

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ОБЛАКОМ ЧАСТИЦ С ВОЗМУЩЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ

УДК 662.612.32

С. П. Киселев, В. П. Киселев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск

В данной работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия ударной волны (УВ) с облаком частиц, границы которого в начальный момент возмущены. Показано, что с течением времени развивается неустойчивость, которая приводит к росту возмущений и разрушению облака.

Рассмотрим облако твердых сферических частиц, занимающих область Ω_2 (рис. 1), на которое слева набегают УВ. Границы облака при $t = 0$ определяются уравнением

$$x_{1,2} = x_{1,2}^0 + a_0 \cos(2\pi y/\lambda),$$

где индекс 1 соответствует передней границе, а 2 — задней; первое слагаемое определяет координату невозмущенной границы, а второе отвечает возмущениям с амплитудой a_0 и длиной волны λ .

Вертикальный размер облака выбран таким, что на нем укладывается две длины волны возмущения. В Ω_1 находится газ, течение которого описывается уравнениями Эйлера, а в Ω_2 — смесь газа с частицами. Течение смеси газ — частицы находится из уравнений континуально-дискретной модели, алгоритм численного решения которых приведен в [1]. На границах γ_1, γ_3 для газа ставилось условие стенки, а на γ_2, γ_4 — условие симметрии. Для частиц на γ_1, γ_3 задавалось условие зеркального отражения, а на γ_2, γ_4 — поглощения частиц (рис. 1).

Перед УВ газ (воздух) находился в нормальных условиях: $\gamma = 1,4$, $\rho_0 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $p_0 = 1$ атм (γ — показатель адиабаты Пуассона, ρ_0 и p_0 — начальные плотность и давление газа), а за УВ параметры газа определялись из соотношения Гюгонио. Число Маха УВ $M_0 = 2,7$ ($M_0 = D/c_0$, D — скорость УВ). В расчетах использовались частицы оргстекла (диаметр частиц $d = 2 \cdot 10^{-3}$ см, объемная концентрация $m_2^0 = 3 \cdot 10^{-2}$, $m_2 = \pi d^3 n/6$, n — концентрация частиц). Начальная толщина облака $h_0 = 1$ см ($h_0 = x_2^0 - x_1^0$), амплитуда возмущения $a_0 = 0,15$ см, а длина волны $\lambda = 1,45$ см.

В результате взаимодействия УВ с облаком частиц образуются отраженная УВ, прошедшая и волна разрежения (рис. 2, где приведены изобары в атмосферах при $t = 80$ мкс, штриховыми линиями показаны границы облака частиц). Видно, что волна разрежения находится в облаке и не расплывается со временем [1]. За отраженной УВ течение газа дозвуковое. При обтекании выпуклых участков облака (максимумов возмущения) происходит сжатие трубки тока, что приводит к ускорению газа и росту скоростного напора $\rho v_1^2/2$ в областях минимумов возмущения (ρ и v_1 — плотность и скорость газа). Поскольку сила $f = (\pi d^2/8) C_d \rho v_1^2$, действующая на частицу, пропорциональна скоростному напору, то в области минимумов возмущения величина f будет больше, чем в области максимумов. Это приведет к росту возмущений.

Другим важным обстоятельством роста возмущений и разрушения облака является картина вторичных течений. Из рис. 2 видно, что изолинии давления в облаке повторяют

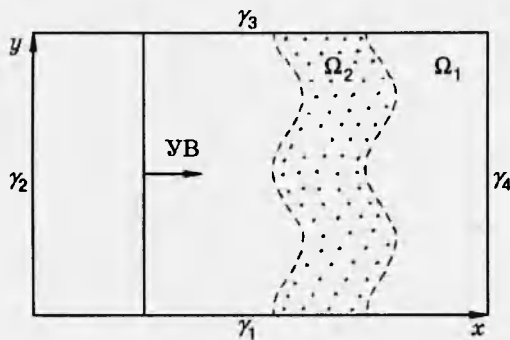


Рис. 1

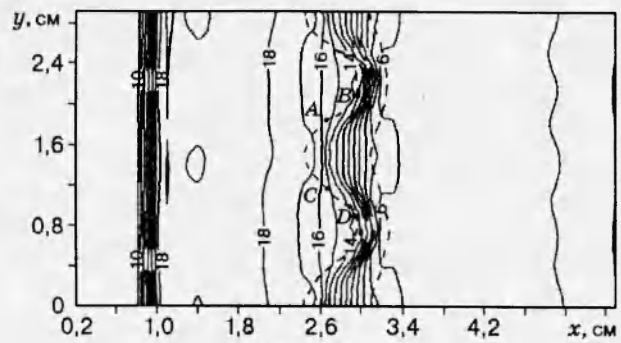


Рис. 2

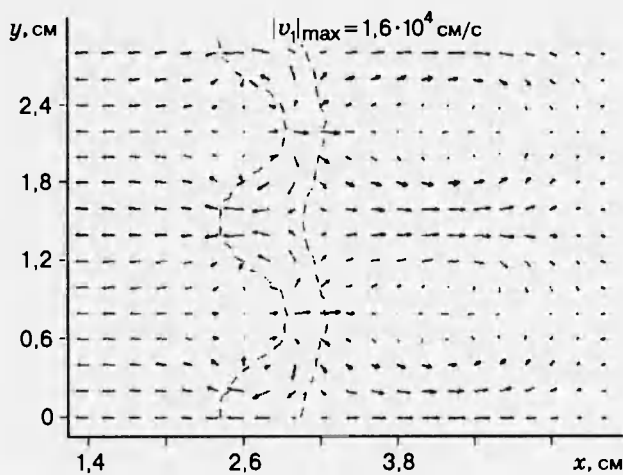


Рис. 3

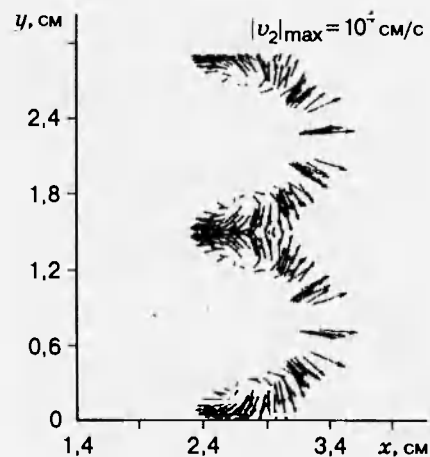


Рис. 4

контуры границы облака. В результате на выпуклых границах облака (см., например, участки AB и CD на рис. 2) появляется отличная от нуля компонента ∇p , направленная внутрь облака. Под действием ∇p газ затекает в облако и сворачивается в четыре вихря.

На рис. 3 показано поле скоростей газа на момент $t = 80$ мкс в системе отсчета, связанной с движущимся газом: $v'_{1x} = v_{1x} - u$, $v'_{1y} = v_{1y}$, $u = \int \rho v_{1x} dV / \int \rho dV$ (v_{1x} , v_{1y} — компоненты скорости газа в лабораторной системе координат). Видно, что на длине волны λ укладывается два вихря в облаке и два за облаком. Под действием силы трения частицы вовлекаются газом в вихревое движение. Происходят вынос частиц из областей минимума в области максимума и разрушение облака на отдельные сгустки.

На рис. 4 приведено поле скоростей частиц v_2 при $t = 100$ мкс, которое иллюстрирует описанную выше картину движения частиц, а на рис. 5 — поле скоростей газа в системе облака частиц после разрушения облака на сгустки ($t = 140$ мкс). Аналогичная картина развития возмущений наблюдается при начальной объемной концентрации $m_2^0 = 10^{-3}$. Однако возмущения в этом случае растут более медленно, поэтому разрушения облака не происходит. Скорость частиц достигает скорости газа раньше, чем произойдет разрушение облака.

Отмеченные выше вторичные вихревые течения могут существенно изменить конфигурацию облака. Предположим, что возмущения границы облака в начальный момент та-

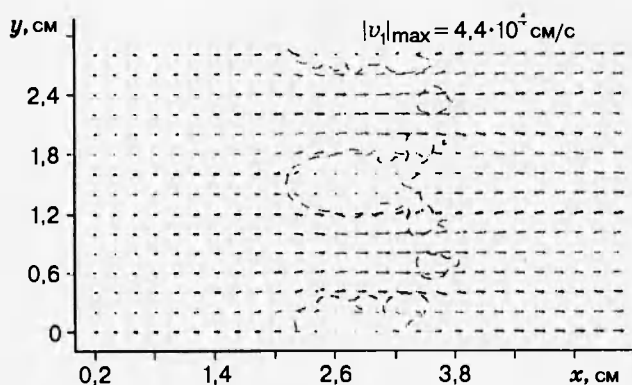


Рис. 5

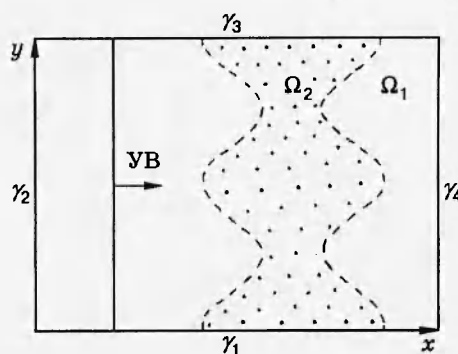


Рис. 6

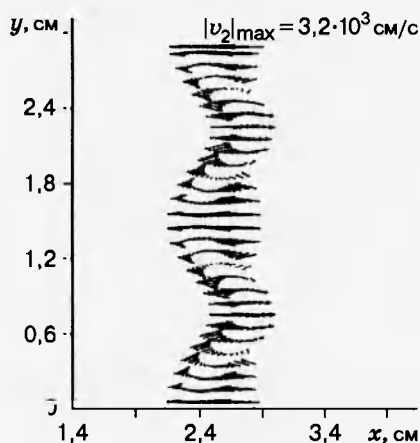


Рис. 7

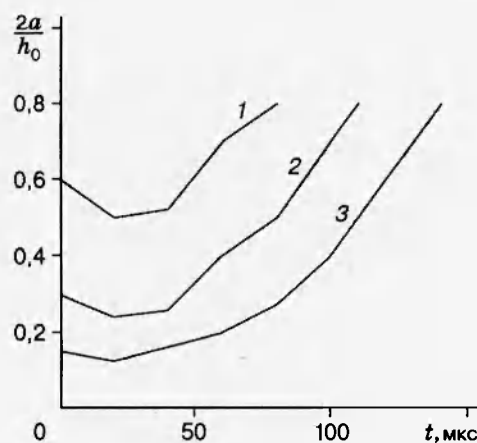


Рис. 8

кие, как на рис. 6. При $t = 0$ облако имеет объемную концентрацию $m_2^0 = 10^{-3}$, $a_0 = 0,3$ см, а параметры частиц и УВ те же, что приведены выше. После прохождения УВ и возникновения вихрей задняя граница облака сначала сглаживается (рис. 7), а затем становится геометрически подобной передней границе, как показано на рис. 1. Из аналогичных расчетов для $m_2^0 = 3 \cdot 10^{-2}$ видно, что задняя граница также стремится подстроиться под переднюю. Однако этот процесс не успевает завершиться вследствие разрыва облака в минимальном сечении.

Скорость роста возмущений зависит от диаметра d , объемной концентрации m_2^0 частиц, интенсивности УВ и слабо от толщины облака h_0 . На рис. 8 приведена зависимость $2a/h_0$ (a — амплитуда возмущения) от времени для трех начальных амплитуд возмущений $a_0 = a|_{t=0}$ (линии 1–3 отвечают $a_0 = 0,075; 0,15; 0,3$ см). Наблюдается приблизительно экспоненциальная зависимость $a(t)$ с выходом на постоянную скорость роста возмущений. Некоторый провал при $t \approx 40$ мкс связан с различием во временах прихода УВ на максимумы и минимумы возмущений. Частицы в области максимумов возмущения находятся большее время в потоке газа, чем в области минимумов возмущения, поэтому амплитуда при $t \leq 40$ мкс уменьшается. В дальнейшем развивается неустойчивость, и рост возмущений начинает преобладать.

Рассмотрим облако частиц, верхняя граница которого возмущена по формуле $y =$

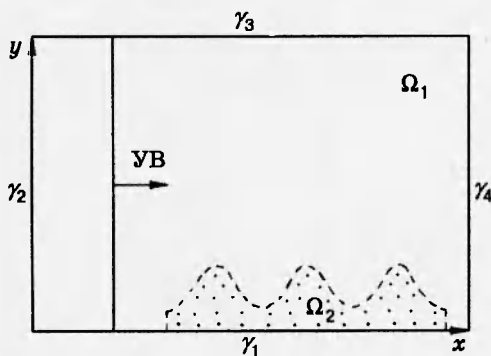


Рис. 9

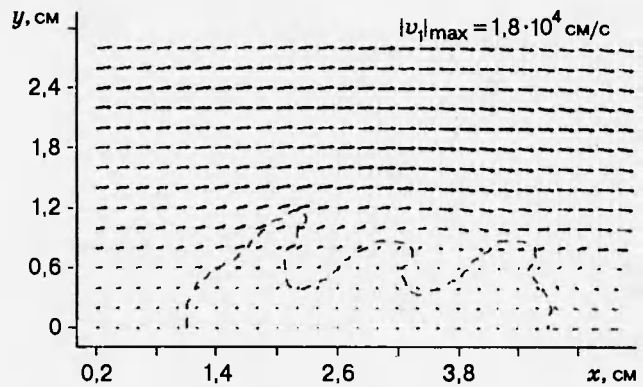


Рис. 10

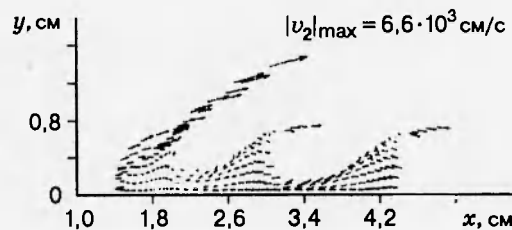


Рис. 11

$y_0 + a_0 \cos(2\pi x/\lambda - \pi)$. Слева на облако набегают УВ (рис. 9), $M_0 = 1,3$, $m_2^0 = 3 \cdot 10^{-2}$, $a_0 = 0,3$ см, $\lambda = 1,3$ см, $y_0 = 0,65$ см. Остальные параметры те же, что и выше. На рис. 10 показано поле скоростей газа при $t = 250$ мкс, а на рис. 11 — поле скоростей частиц при $t = 400$ мкс. Видно, что газ, встречая на своем пути препятствие в виде облака частиц, тормозится вследствие вязкого взаимодействия с частицами и разворачивается вверх. Поэтому с передней части облака происходит интенсивный вынос частиц во внешнюю область. Между соседними вершинами облака частиц формируется вихревое течение, вовлекающее во вращательное движение частицы. В области максимумов волны возмущения частицы выносятся во внешний поток и сносятся вниз по течению.

В заключение отметим, что рассмотренная картина роста возмущений границы облака и его разрушения качественно совпадает с наблюдаемой в эксперименте [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Boiko V. M., Fedorov A. V., Fomin V. M., et al. Ignition of small particles behind shock waves // Shock Waves, Explosions, and Detonations. Ser. Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 87. New York: AIAA Publishing, 1987. P. 71–87.
3. Бойко В. М., Папырин А. Н. О динамике образования газозвеси за ударной волной, скользящей вдоль поверхности сыпучей среды // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 2. С. 122–126.

Поступила в редакцию 10/V 1995 г.