

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА – МЕШКОВА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С КАПЛЕЙ ТЯЖЕЛОГО ГАЗА

К.И. Зырянов*, Г.А. Руев***, А.В. Федоров***.

*НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск, Россия,

**ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия.

Импульсивное ускорение искривленной границы раздела двух сред с разной плотностью порождает неустойчивость Рихтмайера – Мешкова [1,2], что связано с рассогласованием градиентов плотности и давления. В результате возникает завихренность вдоль поверхности раздела, что приводит к деформированию поверхности, смещению сред и в дальнейшем к возникновению турбулентности. После прохождения ударной волны через каплю тяжелого газа образуется пара вихрей на противоположных концах капли. В дальнейшем течение близи капли определяется взаимодействием этих вихрей. Со временем появляется волнообразность в области смещения, что связано с возникновением вторичной неустойчивости. В результате комбинация этих неустойчивостей приводит течение к турбулентности. Объяснения многих явлений, таких как, например, сверхзвуковое смещение и горение, астрофизика, инерционный термоядерный синтез и др., лежит в понимании развития указанной неустойчивости.

В многочисленных работах, посвященных численному моделированию рассматриваемой задачи с использованием односкоростных уравнений газовой динамики, например, [3], не учитывалось влияние процессов взаимопроникновения газов.

Поэтому представляет интерес исследование данной проблемы на основе уравнений двухскоростной двухтемпературной смеси газов, когда каждый компонент имеет собственную скорость и температуру. Данный подход позволяет описать как деформацию капли, так и протекающие при этом процессы перемешивания газов.

Постановка задачи. Стационарная ударная волна распространяется по газу 1 и в момент $t=0$ начинается взаимодействие с цилиндрической каплей тяжелого газа 2.

На рис. 1 использованы обозначения: 1 – газ 1, 2 – смесь газа 1 и 2, 3 – ударная волна, 4 – переходная область смещения.

Формирование начальной области смещения. В работе [4], в одномерном приближении получено асимптотическое решение задачи о формировании начального одномерного диффузионного слоя. Задача сводилась к одномерному уравнению диффузии, решение которого выражалось с помощью интеграла вероятностей. В настоящей работе, с учётом радиальной симметрии цилиндрической капли, получено распределение концентрации газа 2 в слое смещения в виде

$$\alpha_2(r, td) = \alpha_{20} \sum_{k=1}^{500} C_k e^{-\left(\frac{\mu_k}{R}\right)^2 Dtd} J_0\left(\frac{\mu_k r}{R}\right), \quad C_k = \frac{2}{\mu_k J_1^2(\mu_k)} \frac{R_0}{R} J_1\left(\mu_k \frac{R_0}{R}\right). \quad (1)$$

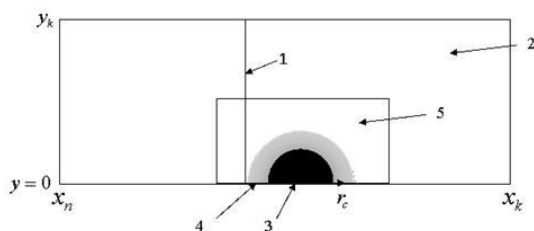


Рис. 1. Постановка задачи. 1 – ударная волна, 2 – легкий газ (газ 1), 3 – тяжелый (газ 2), 4 – переходная диффузионная область, 5 – расчетная область с малым шагом сетки.

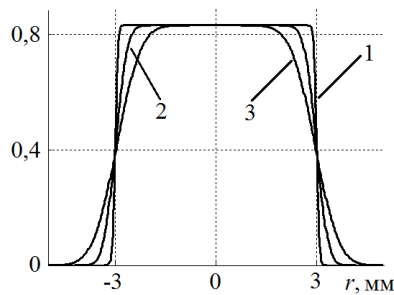


Рис. 2. $\alpha_{20} = 0,834$. 1 – $td = 6$ мкс ; 2 – $td = 100$ мкс ; 3 – $td = 1600$ мкс .

Здесь R_0 – начальный радиус капли, $R = 10R_0$, td – время формирования переходной диффузионной области, α_{20} – концентрация тяжелого газа SF_6 в центре капли, D – коэффициент диффузии, μ_k – корни функции Бесселя $J_0(x)$. По мере роста времени диффузии td ширина переходной области увеличивается (рис. 2).

Параметры смеси в области смешения описываются уравнениями двухскоростной двухтемпературной газодинамики смесей [4]. При малых (или нулевых) значениях концентрации одного из газов используются уравнения Эйлера для второго газа.

В качестве метода расчета для пространственной аппроксимации системы используется метод расщепления вектора потоков с применением непрерывного ограничителя [5]. Используемая схема имеет второй порядок точности по времени и третий по пространственным координатам в области гладких течений. Расчеты проводились в прямоугольной области. На верхней границе и правой границе ставились условия равенства производных нулю, на нижней границе - условия симметрии, на левой границе – входной поток. Применялась адаптивная сетка с переменным шагом. В области, включающей каплю, использовался мелкий шаг (0,01-0,03 мм), а вне этой области шаг увеличивался с множителем равным 1,1, что позволило устранить влияние эффектов отражения на границах. Для удержания капли внутри области с мелким шагом расчеты проводились в системе координат,двигающейся с некоторой скоростью U_0 в направлении оси x .

На рис. 3 приведены изолинии массовой концентрации тяжелого газа при различных моментах времени t после начала взаимодействия с ударной волной, полученные в результате расчетов падения ударной волны с числом Маха $M = 1.2$. Газ 1 – воздух, газ 2 – SF_6 , $\alpha_{20} = 0,834$, $td = 100$ мкс. В последней строке Таблицы - данные эксперимента [2]. Как видим, расчетные данные показывают удовлетворительное соответствие динамики развития возмущений контактной поверхности.

t	0,13 мс	0,31 мс	0,56 мс
Расчет ($td = 0,1$ мс)			
Эксперимент [2]			

Рис. 3. Изолинии массовой концентрации тяжелого газа

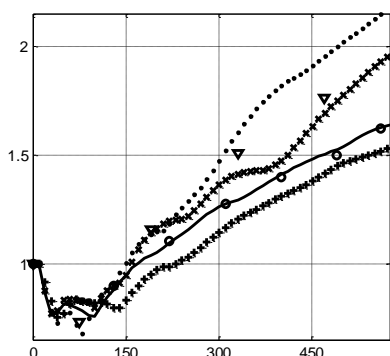


Рис. 4. Изменения ширины капли в горизонтальном направлении
 о - Эксперимент [2]; ▽ - эксперимент [3], первая сверху кривая соответствует данным третьей строки Таблицы, вторая – второй строке, третья – первой строке, четвертая – четвертой строке.

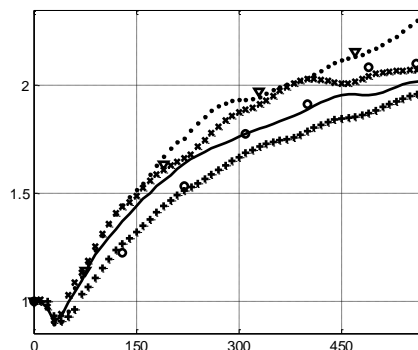


Рис. 5. Изменения ширины капли в вертикальном направлении

На рис. 4 приведены изменения ширины капли в горизонтальном направлении, которая определялась как разность между координатами, где молярная концентрация SF_6 начала превышать 10%. Аналогично на рис. 5 приведено изменение ширины капли в вертикальном направлении. В таблице приведена расшифровка пометок на графиках, соответствующих нашим расчётам.

Таблица. Пояснения к рис. 4.

Тип линии	R_0 , мм	td , мкс	α_{20}
—	3	100	0,834
x	3	6	0,834
•	3	100	0,941
+	4	100	0,834

Видно, что результаты расчетов количественно соответствуют экспериментальным данным. Наблюдается влияние начальных параметров на эволюцию капли. При уменьшении размеров переходной зоны, а также при увеличении концентрации SF_6 в центре капли, размеры капли в последующие моменты времени увеличиваются более интенсивно. Это приводит к более быстрому развитию неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, что в свою очередь связано с большей величиной градиентов концентрации на границах капли в начальный момент. Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ, проект № 211, ЗАДАНИЕ № 2014/140.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной/ Е.Е. Мешков // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1969. №5. С. 151-157.
2. Tomkins C., Kurman S., Orlicz G., Prestridge K. An experimental investigation of mixing mechanisms in shock-accelerated flow // J. Fluid Mech. 2008. Vol. 611. P. 131-149.
3. Zhang S., Zabusky N.J., Peng G., Gupta S. Shock gaseous cylinder interactions: Dynamically validated initial conditions provide excellent agreement between experiments and numerical simulations to late-intermediate time // Physics of Fluids. 2004. Vol. 16, No 5. P. 1203-1216.
4. Ruev G.A., Fedorov A.V., Fomin V.M. Development of the Rayleigh – Taylor instability due to interaction of a diffusion mixing layer of two gases with compression waves // Shock Waves. 2006. Vol. 16, No 1. P. 65-74.
5. Anderson W.K., Thomas J.L., Van Leer B. Comparison of volume flux vector splitting for the Euler equations // AIAA Journal. 1986. Vol. 24. No. 9. P. 1453-1460.