Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (3), с. 628–630

УДК 517.95:533.601.1

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ВЗРЫВЕ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА В НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ В ПЕРЕМЕННЫХ ЛАГРАНЖА

В.А. Андрущенко[1], В.А. Головешкин[2], И.В. Мурашкин[1]

[1]Институт автоматизации проектирования РАН, Москва
[2]Московский госуниверситет приборостроения и информатики

murashkin@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассматривается задача о взрыве малого космического тела в неоднородной атмосфере в переменных Лагранжа. Исследуется процесс перестройки течения газа в области, охваченной взрывом. В ходе численного эксперимента выявлена сложная картина эволюции течения внутри возмущенной взрывом области (при учете противодавления и гравитации), сопровождаемая перманентным сингулярогенезисом. Кроме заложенной уже в начальные условия задачи – автомодельное решение Седова – особенности типа узла, образуются другие особые точки типа фокусов, седел, узлов. В результате сингулярогенезиса некоторые особые точки преобразуются из одного типа в иной, другие же – сохраняют свой «статус» постоянным.

Ключевые слова: точечный взрыв, ударные волны, уравнения газовой динамики, переменные Лагранжа, особые точки.

Постановка задачи

В настоящее время задачи теории точечного взрыва вновь выдвинулись в ряд задач первостепенной значимости ввиду реальности вторжения в атмосферу нашей планеты малых космических тел с их возможным последующим взрывным разрушением. Именно такая задача рассматривается в представленной работе. В качестве начальных условий выбирается решение автомодельной задачи о точечном взрыве Л.И. Седова [1], как это делалось во многих работах в приложении к взрыву Тунгусского тела [2]. Исходная система уравнений, описывающих двумерное эволюционное движение совершенного, невязкого, нетеплопроводного газа – система уравнений Эйлера в цилиндрических координатах (r, z). Задача решается в полуплоскости $(0 \le r < +\infty, -\infty \le z < +\infty)$, в области, ограниченной фронтом ударной волны $\Gamma_1(t)$ (рис. 1).

Традиционно при решении задач такого вида возмущенная область делится на малую центральную G_0 и протяженную периферийную G_1 подобласти; в первой решение ищется по асимптотическим формулам, во второй – с помощью сеточного метода в лагранжевых переменных. При переходе к переменным Лагранжа ξ, θ в их качестве выбраны значения параметров, характеризующих частицу на поверхности $t = t_1$, где t_1 – момент времени, когда частица пересекает поверхность разрыва – ударную волну ($\xi = t$). Другая переменная θ определяет положение в пространстве точки пересечения частицей газа поверхности разрыва (точки входа в ударный слой) (подробности см. в [3]).

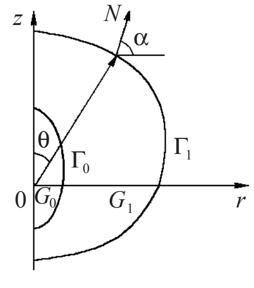


Рис. 1

Результаты расчетов

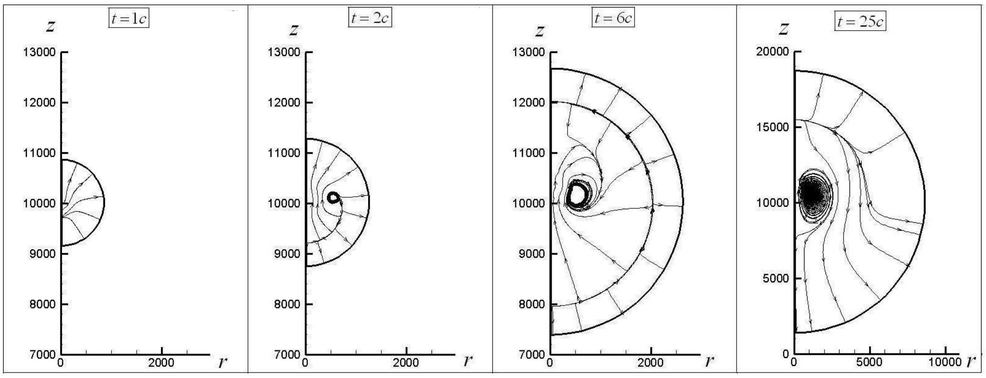
Приводятся некоторые результаты расчета взрыва для энергии $E_0 = 8.12\cdot10^{23}$ Дж (20 кт в тротиловом эквиваленте) на высоте 10 км в экспоненциальной атмосфере для показателя адиабаты $\gamma = 1.4$ с учетом противодавления и гравитации. Значения давления, плотности и масштаба неоднородности для этой высоты соответственно равны: $p_0 = 26500$ Па, $\rho_0 = 4.13\cdot10^{-1}$ кг/м^3, $\Delta = 6555$ м. Рассмотрим, как происходит перестройка течения внутри области, охваченной ударной волной. На рис. 2*а-г* представлены картины линий тока для 4 моментов времени $t = 1$, 2, 6 и 25 с соответственно, построенных по мгновенным полям скоростей.

В самом начале процесса происходит опускание начальной особой точки – узла – вдоль оси симметрии (см. рис. 2*а*), к моменту времени $t = 1.5$ с она опускается на 600 м. Из этого узла формируется параболическая поверхность тока, выше которой ветвятся линии тока с направлением вверх, ниже – с направлением вниз (на самой этой поверхности направление движения вверх). К моменту времени $t = 1.8$ с в верхней части этой поверхности образуется «обод» из особых точек типа узлов, причем движение от них вдоль поверхности направлено вниз. Через некоторое время это течение подавляет восходящее течение от первоначального узла и достигает оси симметрии. Теперь на месте первоначального узла формируется особая точка типа седло, и к этому же времени на верхней кромке параболической поверхности (на высоте ~10.1 км) особые точки типа узел трансформируются в сингулярности типа фокус (см. рис. 2*б*). Далее течение еще более усложняется и внутри возмущенной области формируется поверхность из линий тока, направленных вниз, по конфигурации почти подобная фронту ударной волны, причем ее нижний «полюс» (точка пересечения с осью z) является седлом, а верхний – узлом (см. рис. 2*в*). Такая конфигурация этой поверхности сохраняется в течение относительно долгого времени – примерно с 3 до 14 с. Начиная примерно с 15 с, нижняя седловая точка аннигилирует, и общая конфигурация линий тока принимает грибовидную форму с тороидальным фокусным «включением» внутри; линии тока, расположенные ниже линии, выходящей из верхнего «полюса» – узла, выходят на нижнюю часть ударного фронта, линии тока расположенные выше – на верхнюю (см. рис. 2*г*).

И такая конфигурация линий тока сохраняется до момента выхода нижней части ударного фронта на поверхность земли при $t \approx 30$ с. Интересно, что в отличие от других особых точек, фокусы оказываются наиболее стабильными сингулярностями. Отметим, что в отсутствие противодавления и гравитации процесс протекает без образования новых особых точек. Имеет место единственная первоначальная особая точка (узел), которая со временем достаточно быстро опускается вдоль оси симметрии z, так что верхняя область с восходящим течением значительно превосходит по площади нижнюю – с нисходящим. Контроль точности счета велся путем слежения за законом сохранения полной энергии. Для сетки 80×80 узлов был получен дисбаланс ~5%, что для задач этого класса является хорошим показателем.

Список литературы

1. Седов Л.И. Движение воздуха при сильном взрыве // ДАН СССР. 1946. Т. 52, №1. С. 17–20.
2. Korobeinikov V.P. et al. Complex modeling of the Tunguska catastrophe // Planet Spase Sci. 1998. V. 46, No 2/3. P. 231–244.
3. Кестенбойм Х.С.и др. Эйлерова и лагранжева методики для расчета точечного взрыва в неоднородной атмосфере // Тр. Секции по численным методам в газовой динамике второго Международного коллоквиума по газодинамике взрыва и реагирующих систем. Новосибирск, 19-23 авг. 1969 г. М.: ВЦ АН СССР. 1971. Т. 3. С. 85–97.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2

NUMERICAL ANALYSIS OF THE PROBLEM OF EXPLOSION OF A SMALL-SIZE COSMIC BODY IN NON-UNIFORM ATMOSPHERE IN LAGRANGIAN COORDINATES

V.A. Andrushchenko, V.A.Goloveshkin, I.V. Murashkin

An unsteady problem of the point explosion theory in Lagrangian coordinates is considered. The process of reorganization of gas flow in the area covered by a blast-wave is investigated. In a numerical experiment with variation of non-dimensional governing parameters of the problem, the features of such a flow have been identified for the first time. It was found that, except for the nodal point singularity in the center of energy release, determined by the initial conditions of the problem (L.I. Sedov's self-similar solution), extra singular focus, saddle and node points are formed in the disturbed flow area with time.

Keywords: point explosion, shock waves, gas dynamics equations, Lagrangian coordinates, critical points.