

УДК 532.517.013.4:533.6.011.72

© 1999 г. С.Г. ЗАЙЦЕВ, В.В. КРИВЕЦ, С.Н. ТИТОВ, Е.И. ЧЕБОТАРЕВА

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЭЙЛОРА В СЖИМАЕМЫХ СРЕДАХ

Экспериментально исследовано возбуждение турбулентности, вызванной неустойчивостью Рэлея – Тэйлора, в области перемешивания двух газов. Ускоренное движение этой области сообщается нестационарной волной сжатия. Ускорение $g \sim 1,5 \cdot 10^7$ см/с², числа Атвуда изменяются от 0,04 до 0,77. Используются области перемешивания между кислородо-водородной смесью и инертными газами (Ne, Ar, Kr, Xe) или SF₆. Исходное давление газов 0,5 атм.

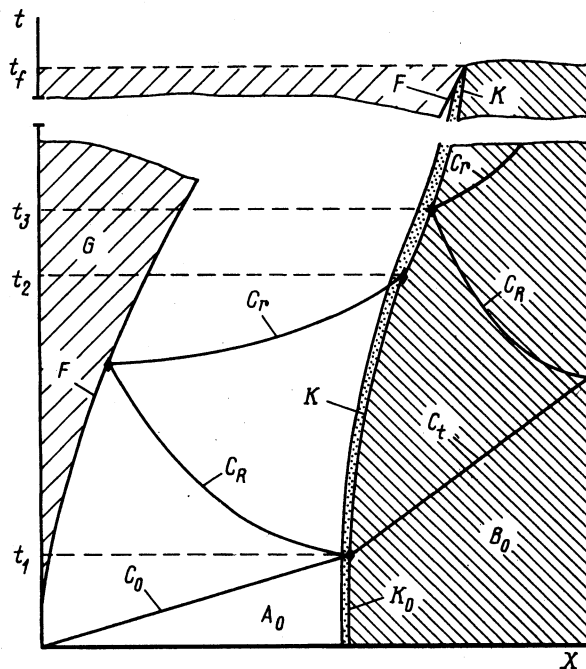
Область перемешивания двух сред, движущихся ускоренно, будет неустойчива, если ускорение направлено со стороны легкой среды в тяжелую. В результате развития этой неустойчивости образуется турбулизированный слой перемешивания, разделяющий обе среды. Это явление носит название неустойчивости Рэлея – Тэйлора. Оно наблюдается в явлениях природы и в ряде объектов новой техники, например при сжатии мишеней лазерного термоядерного синтеза.

Большинство теоретических и экспериментальных исследований неустойчивости Рэлея – Тэйлора проведено для несжимаемых сред [1–7]. Учет сжимаемости влечет за собой существенное усложнение теоретического анализа даже для линейной стадии неустойчивости. В [8] показано, что сжимаемость может приводить к увеличению скорости роста возмущений. Другим фактором, влияющим на скорость развития неустойчивости Рэлея – Тэйлора, является характер изменения плотности в области перемешивания. Замена разрывного изменения плотности на непрерывное приводит к уменьшению скорости развития возмущений [5–7] или к задержке [3,4] в их развитии. В процессах, развивающихся при сверхвысоких параметрах в мишенях лазерного термоядерного синтеза, присутствуют оба фактора: граница, на которой развивается неустойчивость, имеет непрерывное изменение плотности и подвергается значительному сжатию.

В данной работе проведено экспериментальное исследование неустойчивости Рэлея – Тэйлора в области перемешивания двух газов, ускоряемой нестационарной волной сжатия. Характерной особенностью постановки этих исследований является сжимаемость используемых сред и непрерывное изменение плотности в исходной области перемешивания, разделяющей газы разной плотности. Представленный материал включает в себя продолжение исследований линейной стадии неустойчивости, начатых в [9], а также исследование нелинейной, переходной и начала образования турбулентной стадий.

1. Постановка эксперимента. Основным элементом экспериментального стенда является вертикально расположенный канал с сечением 72×72 мм², разделенный быстро удаляемой пластиной. Верхняя часть канала заполняется кислородно-водородной смесью (молекулярный вес 18,5). Нижняя часть – одним из инертных газов (Ne, Ne, Ar, Kr, Xe) или SF₆. В момент полного удаления пластины в верхней части канала инициируется воспламенение кислородно-водородной смеси.

На фиг. 1 приведена x,t -диаграмма, которая дает принципиальное объяснение постановки исследования. K_0 – область перемешивания, формирующаяся после удаления

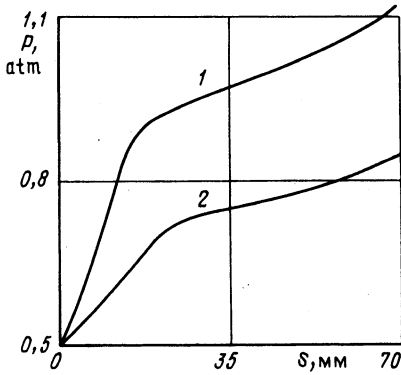


Фиг. 1. x,t -Диаграмма процесса: F – фронт пламени; C_0 – передний фронт волны сжатия; K_0 – исходная область перемешивания; C_R, C_t – отраженная и преломленная волны сжатия; C_r – волны разрежения; C_R – отраженная от нижнего фланца волна сжатия; K – область перемешивания; G – область, занятая продуктами горения; A_0 – исходная кислородно-водородная смесь; B_0 – инертный газ или SF_6

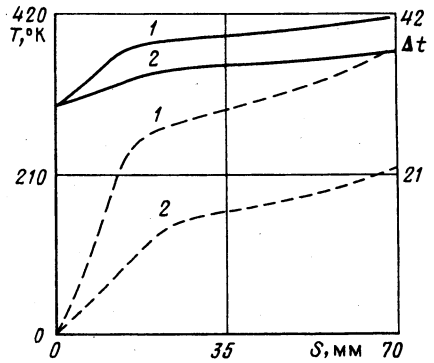
пластины, F – фронт пламени, распространяющийся вниз по каналу вдоль оси x . Сечение $x = 0$ совмещено с точкой инициирования воспламенения. Исходная область перемешивания K_0 располагается в сечении $x = 600$ мм. Перед фронтом пламени образуется волна сжатия, передний фронт которой обозначен C_0 . Фронт волны C_0 , двигаясь со скоростью звука в газе A_0 , достигает K_0 в момент $t = t_1$. При этом он образует преломленную C_t и отраженную C_R волны сжатия и вовлекает в ускоренное движение область перемешивания K . Параметры "чистых" газов в окрестности K определяются характеристиками нестационарных волн сжатия C_R и C_t . Эволюция области перемешивания в процессе ускоренного движения отражает все стадии развития неустойчивости Рэлея – Тэйлора.

В результате взаимодействия волны сжатия C_R с фронтом пламени F образуется отраженная волна разрежения C_r , движущаяся по газу A . Взаимодействие этой волны с K в $t = t_2$ приводит к замедлению области перемешивания. Наиболее интенсивное торможение K происходит при взаимодействии ее с отраженной от нижнего фланца канала волной сжатия C_R в $t = t_3$. Торможение K должно сопровождаться стратификацией области перемешивания. В $t = t_f$ завершается процесс взаимодействия потока A с K .

В данной работе регистрация движения области перемешивания осуществлялась на отрезке $600 < x < 690$ мм. Положение торца подбиралось таким образом, чтобы взаимодействие области перемешивания с волной C_R происходило при $x > 690$ мм и не осложняло трактовку полученных экспериментальных данных.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Значение давления в процессе распространения области перемешивания по визуализируемому участку канала. Область перемешивания между кислородно-водородной смесью и криптоном – 1, неон – 2

Фиг. 3. Изменение температуры области перемешивания в процессе распространения по визуализируемому участку канала. Сплошные линии – температура со стороны инертного газа; штриховые линии – разность температур "чистых" газов $\Delta T = T_B - T_A$ вблизи области перемешивания. Область перемешивания между кислородно-водородной смесью и криптоном – 1, неон – 2

Регистрация процесса производилась с помощью интерферометра Маха – Цендера. Подробное описание установки и особенностей проведения эксперимента даны в [9].

2. Одномерная модель процесса. С целью оценки параметров области перемешивания и "чистых" газов в ее окрестности рассмотрено в одномерном приближении ускоренное движение полупрозрачного поршня, вдвигаемого в трубу. Последняя наполнена двумя газами A_0 и B_0 разной плотности, разделенными областью перемешивания K_0 . Полупрозрачный поршень моделирует движение фронта пламени [10]. Численный расчет ограничивается временным интервалом от момента начала движения поршня ($t = 0$) до момента $t = t_2$ (фиг. 1). В момент $t = t_2$ происходит столкновение отраженной от поршня волны разрежения C_r с областью перемешивания K .

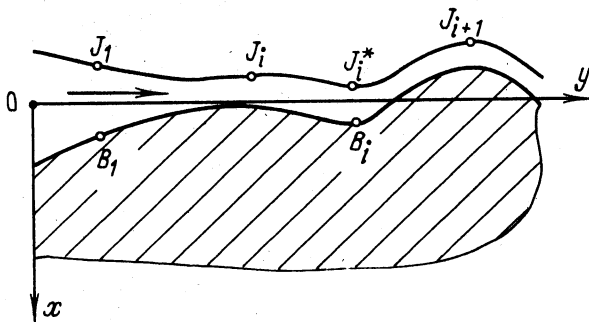
Расчет проводился в лагранжевой системе координат на основании системы уравнений

$$\frac{dx}{dt} = u; \quad \frac{d}{dt}(\rho\Delta) = 0; \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{p}{\rho^\gamma}\right) = 0; \quad \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Здесь p , ρ и u – давление, плотность и скорость потока; Δ – величина лагранжевой ячейки; γ – отношение удельных теплоемкостей. Рассмотрены два варианта изменения плотности в K_0 : разрыв плотности и линейное изменение плотности от ρ_a в области, занятой A_0 , до ρ_b в области, занятой B_0 . Толщина области перемешивания – δ_0 .

Граничные условия задаются следующим образом. Скорость движения газа A_0 (кислородно-водородная смесь с молекулярным весом 18,5) на поверхности полупрозрачного поршня задается в форме: $u_F = \chi W_F$. Здесь W_F – скорость движения фронта пламени в лабораторной системе координат, χ – коэффициент прозрачности поршня ($\chi < 1$). Для функции W_F используется экспериментально измеренная траектория движения фронта пламени. Функция $\chi(x)$ выбирается из условия совмещения расчетной и экспериментально измеренной траекторий движения области перемешивания.

На фиг. 2 приведены полученные в расчете значения изменения давления в области перемешивания по мере продвижения ее по каналу. На фиг. 3 даны значения скачка



Фиг. 4. Схематическое изображение области перемешивания и характерные точки, используемые при обработке

температуры $\Delta T = T_B - T_A$ в окрестности области перемешивания и значения температуры $T(S)$ со стороны инертного газа, S — путь, пройденный областью перемешивания. Во всех рассмотренных режимах температура в инертном газе всегда выше температуры кислородно-водородной смеси.

3. Исходная область перемешивания. Исходная область перемешивания формируется по мере удаления разделительной пластины. Пластина удаляется из канала с помощью пружинного механизма в направлении оси y . Специальное устройство регистрирует y, t -траекторию движения пластины. Сечение $y = 0$ совмещается с положением кромки пластины в момент полного перекрытия канала. Сформировавшаяся область перемешивания характеризуется непрерывным изменением плотности. Толщина ее $\delta_0(y)$ определяется коэффициентом молекулярной диффузии газов A_0 и B_0 , а также интервалом времени, в течение которого происходило перемешивание. Этим объясняется уменьшение толщины области перемешивания в направлении движения пластины. Форма границ области перемешивания изменяется в зависимости от газа, заполняющего нижнюю часть канала, и скорости движения пластины. Обработка большого количества опытов показала, что в соответствии с формой границ можно условно выделить три типа исходных областей перемешивания. При $Re = v d \nu^{-1} < 40$ (v, d — скорость движения и толщина пластины, ν — вязкость тяжелого газа) границы являются прямыми линиями. Волнообразные возмущения на границах появляются при $Re \cong 100$. Длины волн наблюдаемых возмущений увеличиваются с уменьшением плотности газа в нижней половине канала. Ниже приведены значения λ для газов B_0 , используемых в данной работе ($P_0 = 0,5$ атм, время выдвигания пластины ~ 100 мс):

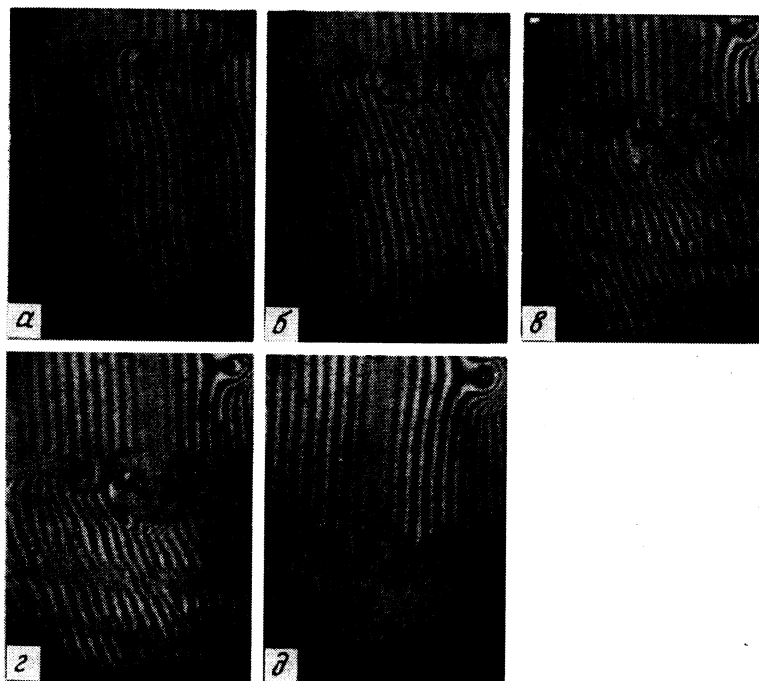
Газ B_0	He	Ne	Ar	Kr	Xe	SF ₆
λ , мм	20 ± 2	18 ± 2	15 ± 2	12 ± 2	9 ± 2	6 ± 2

При $Re \gg 100$ в области перемешивания образуются вихревые структуры. Это слой третьего типа.

На фиг. 4 дано схематическое изображение области перемешивания второго типа. Здесь сечение $x = 0$ совмещено с центром разделительной пластины. В этой системе координат представлены все полученные экспериментальные результаты. На фиг. 4 обозначены характерные точки границ, отделяющих область перемешивания от "чистых" газов. Координаты этих точек измерялись при обработке интерферограмм и использовались для определения длины волны возмущения λ_i , амплитуды a_i , глубины внедрения одного газа в другой L_i , пути S_i , проходимого средней линией выбранного участка области перемешивания, и толщины области перемешивания δ

$$\lambda_i = y(J_{i+1}) - y(J_i); \quad a_i = x(J_i^*) - \left[\frac{x(J_i) + x(J_{i+1})}{2} \right]; \quad L_i = x(B_i) - \left[\frac{x(J_i) + x(J_{i+1})}{2} \right];$$

$$S_i = x(B_i) \cdot 0,5 + [x(J_{i+1}) + x(J_i)] \cdot 0,25; \quad \delta = x(B_i) - x(J_i)$$



Фиг. 5. Развитие области перемешивания между кислородно-водородной смесью и криптоном. Время регистрации кадров: *a* – 399,06; *б* – 597,2; *в* – 676,3; *г* – 722,4; *д* – 876,1 мкс. Начало отсчета времени совмещено с первым кадром, зарегистрированным в опыте

Для определения толщины области перемешивания использовались точки B_1 и J_1 , расположенные на участках, границы которых аппроксимируются прямыми линиями.

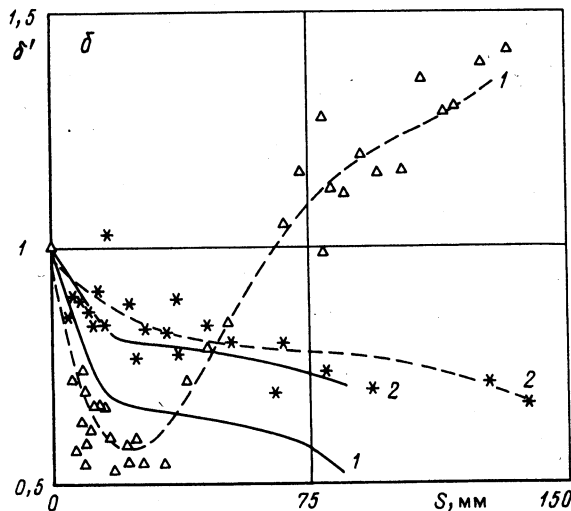
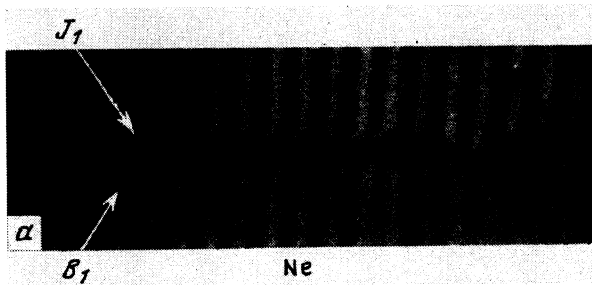
Абсолютная погрешность измерения амплитуды a_i , глубины внедрения L_i и длины волны составляет $\pm 0,3$ мм.

4. Результаты эксперимента. На фиг. 5 приведена серия интерферограмм, иллюстрирующая движение области перемешивания K между кислородно-водородной смесью и Кг.

Интерферометр в исходном состоянии настраивался таким образом, чтобы на участке канала, заполненном Кг, располагались интерференционные полосы низких порядков. Использование источника света с широким спектром излучения привело к тому, что на снимках хорошо видны четкие полосы, прилегающие к интерференционной полосе нулевого порядка, и "размытые" участки, связанные с перекрытием интерференционных полос высоких порядков.

Смещение полос позволяло следить за изменением плотности в преломленной волне сжатия C_1 , распространяющейся по Кг. Из интерферограмм, полученных при $t > 650$ мкс, видно, что C_1 включает в себя ряд приблизительно плоских фронтов. В процессе движения последующие фронты догоняют предыдущие, плотность в окрестности области K возрастает, о чем свидетельствует значительное смещение интерференционных полос.

Участки интерферограмм, соответствующие наибольшему изменению рефракции, регистрировались в виде темных линий. В области перемешивания они совпадали с контуром вихревых структур. Это позволяет отчетливо проследить эволюцию структур: образование и рост "струй" тяжелого газа, внедряющегося в легкий, и "пузырей", соответствующих внедрению легкого газа в тяжелый, – нелинейная стадия неустойчи-



Фиг. 6. Сжатие области перемешивания с невозмущенными границами. Штриховая линия – эксперимент, сплошная линия – расчет. Область перемешивания между кислородно-водородной смесью и криптоном – 1, неоном – 2

вости; возникновение в области острия струи вихревой структуры, имеющей грибовидную форму, – переходная стадия; рост размеров вихревых структур и объединение их – турбулентная стадия развития неустойчивости.

Можно видеть, что в один и тот же момент амплитуды различных возмущений отличны друг от друга. При этом различаются и стадии развития неустойчивости, в которых находятся выбранные возмущения. Это объясняется различной величиной амплитуд возмущений на исходной области перемешивания.

Проведено измерение толщины области перемешивания δ в процессе движения ее по визуализируемому участку канала. Измерения проводились в сечении y , отстоящем на ~ 15 мм от начала движения пластины. В этом сечении границы области перемешивания описываются приблизительно прямыми линиями. Координата x_1 точки B_1 (фиг. 6, а) определялась в месте наибольшего искривления интерференционной полосы, ближайшей к сечению $y = 15$ мм. При определении x_1 точки J_1 неизбежно возникало смещение по оси y . Величина смещения не превышала $\pm 0,5$ мм.

Полученные результаты для неона и криптона приведены на фиг. 6, б. По оси ординат отложены значения $\delta' = \delta/\delta_0$, где δ_0 – значение толщины области перемешивания в рассматриваемом сечении в момент прихода волны сжатия. Значения δ_0 рассчитывались по уравнению молекулярной диффузии и за границы принимались точки, в которых $\rho_1/\rho_2 = 0,01$ и $0,99$. Время диффузии определялось с помощью y, t -

№ опыта	B_0	λ , мм	δ_0 , мм	W_T , мм $^{-1/2}$	W_D , мм $^{-1/2}$	W , мм $^{-1/2}$
400A	Ar	14	8	0,407	0,206	0,183
402A	Ar	15	6	0,391	0,225	0,172
585A	Kr	14	3	0,540	0,381	0,120
584A	Xe	8,3	5	0,755	0,401	0,278
584A	Xe	6,5	1,5	0,879	0,646	0,370

траектории движения разделительной пластины. По оси абсцисс отложен путь S , пройденный областью перемешивания. Экспериментальные точки аппроксимировались по методу наименьших квадратов.

Из фиг. 6 видно, что для неона на протяжении всего визуализируемого участка толщина области перемешивания непрерывно уменьшалась. Аналогичное поведение толщины области перемешивания было зарегистрировано в случае заполнения нижней части канала гелием.

В отличие от неона и гелия для криптона зависимость толщины области перемешивания от пройденного пути имеет минимум δ'_{\min} при $S \sim 30$ мм. Аналогичный характер изменения δ' был зарегистрирован при заполнении нижней части канала аргоном, ксеноном, SF_6 .

Для получения количественной информации об эволюции неустойчивости Рэлея – Тэйлора на линейной стадии выбирались возмущения с наименьшими значениями амплитуд a_i . Это позволяло провести достаточное количество измерений a_i прежде, чем проявлялись искажения формы возмущения, свидетельствующие о начале образования струй и пузырей, характерных для нелинейной стадии неустойчивости. Область измерения амплитуд a_i для линейной стадии ограничена условием $a_i \leq 0,5 \lambda_i$ и удовлетворительно аппроксимируется выражением

$$a_i(\sqrt{2S}) = a_i^{(0)} \exp(W\sqrt{2S})$$

Для $a_i > \lambda/2$ скорость роста амплитуды снижается по сравнению со скоростью роста a_i в конце линейной стадии. Экспериментально измеренные значения параметра W , характеризующего скорость роста амплитуды возмущения границы, отделяющей область перемешивания от легкого газа, приведены в таблице. Эти значения сопоставляются с параметром W , рассчитанным по соотношению Тэйлора [1] и равным

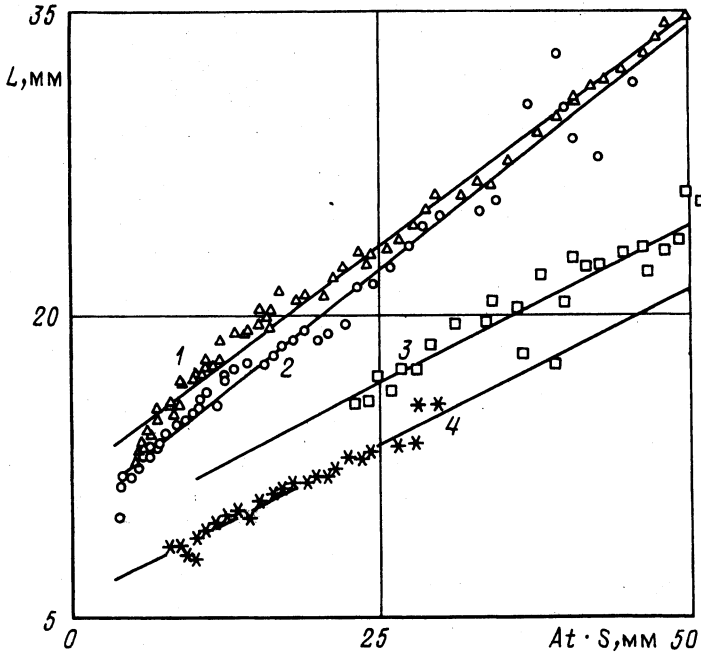
$$W = W_T = \sqrt{Atk}, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad At = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$$

В работе Тэйлора предполагается разрывное изменение плотности в области перемешивания и несжимаемость сред. Область применимости этого соотношения ограничена $a_i < 0,4\lambda$. В таблице также приведены данные W , рассчитанные по соотношению, предложенному в [7], где

$$W = W_D = \sqrt{[(Atk)/\Psi(\delta, At)]}$$

Функция $\Psi(\delta, At)$ рассчитывается численно. Параметр W_D позволяет учесть замену границы с разрывным изменением плотности, для которой $\Psi = 1$, на область с непрерывным изменением плотности, имеющую толщину δ . Распределение плотности в рассматриваемой области определяется молекулярной диффузией. Теория, предложенная в [1,7], предполагает несжимаемость рассматриваемых сред.

Проведено измерение глубины внедрения L одного газа в другой для возмущений, которые в процессе эволюции проходят нелинейную и переходную стадии. На фиг. 7 приведены результаты, для областей перемешивания между кислородно-водородной смесью и одним из инертных газов (Ar, Kr, Xe) или SF_6 . Здесь глубина взаимного внедрения газов L представлена в функции параметра AtS , где At – число Атвуда



Фиг. 7. Глубина взаимного внедрения газов на нелинейной и переходной стадиях развития неустойчивости Рэлея – Тэйлора. Область перемешивания между кислородно-водородной смесью и ксеноном – 1, криптоном – 2, аргоном – 3, SF_6 – 4

для рассматриваемой комбинации газов ($At_{Ar} = 0,365$, $At_{Kr} = 0,638$, $At_{Xe} = 0,759$, $At_{SF_6} = 0,77$). Для каждой комбинации газов проводилось не менее трех экспериментов. Экспериментальные значения удовлетворительно аппроксимируются линейной зависимостью $L = \alpha AtS + L_0$, где значения α равны 0,336; 0,484; 0,457; 0,286 для аргона, криптона, ксенона и SF_6 соответственно.

5. Обсуждение полученных результатов. Характерной особенностью данной работы является исследование эволюции неустойчивости, происходящей при условии непрерывно возрастающего сжатия. Результаты одномерного расчета и эксперимента (фиг. б) показывают, что при прохождении визуализируемого участка канала область перемешивания между кислородно-водородной смесью и неонем непрерывно уменьшает свою толщину δ . Наибольшая скорость сжатия наблюдается на начальной стадии. Аналогичный результат получен для области перемешивания между кислородно-водородной смесью и гелием. Если в случае неона критерий развития неустойчивости Рэлея – Тэйлора выполняется, хотя число Атвуда ($At = 0,04$) сравнительно невелико, то в опытах с гелием критерий развития неустойчивости не выполняется.

Для областей перемешивания кислородно-водородной смеси с Ar, Kr, Xe или SF_6 зависимость $\delta(S)$, полученная в экспериментах, имеет минимум при $S \sim 30$ мм. После уменьшении δ на начальном участке $S < 30$ мм, удовлетворительно согласующимся с расчетом, наблюдается рост $\delta(S)$. Результаты экспериментов показывают, что для $S > 30$ мм зависимость $\delta(S)$ приблизительно аппроксимируется соотношением $\delta(S) = \beta At(S - 30) + \delta^*$, где β для различных газов изменяется от 0,03 до 0,11. При этом результаты одномерного расчета показывают непрерывное уменьшение толщины $\delta(S)$.

По-видимому, наблюдаемое различие связано с тем, что внутри области перемешивания, имеющей первоначально диффузное распределение плотности, в резуль-

тате взаимодействия с волной сжатия по истечении определенного промежутка времени возбуждается мелкомасштабная турбулентность размером $\leq \delta$. Последующий рост толщины слоя определяется турбулентным коэффициентом диффузии.

Теоретические и экспериментальные исследования области турбулентного перемешивания сред с различной плотностью, движущейся ускоренно, выполненные для несжимаемых сред [3, 4, 11], показывают, что $\delta(S)$ возрастает линейно с увеличением пути, проходящего этой областью.

В опытах с неоном наряду с отсутствием роста толщины δ не увеличивается и амплитуда a_i возмущений границ, отделяющих область перемешивания от области "чистых" газов, в то время как во всех опытах, где использовались газы с молекулярным весом больше, чем у неона, отчетливо регистрировался рост a_i , характерный для эволюции неустойчивости Рэля – Тэйлора. По-видимому, в области перемешивания кислородно-водородной смеси и неона процесс сжатия происходит более интенсивно, чем рост амплитуды a_i .

Действием сжатия в условиях настоящего эксперимента можно также объяснить значительное снижение скорости роста амплитуды a_i (параметр W) на линейной стадии развития неустойчивости по сравнению с результатами теории и эксперимента, изложенными в [1, 2, 8].

Одновременно с возбуждением внутри слоя турбулентности с масштабом $\leq \delta$ происходит изменение формы границ области перемешивания. Растет амплитуда a_i , волнообразных границ и изменяется их форма. В процессе этой эволюции образуются вихревые структуры с характерным размером порядка λ . На заключительной стадии вихревые структуры, взаимодействуя между собой, образуют турбулентный слой. Глубина внедрения одного газа в другой на протяжении описанной эволюции удовлетворительно аппроксимируется соотношением $L = \alpha AtS + L_0$, где α в исследуемых газах изменяется от 0,29 до 0,5. Полученные в настоящих экспериментах значения скорости изменения глубины внедрения одного газа в другой (величина α) удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями, полученными в несжимаемых средах для турбулентной стадии эволюции неустойчивости [3, 4, 11], и рассчитанными с помощью теории [3]. Здесь следует указать, что в экспериментах, выполненных в [3, 4, 11], регистрировалась глубина внедрения легкой среды в тяжелую h_1 , измеренная относительно средней линии области перемешивания. Полная глубина внедрения одной среды в другую $L = h_1 + h_2$, где h_2 – глубина внедрения тяжелой среды в легкую относительно средней линии. Используя экспериментальные данные, полученные в [11] для h_1/h_2 , и имея в виду, что результаты в работах [3, 4, 11] представлены в форме $h_1 = \alpha^{**} AtS$, можно получить для настоящих экспериментов значения α^{**} , представленные ниже:

B_0	SF ₆	Xe	Kr	Ar
At	0,77	0,759	0,638	0,365
α^{**}	0,052	0,087	0,098	0,072

Результаты численного моделирования, выполненные в [11], дают $0,06 \leq \alpha^{**} \leq 0,07$. Эксперименты, выполненные в [3, 4, 11], дают значения $0,05 \leq \alpha^{**} \leq 0,077$ для $0,231 \leq At \leq 0,997$.

Заключение. В работе выполнено экспериментальное исследование неустойчивости Рэля – Тэйлора в области перемешивания двух газов разной плотности, движущихся ускоренно: $g \sim 1,5 \cdot 10^7$ см/с². Обнаружено, что в процессе сжатия области перемешивания инициируется возбуждение турбулентности с характерным размером порядка толщины δ рассматриваемой области. В процессе ускоренного движения амплитуды возмущений на границах области перемешивания возрастают и образуются вихревые структуры, размеры которых увеличиваются. На заключительной стадии эволюции образуется турбулизованная область перемешивания с характерным размером возмущения.

Глубина внедрения L одного газа в другой в процессе формирования заключительной, турбулентной области перемешивания аппроксимируется линейной зависимостью от пути S , проходимого этой областью $L = \alpha |At|S + L_0$.

Сжатие области перемешивания, вызванное волной сжатия, приводит к частичному подавлению неустойчивости Рэлея – Тэйлора. Значения измеренных инкрементов роста амплитуды волнообразных возмущений на начальной стадии оказываются значительно ниже аналогичных значений для эволюции неустойчивости в несжимаемых средах. При $At = 0,04$ не происходит возбуждения турбулентности в слое перемешивания, а амплитуды волнообразных возмущений поверхностей, ограничивающих область перемешивания, не увеличиваются в процессе движения этой области.

Работа выполнена при финансовой поддержке ISTC (проект 94-029) и ERCOFTAC (Project INTAS-93-1584)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor G.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1950. V. 201. № 1065. P. 192–196.
2. *Lewis D.J.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1950. V. 202. № 1068. P. 81–96.
3. *Youngs D.L.* Experimental investigation of turbulent mixing by Rayleigh–Taylor instability // Adv. Compressible Turbulent Mixing / Ed. W.P. Dannevik et al. Janery 1. 1992.
4. *Кучеренко Ю.А., Томашев Г.Г., Шибаршов Л.И.* Экспериментальное исследование гравитационного турбулентного перемешивания в автомодельном режиме // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1988. Вып. 1. С. 13–19.
5. *Chandrasekhar S.* Hydrodynamic and Hydromagnetic. Oxford: Clarendon Press, 1961. 652 p.
6. *Заббахин Е.И., Птицын А.Р.* Ограничение конвективной неустойчивости // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1988. Вып. 1. С. 4–6.
7. *Duff R.E., Harlow F.H., Hirt C.W.* Effects of diffusion on interface instability between gases // Phys. Fluids. 1962. V. 5. № 4. P. 417–425.
8. *Bernstein I., Book D.* Effect of compressibility on the Rayleigh–Taylor instability // Phys. Fluids. 1983. V. 26. № 2. P. 453–458.
9. *Зайцев С.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б., Титов С.Н., Чеботарева Е.И.* Гидродинамическая неустойчивость области контакта газовых сред, движущихся ускоренно // Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 6. С. 15–21.
10. *Саламандра Г.Д.* Фотографические методы исследования быстропотекающих процессов. М.: Наука, 1974. 200 с.
11. *Smeeton V.S., Youngs V.S.* Experimental investigation of turbulent mixing by Rayleigh–Taylor instability // AWE Report № 035/87. AWE, MOD(PE). Aldermaston, Berks.

Москва

Поступила в редакцию
17.И.1998