

УДК 532.517+519.6

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОСТОЯННОЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

В. Е. Неуважаев, И. Э. Паршуков, Н. В. Первиненко, А. В. Пономарев

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики  
им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск  
E-mail: i.e.parshukov@vniitf.ru

На основании численных расчетов проведен анализ результатов экспериментов по исследованию перемешивания на границе раздела газов. Рассмотрены случаи одномодовых и хаотических возмущений границы раздела и наложения хаотических возмущений на длинноволновые. Обсуждаются возможные причины завышения получаемого в опытах значения постоянной перемешивания.

Ключевые слова: граница раздела газов, устойчивость, постоянная перемешивания.

**Введение.** Большой класс задач гидродинамики связан с изучением эволюции границ раздела жидкостей, которые зачастую оказываются неустойчивыми, и любые начальные возмущения, имеющиеся на границе, со временем неограниченно растут. Неустойчивость Рэлея — Тейлора (НРТ) обусловлена ускорением, действующим ортогонально границе разнородных жидкостей, и возникает, когда градиенты плотности и давления направлены в разные стороны от границы раздела. В случае импульсного ускорения, соответствующего прохождению ударной волны, граница раздела всегда неустойчива (неустойчивость Рихтмайера — Мешкова (НРМ)).

Особенностью гидродинамической неустойчивости является сильная зависимость развития границ раздела от постановки начальных и граничных условий. При проведении опытов это проявляется в воздействии таких факторов, как способ задания начального возмущения границы (в частности, влияние разделяющей жидкости пленки), сжимаемость, вязкость, поверхностное натяжение и др., что значительно затрудняет интерпретацию экспериментальной информации. Поэтому для анализа результатов экспериментов необходимо привлекать данные численного моделирования.

В работах [1, 2] представлены результаты опытов на ударной трубе, в которых замедляющаяся ударная волна проходила из тяжелого вещества в легкое. После прохождения ударной волны граница раздела оказывалась неустойчивой, так как испытывала последовательное воздействие ударного (НРМ), а затем квазистационарного ускорения, создаваемого волной разгрузки, в направлении от менее плотного газа к более плотному (НРТ). В [1] задавались регулярные (одномодовые) возмущения границы раздела; в [2] граница раздела была плоской, однако при использовании разрушающейся пленки это равносильно наложению на нее некоторого хаотического возмущения. Было отмечено, что развитие возмущений быстро проходит нелинейную стадию и выходит на режим, предположительно соответствующий турбулентной стадии.

В [1, 2] данные опытов обрабатывались исходя из предложенной в [3] зависимости

$$\sqrt{L} = \sqrt{L_0} + \sqrt{\hat{L}}. \quad (1)$$

Здесь  $L$  — ширина зоны перемешивания;  $L_0$  — ширина начальной турбулизованной зоны перемешивания;  $\hat{L} = \alpha A 2S$  — автомодельная ширина зоны перемешивания;  $\alpha$  — постоянная перемешивания;  $A = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$  — число Атвуда ( $\rho_1, \rho_2$  — плотности граничащих газов);  $S$  — путь торможения, который определяется как  $S = Ut - \hat{x}$ , где  $U$  — приращение скорости контактной границы газов после прохождения ударной волны (УВ),  $t$  — время относительно выхода УВ на контактную границу,  $\hat{x}$  — расстояние, пройденное контактной границей относительно начального положения. Для постоянного ускорения  $g$  величина  $S = gt^2/2$ .

По результатам обработки в [1, 2] была получена постоянная перемешивания  $\alpha \approx 0,31$ , определяющая рост ширины зоны перемешивания как для случая опытов с начальной синусоидальной границей раздела, так и для случая начальной плоской границы. Полученное значение оказалось в 2–3 раза больше, чем в опытах [4–6], где  $\alpha = 0,11 \div 0,14$ . Следует отметить, что правильное определение этой постоянной имеет большое значение для проверки и определения констант в существующих полуэмпирических моделях турбулентного перемешивания.

Это расхождение было предметом многочисленных обсуждений, однако полной ясности здесь пока нет. В [1, 2] предполагается, что на процесс развития турбулентного перемешивания жидких сред в [4–6] оказывают определенное влияние силы поверхностного натяжения, тогда как в опытах с газами этот фактор исключен. Также предполагалось влияние условий разрушения разделяющей газ пленки.

В [2] отмечается, что данные по интенсивности перемешивания в опытах с плоской границей раздела совпадают с результатами экспериментов с синусоидальной границей [1], что, по мнению авторов [1, 2], повышает достоверность полученного результата. Однако такое совпадение вызывает ряд вопросов и необходимость их изучения.

Для неустойчивости Рэлея — Тейлора теоретический и расчетный анализ развития многомодовой или хаотически возмущенной границы раздела дан в [7]. Показано, что постоянное значение величины  $\alpha = dL/d(Agt^2)$  устанавливается очень далеко во времени, причем значение  $\alpha$  сильно зависит от спектра начальных возмущений. При этом существенно влияет только длинноволновая часть спектра и существует пороговое значение начальных амплитуд длинноволновых составляющих спектра. Если амплитуда длинноволновых возмущений меньше пороговой (спонтанный случай по терминологии [7]), то согласно результатам численных расчетов при больших значениях  $t$  устанавливается автомодельное значение постоянной перемешивания  $\alpha \approx 0,1$ . Если же амплитуды длинноволновых возмущений превышают пороговое значение (стимулированный случай по [7]), то длинноволновые гармоники достигают нелинейной стадии значительно раньше остальных гармоник. Получающееся в этом случае значение  $\alpha$  сильно зависит от амплитуд длинноволновых гармоник: превышение может быть в несколько раз по сравнению со спонтанным случаем.

В свете вышеизложенного возникает предположение, что в опытах [2] с первоначально плоской границей раздела в спектре возмущений каким-то образом всегда присутствует определенная длинноволновая компонента с амплитудой, превышающей пороговую, что может существенно повысить получаемую в опытах постоянную перемешивания.

В данной работе вопрос изучается с привлечением результатов двумерных расчетов по вихревому методу [8, 9] и по методике ТИГР [10] с использованием маркеров для описания контактной границы. Ранее вихревая методика дала возможность установить асимптотические режимы развития одномодовых возмущений границы раздела на нелинейной стадии для случаев стационарного и импульсного ускорений [8] и их совместного действия [9]. Метод маркеров в ТИГР позволяет отслеживать развитие границ раздела сжимаемых сред (в том числе и с заданным многомодовым или хаотическим начальным возмущением) далеко во времени.

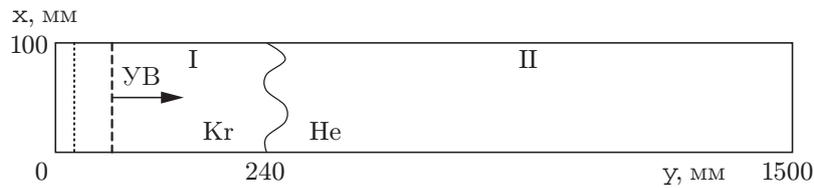


Рис. 1. Геометрия задачи

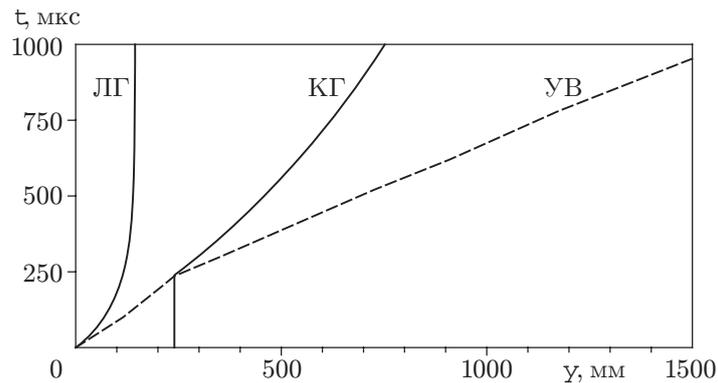


Рис. 2. Движение границ и ударной волны в случае невозмущенной контактной границы

**Постановка задачи и методики расчета.** Постановка экспериментов с регулярными возмущениями границы раздела газов детально описана в [1], с плоской границей — в [2]. Здесь мы приведем только необходимые сведения и постановку задачи для расчета. Отметим, что в [2] исследовались различные комбинации газов, из которых в данной работе для изучения будет использоваться такая же, что и в [1].

Геометрия задачи представлена на рис. 1. Область I занята криптоном. Начальная плотность  $\rho_0 = 3,36 \cdot 10^{-3}$  мг/мм<sup>3</sup>, начальное давление  $p_0 = 0,984$  бар, показатель адиабаты  $\gamma = 1,689$ . В области II находится гелий ( $\rho_0 = 1,6 \cdot 10^{-4}$  мг/мм<sup>3</sup>,  $p_0 = 0,984$  бар,  $\gamma = 1,63$ ). Изначально газы покоятся. Протяженность области, занятой газами,  $y = 1500$ ; координатам  $x = 0$ ,  $x = 100$  мм соответствуют жесткие стенки. На левой границе (занимающей в начальный момент времени положение  $y = 0$ ) задана скорость  $u = U_0 \exp(-t/\tau)$ , где  $U_0 = 0,948$  мм/мкс,  $\tau = 153,56$  мкс. Дополнительно накладывается условие отсутствия тепловых потоков через границы.

В результате от левой границы (ЛГ) отходит замедляющаяся ударная волна с числом Маха  $M \approx 3$ , проходящая из криптона в гелий (т. е. из тяжелого в легкое), за которой следует волна разгрузки. Картина движения границ и ударной волны в случае невозмущенной контактной границы (КГ) газов показана на рис. 2. В таком режиме граница раздела вначале испытывает импульсное ускорение, а затем плавно замедляется и на ней возникает рэлей-тейлоровское перемешивание.

В опытах возмущение контактной границы областей I и II определяется формой пленки, разделяющей газы в начальный момент времени. В работе [1] граница раздела задается в виде  $y = y_0 + a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ , где  $y_0 = 240$  мм,  $\lambda = 50$  мм,  $x \in [0; 100]$  мм;  $a_0$  — амплитуда начального возмущения (в [1] приведены опыты при  $a_0 = 1$  и 2,5 мм).

В опытах [2] начальная форма пленки, разделяющей газы, была плоской, однако в условиях разрушающейся пленки это равносильно наложению на нее некоторого хаотического возмущения, обусловленного неодинаковостью ее толщины.

Численные расчеты проводились по вихревой методике и с использованием метода маркеров в ТИГР. В расчетах контролировалось изменение во времени формы и полной ширины границы раздела газов (которая определялась как  $|y_{\max} - y_{\min}|$ ).

*Методика ТИГР.* В неявной конечно-разностной методике ТИГР [10], предназначенной для численного решения двумерных задач газовой динамики, границы раздела веществ в процессе счета остаются лагранжевыми линиями, а внутри слоев движение описывается в подвижных эйлеровых координатах. Однако при сильных деформациях рассчитываемой среды сохранить лагранжевость границ раздела веществ удается не всегда. В таких случаях выбранная контактная граница размечается частицами-маркерами, которые в дальнейшем двигаются по подвижной эйлеровой сетке как лагранжевы частицы. Это позволяет локализовать положение контактной границы с точностью до одной ячейки разностной сетки и детально проследить ее эволюцию при значительных деформациях на достаточно длинном промежутке времени. Для сглаживания ударных волн применяется искусственная вязкость типа вязкости Неймана.

По методике ТИГР [10] рассчитывалось развитие возмущенной контактной границы идеальных газов в адиабатическом приближении (без учета теплопроводности). Были проведены расчеты развития одномодовых возмущений границ раздела, а также для варианта, когда на плоскую границу ( $y = 240$  мм,  $x \in [0; 100]$  мм) наложено случайное возмущение с максимальным уровнем начальных возмущений порядка 0,3 мм. Для проверки влияния взаимодействия длинноволновых возмущений со случайными проводились расчеты, когда описанное выше случайное возмущение накладывалось на одномодовую границу.

В рассматриваемой системе строилась регулярная четырехугольная разностная сетка, образованная горизонтальным и вертикальным семействами линий. В рассчитываемой системе выделялась область, содержащая возмущенную контактную границу, в которой строилась криволинейная разностная сетка (вне этой области сетка была ортогональной). После прохождения ударной волны контактная граница размечалась маркерами, которые ставились в узлы разностной сетки и по три маркера — внутри ячеек между узлами. В процессе счета с ростом деформации границы, описанной маркерной линией, количество маркеров автоматически увеличивалось. За фронтом ударной волны в области, содержащей маркерную линию, включалось равномерное перестроение сетки для поддержания ортогональности. С ростом деформации зона пересчета расширялась.

В представленных далее расчетах горизонтальное семейство содержало 80 линий, вертикальное — 300 линий. При этом до момента разметки контактной границы маркерами счет велся с шагом по времени 0,05 мкс, который затем был увеличен до 0,1 мкс. Сходимость проверялась изменением сетки (до 240 горизонтальных линий и до 900 вертикальных), а также уменьшением шага по времени. Такое изменение сетки практически не повлияло на полученное численное решение.

*Вихревой метод.* Метод основан на представлении границы раздела идеальных несжимаемых жидкостей вихревым слоем. Задача описания течения сводится к определению формы границы раздела и интенсивности распределенных на ней вихрей. При дискретизации граница раздела представляется набором точечных вихрей. Вместо начально-краевой задачи для нелинейных уравнений с частными производными метод требует решения задачи Коши для конечномерной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Тем самым, в частности, снимается проблема построения сеток для описания границ сложной конфигурации.

Ранее вихревая методика дала возможность установить асимптотические режимы развития одномодовых возмущений границы раздела на нелинейной стадии для случаев стационарного и импульсного ускорений [8] и их совместного действия [9]. В [9] показана применимость методики для описания НРМ для сжимаемых сред. Сжимаемость газов

существенна только в момент прохождения ударной волны через границу раздела и учитывается в виде изменения амплитуды начального возмущения.

В опытах [1, 2] на границе раздела волной разгрузки создается квазистационарное ускорение, определяющее замедление течения. Таким образом, полное ускорение, испытываемое поверхностью раздела, имеет вид

$$\hat{g}(t) = \begin{cases} U\delta(t) + g, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases}$$

где  $\delta(t)$  — функция Дирака;  $U$  — приращение скорости, вызванное действием импульсного ускорения;  $g$  — ускорение, создаваемое волной разгрузки;  $t = 0$  соответствует моменту прохождения ударной волны через границу раздела газов.

Скорость падающей на границу раздела ударной волны  $D = 0,81$  мм/мкс, при этом  $U = 0,94$  мм/мкс. После прохождения ударной волны через границу раздела устанавливается значение числа Атвуда  $A = 0,864$ . В [1] отмечается, что ускорение, создаваемое волной разгрузки, имеет квазистационарный характер, т. е. меняется слабо, поэтому для удобства расчетов можно считать его постоянным ( $g = -9 \cdot 10^{-4}$  мм/мкс<sup>2</sup> при  $t > 0$ ). Значения  $A$ ,  $U$ ,  $D$ ,  $g$  взяты из [1] и подтверждаются одномерным расчетом газодинамической задачи.

Сжимаемость газов существенна только в момент прохождения ударной волны через границу раздела и учитывается в виде изменения амплитуды начального возмущения  $a_0^+ = a_0(1 - U/(2D))$  [9].

Проводились расчеты регулярной границы раздела вида  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ . В отличие от методики ТИГР при использовании метода вихрей можно рассмотреть отдельно случаи постоянного и импульсного ускорений и их совместного действия с целью определения влияния каждого ускорения на картину развития течения.

В представленных расчетах по вихревому методу использовалось 200 вихревых точек на длину волны и шаг по времени 0,05 мкс (отметим, что при исследовании сходимости метода было получено, что достаточно точный результат получается уже при использовании 50 вихрей).

**Анализ расчетных и экспериментальных результатов.** Далее везде при описании результатов расчетов и экспериментов момент  $t = 0$  соответствует моменту прохождения ударной волны через границу раздела газов.

*Одномодовая граница раздела.* Для регулярных начальных возмущений границы на рис. 3 для нескольких случаев приведены расчетные (полученные по методике ТИГР) формы границы раздела в некоторые моменты времени. Зависимости полной ширины границы раздела газов от времени (расчетные и экспериментальные) представлены на рис. 4.

Рассмотрим случай одномодовой границы раздела вида  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$  при  $\lambda = 50$  мм и  $a_0 = 2,5$  мм. На рис. 3,а показаны расчетные (по методике ТИГР) положения границы раздела при  $t = 310$  и  $670$  мкс. На рис. 4 приведены экспериментальные [1] и расчетные (по методу вихрей и методике ТИГР) зависимости полной ширины зоны перемешивания от времени. Отметим, что ударная волна идет из тяжелого вещества в легкое, поэтому при прохождении УВ через границу раздела газов происходит изменение фазы возмущения границы. Метод маркеров позволяет отслеживать развитие границы раздела гораздо дальше во времени по сравнению с методом вихрей, при этом полученные по обоим методикам результаты хорошо согласуются, но дают немного меньшие значения по сравнению с экспериментом.

Для предварительного изучения влияния пристеночных эффектов рассматривался случай изменения угла касания регулярной границы и жесткой стенки, когда граница раздела имела вид  $a_0 \sin(2\pi x/\lambda)$ . Результаты расчетов при  $\lambda = 50$  мм и  $a_0 = 2,5$  мм

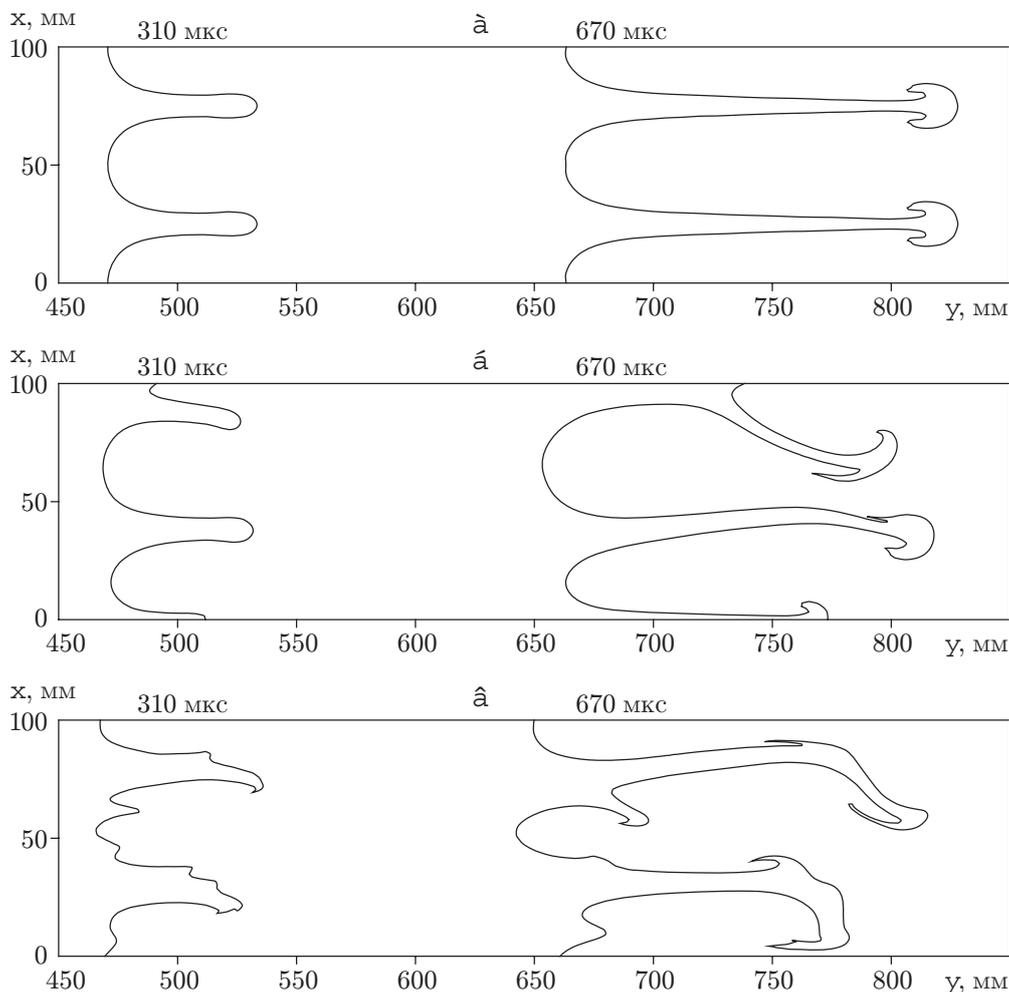


Рис. 3. Положение границы раздела на моменты времени  $t = 310$  и  $670$  мкс ( $a_0 = 2,5$  мм,  $\lambda = 50$  мм). Расчеты по методике ТИГР:

$a$  — начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ ;  $b$  — начальное возмущение  $a_0 \sin(2\pi x/\lambda)$ ;  $v$  — на начальное возмущение ( $a$ ) наложено случайное возмущение

представлены на рис. 3,  $b$  и 4. Видно, что полная ширина зоны смешения  $L$  практически совпадает со случаем начального возмущения  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ . Отличия проявляются в искажениях формы границ раздела в районе пиков тяжелого газа и несимметрии этих пиков. Также несколько различаются глубины проникновения жидкостей друг в друга (в случае синусоиды глубина проникновения тяжелой жидкости в легкую уменьшается, а легкой в тяжелую — увеличивается, что видно по положениям границ раздела на конечный момент времени).

Возможное влияние других различного рода пристеночных эффектов на развитие ширины зоны перемешивания заслуживает отдельного и подробного изучения.

Перейдем теперь к обсуждению значения постоянной перемешивания  $\alpha$ , полученного в [1] при обработке экспериментальных данных.

Выделяют три стадии развития неустойчивости границы раздела: регулярную (включающую линейную и нелинейную стадии), переходную и турбулентную. Выявление линейной стадии производилось при сравнении результатов опытов и расчетов с аналитическим решением (также приведено на рис. 4), полученным [1] в линейном приближении для слу-

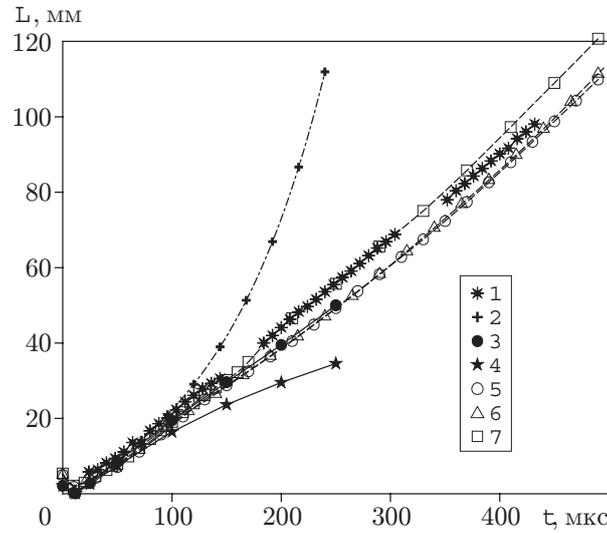


Рис. 4. Зависимость ширины зоны перемешивания от времени (регулярное возмущение при  $a_0 = 2,5$  мм,  $\lambda = 50$  мм):

1 — эксперимент (начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ ); 2 — линейная теория [1]; 3 — расчет по вихревому методу (начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ ); 4 — вихревой метод (начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ , но присутствует только импульсное ускорение); 5 — расчет по ТИГР (начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ ); 6 — ТИГР (начальное возмущение  $a_0 \sin(2\pi x/\lambda)$ ); 7 — ТИГР (начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$  + случайное возмущение)

чая идеальных жидкостей при последовательном воздействии на КГ импульсного и постоянного ускорений

$$L(t) = 2a_0^+ \left( \operatorname{ch}(\omega t) - \frac{U}{W} \operatorname{sh}(\omega t) \right), \quad \omega = \sqrt{Agk}, \quad W = \sqrt{\frac{g}{Ak}}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Можно считать, что для рассматриваемого случая линейная стадия имеет место до момента  $t \approx 120$  мкс; при этом наблюдается согласие результатов опыта, расчетов и линейной теории. Нелинейная стадия начинается с искажения формы границы и ведет к формированию четко выраженных вихревых структур. В переходной стадии начинается разрушение первоначальной пространственной структуры границы из-за взаимодействия вихрей и выход на стадию турбулентности.

Процесс перехода к турбулентной стадии зависит от конкретных условий проведения опытов, однако предельная стадия турбулентного перемешивания не должна зависеть от начальных условий. При этом хотя в [1] и признается, что реализовать в эксперименте асимптотическую стадию перемешивания в силу конечного размера установки и кратковременного действия ускорения практически невозможно, тем не менее считается, что в описываемых опытах уже произошел переход к турбулентной стадии и результаты опытов анализируются исходя из зависимости (1). Для описания процесса гравитационного турбулентного перемешивания находится коэффициент  $d\sqrt{L}/d\sqrt{2S} = \sqrt{\alpha A}$ . В [1] значение постоянной перемешивания  $\alpha$  получено при использовании метода наименьших квадратов при  $t > 150$  мкс ( $S > 10$  мм).

Следует отметить, что указанные формулы справедливы только для асимптотической стадии гравитационного перемешивания, характеризующейся хаотичностью течения. Однако на фотографиях зоны перемешивания [1] и в расчетах (см. рис. 3) даже в последние

моменты времени наблюдаются четко выраженные и еще не разрушающиеся грибообразные структуры тяжелого газа, число которых остается неизменным. Такая форма развития границы раздела характерна для глубокой нелинейной стадии. Рассчитанная ширина зоны перемешивания растет почти линейно во времени, что характерно для нелинейной стадии развития одномодовых возмущений при неустойчивости Рэля — Тейлора.

Таким образом, можно предполагать, что в случае одномодовой границы раздела в конечный момент времени наблюдается нелинейная стадия развития неустойчивости, не перешедшая еще в турбулентность.

Если, учитывая формулу (1), формально обработать результаты расчетов ширины зоны перемешивания в переменных  $\sqrt{L}$  и  $\sqrt{2S}$  и оценить изменение параметра  $\alpha$  во времени, то даже на последние рассчитанные моменты времени значение этого параметра не выходит еще на постоянное значение и представляет собой убывающую функцию времени. Таким образом, включение нелинейной стадии в обработку результатов опытов значительно повышает значение получаемого [1] осредненного значения параметра  $\alpha$ .

В опытах присутствует еще один фактор, оказывающий значительное влияние на развитие зоны перемешивания и не учитываемый при обработке результатов в [1], а именно влияние развития неустойчивости Рихтмайера — Мешкова после прохождения ударной волны через границу раздела. Результаты расчета вихревым методом варианта  $a_0 = 2,5$  мм ( $\lambda = 50$  мм) при действии только импульсного ускорения также приведены на рис. 4. Вклад импульсной составляющей ускорения в случае полной ширины зоны перемешивания для рассматриваемых времен сопоставим с влиянием постоянного ускорения. Ударная волна сообщает некоторую начальную кинетическую энергию слою, что ускоряет его развитие. При существующем соотношении параметров  $U$  и  $g$  на рассматриваемых интервалах времени начальный импульс оказывает существенное влияние на получающееся при обработке результатов значение  $\alpha$  в сторону его увеличения.

Кроме того, в [2] показано, что в условиях проведения экспериментов разделяющая газы нитроцеллюлозная мембрана сгорает до момента падения ударной волны на контактную границу. Из-за примеси продуктов сгорания часть теплового излучения от более горячего криптона поглощается в зоне перемешивания, что, возможно, приводит к более интенсивному росту зоны перемешивания.

На развитие ширины зоны перемешивания могут оказывать определенное влияние наложенные на границу раздела начальные случайные возмущения, определяемые разнотолщинностью пленки и условиями ее разрушения.

Рассматривался случай, когда на описанные выше регулярные начальные возмущения границы вида  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$  накладывались случайные возмущения порядка 0,3 мм, соответствующие постановке опытов [1, 2]. Точно количественно оценить такое влияние с помощью вихревого метода не удалось, однако метод маркеров в ТИГР позволяет выполнить подобные расчеты. Для случая  $\lambda = 50$  мм,  $a_0 = 2,5$  мм результаты развития ширины зоны перемешивания во времени приведены на рис. 4, форма границы раздела в моменты времени 310 и 670 мкс — на рис. 3, в. Влияние случайных возмущений проявляется в заметном искажении формы границы раздела (см. рис. 3, в) и позволяет хорошо описать экспериментальные данные по ширине зоны смешения, хотя ведущей является длинноволновая компонента возмущения.

Как и в описанном выше случае, если обработать результаты расчетов ширины зоны перемешивания в переменных  $\sqrt{L}$  и  $\sqrt{2S}$ , то значение параметра  $\alpha$  также представляет медленно убывающую функцию, еще не вышедшую на постоянное значение.

Для всех описанных случаев проводились расчеты и с другими амплитудами начального возмущения  $a_0$ . Однако качественная картина эволюции границы раздела остается без изменений, поэтому результаты этих расчетов здесь не приводятся.

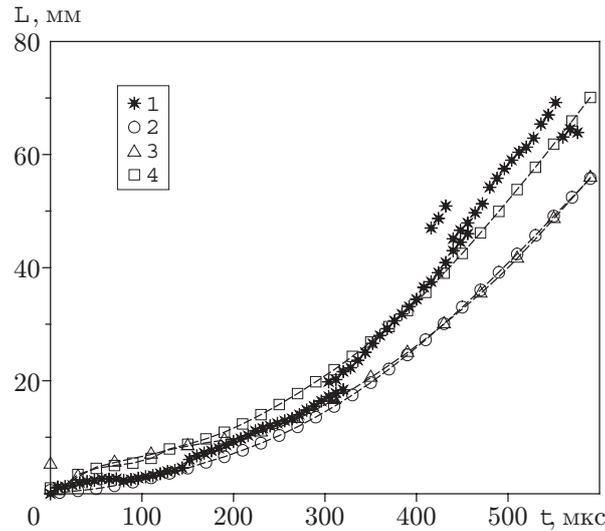


Рис. 5. Зависимость ширины зоны перемешивания от времени:

1 — эксперимент с плоской границей раздела; 2–4 — расчеты по методике ТИГР: 2 — начальное возмущение  $a_0 \cos(2\pi x/\lambda)$ ,  $a_0 = 0,3$  мм,  $\lambda = 50$  мм; 3 — случайное начальное возмущение; 4 — регулярное начальное возмущение с  $a_0 = 0,3$  мм + случайное возмущение

*Опыты с плоской границей раздела.* В опытах с плоской границей раздела [2] разрушение изначально разделяющей газ пленки соответствует наложению на нее некоторого хаотического возмущения. При этом полученная при обработке экспериментальных данных интенсивность перемешивания в опытах с плоской границей раздела [2] совпадает с результатами экспериментов с синусоидальной границей [1], что, по мнению авторов [1, 2], повышает достоверность полученных данных. Однако, учитывая результаты [7] и приведенные выше результаты численного исследования поведения одномодовых границ, можно предположить, что в опытах с плоской границей раздела в спектре начального возмущения вырабатывается некоторая длинноволновая компонента, которая оказывает существенное влияние на развитие перемешивания.

Высказанное предположение было проверено расчетами по методике ТИГР с использованием маркеров для описания контактной границы. На рис. 5 показаны расчетные зависимости ширины зоны перемешивания от времени для различных вариантов начального возмущения.

В [2] при анализе результатов опытов с плоской границей для рассматриваемой комбинации газов считается, что до момента  $t = 100$  мкс течение ламинарное, а при  $t \geq 150 \div 200$  мкс течение турбулизуется. Видно, что для случая одномодового и случайного возмущений результаты расчетов ширины зоны перемешивания практически совпадают, но все еще лежат ниже экспериментальных данных на стадии, соответствующей по [2] турбулентной. При совмещении начальных одномодового и случайного возмущений вклады случайной и регулярной составляющей практически одинаковы. При этом результат расчета практически совпадает с экспериментом (см. рис. 5) при  $t > 200$  мкс, но наблюдается расхождение на начальной регулярной стадии.

Если, как и раньше, оценивать получающуюся в расчете интенсивность перемешивания  $\alpha$ , то в поздние моменты времени значение этого параметра представляет собой медленно убывающую функцию времени. При этом в момент времени  $t = 500$  мкс для случаев регулярного или случайного начальных возмущений  $\alpha \approx 0,23$ , а для случая наложения

начального случайного возмущения на регулярное —  $\alpha \approx 0,27$ , что неплохо согласуется с экспериментальным значением. Здесь амплитуда длинноволновой составляющей возмущения превосходит пороговое значение [7] и существенно влияет на получаемые в расчетные моменты времени значения интенсивности перемешивания  $\alpha$  в сторону их повышения.

**Заключение.** Продемонстрированы возможности вихревой методики и методики ТИГР с использованием маркеров для описания контактных границ газов. Рассмотрены случаи одномодовых и хаотических возмущений границы раздела и наложения хаотических возмущений на длинноволновые.

На основании расчетов по данным методикам проведен анализ результатов экспериментов [1, 2] по исследованию неустойчивости и перемешивания на границе раздела газов. Показано, что ряд факторов, не учитываемых при обработке опытных данных, для рассматриваемых интервалов времени могут существенно повлиять на получаемые значения интенсивности перемешивания в сторону их повышения.

В случае начальной одномодовой границы раздела учет дополнительных случайных возмущений позволяет достаточно хорошо описать рост ширины зоны перемешивания. При этом в конечные расчетные моменты времени имеет место нелинейная стадия развития неустойчивости, не перешедшая еще в турбулентность. Завышение получаемого в опытах значения постоянной перемешивания может быть вызвано включением нелинейной стадии в обработку результатов, а также наличием начальной кинетической энергии слоя, вызываемой прохождением ударной волны через границу раздела и оказывающей существенное влияние на развитие процесса в течение рассматриваемого интервала времени.

Для случая опытов с изначально плоской границей раздела показано, что завышение постоянной перемешивания может быть вызвано наличием в спектре начального возмущения некоторой дополнительной длинноволновой компоненты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Василенко А. М., Буряков О. В., Куропатенко В. Ф. и др.** Экспериментальное исследование гравитационной неустойчивости и турбулизации течения на границе раздела благородных газов // Экспериментальное исследование гравитационной неустойчивости и турбулентного перемешивания стратифицированных потоков в поле ускорения в связи с задачами инерциального термоядерного синтеза. М., 1990. (Препр. / ФИАН; № 56). С. 32–51.
2. **Василенко А. М., Буряков О. В., Ольховская В. И., Яковлев В. Г.** Экспериментальное исследование турбулентного перемешивания газов на плоской границе раздела при воздействии замедляющейся ударной волны. Челябинск-70, 1991. (Препр. / ВНИИТФ; № 8).
3. **Неуважаев В. Е., Яковлев В. Г.** О перемешивании контактной границы, замедляемой стационарными ударными волнами // ПМТФ. 1981. № 2. С. 85–89.
4. **Кучеренко Ю. А., Томашев Г. Т., Шибаршов Л. И.** Экспериментальное исследование гравитационного турбулентного перемешивания в автомодельном режиме // Вопр. атомной науки и техники. 1988. Вып. 1. С. 13–19.
5. **Youngs D. L.** Modelling turbulent mixing by Rayleigh — Taylor instability // Physica D. 1989. V. 37. P. 270–287.
6. **Read K. I.** Experimental investigation of turbulent mixing by Rayleigh — Taylor instability // Physica D. 1984. V. 12. P. 45–58.
7. **Иногамов Н. А., Демьянов А. Ю., Сон Э. Е.** Гидродинамика перемешивания. М.: Изд-во МФТИ, 1999.
8. **Неуважаев В. Е., Паршуков И. Э.** Изучение неустойчивости Рихтмайера — Мешкова вихревым методом // Моделирование в механике. 1991. Т. 5, № 2. С. 81–100.

9. **Неуважаев В. Е., Паршуков И. Э.** Изучение устойчивости границ раздела жидкостей при совместном действии импульсного и постоянного ускорений // Мат. моделирование. 1993. Т. 5, № 2. С. 16–24.
10. **Первиненко Н. В., Фролов В. Д.** Неявная разностная методика расчета двумерных задач газовой динамики с теплопроводностью // Проблемы вязких течений: Тр. 8-й Всесоюзной школы-семинара по численным методам механики вязкой жидкости. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1981. С. 170–178.

*Поступила в редакцию 11/X 2002 г.,  
в окончательном варианте — 9/XII 2003 г.*

---