МЕХАНИКА
ЖИДКОСТИ И ГАЗА
№ 5 • 1996

УДК 532.517.013.4:533.6.011.72

© 1996 г. С.Г. ЗАЙЦЕВ, С.Н. ТИТОВ, Е.И. ЧЕБОТАРЕВА

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА НА ГРАНИЦЕ С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПЛОТНОСТИ

Исследовано развитие неустойчивости Рихтмайера–Мешкова под действием ударной волны, отраженной от жесткой стенки. Показано, что скорость нарастания амплитуды возмущения зависит от характера рефракции ударной волны на границе раздела разноплотных газов. Для случая регулярно-мягкой рефракции измерено замедление скорости роста неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, связанное с непрерывным изменением плотности на границе раздела.

Теоретический анализ гидродинамической неустойчивости области контакта двух разноплотных сред, находящихся в гравитационном поле, показал, что на линейной стадии развития скорость роста неустойчивости в слое с непрерывным изменением плотности меньше, чем на границе с разрывным изменением плотности. Экспериментальные исследования подтвердили этот результат.

Влияние замены разрывного изменения плотности на непрерывное в случае импульсного ускорения, создаваемого ударной волной (неустойчивость Рихтмайера–Мешкова), изучалось в [1–3]. В [1] определено снижение скорости роста возмущений на начальной стадии неустойчивости при однократном прохождении ударной волны. Постановка эксперимента в [2] не позволила зарегистрировать изменение амплитуды возмущения после взаимодействия с первой ударной волной и провести прямое определение уменьшения скорости роста, обусловленное непрерывным изменением плотности на границе. Поэтому исследования неустойчивости Рихтмайера–Мешкова в [2] выполнены при прохождении через область перемешивания нескольких ударных волн.

Анализ экспериментальных данных в [2] проводился с помощью соотношения Брюоллетта–Стюртеванта:

$$\frac{da_k}{dt} = \frac{a_{k1}A_1U_1k}{\psi(\delta_1A_1)} + \frac{a_{k2}A_2kU_2}{\psi(\delta_2A_2)} + \frac{a_{k3}A_3kU_3}{\psi(\delta_3A_3)} + \ldots, \quad A_i = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

Здесь a_{ki} – значение амплитуды возмущения непосредственно после нахождения i-й ударной волны; A_i – число Атвуда, ρ_1 и ρ_2 – значения плотности "чистых" газов в областях, примыкающих к слою после прохождения через него i-й ударной волны; U_i – значение скорости, сообщаемой области перемешивания i-й ударной волной; ψ – фактор уменьшения скорости роста. Он является функцией числа Атвуда и толщины переходного слоя, причем за толщину слоя принимается величина $\delta = {}^1/_2(\delta_i + \delta_i')$, где δ_i, δ_i' – толщина слоя до и после взаимодействия с i-й ударной волной.

Соотношение Брюоллетта–Стюртеванта является комбинацией модернизированного соотношения Рихтмайера и модели, учитывающей влияние толщины слоя на развитие гидродинамической неустойчивости в случае постоянно действующего ускорения (модель Даффа) [4]. Оно предполагает, что скорость роста возмущений, сообщенная i-й ударной волной, не будет изменяться при прохождении через слой по-

Таблица 1

Комбинация газов	A	M_{e1a}	W_{i1b}, мм/мкс	$U(K_{12})$, мм/мкс	$U(K_{23})$, мм/мкс	W_{e2b}, мм/мкс	t_{s1}, мкс	t_{s2}, мкс
Ar → 0,7Ar + + 0,3He	0,103	3,22	1,23	0,73	0,02	0,66	62,0	61,6
Ar → 0,5Ar + + 0,5He	0,244	3,22	1,16	0,81	0,08	0,71	84,0	84,2
Ar → He	0,760	3,21	1,94	1,11	0,56	1,58	45,0	47,7
Ar → He	0,760	3,22	1,94	0,98	0,32	1,23	19,0	24,1
Ar → He	0,761	3,25	1,96	1,08	0,46	1,15	28,5	36,8

следующих ударных волн. В [2] была проведена экспериментальная апробация соотношения Брюоллетта–Стюртеванта. Для этого измерялись скорости роста возмущений на контактной поверхности после взаимодействия ее с двумя отраженными волнами и расчитывались значения начальных амплитуд. Малый разброс полученных значений служил доказательством работоспособности предложенной модели.

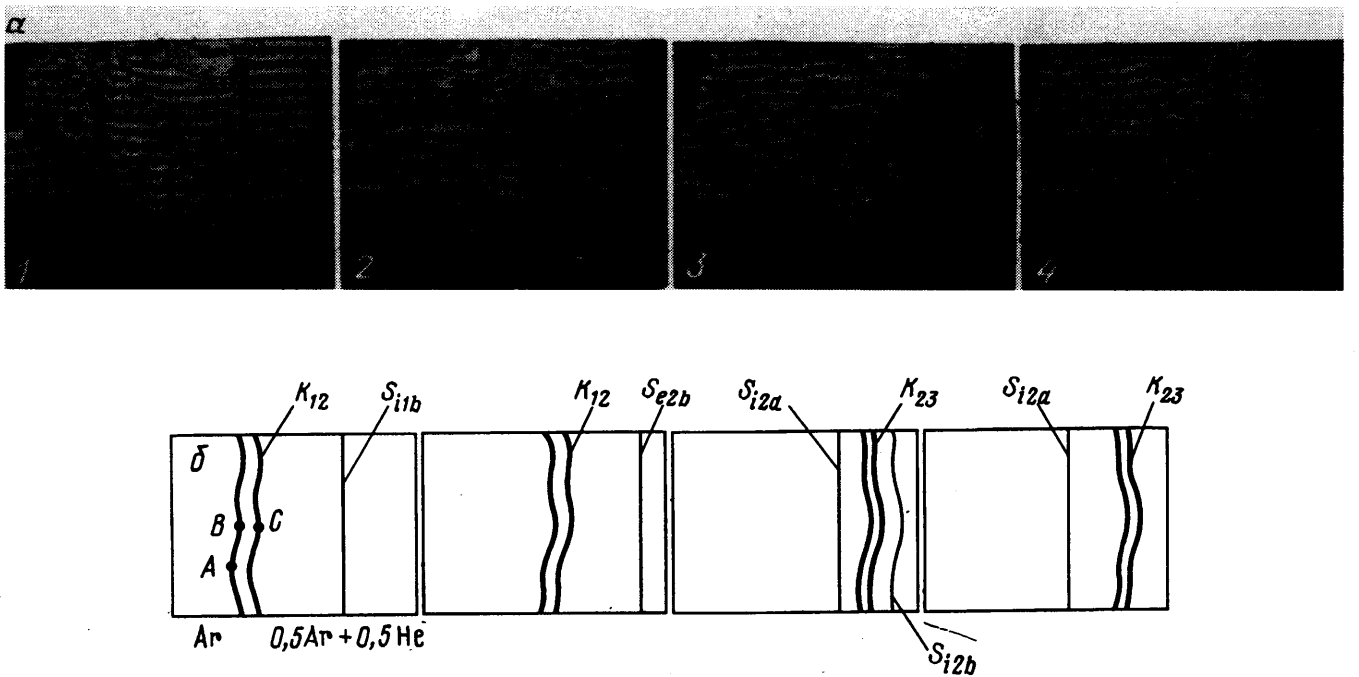
Однако различие в природе неустойчивостей Рихтмайера–Мешкова и Рэлея–Тейлора позволяет предположить, что возникновение переходного слоя с непрерывным изменением плотности приведет к различному количественному изменению скорости процесса. Искусственное объединение модели Даффа с формулой Рихтмайера–Мешкова и перенос значений ψ на модель неустойчивости Рихтмайера–Мешкова не является очевидным. Кроме того, необходимо отметить условность выбора значений числа Атвуда и толщины слоя, используемых для расчета фактора ψ в этой модели. В связи с этим необходима прямая проверка предложенной модели и определение значений фактора уменьшения скорости роста для различных значений числа Атвуда.

Данная работа является продолжением [1] и содержит результаты по развитию неустойчивости Рихтмайера–Мешкова при ускорении области контакта ударной волной, отраженной от торца трубы. Используемая установка позволяет реализовать переход отраженной ударной волны как из тяжелого газа в легкий, так и наоборот. Для ускорения области контакта используются ударные волны с числами Маха $M \geqslant 3$.

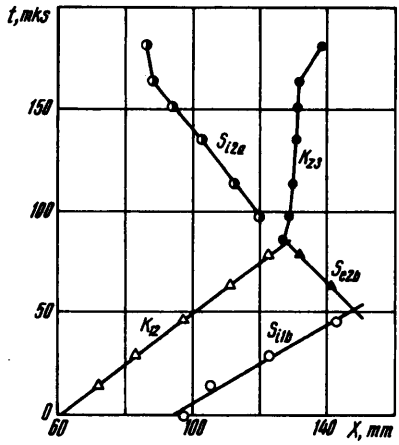
1. Экспериментальная установка. Эксперимент проводился на ударной трубе диафрагменного типа. Длины камер низкого и высокого давления равны 4,7 и 0,9 м соответственно. Сечение канала 7,2 × 7,2 см^2. Для формирования контактной области в камере низкого давления устанавливалась специальная секция с быстро удаляемой пластиной. Время полного удаления могло варьироваться от 40 до 150 мс. После удаления пластины происходило смешение газов, обусловленное молекулярной диффузией. Ширина контактной области определялась временем между моментом удаления пластины из рассматриваемого сечения и приходом ударной волны. Форма границ зависила от комбинации газов и скорости движения пластины. Более подробно эти вопросы, а так же конструктивные особенности установки и техники проведения эксперимента рассмотрены в [1].

Для изучения эволюции контактной области после взаимодействия с падающей и отраженной ударными волнами применялась оптическая регистрация процесса с помощью интерферометра Маха–Цендера с лазерным источником света. Визуализация проводилась на участке $50 < x < 150$ мм. Сечение $x = 0$ совмещалось с центром разделительной пластины. Торец располагался в сечении $x = 150$ мм.

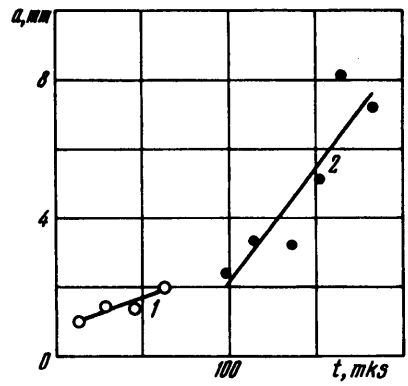
Во всех приводимых в работе опытах ударная волна сначала распространялась по аргону, а затем переходила в смесь аргона с гелием ($C_1 \times \mathrm{Ar} + C_2 \times \mathrm{He}$, где C_1, C_2 – объемные концентрации газов). В табл. 1 приведены рассмотренные комбинации газов, соответствующие им числа Атвуда и значения чисел Маха падающей ударной волны M_{e1a}. Начальное давление в обеих половинах камеры низкого давления было равно 0,5 атм.



Фиг. 1. Взаимодействие области контактного перемешивания с отраженной ударной волной: *а* – серия интерферограмм: *1* – 13,52; *2* – 62,77; *3* – 97,85; *4* – 114,32 мкс; *б* – схематическое изображение процесса: S_{i1b} – преломленная ударная волна, K_{12} – контактная область, ускоренная падающей ударной волной, S_{e2b} – ударная волна, отраженная от торца, K_{23} – контактная область, ускоренная отраженной ударной волной, S_{i2a} – ударная волна, проходящая в аргон после взаимодействия отраженной ударной волны с K_{23}



Фиг. 2. Диаграмма движения газодинамических объектов в канале (все обозначения даны на фиг. 1,*б*)



Фиг. 3. Нарастание амплитуды возмущения за падающей и отраженной ударными волнами

2. Экспериментальные результаты. Используемая в работе система регистрации позволила в каждом опыте получить серию мгновенных интерферограмм, дающих полную информацию о движении газодинамических объектов в канале и развитии неустойчивости на контактной границе под действием падающей и отраженной ударных волн. На фиг. 1,*а* приведены интерферограммы, иллюстрирующие переход ударной волны из Ar в смесь 0,5Ar + 0,5He. На первых двух кадрах хорошо видны преломленная S_{i1b} и отраженная S_{e2b} ударные волны, а также контактная область K_{12} в моменты, предшествующие встрече ее с отраженной ударной волной. Из интерферограммы видно, что контактная область K_{12} является слоем с возмущенными границами. Амплитуда возмущений меньше толщины слоя. После взаимодействия K_{12} с отраженной ударной волной S_{e2b} образуются ударная волна S_{i2b}, идущая к торцу, и ударная волна S_{i2a}, идущая по аргону в направлении камеры высокого давления. Распределение давления между ними в момент окончания рефракции определяет развитие неустойчивости контактной области K_{23}.

На фиг. 2 приведена *x*, *t* – диаграмма, полученная в результате обработки представленных интерферограмм. Положение газодинамических объектов определялись на оси канала. За положение K_{12} и K_{23} принималась середина области перемешивания $(x_A + x_C)/2$ (фиг. 1,*б*). Диаграммы, аналогичные представленным на фиг. 2, позволили определить скорости движения всех газодинамических объектов и моменты столкновения отраженной ударной волны S_{e2b} с контактной областью $K_{12} - t_{s1}$. Измеренные значения приведены в табл. 1 для пяти различных опытов.

Для получения информации о скорости развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова измерялась амплитуда возмущения со стороны тяжелого газа. Амплитуда определялась как расстояние между экстремальными точками границы переходного слоя $a = x_A - x_B$ (фиг. 1,*б*). Измеренные значения амплитуд наносились на график в функции времени и аппроксимировались прямой с использованием метода наименьших квадратов.

На фиг. 3 приведены результаты измерения амплитуды в опыте, представленном на фиг. 1. Прямая *1* – развитие возмущения, вызванное взаимодействием области контакта с падающей ударной волной (описывается уравнением $a = 0{,}0173t + 0{,}833$). Прямая *2* – развитие возмущения, вызванное взаимодействием с отраженной ударной волной (описывается уравнением $a = 0{,}0667t - 4{,}517$). При переходе ударной волны

Таблица 2

Комбинация газов	da/dt		a_0k	a^{**}	ψ_1	δ/λ	ψ_2
	I	II					
Ar → 0,7Ar + + 0,3He	0,035	0,056	1,44	2,28	2,35	0,255	2,40
Ar → 0,5Ar + + 0,5He	0,017	0,067	1,19	1,13	2,15	0,316	2,62
Ar → He	0,064	0,205	1,68	5,14	4,53	0,264	1,57
Ar → He	0,140	0,207	3,29	7,36	8,04	0,325	1,65
Ar → He	0,121	0,259	2,13	5,99	8,44	0,408	1,82

S_{e2b} из легкого газа в тяжелый процесс рефракции приводит к сжатию амплитуды возмущения, причем

$$a^{**} = Ha(t), \quad H = \frac{W_{e2b} + U(K_{23})}{W_{e2b} + U(K_{12})} \tag{2.1}$$

Здесь $a(t)$ – амплитуда возмущения на K_{12} ПЕРЕД СТОЛКНОВЕНИЕМ С S_{e2b}; a^{**} – амплитуда возмущения в момент окончания рефракции S_{e2b} на K_{12}, т.е. амплитуда возмущения на K_{23} в начальный момент образования K_{23}; W_{e2b}, $U(K_{12})$, $U(K_{23})$ – скорость отраженной ударной волны и скорости контактных поверхностей K_{12}, K_{23} в лабораторной системе координат. Используя уравнения, описывающие развитие возмущений за преломленной и отраженной ударными волнами, можно определить момент окончания рефракции t_{s2}

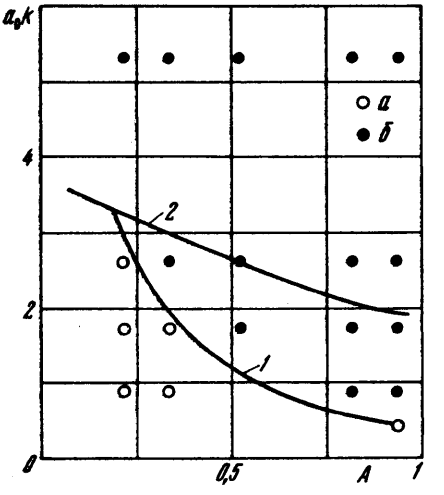
$$(A_1 t_{s2} + B_1)H = (A_2 t_{s2} + B_2) \tag{2.2}$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 – коэффициенты в уравнениях, описывающих развитие возмущений.

Рассчитанные времена приведены в табл. 1. В опытах, в которых падающая ударная волна переходила из аргона в смесь газов, моменты столкновения t_{s2}, определенные по уравнению (2.2), и моменты t_{s1}, определенные в помощью x, t-диаграмм, совпадают с точностью до 1–2%. В опытах, в которых ударная волна переходила из аргона в гелий, значения t_{s2} оказались на 20% выше t_{s1}. Это связано с тем, что момент столкновения, определенный с помощью x, t-диаграмм, относится к центральному сечению области перемешивания и при увеличении амплитуды возмущения и толщины слоя отличается от момента окончания рефракции. Поэтому при определении величины "сжатой" амплитуды, с которой начинался второй этап развития НРМ, использовались времена, рассчитанные по уравнению (2.2).

Полученный таким образом комплекс экспериментальных данных оказывался достаточным для прямого определения с помощью уравнения Брюоллетта–Стюртеванта фактора замедления скорости роста ψ. В табл. 2 приведены результаты измерения скорости развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова в опытах, представленных в табл. 1. Таблица 2 содержит: da/dt – скорости роста возмущения за падающей и отраженной ударными волнами; a_0k – произведение амплитуды возмущения на K_{12} перед столкновением с S_{e2b} на волновое число; a^{**} – величина "сжатой" амплитуды возмущения; ψ_1 – значения фактора замедления скорости роста, рассчитанные с помощью формулы Брюоллетта–Стюртеванта; δ/λ – отношение средней толщины области перемешивания к длине волны возмущения; ψ_2 – соответствующие им значения фактора замедления, рассчитанные с помощью модели Даффа [4].

Фиг. 4. Зависимость режима развития неустойчивости Рихтмайера – Мешкова от числа Атвуда и a_0k для $M_{i1b} = 4$: *1* – граница между регулярно-мягким и регулярно-жестким режимами рефракции; *2* – граница между регулярно-жестким и нерегулярным режимами рефракции; точки *а* – режимы без вторичных волн; точки *б* – режимы с вторичными ударными волнами



3. Обсуждение результатов. В работе [5] показано, что на границе с разрывным изменением плотности развитие неустойчивости Рихтмайера–Мешкова определяется, главным образом, характером рефракции ударной волны на контактной поверхности. Все многообразие наблюдаемых газодинамических картин разделено на три типа: регулярно-мягкий режим, регулярно-жесткий режим и нерегулярный режим.

На фиг. 4 представлена зависимость режимов развития неустойчивости от числа Атвуда и a_0k [5]. В данной работе под a_0 понимается значение амплитуды возмущения на K_{12} непосредственно перед воздействием с отраженной ударной волной. В соответствии с графиком на фиг. 4 режимы с малыми числами Атвуда (первая и вторая строка табл. 2) относятся к регулярно-мягкому типу рефракции. Этот тип характеризуется отсутствием газодинамических разрывов между ударными волнами, образовавшимися после окончания рефракции. На фронтах преломленной и отраженной волн не образуется изломов. Все эти признаки наблюдаются и в случае границы с непрерывным изменением плотности. Однако скорость роста возмущения оказалась существенно ниже, чем в случае с разрывным изменением плотности. Фактор замедления скорости роста ψ, измеренный в этих опытах, с точностью до 20% совпадает с рассчитанным с помощью модели Даффа [4].

Результаты опыта с $A = 0{,}76$ и $a_0k = 1{,}68$ (третья строка табл. 2) относятся к регулярно-жесткому типу. На границе с разрывным изменением плотности этот тип рефракции характеризуется формированием вторичных ударных волн между преломленной и отраженной ударными волнами. Искажение начальной формы контактного разрыва происходит сразу после процесса рефракции. При этом линейная стадия развития неустойчивости не наблюдается, а скорость роста амплитуды возмущения приблизительно вдвое меньше определенной по соотношению Рихтмайера. С учетом этого, замедление скорости роста, связанное с непрерывным изменением плотности, в третьем опыте из табл. 2 примерно равно 2 (по модели Даффа $\psi \sim 1{,}57$).

Результаты последних двух опытов относятся к нерегулярному режиму рефракции. При этом на границе с разрывным изменением плотности наблюдается дальнейшее снижение скорости роста возмущения. По-видимому этим объясняется значительное нарастание ψ_1, тогда как ψ_2 остается практически постоянным.

Анализ результатов, представленных в [1], с точки зрения режимов рефракции показал, что во всех опытах реализовывался регулярно-мягкий режим.

Таким образом, для регулярно-мягкого режима рефракции факторы замедления скорости роста амплитуды возмущения, рассчитанные по модели Даффа, хорошо совпадают с полученными в эксперименте. В случае регулярно-жесткой и нерегулярной рефракции замедление является суммой двух факторов: толщины слоя и формы

возмущения, определяющего тип рефракции. Для режимов, реализованных в данной работе, вклады обоих факторов оказались соизмеримыми и разделить их не удалось.

Заключение. В результате проведенной работы показано, что скорость нарастания области контактного перемешивания после взаимодействия с отраженной ударной волной определяется, в первую очередь, типом рефракции отраженной ударной волны на контактном слое. В случае регулярно-мягкого типа рефракции скорость нарастания толщины слоя может быть получена с помощью соотношения Брюоллетта–Стюртеванта с использованием факторов замедления скорости роста, рассчитанных по модели Даффа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-01-01144-а) и Комиссариата по атомной энергии Франции (контракт СТА/ДАМ № 3672 DIR).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев С.Г., Титов С.Н., Чеботарева Е.И.* Эволюция переходного слоя, разделяющего разноплотные газы, при прохождении через него ударной волны // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 2. С 18–26.
2. *Brouillette M., Sturtevant B.* Experiments on the Richtmyer – Meshkov instability: single-scale perturbations on a continuous interface // J. Fluid Mech.1994. V. 263. P. 271–292.
3. *Rodriguez G., Galametz I., Croso H., Haas J.F.* Richtmayer – Mechkov instability in a vertical shock-tube // Proc. 4th Intern. Workshop on the Physics of Compessible Turbulent Mixing. Cambridge, England. 1993.
4. *Duff R.E., Harlow F.H., Hirt C.W.* Effects of diffusion on interface instability between gases // Phys. Fluids. 1962. V. 5. N 4. P. 417–425.
5. *Aleshin A.N., Zaytsev S.G., Lazareva E.V.* Experimental and numerical studies on Richtmayer – Mechkov instability // Russia J. Comput. Mech. 1993. V. 1. N 2.

Москва

Поступила в редакцию
1.IX.1995