

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УДАРНЫХ ТРУБАХ

Е.Е.Мешков  
СарФТИ НИЯУ МИФИ

### Введение

Граница раздела двух сред разной плотности (контактная граница), движущаяся с ускорением, направленным нормально к границе, может быть при определенных условиях неустойчивой. Начальные возмущения неустойчивой границы неограниченно растут, и в результате формируется растущая со временем зона турбулентного перемешивания контактирующих сред. В зависимости от характера ускорения различают два основных типа неустойчивости.

В первом случае, когда ускорение постоянно или слабо меняется со временем и направлено от легкой среды к тяжелой, контактная граница оказывается неустойчивой. Такой тип неустойчивости называют неустойчивостью Рэлея-Тейлора (РТ) или гравитационной неустойчивостью [1,2]. Граница раздела сред устойчива, если ускорение направлено от тяжелой среды к легкой.

Во втором случае, когда ускорение имеет импульсный характер или, в частности, когда граница ускоряется стационарной ударной волной, неустойчивость развивается независимо от направления ускорения. Такой тип неустойчивости обычно называют неустойчивостью Рихтмайера – Мешкова (РМ) [3,4].

На протяжении более сорока лет автором или при его непосредственном участии был выполнен ряд исследований РМ неустойчивости – неустойчивости границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной, в экспериментах на ударных трубах. Результаты этих исследований были описаны в обзорах [5,6], монографии [7] и в ряде статей и докладов. В данном обзоре описаны примеры применения в экспериментах различных методов визуализации течения: теневого метода [8-10], метода лазерного ножа [11], метода расфокусированной нити (метод Ронки) и расфокусированной решетки [12]. Эти методы использовались при исследовании зоны турбулентного перемешивания, развивающейся на границе двух газов разной плотности, при ускорении ее ударными волнами.

### 1 Особенности структуры зоны турбулентного перемешивания на границе газ-газ

Явление турбулентного перемешивания на плоской границе двух газов разной плотности, ускоряемой ударными волнами, экспериментально было обнаружено автором в 1968 г., результаты его исследования были опубликованы в [8-11]. Эксперименты [8-11] проводились на ударной трубе в геометрии: *воздух* ( $\rho_0=1,2$  г/л) – *гелий* ( $\rho_0=0,178$  г/л) – *жесткая стенка* (рис. 1). Сечение канала ударной трубы  $4 \times 12$  см<sup>2</sup>, протяженность отсека с гелием 16,6 см. Число Маха первоначальной *стационарной* ударной волны в воздухе  $M=1.3$ . В экспериментах в такой постановке оптическая регистрация течения проводилась следующими методами: а) визуализация теньевым методом с регистрацией скоростной кинокамерой СФР [8-10]; б) визуализация зоны турбулентного перемешивания методом лазерного ножа с регистрацией течения в однокадровом режиме [11].

В этих экспериментах плоская граница между воздухом и гелием, разделенных тонкой пленкой, вначале скачком ускоряется стационарной ударной волной и движется далее с постоянной скоростью по инерции. Так как гелий много легче воздуха, то после распада

разрыва в воздух идет волна разрежения, а в гелий - ударная волна с намного меньшей, по сравнению с падающей волной, амплитудой. Эта волна отражается от жесткой стенки в конце канала в виде ударной волны, которая в свою очередь отражается от границы гелий-воздух также в виде ударной волны и т. д. В результате граница тормозится серией ударных волн с последовательно уменьшающейся амплитудой. Картина течения иллюстрируется кадрами теневой фотохронограммы эксперимента (рис. 2).

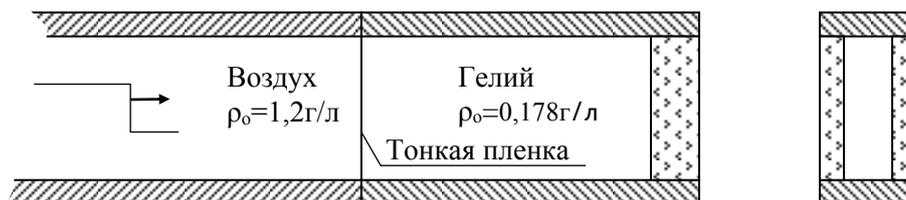


Рис. 1. Схема измерительной секции ударной трубы в экспериментах по исследованию развития зоны турбулентного перемешивания на плоской границе воздух-гелий, ускоренной ударными волнами

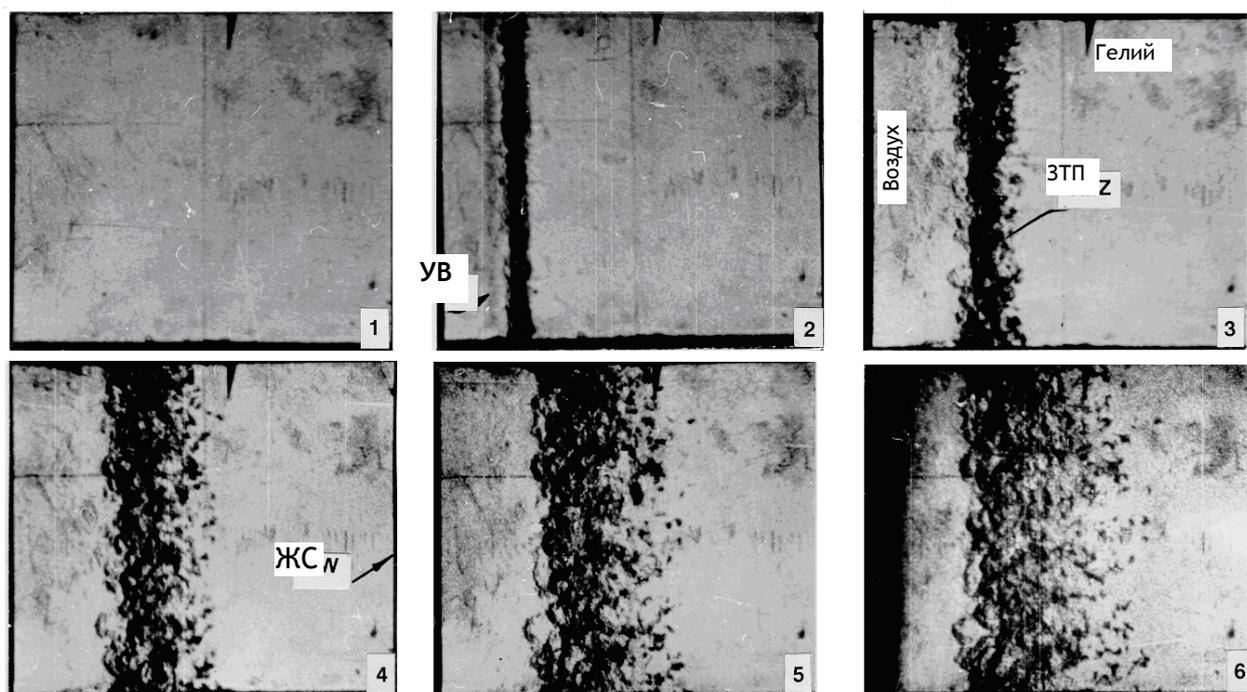


Рис.2. Развитие зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) на границе воздух – гелий [8]. Обозначения: УВ – ударная волна; ЖС – жёсткая стенка. Визуализация течения осуществлялась теневым методом

В экспериментах роль начального возмущения играла естественная разнотолщинность (а, следовательно, разномасность) пленки; при этом распределение толщины имело случайный характер и могло достигать около  $\pm 50\%$  от среднего значения. После первоначального ускорения контактной границы ударной волной, она некоторое время движется по инерции с постоянной скоростью. Однако в эксперименте газы разделяются тонкой пленкой с малой, но конечной массой, соответственно, граница разгоняется до расчетной скорости потока на малом, но конечном расстоянии. В течение этого времени существует разность давлений по обе стороны пленки. Участки пленки с разной удельной массой разгоняются по-разному, что приводит к искажению формы границы. Если искривление превышает предел упругих деформаций пленки, она рвется на

фрагменты, в разрывы между которыми втекают микроструи сжатого воздуха [10]. В результате всех этих процессов формируется затравочное возмущение (кадр 2 на рис. 5), и далее наблюдается быстрое развитие зоны перемешивания, изображение которой имеет ячеистую структуру, характерную для теневых фотографий турбулентных течений. Границы зоны перемешивания возмущены, и масштаб этого возмущения нарастает со временем.

На рис. 3 приведена фотография зоны турбулентного перемешивания на границе воздух-гелий, полученная методом расфокусированной нити [12].

На рис.4 фотография зоны турбулентного перемешивания на границе воздух-гелий, полученная методом лазерного ножа [11].

Теневые фотографии [8] и фотография, полученная методом расфокусированной нити [12], дают интегральное изображение зоны турбулентного перемешивания; такие фотографии позволяют определять ширину зоны и не более того. Фотографии, полученные методом лазерного ножа [11], кроме этого, дают информацию о структуре зоны перемешивания.

Постановка опытов [11] не отличается от приведенной на рис.1, за исключением того, что к воздуху, граничащему с гелием, был подмешан сигаретный дым. В заданный момент времени через зону перемешивания пропускался плоский тонкий (~1 мм) луч лазерного излучения в направлении оси канала ударной трубы (луч пропускался через прозрачную стенку в конце канала). Свет лазерного ножа рассеивался на частицах дыма в воздухе, в том числе, и в том воздухе, который находился в зоне перемешивания. Таким образом, было сформировано мгновенное изображение распределения воздуха в зоне перемешивания в плоскости лазерного ножа.

Характер изображения зоны перемешивания в рассеянном свете (рис. 4) существенно отличается от ее изображения, полученного теневым методом (рис. 2,3). Характерной особенностью этого изображения является наличие достаточно четко выраженной границы между воздухом («тяжелый» газ) и зоной перемешивания, в то же время такая граница между зоной перемешивания и гелием («легкий» газ) не наблюдается. Таким образом, *между тяжелым газом и зоной перемешивания существует разрыв концентрации (и плотности) тяжелого газа, т.е. скачок концентрации между тяжелым газом и зоной перемешивания, а между зоной перемешивания и легким газом подобный разрыв отсутствует.*

В зоне перемешивания концентрация воздуха постепенно падает до нуля. Приведенная на рис. 4 фотография раскрывает механизмы развития зоны турбулентного перемешивания на сравнительно поздней стадии, когда фрагменты пленки, первоначально разделявшей газы, в основной массе сместились к краю зоны, и их влияние на развитие зоны свелось к минимуму. На этой стадии развитие зоны определяется, в основном, явлениями, происходящими на границе между тяжелым газом и зоной перемешивания. Как замечено выше, на этой границе постоянно существует скачок плотности. Тяжелый газ проникает в зону перемешивания в виде сравнительно узких струй. Вихревые зоны на концах этих струй и являются источником поступления тяжелого газа в зону перемешивания и его дальнейшего турбулентного перемешивания с легким газом. При этом интересно отметить, что граница между тяжелым газом и зоной перемешивания на остальных участках (вне струй) остается сравнительно гладкой и не турбулизованной.

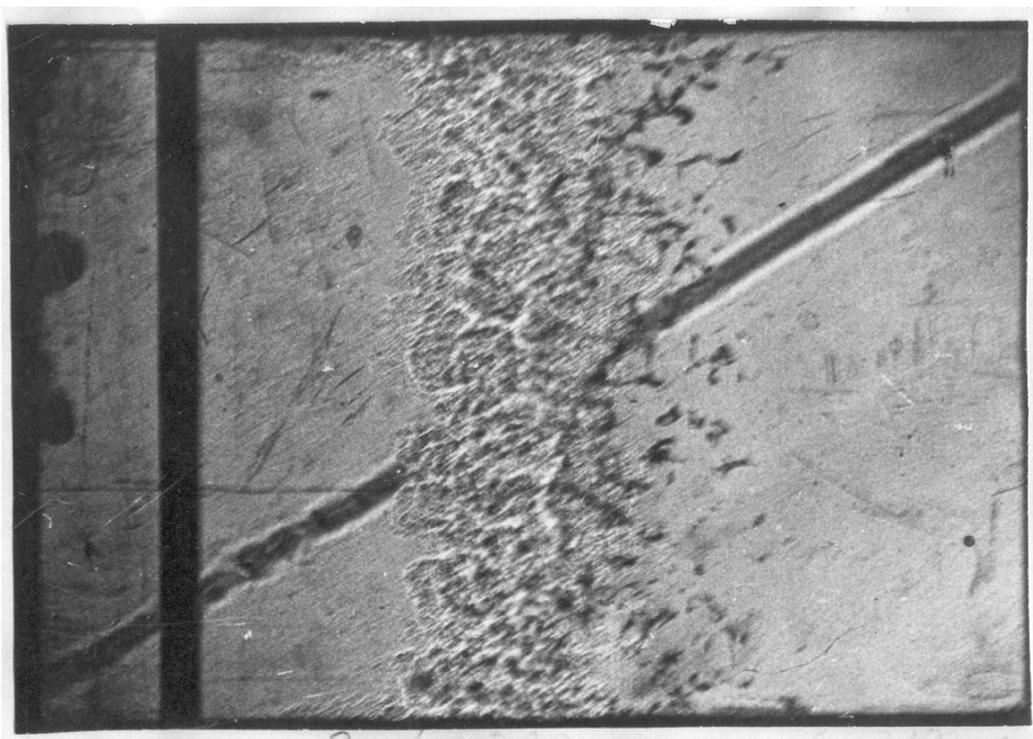


Рис.3. Фотография зоны турбулентного перемешивания на границе воздух – гелий в экспериментах, полученная методом расфокусированной нити, на момент времени  $t \approx 900$  мкс после начала движения границы [12].

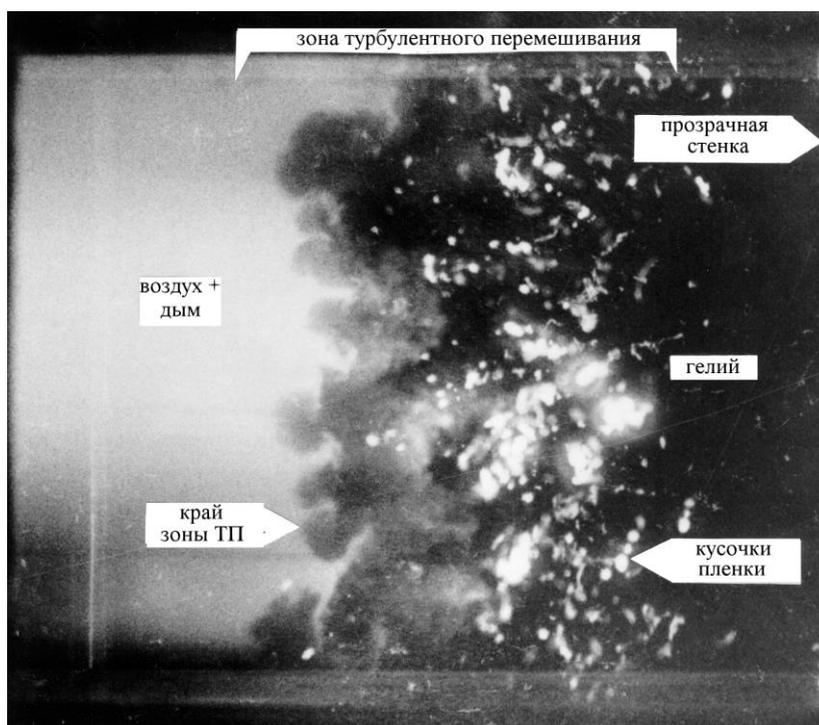


Рис.4. Фотография зоны турбулентного перемешивания, полученная методом лазерного ножа на границе воздух (с примесью дыма) – гелий на момент времени  $t \approx 900$  мкс [11].

Таким образом, на стадии развитого течения в зоне перемешивания наблюдается сочетание элементов упорядоченного течения на границе с тяжелым газом (граница между тяжелым газом и зоной перемешивания возмущена, но не турбулизована) и турбулентного перемешивания газов в остальной части зоны.

Негатив фотографии, полученной в одном из экспериментов на момент времени 800 мкс, был фотометрирован по 25 линиям в направлении оси канала измерительной секции ударной трубы (процедура обработки негатива и результатов фотометрирования детально описаны в [11]). В результате было получено распределение концентрации воздуха по каждой из линий. На рис. 5,а приведён фрагмент фотографии с нанесёнными на ней линиями. На рис. 5,б представлен график концентрации воздуха в зоне турбулентного перемешивания после обработки по линии №5. По результатам фотометрирования на границе между воздухом и зоной перемешивания концентрация воздуха падает скачком от 1 до  $\sim 0.15$ . Вместе с тем усредненное (по всем строкам) распределение концентрации воздуха имеет плавный характер и согласуется с результатами расчетов зоны перемешивания по модели Никифорова [13] (рис. 6).

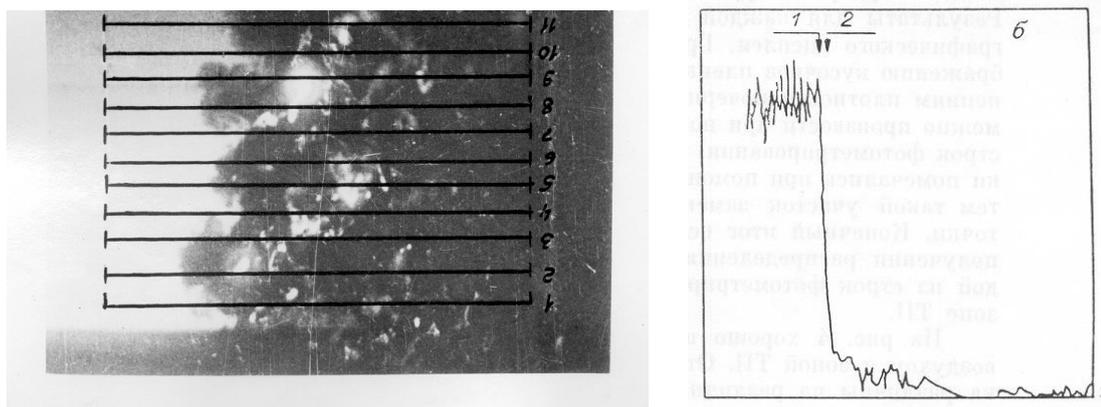


Рис.5. а) фрагмент фотографии ЗТП ( $t \approx 800$  мкс), подвергнутой фотометрированию по линиям, нанесённым на фотографии. б) распределение концентрации воздуха (1) в ЗТП (2) по результатам фотометрирования фотографии по линии №5 (после обработки) [11].

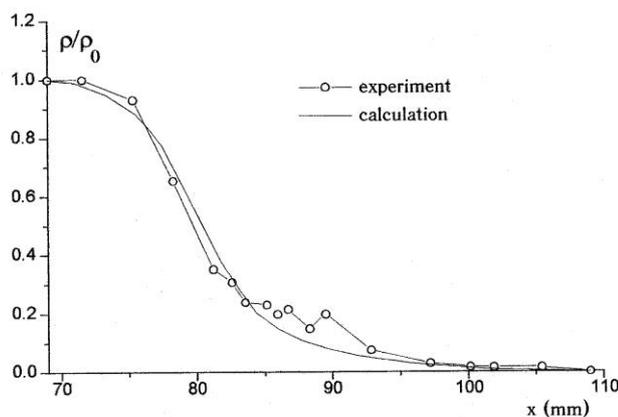


Рис.6. Усредненное распределение концентрации воздуха в зоне турбулентного перемешивания на границе воздух – гелий. Сравнение с расчетом по модели [13].

В связи с этими результатами возникает вопрос: являются ли наблюдаемые в описанных экспериментах особенности в виде скачка концентрации тяжелого газа на границе с ЗТП случайными и присущими только этому эксперименту или в целом присущи структуре ЗТП на границе газ-газ? По-видимому, эта особенность носит общий характер, в противном случае отсутствие скачка концентрации на границе тяжелый газ-зона перемешивания должно приводить к затуханию процесса перемешивания газов.

## 2. Развитие зоны турбулентного перемешивания на контактной границе, ускоряемой нестационарной ударной волной

Особенности развития зоны турбулентного перемешивания на контактной границе, ускоряемой нестационарной ударной волной, иллюстрируют результаты экспериментов на ударной трубе (рис. 7) [14-16]. Сильная нестационарная затухающая ударная волна формировалась после детонации относительно тонкого слоя смеси ацетилена с кислородом. Детонация слоя смеси инициируется синхронно в 36 точках, равномерно расположенных на жесткой стенке 1, при помощи электрического взрыва ряда коротких (~1 мм) отрезков проволочек. При этом степень синхронности инициирования детонации оказывается достаточно высокой для получения практически плоского фронта детонации и затем ударной волны. Эти эксперименты выполнялись на ударной трубе с каналом квадратного сечения  $8 \times 8$  см<sup>2</sup>, длиной 25 см (протяженность камеры, заполненной газовой смесью – 1,95 см).

Визуализация течения в ударной трубе осуществлялась методом расфокусированных решеток [12]. Решетка из нитей диаметром 0,16мм с шагом 1 мм была установлена внутри корпуса наблюдательной трубы теневой установки ИАБ-451 на его стенке (величина расфокусировки  $\Delta = 125$  мм). Регистрация течения производилась при помощи камеры SENSI CAM, оптически сочлененной с теневой установкой ИАБ-451.

Сложности регистрации зоны турбулентного перемешивания в данном случае определяются, с одной стороны, самосвечением продуктов детонации, нагретых до высоких температур (более 4000°С), а, с другой стороны, тем, что окна канала ударной трубы были изготовлены из пластин листового оргстекла с невысоким качеством поверхностей (поверхности пластин гладкие, но с отклонением от плоскостности). Об этом можно судить по искривлению изображений линий теней от решетки у верхней и нижней стенок в невозмущенном воздухе перед фронтом ударной волны на рис.9,а. Тем не менее, в экспериментах методом расфокусированных решеток удалось получить достаточно высококачественное изображение ударных волн и зоны турбулентного перемешивания на контактной границе.

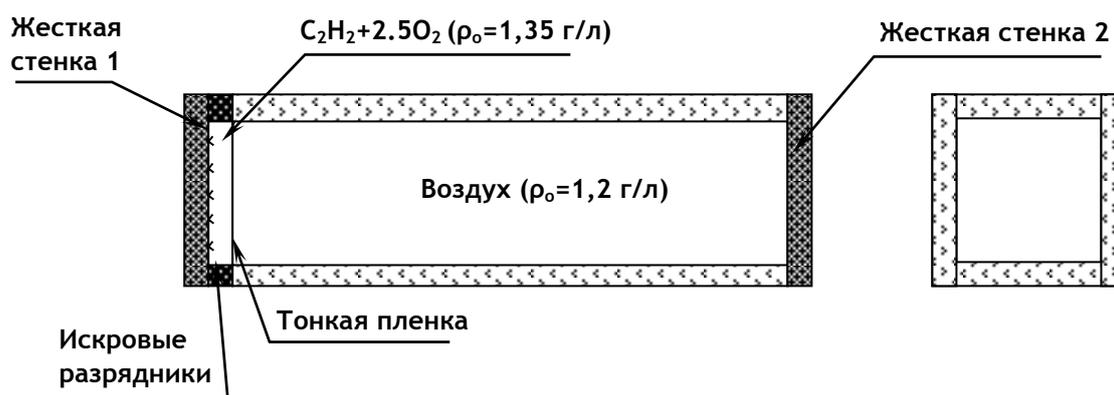


Рис.7. Схема ударной трубы с драйвером ударной волны в виде относительно тонкого слоя детонирующей стехиометрической смеси ацетилена с кислородом.

На рис. 8 приведены результаты одномерного расчета течения в ударной трубе, сделанного в предположении мгновенной детонации слоя смеси ацетилена с кислородом [15].

На рис. 9,а и 9,б приведены картины течения на разные моменты времени в ударной трубе, полученные методом расфокусированных решёток [12]. Рис. 9,а иллюстрирует течение до момента выхода ударной волны на жёсткую стенку 2. На рис. 9,б показана картина течения после выхода на контактную границу ударной волны, отраженной от жёсткой стенки 2.

На рис. 10 приведена  $x-t$  диаграмма течения в ударной трубе. Регистрация теневой картины течения велась камерой СФР в многокадровом режиме съемки и камерой SENSI SAM в однокадровом режиме. До выхода на контактную границу (продукты детонации – воздух) ударной волны, отраженной от жесткой стенки 2 ( $\tau=500\text{мкс}$ ), начальное возмущение границы практически не растет. После выхода отраженной волны на границу на ней быстро начинает развиваться зона турбулентного перемешивания.

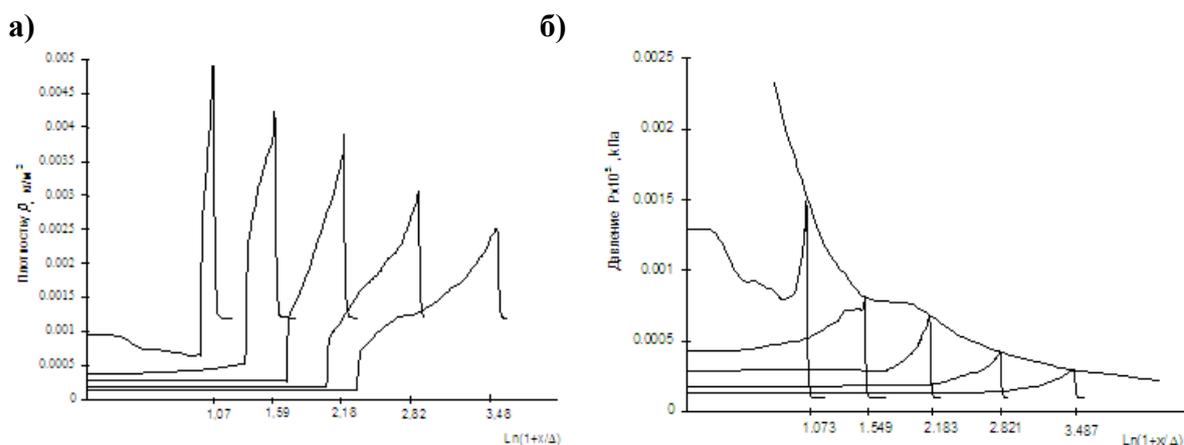
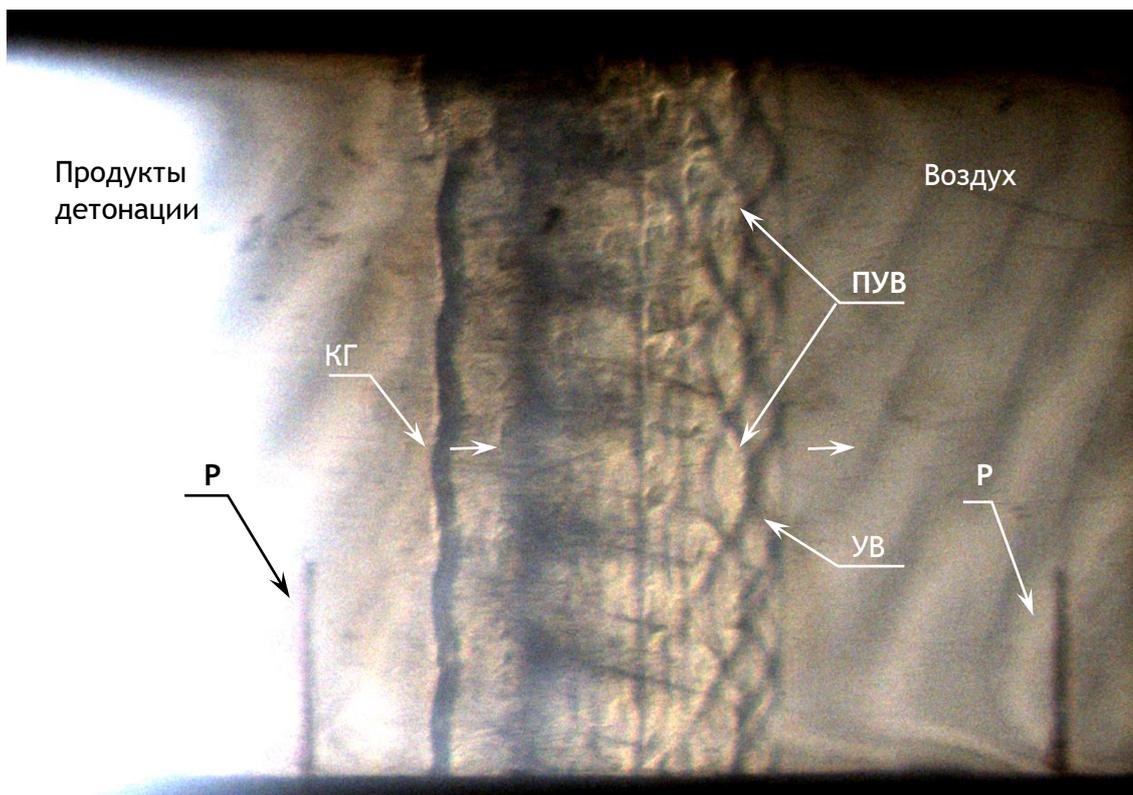


Рис.8. Результаты одномерного расчета работы ацетиленовой ударной трубы: а) профили плотности; б) профили давления за фронтом ударной волны на разные моменты времени ( $x$  - координата,  $\Delta$  - начальная толщина слоя газовой смеси) [15]

Рис. 9,а иллюстрирует сложную, и вместе с тем, регулярную структуру течения за фронтом ударной волны в начальные моменты времени в ударной трубе. Наблюдаемая картина представляет собой течение за фронтом ударной волны с *трехмерным* периодическим возмущением. При выходе детонационной волны, распространяющейся по смеси ацетилена с кислородом, на границу с воздухом, пленка, первоначально разделявшая газы, подвергается быстрому прогреву до очень высоких температур, при которых происходит ее разложение. По оценкам [15] пленка толщиной менее 0,5 мкм прогревается за доли микросекунды. Температура продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом, по оценке, достигает 4000 – 4800 К. Пленка, быстро прогревая до таких температур, должна превращаться в тонкий слой газообразных продуктов распада в виде дыма, тем самым не оказывая влияния на развитие зоны турбулентного перемешивания.

Представляет интерес необычное поведение возмущения границы между продуктами детонации и воздухом. Несмотря на то, что начальное возмущение контактной границы, возникающее после выхода на нее сильно возмущенной волны детонации велико по амплитуде, дальнейшего роста возмущений на первой стадии движения границы вплоть до момента выхода отражённой ударной волны от жёсткой стенки 2 не наблюдается (рис. 9,а и 10).

а)



б)

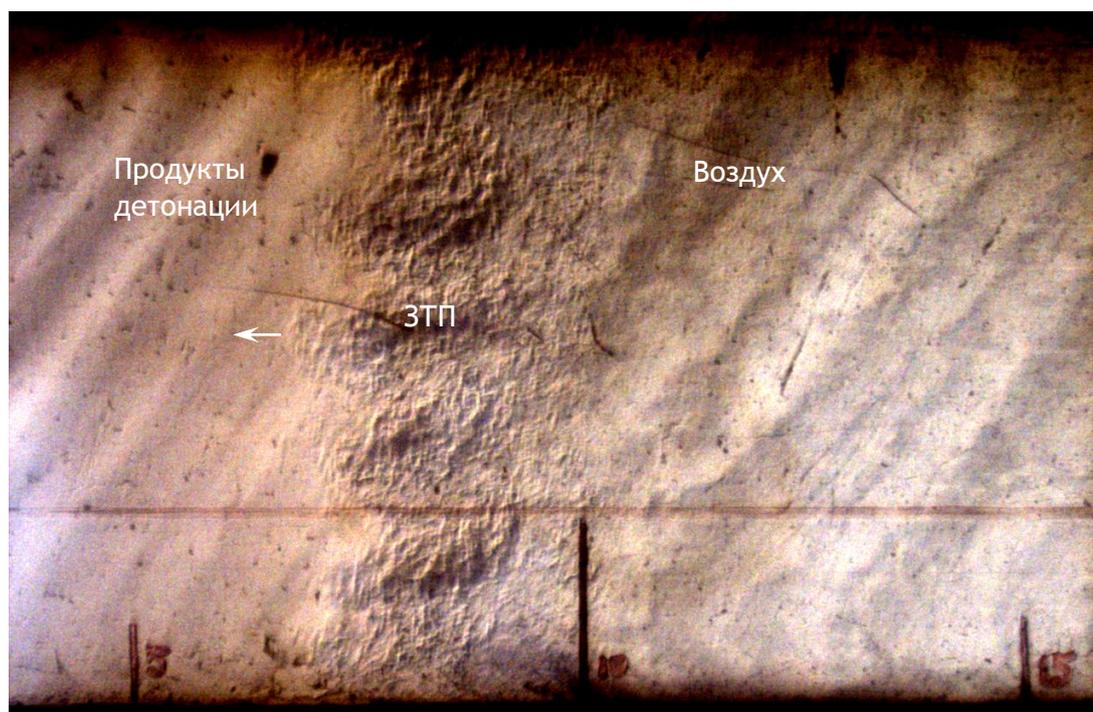


Рис.9. Картина течения в ацетиленовой ударной трубе на разные моменты времени: а)  $\tau_1 = 100\text{мкс}$ , б)  $\tau_2 = 700\text{мкс}$ . Время отсчитывается от момента инициирования слоя смеси ацетилена с кислородом. Обозначения: УВ - ударная волна; ПУВ – система поперечных ударных волн; КГ - граница между продуктами детонации и воздухом; ЗТП - зоны турбулентного перемешивания; Р – репер. Стрелками указано направление течения.

Такое поведение контактной границы в данном случае можно объяснить следующим образом. После выхода волны детонации на границу газов последняя ускоряется скачком до

скорости порядка 1000 м/с, но сразу же, после этого скорость ее начинает уменьшаться и к моменту выхода на нее ударной волны, отраженной от стенки 2, скорость границы падает до ~250 м/с. Соответственно, ускорение границы – торможение связано с быстрым расширением и падением давления продуктов детонации тонкого слоя газовой смеси.

Начальная плотность смеси ацетилена с кислородом ( $\rho_0=1,35\text{г/л}$ ) примерно равна плотности воздуха ( $\rho_0=1,205\text{г/л}$ ), но в процессе расширения продуктов детонации их плотность падает, а плотность воздуха, сжатого ударной волной возрастает. После импульсного ускорения на начальной стадии граница: продукты детонации - воздух движется с торможением, и ускорение оказывается направленным от более тяжелого газа (сжимаемый воздух) к более легкому (расширяющиеся продукты детонации), т.е. это соответствует случаю устойчивости [1,2], при котором возмущение границы, колеблясь, затухает.

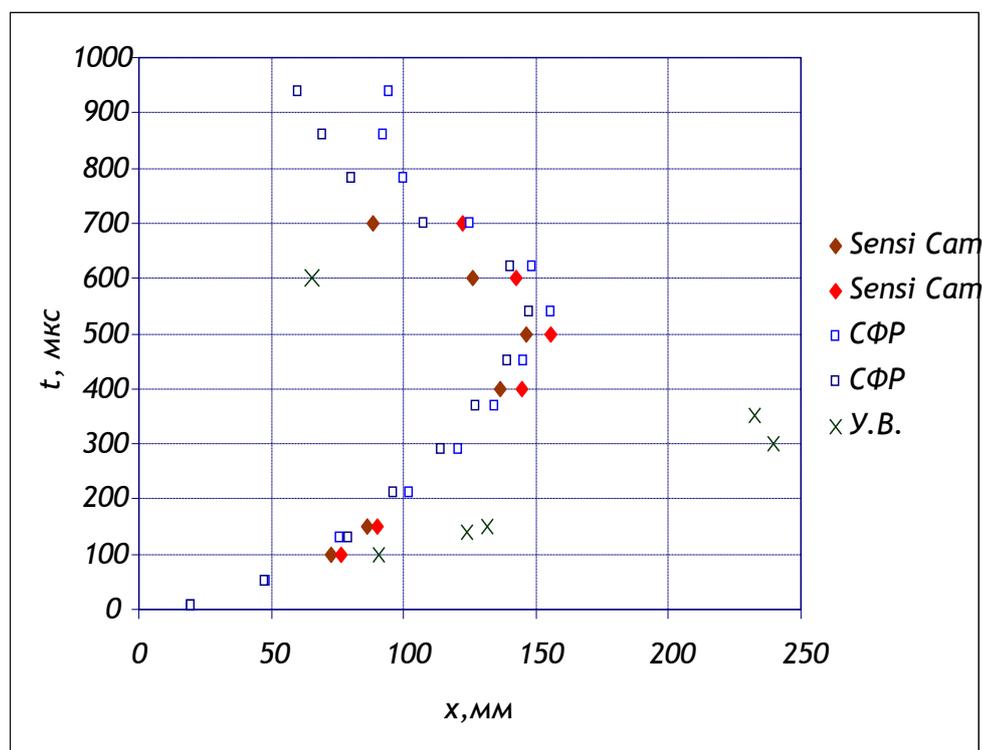


Рис.10. X-t диаграмма течения в ацетиленовой ударной трубе. Обозначения: × - фронт ударной волны

Таким образом, при ускорении границы двух газов нестационарной (затухающей) ударной волной в направлении от легкого газа к тяжелому возникает противоречивая ситуация. С одной стороны, сразу же после прохождения через границу ударной волны возникают условия для развития начального возмущения, затем практически сразу возникает ускорение, направленное от тяжелого газа к легкому, оказывая стабилизирующее воздействие на развитие возмущений. Картина последующего развития возмущения в разных случаях будет зависеть от величины ускорения границы. Тем самым, темп и характер развития возмущений будет определяться спадом давления за фронтом ударной волны. Слабое изменение давления и, соответственно, малый масштаб ускорения практически не повлияет на рост возмущений, который будет определяться первоначальным импульсом ускорения контактной границы ударной волны.

Все сказанное выше относится к течению в данной ударной трубе до выхода на границу ударной волны, отраженной от стенки 2. В случае ударной трубы, построенной по схеме, приведённой на рис. 7, с заглушенным концом канала жесткой стенкой 2, ударная

волна отражается от этой стенки и приходит на контактную границу. К этому моменту времени начальное возмущение сильно затухает. Однако, после выхода на нее отраженной волны, на границе начинается быстрое развитие зоны турбулентного перемешивания (рис. 9,б и 10). В этом случае начальным возмущением является остаточное возмущение контактной границы. Несмотря на сравнительно малый масштаб этого возмущения, оно достаточно быстро развивается, поскольку имеет место одновременное (*и однонаправленное*) действие РМ- и РТ – неустойчивостей.

Аналогичные особенности развития неустойчивости на границе - продукты детонации газовой смеси и воздуха - наблюдаются в цилиндрической геометрии [16]. В этом случае роль жесткой стенки 1 играет ось симметрии системы слоев газовая смесь-воздух, на которой расположена тонкая проволочка, взрываемаемая высоковольтным электрическим импульсом.

Таким образом, из приведенных экспериментов следует, что при ускорении контактной границы нестационарной ударной волной возможны случаи, при которых развитие РМ-неустойчивости сильно ослабляется действием РТ-неустойчивости.

Отметим также продемонстрированные в этих опытах преимущества описанной ударной трубы перед обычными ударными трубами (в частности, с трубой, результаты экспериментов с которой описаны в разделе 1). В подобной ударной трубе длина канала может быть многократно короче канала обычных ударных труб. В частности, может быть создана лабораторная ударная труба с большим поперечным сечением (например  $0.5 \times 0.5 \text{ м}^2$ ) и малой длины (меньше 1 метра) канала.

Автор выражает благодарность А.Б.Георгиевской и В.П.Стаценко за полезные замечания и обсуждения, а также Е.Н.Поздняковой и М.Е.Мешкову за помощь в оформлении статьи.

## Литература

1. Lord Rayleigh. Proc. London Math. Soc., v.14, 1883, p.170.
2. Taylor G.I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc. Roy. Soc., v.A201, 1950, p.192.
3. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun.Pure Appl.Math. V.13, 1960, 297.
4. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. // Изв.АН СССР, МЖГ. N 5, 1969, 151-158.
5. Meshkov E.E. Instability of shock-accelerated interface between two media. // Proc. of the First Intl Workshop on the Physics of Turbulent Compressible Mixing (Princeton, USA, 1988), 1992, pp.473-503.
6. V.Andronov,I.Zhidov, E.Meshkov, N.Nevmerzhiitsky, V.Nikiforov, A.Razin, V.Rogachov, A.Tolshmyakov, Yu.Yanilkin. Computational and Experimental Studies of Hydrodynamic Instabilities and Turbulent Mixing. // (Review of VNIIEF Efforts). Los Alamos National Laboratory. N LA-12896, 1995г.
7. Е.Е.Мешков. Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах. // Саров, 2006, 138 с.
8. В.А.Андронов, С.М.Бахрах, Е.Е.Мешков, В.Н.Мохов, В.В.Никифоров, А.В.Певницкий, А.И.Толшмяков. Турбулентное перемешивание на контактной поверхности, ускоряемой ударными волнами.// ЖЭТФ, т.71, вып. 2(8), 1976, с. 806-811.

9. В.А.Андронов, С.М.Бахрах, Е.Е.Мешков, В.В.Никифоров, А.В.Певницкий, А.И.Толшмяков. Экспериментальное исследование и численное моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях. // ДАН, т. 264, N 1, 1982, с. 76-82.
10. Abakumov A.I., Fadeev V.Yu., Kholkin S.I., Meshkov E.E., Nikiforov V.V., Nizovtsev P.N., Nikulin A.A., Sadilov N.N., Sobolev S.K., Til'kunov A.I, Tochilin V.O., Tolshmyakov A.I., Zhidkov N.V. (1995) Studies of Film Effects on the Turbulent Mixing Zone Evolution in Shock Tube Experiments. // The Proc of the 5th IWPCTM, Stony Brook, USA, 1995, p.118-123.
11. Е.Е.Мешков, В.В.Никифоров, А.И.Толшмяков. О структуре зоны турбулентного перемешивания на границе двух газов, ускоряемой УВ. // ФГВ, N 3, 1990, с. 71-77.
12. Базаров Ю.Б., Левушов А.Е., Логвинов А.И., Мешков Е.Е., Попов В.В. Применение метода расфокусированных решеток для визуализации течения в экспериментах на ударных трубах // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 11. 2007. С.294-297.
13. Никифоров В.В. Турбулентное перемешивание на контактной границе разноплотных сред. // ВАНТ, сер. Теор. и прикл. физика. Вып.1, 1985, 3.
14. Meshkov E.E. One Approach to the Experimental Study of Hydrodynamic Instabilities: Creation of a Gas-Gas Interface Using the Dynamic Technique. // The Proc of the 5th IWPCTM, Stony Brook, USA, Editors R.Young, J.Glimm & V.Boston, 1995, P.237.
15. Ю.А. Власов, С.И. Герасимов, Губков Е.В, В.И.Дудин, В.П.Копышев, Е.Е.Мешков, А.А.Никулин, В.П.Рябов, В.А.Тилькунов. Ударная труба с ГВС-драйвером. // Препринт 47-96. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.
16. Yu.V.Alekhanov, A.E.Levushov, A.I.Logvinov, S.A.Lomtev, E.E.Meshkov, A.A.Polovnikov, E.A.Polovnikov, First Mix Experiments on the Cylindrical Acetylene Shock Tube. // Proc. of the 10<sup>th</sup> IWPCTM, Paris, France July 17-21,2006, p.p. 244-248.