

## О ВЛИЯНИИ НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ДВИЖЕНИЕ ОБЛАКА ЧАСТИЦ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

УДК 662.612.32

В. П. Киселев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
630090 Новосибирск

В работе приведены результаты численного решения задачи о взаимодействии ударной волны (УВ) с облаком частиц, находящимся на высоте  $H$  над поверхностью. Показано, что присутствие поверхности приводит к асимметрии движения облака, а при  $H \sim 0,25 \div 0,5$  м — к разрыву облака частиц.

Рассмотрим облако сферических частиц, занимающих область  $\Omega_2$ , на высоте  $H$  над плоской поверхностью (рис. 1), на которое слева набегают УВ. Исследуем течение газа и частиц в этом случае. В  $\Omega_1$  течение газа описывается уравнениями Эйлера. В  $\Omega_2$  движение частиц моделируется бесстолкновительным кинетическим уравнением, а газ — уравнениями запыленного газа. Данная модель и ее численная реализация подробно описаны в [1, 2]. В качестве граничных условий для газа на  $\gamma_1$  ставилось условие твердой стенки, а на  $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  — условие равенства нулю градиента газодинамических функций. Для частиц на  $\gamma_1$  задавалось условие зеркального отражения, а на  $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  — поглощения частиц.

Перед УВ газ имел плотность  $\rho_0 = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>, давление  $p_0 = 1$  атм, скорость  $v_{1x} = v_{1y} = 0$  (нормальные атмосферные условия), а параметры газа за УВ определялись из соотношения Гюгонио. Число Маха УВ  $M_0 = 3$ , показатель адиабаты  $\gamma = 1,4$ . Облако состояло из частиц оргстекла. Диаметр частиц  $d = 4 \cdot 10^{-3}$  м, объемная концентрация  $m_2^0 = 10^{-2}$ , размеры облака  $L_y \times L_x = 0,65 \times 1,4$  м.

Решение задачи ищется в системе центра масс облака частиц. Проводились расчеты при различных высотах  $H$  облака над поверхностью в начальный момент ( $H = 0; 0,25; 0,5; 1$  м). Результаты исследований показали, что существенное влияние нижней стенки на движение облака частиц имеет место при  $H \leq 0,5$  м.

На рис. 2–4 приведены результаты расчетов при  $H = 0,25$  м (рис. 2 — изобары  $p(x, y)$ , атм (на момент времени  $t = 8 \cdot 10^{-3}$  с), рис. 3 — поле скоростей частиц ( $t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  с), рис. 4 — поле скоростей газа ( $t = 2 \cdot 10^{-2}$  с), штриховыми линиями обозначены контуры облака).

Как следует из рис. 2, перед облаком формируется отраженная УВ, за ней линии тока газа искривляются вверх и увлекают за собой основную часть частиц (рис. 3). У нижней поверхности облака линии тока искривляются вниз, поэтому здесь частицы смещаются в сторону нижней поверхности. Попадая во внешний поток, где скорость газа больше, чем внутри облака, частицы начинают двигаться быстрее, в результате чего форма облака становится кометоподобной [2] с плотным ядром и вытянутым хвостом.

Внутри облака формируется волна разрежения, которая работает против сил вязкого взаимодействия между газом и частицами. Изолинии волны разрежения выходят из облака и либо замыкаются на изолинии отраженной волны, либо выходят на стенку (рис. 2). Газ, обтекающий облако сверху и снизу, ускоряется в волне разрежения. Нижняя стенка не позволяет газу свободно расширяться, поэтому волна разрежения у нижней стенки расплывается меньше, чем в верхней части расчетной области. Градиент давления по

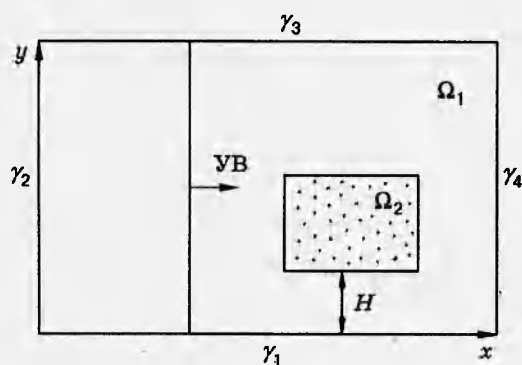


Рис. 1

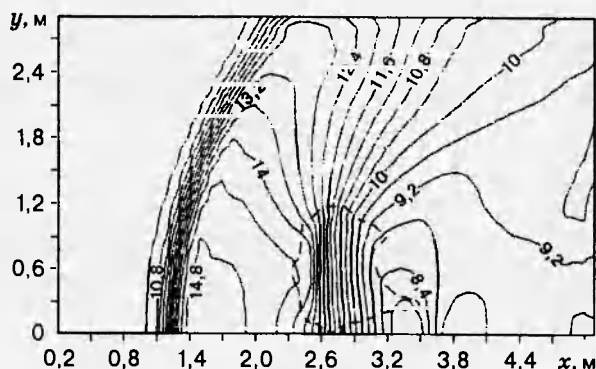


Рис. 2

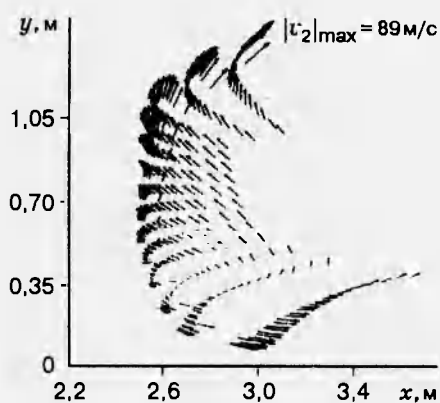


Рис. 3

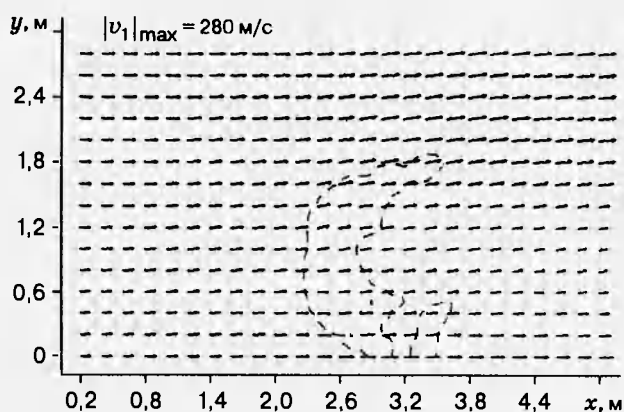


Рис. 4

абсолютной величине здесь больше ( $\nabla p < 0$ ), в результате газ ускоряется снизу облака сильнее, чем сверху. Это приводит к тому, что частицы в нижней части облака движутся быстрее, чем в верхней.

Со временем в результате расширения облако частиц перекрывает зазор между облаком и поверхностью. За счет силы трения газ резко тормозится, и попадающие сюда частицы движутся уже не так быстро, как прошедшие раньше через это сечение, поэтому происходит разрыв облака частиц (рис. 4). Перекрытие зазора приводит к тому, что частицы, выдуваемые из верхней части облака, начинают двигаться быстрее нижних и обгоняют их. Расчеты показали, что при движении облака на уровне поверхности ( $H = 0$ ) эффект разрыва облака пропадает.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С. П. Киселев, Г. А. Руев, А. П. Трунев и др. Новосибирск: Наука, 1992.
2. Киселев В. П., Киселев С. П., Фомин В. М. О взаимодействии ударной волны с облаком частиц конечных размеров // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 2. С. 26–37.

Поступила в редакцию 10/V 1995 г.