

E.E.Meshkov. Some peculiar features of hydrodynamic instability development. // Phil. Trans. R. Soc. A2013 371, 20120288

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

E.E.Мешков

СарФТИ НИЯУ МИФИ

Аннотация

В статье приводится обзор экспериментов, выполненных при участии автора, иллюстрирующих особенности структуры зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) на границе газ-жидкость (неустойчивость Релея-Тейлора) и на границе газ-газ, ускоряемой ударными волнами. Особенности заключаются в существовании скачка концентрации более тяжелого вещества на границе между тяжёлой средой и ЗТП. Высказано предположение о том, что существование такого скачка является общим свойством любой развитой ЗТП и является необходимым условием её постоянного развития. В случае границы газ – жидкость постоянство существования упомянутого скачка обуславливает устойчивость купола пузырей газа, проникающих в жидкость в ЗТП.

Особенностью развития неустойчивости контактной границы, ускоряемой нестационарной ударной волной является возможность ослабления (вплоть до полного подавления) неустойчивости границы в случае, когда затухающая ударная волна проходит через границу в направлении от лёгкой среды к тяжелой.

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 меняется слабо со временем и направлено от легкой среды к тяжелой, контактная граница оказывается неустойчивой. Такой тип неустойчивости называют неустойчивостью Релея-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, также развивается неустойчивость независимо от направления ускорения. Такой тип неустойчивости называют неустойчивостью Рихтмайера – Мешкова (РМ) [3,4].

На протяжении более сорока лет автором или при его непосредственном участии был выполнен ряд исследований развития как РМ, так и РТ – неустойчивостей. Результаты этих исследований были описаны в обзора [5-7], монографии [8] и в ряде статей и докладах на международных конференциях. В данной статье обсуждаются некоторые особенности развития гидродинамических неустойчивостей, наблюдавшихся ранее, и описанных в ряде работ, выполненных при участии автора [9-22].

1 Устойчивость купола пузыря Тейлора.

На рис. 1. приведены кадры фотохронограммы процесса развития зоны турбулентного перемешивания на неустойчивой границе слоя студня водного раствора желатина (концентрация раствора $C \sim 4\%$), ускоряемого давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом [9]. Характерный масштаб давления продуктов детонации в данном случае порядка 1 МПа; при таких давлениях студень ведет себя подобно жидкости, и в данном случае наблюдается, по-существу, развитие зоны турбулентного перемешивания на границе газ-жидкость со всеми ее характерными признаками. В частности на рис. 1 видно, что газообразные продукты детонации проникают в слой студня в виде ряда пузырей, укрупняющихся со временем.

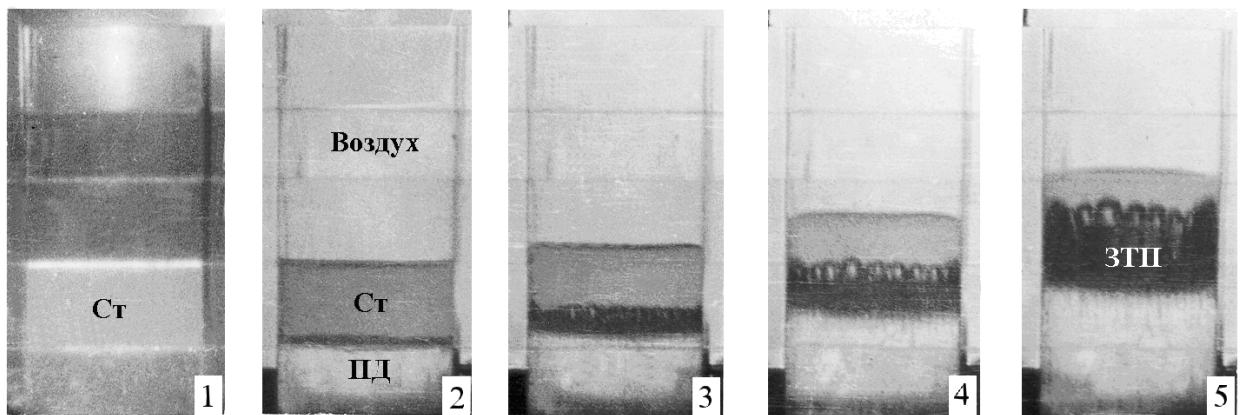


Рисунок 1 Развитие зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) на границе слоя студня (Ст), ускоряемого продуктами детонации (ПД) в канале квадратного сечения. Детонация смеси ацетилена с кислородом инициировалась в 64 точках

На рис. 2 приведены кадры видеограммы другого опыта, в котором воздушный пузырь, поднимается в канале с водой квадратного сечения [10]. Пузырь имеет большой объем и занимает практически все сечение канала. Это не что иное, как банальная воздушная пробка, с которой мы порой сталкиваемся в быту. В научной литературе такой тип пузыря называется пузырем Тейлора, а режим течения, который в этом случае возникает, иногда называют снарядным режимом течения. Пузырь формируется после разрушения иглой в полюсе тонкой резиновой оболочки, надутой воздухом. В процессе очень быстрого стягивания остатков оболочки (за время $\sim 2\text{мс}$) на поверхности пузыря формируются начальные мелкомасштабные возмущения. Рост этих возмущений на куполе пузыря вследствие развития РТ – неустойчивости, едва начавшись, затухает, и они как бы “скатываются” вниз по поверхности пузыря.

С точки зрения развития РТ – неустойчивости в обоих приведенных случаях (рис. 1 и рис. 2) принципиальным отличием является только форма границы газ-жидкость. В экспериментах со студнем граница изначально плоская, а в экспериментах с пузырём – приближенно сферическая. Но результат экспериментов оказывается разительно различным: в первом случае развивается РТ – неустойчивость и ЗТП, а во втором случае развития ЗТП не наблюдается. Возникает вопрос - почему купол всплывающего пузыря Тэйлора оказывается устойчивым. Этот эффект не может быть объяснен действием только поверхностного натяжения. Оценки показывают, что в подобном случае характерный масштаб критической длины волны начального возмущения порядка 1 см [11], в то же время размер канала, в котором всплывает пузырь намного больше. Вероятно, это связано с действием сдвигового течения на поверхности купола пузыря, возникающего при обтекании пузыря водой, в которую он проникает.

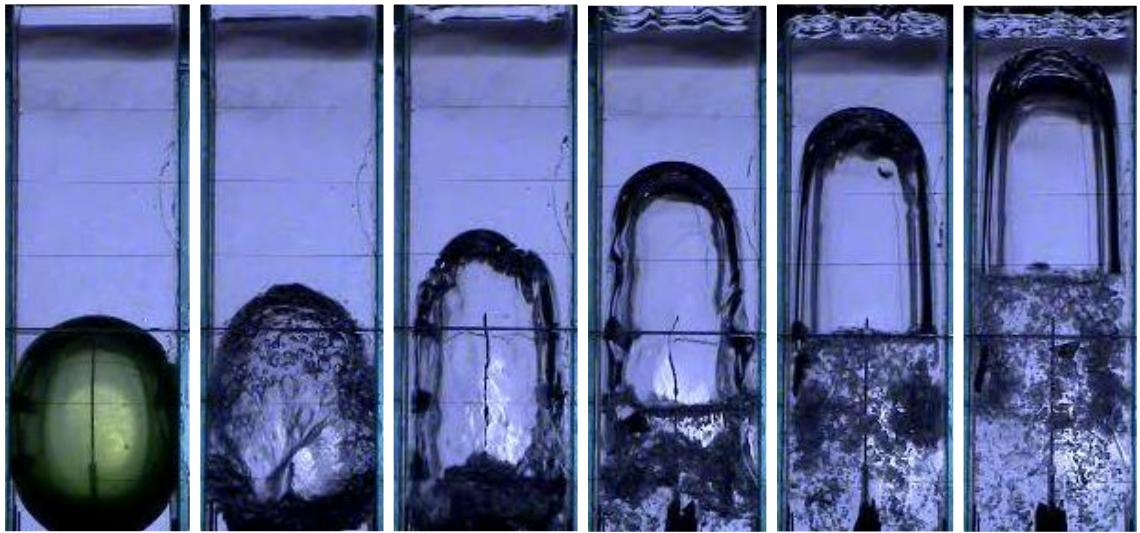


Рисунок 2 Кадры видеосъемки (~25 кадров/с) воздушного пузыря, всплывающего в воде в канале квадратного сечения ($11 \times 11 \text{ см}^2$) из состояния покоя

Наиболее ярко это проявляется в экспериментах, представленных на рисунке 3 [12]. На поверхности купола пузыря, всплывающего в цилиндрическом канале, создавалось кольцевое возмущение путем помещения на поверхности надутой резиновой оболочки кольца из металлического прутка. Здесь течение, включая стадию развития возмущения, является двумерным. Одновременно с ростом этого возмущения, вследствие развития РТ – неустойчивости, наблюдается его быстрое расширение и, в конечном итоге, это кольцевое возмущение, расширяясь, скатывается с поверхности пузыря и купол пузыря остается гладким и невозмущенным. Таким образом, купол всплывающего в воде пузыря оказывается устойчивым по отношению к возмущениям разного типа, включая и возмущения кольцевого вида.

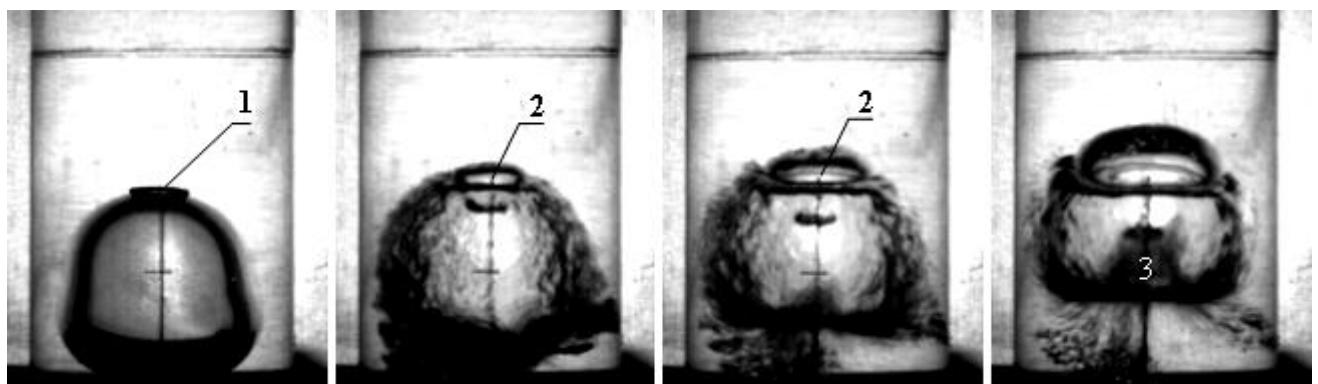


Рисунок 3 Развитие кольцевого возмущения (2) на поверхности пузыря, всплывающего в цилиндрическом канале с водой. Возмущение создавалось кольцом (1), помещенным на куполе резиновой оболочки перед ее разрушением

В экспериментах [11] наблюдалось развитие РТ-неустойчивости на куполе воздушного пузыря, всплывающего в воде в кольцевом зазоре, образованном стенками двух коаксиальных цилиндров. В этом случае РТ-неустойчивость развивается без ограничений, и купол кольцевого пузыря распадается на ряд округлых пузырей.

Ранее мы видели, что фронт зоны турбулентного перемешивания на границе газожидкость состоит из пузырей, являющихся аналогом пузырей Тейлора. С ростом зоны турбулентного перемешивания происходит и постоянное укрупнение этих пузырей за счет подавления соседних пузырей или объединения с ними. С ростом пузырей происходит и увеличение радиуса кривизны на поверхности их купола. В конечном итоге они должны стремиться к плоской форме. При этом возникает вопрос, каким образом это отразится на устойчивости купола пузырей. В работе [13] высказано предположение о том, что рано или поздно может произойти потеря устойчивости купола пузыря Тейлора и при этом должен изменяться закон развития зоны турбулентного перемешивания.

Представляет интерес дальнейшее исследование описанного феномена, с целью выяснения механизмов определяющих устойчивость купола пузыря Тейлора и пределов действия этих механизмов.

2 Особенности структуры зон турбулентного перемешивания на границе газ-газ

Явление турбулентного перемешивания на границе двух газов разной плотности, ускоряемой ударными волнами, экспериментально было обнаружено автором в 1968 г. и опубликовано в [14-16].

Эксперименты [14-16] проводились на ударной трубе в геометрии: *воздух* ($\rho_0=1,2 \text{ г/л}$) – *гелий* ($\rho_0=0,178 \text{ г/л}$) – *жесткая стенка* (рис. 4). Сечение канала ударной трубы $4\times12 \text{ см}^2$, протяженность отсека с гелием 16,6 см. Число Маха первоначальной стационарной ударной волны в воздухе $M=1.3$.



Рисунок 4 Схема измерительной секции ударной трубы в экспериментах по исследованию развития зоны турбулентного перемешивания на плоской границе воздух-гелий, ускоряемой ударными волнами

В экспериментах в такой постановке оптическая регистрация течения проводилась следующими методами: а) визуализация теневым методом с регистрацией скоростной кинокамерой СФР [14,16]; б) визуализация зоны турбулентного перемешивания методом лазерного ножа с регистрацией течения в однокадровом режиме [16].

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. 5).

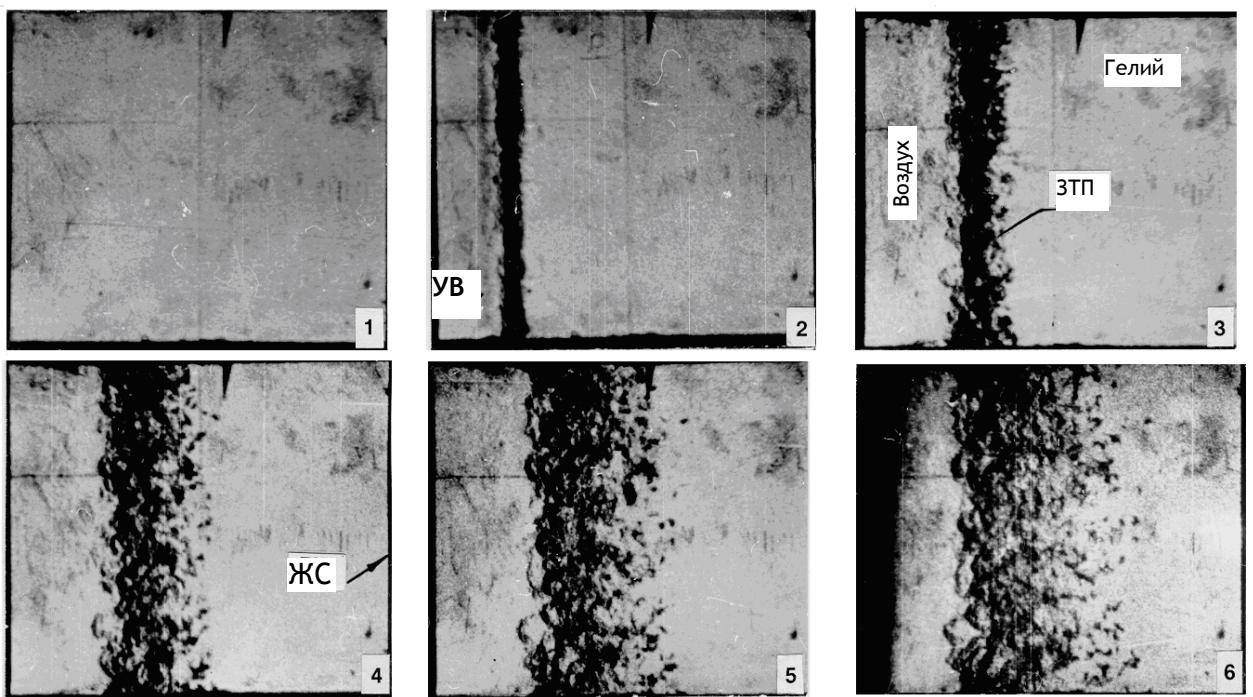


Рисунок 5 Развитие зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) на границе воздух – гелий [14].
Обозначения: УВ – ударная волна; ЖС – жёсткая стенка. Визуализация течения осуществлялась теневым методом

В экспериментах роль начального возмущения играла естественная разнотолщинность (а, следовательно, разномассность) 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 [17]. 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. 6 приведена фотография зоны турбулентного перемешивания на границе воздух-гелий, полученная методом лазерного ножа. Эксперименты были выполнены в 1982 году [16]. Постановка опытов на ударной трубе не отличается от приведенной на

рис.4, за исключением того, что к воздуху, граничащему с гелием, 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. 6) существенно отличается от ее изображения, полученного теневым методом (рис. 5). 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 ЗТП, а между ЗТП и легким газом подобный разрыв отсутствует.

В зоне перемешивания концентрация воздуха постепенно падает до нуля. Приведенная на рис. 6 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 турбулизированной.

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.

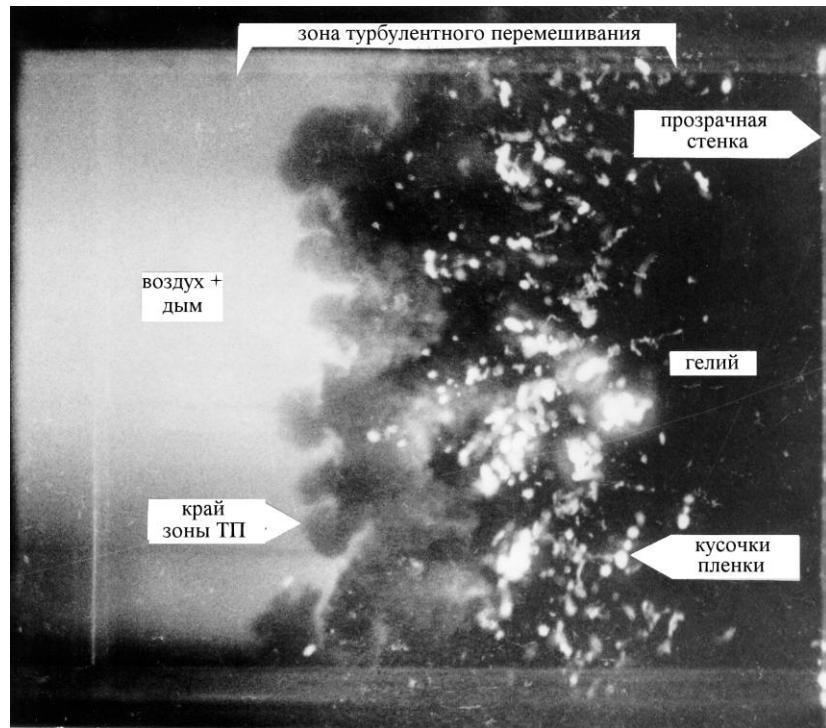
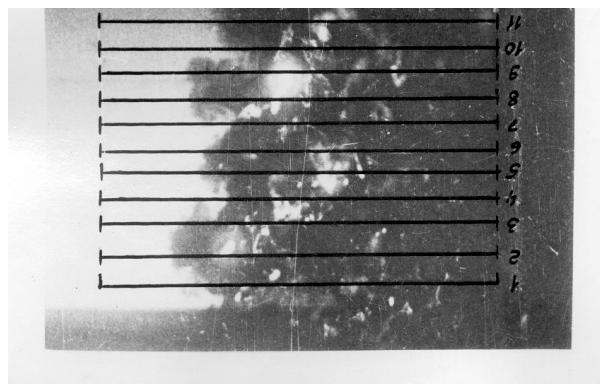


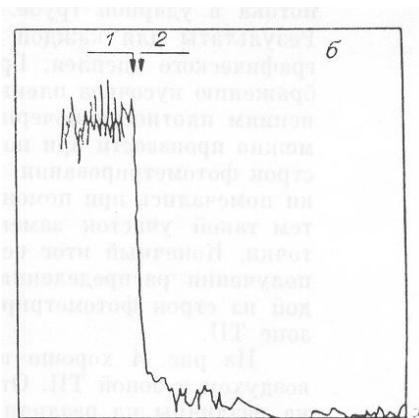
Рисунок 6 Фотография зоны турбулентного перемешивания, полученная методом лазерного ножа на границе воздух (с примесью дыма) – гелий на момент времени $t \approx 890$ мкс

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 [16]). В результате было получено распределение концентрации воздуха по каждой из линий. На рис. 7,а приведён фрагмент фотографии с нанесёнными на ней линиями. На рис. 7,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 ~ 0.15 . В месте с тем усредненное (по всем строкам) распределение концентрации воздуха имеет плавный характер и согласуется с результатами расчетов зоны перемешивания по модели Никифорова [23] (рис. 8).

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 при отсутствии постоянно существующего скачка концентрации на границе тяжелый газ-зона перемешивания должно приводить к затуханию процесса перемешивания газов.



a)



б)

Рисунок 7 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

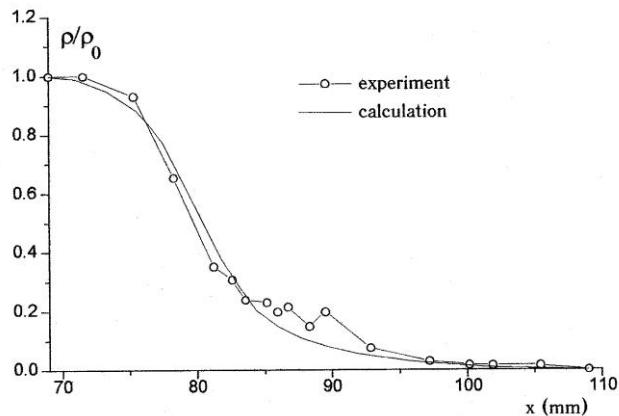


Рисунок 8 Усредненное распределение концентрации воздуха в зоне турбулентного перемешивания на границе воздух – гелий. Сравнение с расчетом

Отметим, что существование скачка концентрации на границе с зоной перемешивания является общим и для случая границы газ-газ и газ-жидкость. Однако, механизмы реализации скачка в обоих случаях различны. В случае газ-жидкость газ проникает в жидкость в виде ансамбля пузырей. Для их постоянного роста необходимо постоянная подпитка. Поэтому эти пузыри, по-видимому, должны соединяться каналами с

областью чистого газа. При этом каналы соседних пузырей отделены друг от друга перегородками из жидкости. В тоже время в случае газ-газ лёгкий газ не проникает в ЗТП в чистом виде и находится там только в виде смеси с тяжёлым газом. В этом случае развитие ЗТП осуществляется за счёт постоянного проникновения в ЗТП струй тяжёлого газа. Существование скачка концентрации в экспериментах с двумя различными типами границы позволяет сделать предположение, что подобная особенность должна реализоваться при любых случаях контактной границы. Наличие скачка является гарантом незатухающего развития неустойчивости.

3 Эксперименты на ацетиленовой ударной трубе. 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 ацетиленовой ударной трубе (рис. 9) [18-21]. Сильная нестационарная затухающая ударная волна создавалась детонацией относительно тонкого слоя смеси ацетилена с кислородом. Детонация слоя смеси инициируется синхронно в 36 точках, равномерно расположенных на жесткой стенке 1, электроискровым способом или при помощи электрического взрыва ряда коротких проволочек. При этом степень синхронности инициирования детонации оказывается достаточно высокой для получения практически плоского фронта детонации и затем ударной волны. Эти эксперименты выполнялись на ацетиленовой ударной трубе с каналом квадратного сечения $8 \times 8 \text{ см}^2$, длиной 25 см (протяженность камеры, заполненной газовой смесью – 1,95 см).

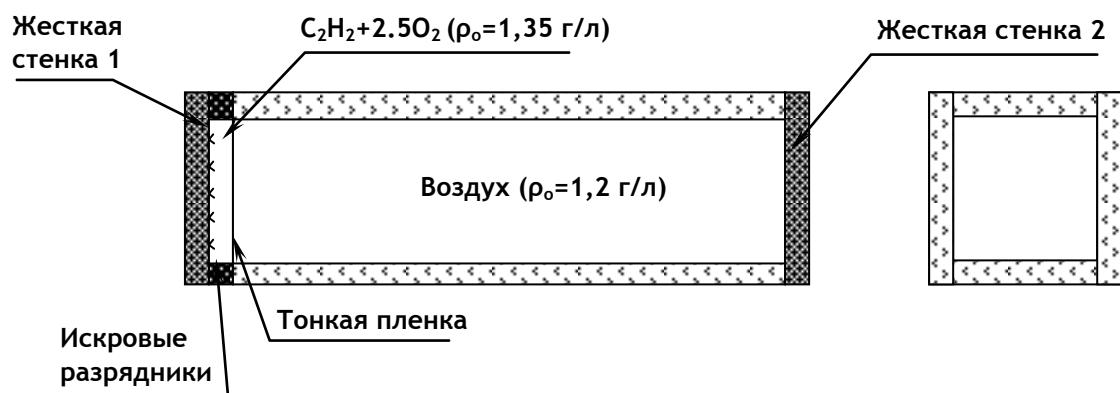


Рисунок 9 Схема ацетиленовой ударной трубы с драйвером ударной волны в виде относительно тонкого слоя детонирующей стехиометрической смеси ацетилена с кислородом

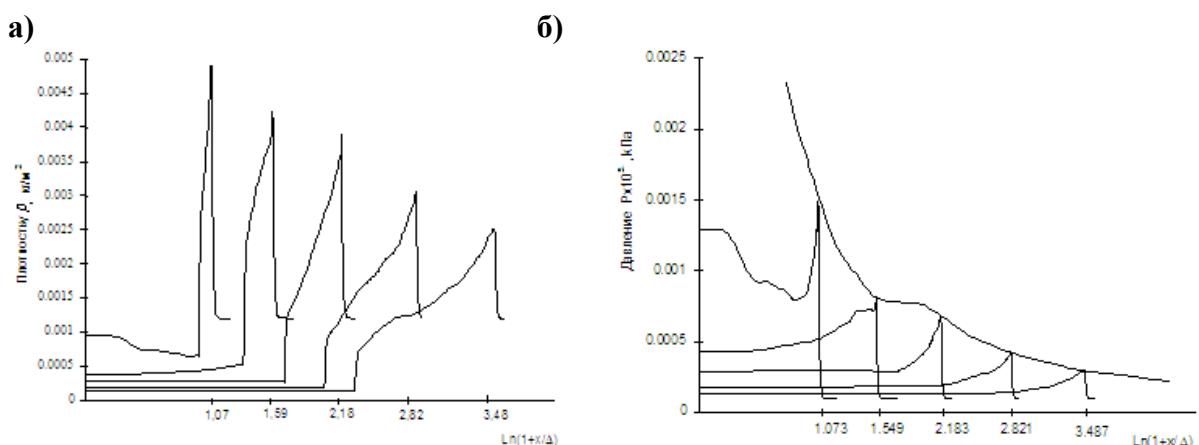


Рисунок 10 Результаты одномерного расчета работы ацетиленовой ударной трубы: а) профили плотности; б) профили давления за фронтом ударной волны на разные моменты времени (x - координата, Δ - начальная толщина слоя газовой смеси) [19]

На рис. 10 приведены результаты одномерного расчета течения в ацетиленовой ударной трубе, сделанного в предположении мгновенной детонации слоя смеси ацетилена с кислородом [19].

На рис. 11,*а* и *б* приведены картины течения на разные моменты времени в ацетиленовой ударной трубе, полученные методом расфокусированных решёток [20]. Рис. 11,*а* иллюстрирует течение до момента выхода ударной волны на жёсткую стенку 2. На рис. 11,*б* показана картина течения после выхода отраженной от жёсткой стенки 2 ударной волны на контактную границу.

На рис. 12 приведена *x-t* диаграмма течения в ударной трубе. Регистрация теневой картины течения велась камерой СФР в многокадровом режиме съемки и камерой Sensi Cam 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. 11,*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 [19] 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 прогретая до таких температур, должна превращаться в тонкий слой газообразных продуктов распада в виде дыма, тем самым не оказывая влияния на развитие ЗТП.

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 происходит (рис. 11,*а* и 12).

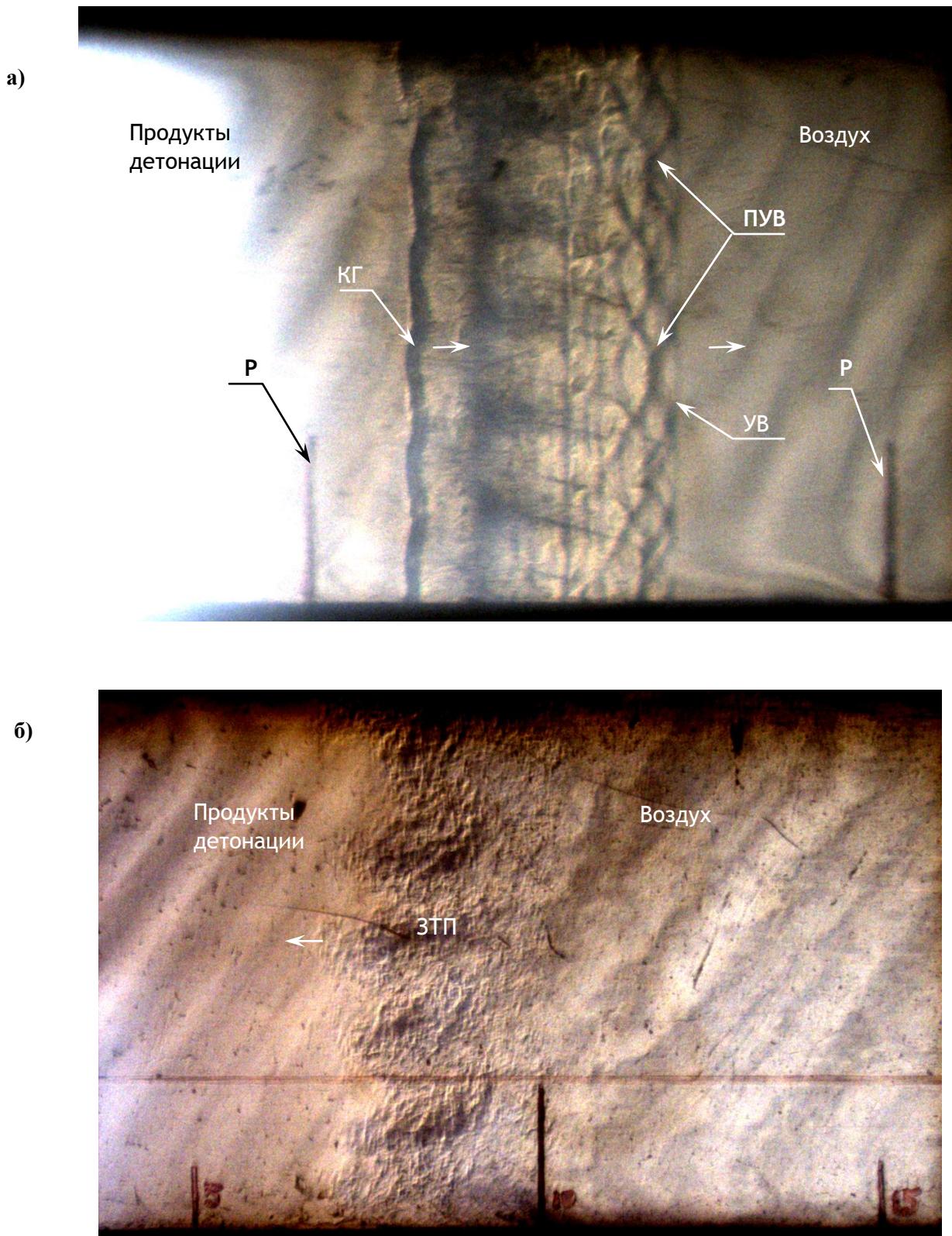


Рисунок 11 Картина течения в ацетиленовой ударной трубе на разные моменты времени:
а) $\tau_1 = 100\text{мкс}$, б) $\tau_2 = 700\text{мкс}$. Время отсчитывается от момента инициирования слоя смеси ацетилена с кислородом. Обозначения: УВ - ударная волна; ПУВ – система поперечных ударных волн; КГ - граница между продуктами детонации и воздухом; ЗТП - зоны турбулентного перемешивания; Р – репер. Стрелками указано направление течения [20]

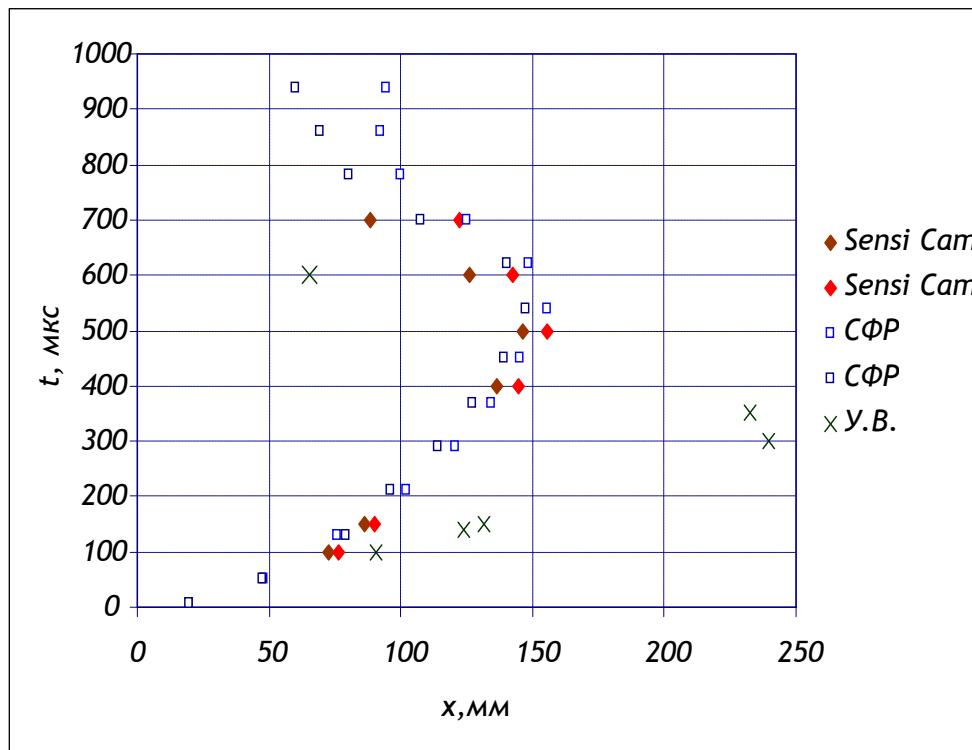


Рисунок 12 x - t диаграмма течения в ацетиленовой ударной трубе.

Обозначения: \times - фронт ударной волны

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 тонкого слоя продуктов детонации газовой смеси. Начальная плотность смеси ацетилена с кислородом ($\rho_0=1,35$ г/л) примерно равна плотности воздуха ($\rho_0=1,205$ г/л), но в процессе расширения продуктов детонации их плотность падает, а плотность воздуха, сжатого ударной волной возрастает (рис. 11,а). Таким образом, на начальной стадии движения граница продуктов 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 [2], при котором возмущение границы, колеблясь, затухает.

Таким образом, при ускорении границы двух газов нестационарной (затухающей) ударной волной в направлении от легкого к тяжелому газу 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 влияет на рост возмущений, который будет определяться первоначальным импульсом ускорения контактной границы ударной волны.

Все сказанное выше относится к течению в ацетиленовой ударной трубе до выхода на границу ударной волны, отраженной от стенки 2. В случае ударной трубы, построенной по схеме, приведённой на рис. 9, 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. 11,б и 12). 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 действие РМ- и РТ – неустойчивостей.

Аналогичные особенности развития неустойчивости на границе - продукты детонации газовой смеси и воздуха - наблюдаются в цилиндрической геометрии [22]. В этом случае роль жесткой стенки 1 играет ось симметрии системы слоев газовая смесь-воздух, на которой расположена тонкая проволочка, взрываемая 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. Необходимо также отметить тот факт, что деструкция пленки разделяющей газы на исследуемой границе позволяет использовать ацетиленовую ударную трубу для исследования структуры зоны турбулентного перемешивания на границе газ-газ.

Заключение

Таким образом, результаты экспериментальных наблюдений указывают на существование в структуре развитой ЗТП на неустойчивой контактной границе, движущейся с ускорением, особенности в виде постоянного существования скачка концентрации на краю ЗТП, граничащей с более тяжелой средой. Подобный скачок концентрации более тяжелой среды существует как в случае границы газ – жидкость, так и случае границы газ – газ. Постоянное (и ускоренное) развитие ЗТП в обоих случаях определяется развитием неустойчивостей границы между тяжелой средой и ЗТП. В случае газ – жидкость развитие неустойчивостей этой границы осуществляется путем проникновения в жидкость ансамбля пузырей газа (которые по существу являются пузырями Тейлора) и устойчивость их куполов является гарантом развития ЗТП; а в случае газ – газ тяжелый газ проникает в ЗТП в форме струй. Неустойчивость Кельвина – Гельмгольца на боковой поверхности этих струй приводит к перемешиванию тяжелого газа с легким. Постоянство существования скачка концентрации на границе тяжелый газ – ЗТП обеспечивает постоянство развития ЗТП.

В случае совместного действия РТ- и РМ– неустойчивостей, возникающем при ускорении контактной границы нестационарной ударной волной, возможны ситуации, когда они ослабляют действия друг друга.

Тем самым, в проблеме гидродинамических неустойчивостей (РТ- и РМ– неустойчивости) и развития зоны турбулентного перемешивания существуют особенности, дальнейшее исследование которых представляет несомненный интерес.

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 (Prinston, USA, 1988), 1992, pp.473-503.
6. V.Andronov,I.Zhidov, E.Meshkov, N.Nevmerzhitsky, 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. E.E.Meshkov. Shock tube investigations of the instability of a two-gas interface accelerated by a shock wave // Abstracts of the Intern. Confer. "Turbulent Mixing and Beyond", 27 July-07 August 2009г., Trieste, Italy, p.115. (Обзор был представлен также на 27-th ISSW, Book of Proc. 27-th ISSW, St.Petersburg, Russian, 19-24 July 2009, p.6).
8. Е.Е.Мешков. Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах. // Саров, 2006, 138 с.
9. И.Г.Жидов, Е.Е.Мешков, Н.В.Невмержицкий. Экспериментальное исследование динамики перемешивания на неустойчивых границах ускоряемых жидких слоев. // В сб.статьй: В.Б.Розанов и др. Экспериментальное исследование гравитационной неустойчивости и турбулентного перемешивания стратифицированных потоков в поле ускорения в связи с задачами инерциального термоядерного синтеза. Препринт ФИАН им.Лебедева, N 56, 1990, с.52-63. г.
10. E.E.Meshkov, D.E.Meshkov, V.S.Sivolgin, Research of the Character of Flow Depending on Volume of Floating Air Bubble.// Proc. of 10th IWPCTM, Editors M.Legrand, Paris, France 17-21 July, 2006, p.p. 238-243.
11. A.S.Katorov, S.E.Kuratov, E.E.Meshkov, I.Yu.Myshkina, O.V.Olkhover, A.A.Polovnikov, E.A.Polovnikov, S.Yu.Sedov, K.V.Tsiberev. Experimental and analytical investigations of various motion conditions for a Taylor bubble in coaxial cylindrical tubes // Proc. of the Intern. Confer. "Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres-2009", Moscow, 2010, editors, p.p.202-206.
12. Yu.B.Bazarov, S.E.Kuratov, D.E.Meshkov, E.E.Meshkov, O.V.Ol'khov, S.Yu.Sedov, and V.S.Sivolgin. Analysis of hydrodynamic instability growth in a 2D flow // Abstracts of the Intern. Confer. "Turbulent Mixing and Beyond", 27 July-07 August 2009г., Trieste, Italy, p.26.
13. Е.Е.Мешков, Н.В.Невмержицкий, В.Г.Рогачев, Ю.В.Янилкин. О возможной роли масштабного фактора в проблеме турбулентного перемешивания // Труды международной конференции V Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 17-21 марта 2003, стр.415-420.
14. 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.

15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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 & B.Boston, 1995, P.237.
19. 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.
20. 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 // Сб. тезисов докладов Международной Конференции «VII Харитоновские Тематические Научные Чтения», 14-18 марта, 2005, с.312
21. V.I.Dudin, E.V.Gubkov, E.E.Meshkov, A.A.Nikulin, A.L.Stadnik, V.P.Statsenko, V.A.Til'kunov, Y.A.Vlasov, V.V.Bashurov, E.A.Bykova, V.I.Tarasov, Y.V.Yanilkin and V.A.Zhmailo. The perturbations and turbulent mixing evolution at the plane gas-gas interface in GEM-driven shock-tube experiments.// Proceedings of the 6th IWPCTM, Marseille 18-21 June 1997, p. 152-160
22. 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 10th IWPCTM, Paris, France Jule 17-21,2006, p.p. 244-248.
23. Никифоров В.В. Турбулентное перемешивание на контактной границе разноплотных сред. // ВАНТ, сер. Теор. и прикл. физика. Вып.1, 1985, 3.