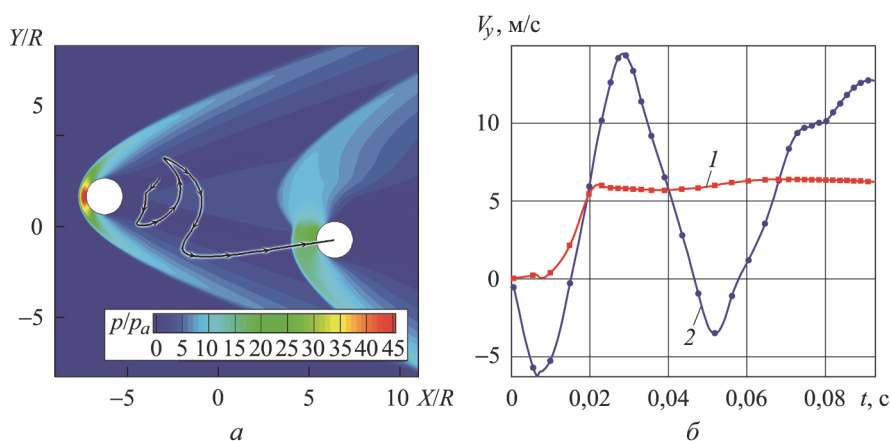


Рис. 4. Эффект коллимации и разлет тел в продольном направлении при $\rho_2 / \rho_1 = 0,5$:

a — распределение давления; b — изменение боковой компоненты скоростей V_y ; 1 — лидирующее тело; 2 — отстающее тело; \longrightarrow — траектория относительного движения отстающего тела по отношению к лидирующему телу

Отметим, что важную роль при переходе к данному режиму играют инерционные силы. По результатам расчетов наблюдали несколько последовательных переключений между поперечными колебаниями с выбросом отстающего тела за линию ударной волны лидирующего тела и поперечными колебаниями с выбросом отстающего тела в дальний след лидирующего тела.

При значениях параметра $\rho_2 / \rho_1 < 0,5$ происходит ослабление эффекта коллимации. В силу худших баллистических свойств тело, расположенное позади, начинает отставать от лидирующего независимо от того, присутствует ли взаимодействие с вихревой областью. Столкновение между телами не происходит, при этом из-за началь-

ного смещения тел в поперечном направлении отстающее тело может приобретать небольшую скорость в боковом направлении.

При разлете тел необходимо учитывать:

- конечную скорость в поперечном направлении — скорость разлета v_p ;
- смещение тел $\Delta Y/R$ относительно линии начального движения.

Эти показатели позволяют рассчитать отклонение тел от первоначальной траектории, возникающее в результате взаимодействия осколков друг с другом после фрагментации. На рис. 5 показано изменение скорости разлета v_p в зависимости от ρ_2/ρ_1 для лидирующего тела 1 и отстающего тела 2. Маркером отмечены точки, соответствующие значениям, полученным по установлению боковой компоненты скорости (одна точка соответствует единичному расчету), линиями — аппроксимация поведения зависимости.

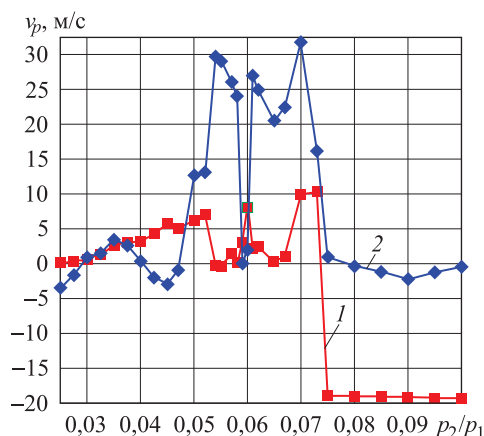


Рис. 5. Изменение скорости разлета v_p в зависимости от ρ_2/ρ_1 :
1 — лидирующее тело; 2 — отстающее тело

Смещение тел $\Delta Y/R$ за время их взаимодействия для $\rho_2/\rho_1 = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ и $0,9$ приведено на рис. 6.

Промежуток $\rho_2/\rho_1 \in [0,75; 1]$ соответствует режиму разлета тел с продавливанием впереди расположенного тела в боковом направлении. Впереди лидирующее тело набирает скорость разлета около 20 м/с из своего начального положения в сторону, противоположную первоначальному возмущению. Отстающее тело не испытывает значительного изменения траектории.

При $\rho_2/\rho_1 \in [0,5; 0,75)$ происходит переход системы в режим поперечных колебаний отстающего тела в следе лидирующего (см. рис. 5). Резкие скачки в поведении скорости разлета отстающего тела 2 соответствуют переключению системы между режимом с выбро-

сом тела за линию головной ударной волны от лидирующего тела ($v_p > 15$ м/с) и режимом с выбросом тела в дальний след лидирующего тела ($v_p < 15$ м/с). Максимальная скорость разлета достигается отстающим телом в результате последовательных колебаний с выбросом за линию ударной волны и составляет 32 м/с, что практически в полтора раза больше, чем при разлете тел близкого состава. Всегда происходит смещение лидирующего тела с линии начальной траектории, однако влияние на скорость разлета лидирующего тела может либо вообще отсутствовать, либо составлять до 10 м/с. Важно отметить, что отлет тел осуществляется в сторону, откуда было задано первоначальное возмущение.

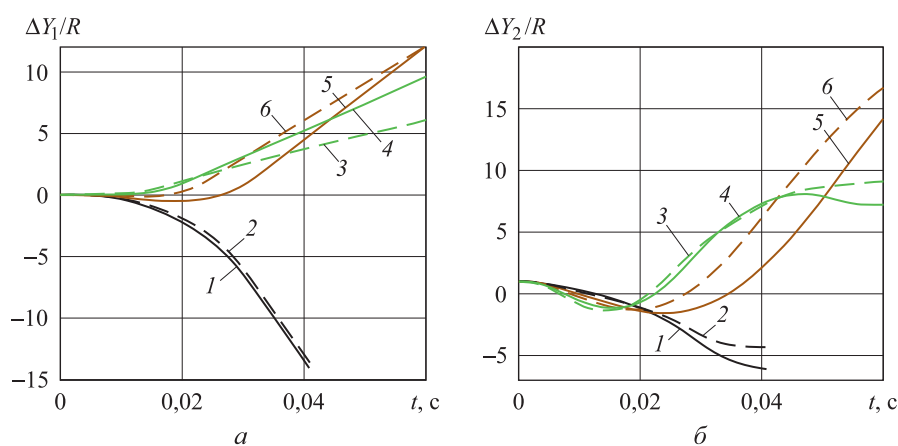


Рис. 6. Смещение тел $\Delta Y/R$ от начальной траектории при разных значениях ρ_2/ρ_1 :

a — лидирующее тело; b — отстающее тело; 1 — $\rho_2/\rho_1 = 0,9$; 2 — $\rho_2/\rho_1 = 0,8$;

3 — $\rho_2/\rho_1 = 0,7$; 4 — $\rho_2/\rho_1 = 0,6$; 5 — $\rho_2/\rho_1 = 0,5$; 6 — $\rho_2/\rho_1 = 0,4$

При значениях $\rho_2/\rho_1 < 0,5$ начинает происходить постепенное отставание позади расположенного тела. Отстающее тело может набирать небольшую скорость в поперечном направлении, однако будет оставаться в дальнем следе. Влияние на траекторию и боковую скорость лидирующего тела при этом постепенно снижается с уменьшением ρ_2/ρ_1 .

Отметим, что по результатам расчетов не наблюдается удерживание отстающего тела в следе лидирующего. Развивающаяся неустойчивость, возникающая из-за начального смещения позади расположенного тела, приводит либо к разлету тел в поперечном направлении, либо к выбросу отстающего тела в дальний след лидирующего тела. Однако данный вывод верен только для тел одного размера, так как характеристики течения сильно зависят от формы и размера тел. Случай тел разного размера подлежит дальнейшему изучению.

Заключение. С помощью многосеточного метода моделирования динамики системы тел проведено исследование полета двух осколков метеорного тела одного размера. Тела находились друг за другом с небольшим смещением позади расположенного тела для создания возмущения в системе. Варьируемым параметром считали плотность отстающего тела. Столкновения между телами моделировали на основе формул абсолютно неупругого удара для большей устойчивости их совместного полета. По результатам расчетов выделено три режима динамики системы:

1) если плотность отстающего тела составляет $3/4$ или более плотности лидирующего тела, происходит постепенное выталкивание впереди расположенного тела в поперечном направлении;

2) если плотность отстающего тела менее $1/2$ плотности лидирующего тела, позади расположенное тело постепенно отстает от лидирующего тела;

3) в промежуточном случае происходят колебания отстающего тела в следе лидирующего тела. Данные колебания в зависимости от плотности тел приводят либо к выбросу позади расположенного тела за линию ударной волны лидирующего тела, либо к выбросу позади расположенного тела в область дальнего следа лидирующего тела.

При выбросе за линию ударной волны отстающее тело набирает значительную скорость в поперечном направлении, которая может в полтора раза превышать скорость, с которой лидирующее тело выталкивается в бок при одинаковых плотностях. В зависимости от соотношения плотностей тел может реализовываться как отлет лидирующего тела в поперечном направлении без изменения траектории отстающего тела, так и отлет отстающего тела без изменения траектории лидирующего тела. При этом конфигурация совместного полета тел одного размера непосредственно друг за другом не реализуется.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. *Аэродинамика болидов*. Москва, Наука, Физматлит, 1995, 240 с.
- [2] Кринов Е.Л. *Железный дождь*. Москва, Наука, 1981, 192 с.
- [3] Borovicka J., Kalenda P. The Moravka meteorite fall: 4. Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, vol. 38, no. 7, pp. 1023–1043. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00296.x
- [4] Borovicka J., Toth J., Igaz A., Spurny P., Kalenda P., Haloda J., Svoren J., Korinos L., Silber E., Brown P., Husarik M. The Kosice meteorite fall: atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, vol. 48, no. 10, pp. 1757–1779. DOI: 10.1111/maps.12078
- [5] Барри Н.Г. Аэродинамика фрагментов метеорного тела. Эффект коллимации. *Астрономический вестник*, 2010, т. 44, № 1, с. 59–64.
- [6] Marwege A., Willems S., Gulhan A., Aftosmis M.J., Stern E.C. Superposition method for force estimation on bodies in supersonic and hypersonic flows.

- Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, vol. 55, no. 5, pp. 1166–1180.
DOI: 10.2514/1.A34128
- [7] Register P.J., Aftosmis M.J., Stern E.C., Brock J.M., Seltner P.M., Willems S., Guelhan A., Mathias D.L. Interactions between asteroid fragments during atmospheric entry. *Icarus*, 2020, vol. 337, article 113468.
DOI: 10.1016/j.icarus.2019.113468
- [8] Барри Н.Г. Динамика двух сферических объектов в сверхзвуковом потоке. *Доклады Академии Наук*, 2010, т. 434, № 5, с. 620–621.
- [9] 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
- [10] Лукашенко В.Т., Максимов Ф.А. Моделирование соударений двух одинаковых осколков метеорного тела, расположенных друг за другом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6.
DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1884
- [11] Ждан И.А., Стулов В.П., Стулов П.В. Аэродинамическое взаимодействие двух тел в сверхзвуковом потоке. *Доклады Академии наук*, 2004, т. 396, № 2, с. 191–193.
- [12] Ждан И.А., Стулов В.П., Стулов П.В. Трехмерные конфигурации фрагментов разрушенного тела в сверхзвуковом потоке. *Доклады Академии наук*, 2005, т. 404, № 4, с. 486–490.
- [13] Андрущенко В.А., Лукашенко В.Т., Максимов Ф.А., Мурашки И.В., Сыранова Н.Г., Шевелев Ю.Д. Комплексное математическое исследование падения болидов в атмосфере с завершающим множественным взрывом. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2018, т. 58, № 8, с. 97–112. DOI: 10.31857/S004446690002005-6
- [14] Максимов Ф.А. Сверхзвуковое обтекание системы тел. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2013, т. 5, № 6, с. 969–980.
DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-6-969-980
- [15] Пановко Я.Г. *Введение в теорию механического удара*. Москва, Наука, 1977, 224 с.
- [16] Тригуба А.М., Штагер Е.В. Приближенные способы оценки коэффициента восстановления при соударении упругих тел. *Современные наукоемкие технологии*, 2014, № 5–1, с. 91–93.

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Лукашенко В.Т. Влияние эффекта коллимации на динамику двух осколков метеорного тела одного размера. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1994>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства «Королёвские чтения — 2020», Москва, 29–31 января 2020 г.

Лукашенко Владислав Тарасович — младший научный сотрудник Института автоматизации проектирования РАН. e-mail: lukashenko-vt@yandex.ru

The effect of collimation on the dynamics of two meteoroid fragments of the same size

© V.T. Lukashenko

Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 123056, Russia

The article analyzes the problem of the supersonic flight of two meteoroid fragments of the same size in the framework of two-dimensional plane formulation using the multigrid method for modeling the dynamics of a system of bodies. Initially, the bodies followed each other with a slight displacement of the body located behind, perpendicular to the direction of motion. The variable parameter was the density of the body located behind. Collisions between bodies were calculated according to the formulas of perfectly inelastic impact without adherence of the bodies. It is shown that there are three different modes of system dynamics: spreading with forcing the leading body in the transverse direction, the oscillations of the lagging body in the trace of the leading body, and the gradual lagging the body located behind from the leading body. Depending on its density oscillations of the lagging body are either diverging in nature with its ejection on the head shock wave from the leading body, or of a damped nature with the ejection into the region of the far trace of the leading body. The configuration of the joint flight of bodies directly one after another is not realized.

Keywords: modeling, dynamics, meteoroid, destruction, fragments, supersonic flight, collimation effect

REFERENCES

- [1] Stulov V.P., Mirsky V.N., Vislyy A.I. *Aerodinamika bolidov* [Aerodynamics of bolides]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995, 240 p.
- [2] Krinov E.L. *Zheleznyy dozhd* [The iron rain]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 192 p.
- [3] Borovicka J., Kalenda P. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, vol. 38, no. 7, pp. 1023–1043.
- [4] Borovicka J., Toth J., Igaz A., Spurny P., Kalenda P., Haloda J., Svoren J., Korinos L., Silber E., Brown P., Husarik M. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, vol. 48, no. 10, pp. 1757–1779.
- [5] Barri N.G. *Astronomicheskij vestnik. Issledovaniya solnechnoy sistemy* — *Solar System Research*, 2010, vol. 44 (1), pp. 55–59.
- [6] Marwege A., Willems S., Gulhan A., Aftosmis M.J., Stern E.C. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, vol. 55, no. 5 pp. 1166–1180.
- [7] Register P.J., Aftosmis M.J., Stern E.C., Brock J.M., Seltner P.M., Willems S., Guelhan A., Mathias D.L. *Icarus*, 2020, vol. 337, article 113468, pp. 1–20.
- [8] Barri N.G. *Doklady Akademii Nauk (Reports of the Academy of Sciences)*, 2010, vol. 434, no. 5, pp. 620–621.
- [9] Lukashenko V.T., Maksimov F.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* — *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9.
DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1669
- [10] Lukashenko V.T., Maksimov F.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* — *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 6.
DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1884

- [11] Zhdan I.A., Stulov V.P., Stulov P.V. *Doklady Akademii Nauk (Reports of the Academy of Sciences)*, 2004, vol. 396, no. 2, pp. 191–193.
- [12] Zhdan I.A., Stulov V.P., Stulov P.V. *Doklady Akademii Nauk (Reports of the Academy of Sciences)*, 2005, vol. 404, no. 4, pp. 486–490.
- [13] Andrushchenko V.A., Lukashenko V.T., Maksimov F.A., Murashkin I.V., Syzranova N.G., Shevelev Yu.D. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoi fiziki — Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2018, vol. 58, no. 8, pp. 1294–1308.
- [14] Maksimov F.A. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie — Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 969–980.
- [15] Panovko Ya.G. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to the theory of mechanical impact]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 224 p.
- [16] Triguba A.M., Shtager E.V. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii — Modern High Technologies*, 2014, no. 5-1, pp. 91–93.

Lukashenko V.T. (b. 1991), Junior Research Fellow, Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences. Research interests: gas dynamics, computational mathematics, mathematical modeling of natural phenomena, movement of bodies in space, liquid and gaseous media. e-mail: lukashenko-vt@yandex.ru