

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА – МЕШКОВА НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗНОПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД С ОДНОМОДОВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

А.А. Тяктев, А.В. Павленко, Н.Б. Аникин, Ю.А. Пискунов, И.Л. Бугаенко, dep5@vniitf.ru
Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ – ВНИИТФ)

На вертикальной многофункциональной ударной трубе (МУТ) с внутренним сечением канала $138 \times 138 \text{ мм}^2$ экспериментально исследовалось развитие неустойчивости Рихтмайера – Мешкова (РМ) на контактных границах разноплотных газовых сред.

В первой части работы описаны эксперименты, направленные на исследование развития одномодовых 2D начальных возмущений границы раздела газовых сред, под действием неустойчивости Рихтмайера – Мешкова. Использовались газовые системы с начальным числом Атвуда 0.2 и 0.7. Контактная граница с одномодовыми возмущениями создавалась с использованием технологии жидких разделительных мембран. Отношение амплитуды к длине волны начальных возмущений $a/\lambda = 0.14$, число Маха ударной волны в экспериментах составляло ~ 1.2 . Экспериментальные результаты сравнивались с моделью К. Микаэляна.

Вторая часть описывает предложенный и опробованный новый способ формирования границы раздела разноплотных газов в экспериментах по изучению гидродинамических неустойчивостей на ударных трубах в результате горения бедной водородо-воздушной смеси. Проведены первые эксперименты в двух однородных смесях водорода в воздухе: 6 % и 16 % по объёму. В этом случае фронт пламени, образовывал 3D границу раздела разноплотных газов, по толщине не превышающей 1 мм. Концентрация водорода определяла перепад плотности на поверхности пламени, а также форму пламени. Представлены результаты по взаимодействию ударной волны с такими 3D возмущениями.

ВВЕДЕНИЕ

Неустойчивость РМ возникает при прохождении ударных волн через границу раздела сред разной плотности [1], [2]. Неустойчивость границы раздела имеет место, как при переходе ударной волны из более легкой среды в более тяжелую, так и в обратном направлении.

Неустойчивость РМ получает запас энергии за короткий промежуток времени, пока прошедшая УВ и отраженная волна не отошли от границы раздела, на расстояние гораздо большее длины волны возмущений. Дальнейшее развитие возмущений на границе происходит, в основном, по инерции [3].

Наиболее удобными тестовыми экспериментами при моделировании гидродинамических неустойчивостей, в частности неустойчивости РМ, являются эксперименты с известными начальными возмущениями границы раздела разноплотных сред.

К таким экспериментам можно отнести эксперименты с возмущением геометрии границы раздела. В наиболее простом случае – это периодические начальные возмущения, с одной амплитудой и длиной волны (одномодовые начальные возмущения), которые под действием неустойчивости, проходят в своем развитии ряд стадий (линейную, нелинейную, переходную) в итоге переходя в турбулентное перемешивание.

В РФЯЦ – ВНИИТФ большая часть экспериментальных работ была направлена на исследование автомодельной стадии развития зоны турбулентного перемешивания (развитой турбулентности). С другой стороны во многих, практически важных задачах стадии развитой турбулентности возможно не наступает. Поэтому исследование линейной, нелинейной стадий развития возмущений и переход к турбулентности (ламинарно – турбулентный переход) являются важными задачами.

В представляемой работе экспериментально изучается развитие одномодовых 2D возмущений границы раздела разноплотных газовых сред под действием неустойчивости

PM. Приводятся результаты экспериментов с двумя числами Атвуда 0.2 и 0.7. Экспериментальные результаты сравниваются с моделью К. Микаэляна [4].

Экспериментальные исследования гидродинамических неустойчивостей на границе раздела газовых сред на ударных трубах наталкиваются на проблему разделения исследуемых газов в процессе подготовки эксперимента. Существующая экспериментальная практика предполагает мембранные [2] и «без мембранные» [5] способы разделения.

В первом способе [2] на границе разноплотных газов располагают тонкую мембрану, предотвращающую взаимодействие газов до начала эксперимента. Обычно такая мембрана опирается на сетку микро проводников и после взаимодействия с УВ разрезается на кусочки с характерным размером равным площади ячейки сетки. Материал мембраны присутствует в зоне перемешивания, влияет на тонкие движения газа, искажает течения в зоне перемешивания, что является отрицательным моментом.

При использовании «без мембранной» [5], [6] технологии исследуемые газы заполняют внутренний объем ударной трубы с противоположных сторон. Тяжелый газ продувается снизу, легкий сверху до отверстий (слотов) в боковых стенках специального отсека ударной трубы через которые они истекают в окружающую атмосферу. В области соприкосновения газов образуется диффузионный слой. Подбором объемного расхода газов добиваются наименьшей толщины диффузионного слоя (~ 10 мм). Такая граница раздела свободна от третьего вещества (разделительной мембраны). С другой стороны наличие диффузионного слоя влияет на задержку в развитии перемешивания, что необходимо учитывать.

Авторами данной работы предложен новый способ формирования границы раздела разноплотных газов в экспериментах по изучению гидродинамических неустойчивостей РТ и РМ на ударных трубах.

В этом способе система разноплотных газов формируется в результате горения бедной водородо-воздушной смеси. При горении фронт пламени является границей раздела системы разноплотных газов: легкий газ – продукты сгорания, тяжелый газ – несгоревшая водородо – воздушная смесь. В этом случае фронт пламени, который образует границу раздела разноплотных газов, по толщине не превышает ~ 0.1 - 1 мм, что является рекордно низким значением для экспериментов по изучению гидродинамических неустойчивостей в разноплотных газовых системах.

Исследование развития неустойчивости РМ на контактных границах разноплотных газовых сред с 2D одномодовыми начальными возмущениями

Постановка экспериментов

Установка

Эксперименты проводились на вертикальной многофункциональной ударной трубе (МУТ), с поперечным сечением внутреннего канала 138×138 мм², которая состояла из трех основных частей (см. рисунок 1).

В верхней части ударной трубы располагался драйвер УВ длиной 1.78 м. Драйвер УВ отделялся от отсеков с исследуемыми газами мембраной из лавсановой пленки. Далее располагался отсек с легким газом плотностью ρ_1 длиной 2.92 м, после которого установлен отсек с тяжелым газом плотностью $\rho_2 > \rho_1$ длиной 2.615 м. Исследуемые газы находились при нормальных условиях и разделялись жидкой разделительной мембраной синусоидальной формы толщиной ~ 1 мкм.

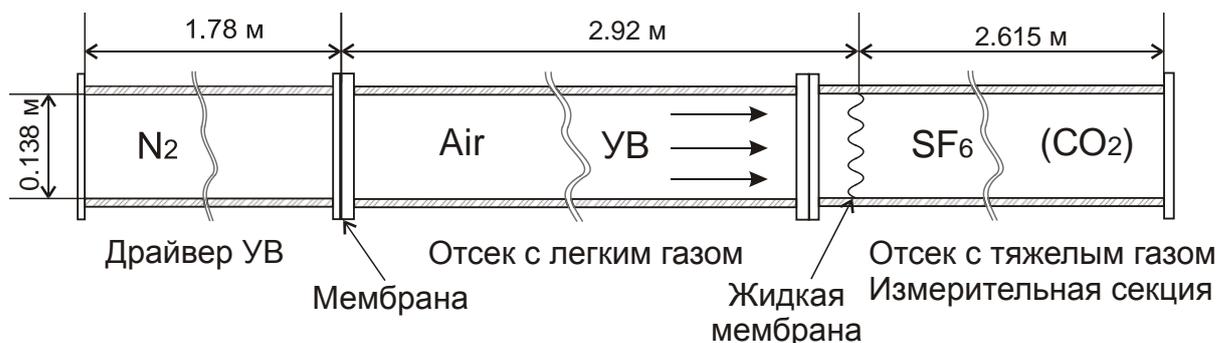


Рисунок 1 – Схема МУТ при проведении экспериментов с 2D начальными возмущениями (неустойчивость РМ)

Отсек с тяжелым газом включал в себя две измерительные секции, снабженные прозрачными окнами высотой 0.2 м, позволяющими проводить теневую скоростную фоторегистрацию развития возмущений контактной границы исследуемой системы газов, а также измерять траекторию (скорость) распространения ударной волны в тяжелом газе. Установка была оборудована двумя датчиками давления, расположенными в отсеке с легким газом на расстояниях 0.3 м и 1.8 м соответственно от середины зоны начальных возмущений, что позволяло измерять скорость ударной волны в легком газе.

Разноплотные газы продували соответствующие отсеки в течении 35 мин., при этом на месте жидкой мембраны устанавливалась жесткая перегородка. Затем в драйвере УВ создавалось избыточное давление (использовался азот), после чего жидкая мембрана с помощью шлюзового устройства вставлялась в канал ударной трубы. Продувка газов не прекращалась и продолжалась еще в течение 2-ух минут после установки жидкой мембраны.

В начальный момент времени мембрана из лавсановой пленки, разделяющая драйвер УВ и исследуемые газы, принудительно разрывалась. После чего, формировалась стационарная УВ, которая распространялась по легкому газу, разрушала жидкую разделительную мембрану и импульсно ускоряла ее.

В результате импульсного ускорения системы разноплотных сред, под действием неустойчивости РМ происходил рост амплитуды возмущений границы раздела газов, формируя зону перемешивания.

Начальная граница раздела газов. 2D возмущения

На рисунке 2 приведено фотоизображение рамки с леской и нанесенной на нее жидкой разделительной мембраной. В экспериментах такая рамка располагалась в канале ударной трубы и разделяла исследуемые газы до проведения эксперимента.

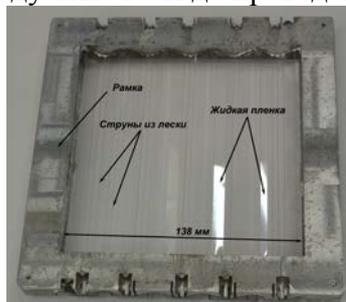


Рисунок 2 – Фотоизображение рамки с леской и нанесенной на нее жидкой разделительной мембраной – одномодовые 2D возмущения

Жидкая разделительная мембрана, наносилась на 31 струну из лески, натянутую внутри рамки с внутренним сечением $138 \times 138 \text{ мм}^2$ и образовывала двумерную поверхности раздела. Толщина лески 0.23 мм. 31 струна служила образующими поверхности контактной границы с амплитудой $a \sim 4 \text{ мм}$ и длиной волны $\lambda \sim 28 \text{ мм}$.

По координатам струн, заданным в чертежной документации рамки, на рисунке 3 построен профиль сечения такой двумерной поверхности (экспериментальный профиль, сплошная линия).

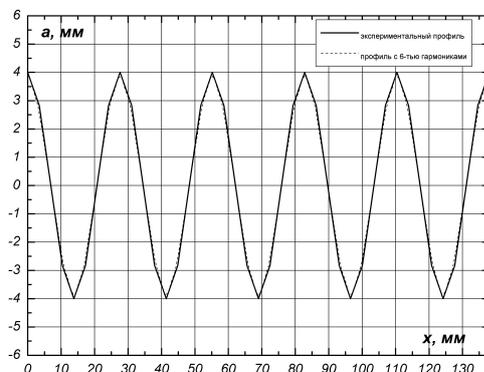


Рисунок 3 – Профиль сечения двумерной поверхности раздела газов

Фурье – анализ экспериментального профиля, приведенного на рисунке 3, показывает доминирующую пространственную частоту в спектре (см. рисунок 4), соответствующую длине волны $\lambda = 27.6 \text{ мм}$, что составляет $1/5$ от величины ширины канала установки $L_x = 138 \text{ мм}$. Кратные основной частоте гармоники с соответствующими длинами волн $\lambda/3$, $\lambda/5$, $\lambda/7$, $\lambda/9$ и $\lambda/11$ существенно меньше по амплитуде.

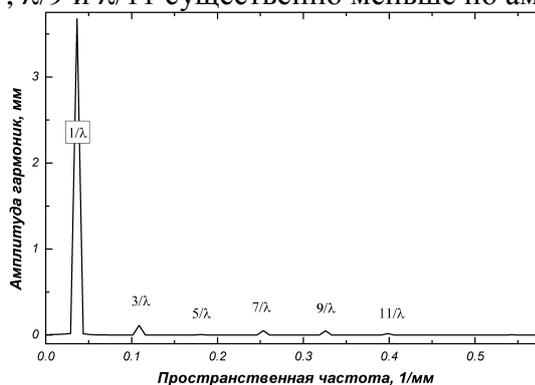


Рисунок 4 – Амплитуды гармонических составляющих экспериментального профиля сечения двумерной поверхности раздела газов

На рисунке 3 также приведен расчетный профиль сечения двумерной поверхности по зависимости: $a(x) = \sum_{i=1,3..11} A_i * \cos(\frac{2\pi * i}{\lambda} * x)$ (профиль с 6-тью гармониками, пунктирная линия). Амплитуда A_i соответствующих гармонических составляющих приведена в таблице 1. Экспериментальный и расчетный профили удовлетворительно совпадают.

Таблица 1 – Амплитуда гармонических составляющих начальных возмущений

i	1	3	5	7	9	11
$A_i, \text{ мм}$	3,677	0,115	0,008	0,053	0,051	0,019

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Перед проведением экспериментов были проведены предварительные, оценочные одномерные расчеты ударно-волнового течения (X - t диаграммы на рисунках 5 а), б)) схемы приведенной на рисунке 1. Расчеты проводились по программе¹. Данная программа является свободно распространяемой и используется в оценочных расчетах на ударных трубах в WiSTL (Wisconsin Shock Tube Laboratory) и LANL².

В драйвере УВ – азот при избыточном давлении, в качестве легкого газа используется воздух, тяжелого – SF_6 (рисунок 5 а)) или CO_2 (рисунок 5 б)). Легкий и тяжелый газы находятся при нормальных условиях. В расчете не учитываются разделительные мембраны и перемешивание на разноплотных контактных границах газов.

В расчете $X = 0$ соответствует границе газов азот/воздух, $t = 0$ – момент распада разрыва на этой границе. В обоих случаях после распада разрыва (в плоскости $X = 0$) по воздуху распространяется стационарная УВ. В обратную сторону распространяются волны разрежения (ВР). Достигнув координаты границы разноплотных газов ($t \sim 7$ мс) в плоскости $X = 2.92$ м, УВ импульсно ускоряет границу разноплотных газов и распространяется далее по тяжелому газу с меньшей скоростью. Импульсно ускорившись, граница разноплотных газов движется с постоянной скоростью до момента взаимодействия с ВР, отраженными от жесткой стенки отсека высокого давления. На границе разноплотных газов происходит развитие возмущений в результате действия неустойчивости РМ.

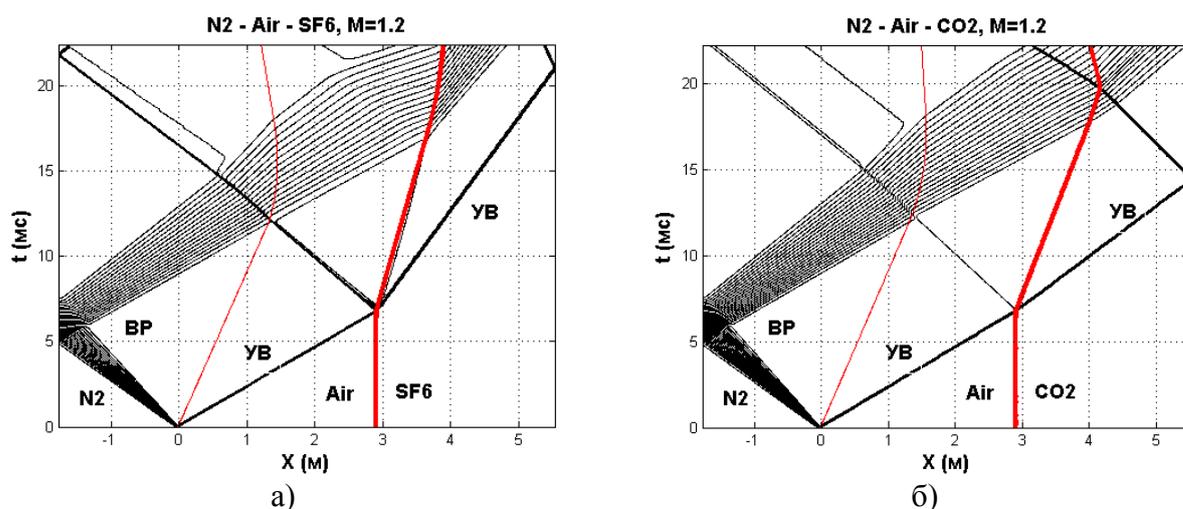


Рисунок 5 – X - t диаграммы ударно-волнового течения в ударной трубе при проведении экспериментов с исследуемыми системами газов: а) воздух/ SF_6 , б) воздух/ CO_2

Проведя такие оценки картины течения, мы расположили измерительные секции таким образом, чтобы провести исследования развития возмущений контактной границы разноплотных газов при однократном взаимодействии с УВ до взаимодействия с отраженными от жестких стенок ВР и УВ.

14 экспериментов проведены с системой воздух/ SF_6 (число Атвуда $A=0.7$). С системой воздух/ CO_2 (число Атвуда $A=0.2$) проведено 7 экспериментов.

Диапазоны регистрации положения фронтов зоны перемешивания находились в пределах $10 \text{ мм} < X < 160 \text{ мм}$ и $340 \text{ мм} < X < 530 \text{ мм}$ ($X=0$ – соответствует положению середины зоны начальных возмущений). Время наблюдения при этом не превышало 6 мс

¹ “Gas Dynamics Calculator”, <http://silver.neep.wisc.edu/~shock/tools/gdcalc.html>

² В.М. Wilson, R. Mejia-Alvarez, К.Р. Prestridge “Single-Interface Richtmyer-Meshkov turbulent mixing at the Los Alamos Vertical Shock Tube”. J. of Fluids Eng., July 2016, Vol.138

(для системы с $A=0.2$) и 8 мс (для системы с $A=0.7$) после взаимодействия УВ с контактной границей. Видео съемка осуществлялась скоростной цифровой видеокамерой с частотой 8600 Гц. Размер каждого фотоизображения 1028×840 пикселей.

Пространственное разрешение фотоизображений составило ~ 4 пиксела/мм.

Для пояснения картины регистрируемого явления, на рисунке 6 приведено фотоизображение, полученное в эксперименте № 9 с исследуемой системой воздух/ SF_6 (число Атвуда $A=0.7$).

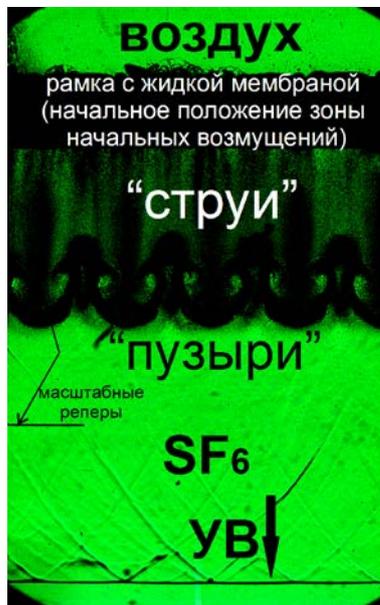
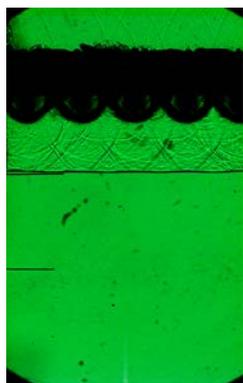


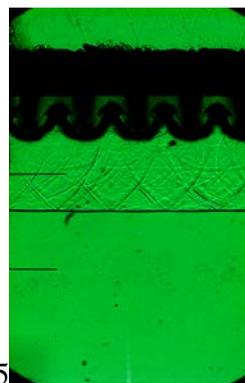
Рисунок 6 – Фотоизображение полученное в эксперименте № 9 с исследуемой системой воздух/ SF_6 (число Атвуда $A=0.7$) на момент $t = 0.88$ мс после взаимодействия зоны начальных возмущений с УВ

На рисунке 6 УВ распространяется из легкого газа (воздух) в тяжелый (SF_6). При воздействии УВ контактная граница разноплотных газов становится неустойчивой по критериям РМ и начинается рост начальных возмущений. За момент времени $t=0$ принимается время прохождения УВ через нулевую координату, показанную на рисунке 3. Со временем «пузыри» легкого вещества «проваливаются» в тяжелое, «струи» тяжелого вещества «растут» в легком. Для определения координат положения УВ, границ «пузырей» и «струй» на измерительной камере установлены два масштабных репера (расстояние между реперами 50 мм). Время регистрации определялось по метаданным видеофайла посредством программного обеспечения скоростной цифровой видеокамеры.

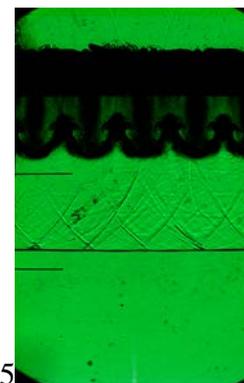
На рисунке 7 приведена последовательность фотоизображений, полученных в эксперименте № 9 с исследуемой системой воздух/ SF_6 (число Атвуда $A=0.7$).



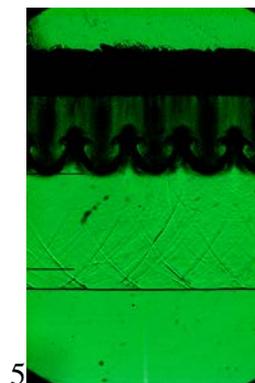
$t = 0.3 \text{ mc}$



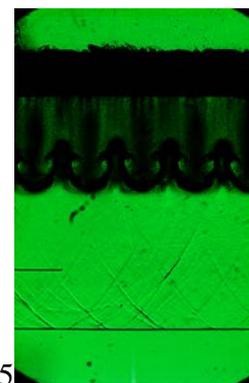
$t = 0.42 \text{ mc}$



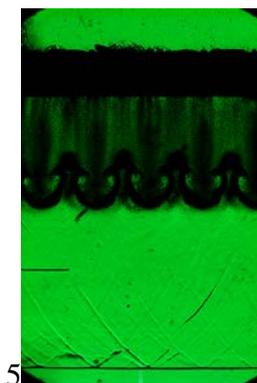
$t = 0.53 \text{ mc}$



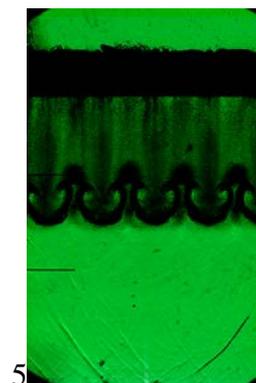
$t = 0.65 \text{ mc}$



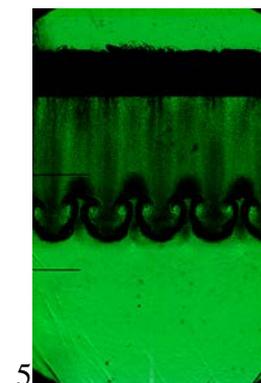
$t = 0.77 \text{ mc}$



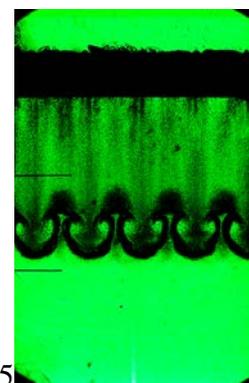
$t = 0.88 \text{ mc}$



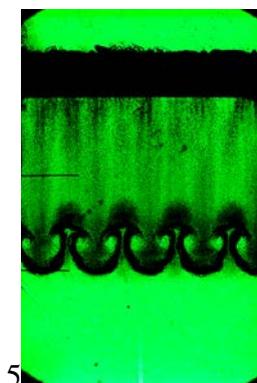
$t = 1.0 \text{ mc}$



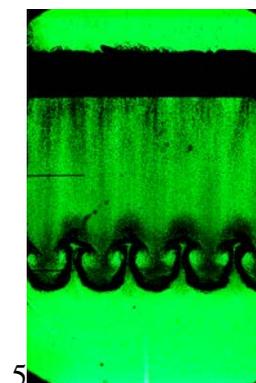
$t = 1.12 \text{ mc}$



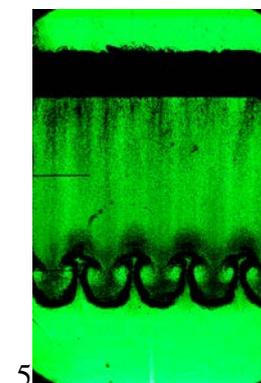
$t = 1.23 \text{ mc}$



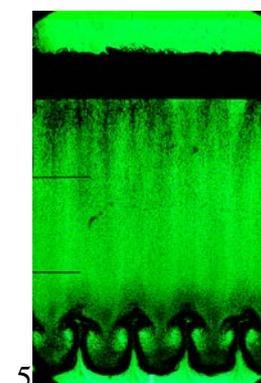
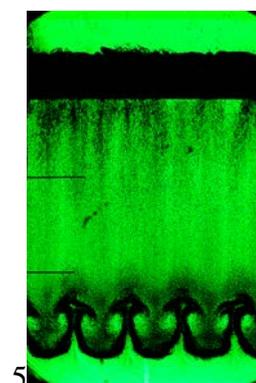
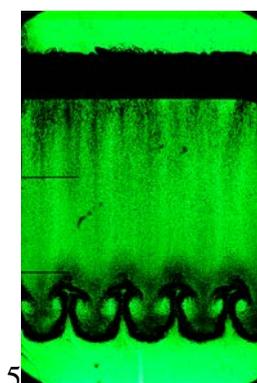
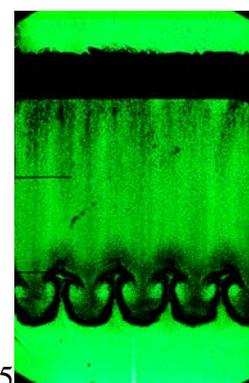
$t = 1.35 \text{ mc}$



$t = 1.46 \text{ mc}$



$t = 1.58 \text{ mc}$



t = 1.7 мс

t = 1.81 мс

t = 1.92 мс

t = 2.05 мс

Рисунок 7 – Последовательность фотоизображений, полученных в эксперименте №9 с исследуемой системой воздух/SF₆ (число Атвуда A=0.7)

Под каждым изображением приведено время регистрации от нулевого момента времени, соответствующего приходу УВ в координату середины зоны начальных возмущений.

Из эксперимента определялась скорость D_2 УВ в тяжелом газе, время начала взаимодействия УВ с возмущениями границы раздела газов - t_{sw} . По соотношению: $u_2 = \frac{2}{\gamma_2 + 1} \left(M_2 - \frac{1}{M_2} \right) c_2$ вычислялась скорость течения за фронтом УВ (γ_2 - показатель адиабаты тяжелого газа, c_2 - скорость звука в тяжелом газе, $M_2 = D_2/c_2$ - число Маха ударной волны в тяжелом газе).

Скорость УВ в легком газе (воздухе) D_1 определялась по осциллограммам, полученным с датчиков давления. «Снимок» экрана осциллографа в эксперименте № 9 представлен на рисунке 8.

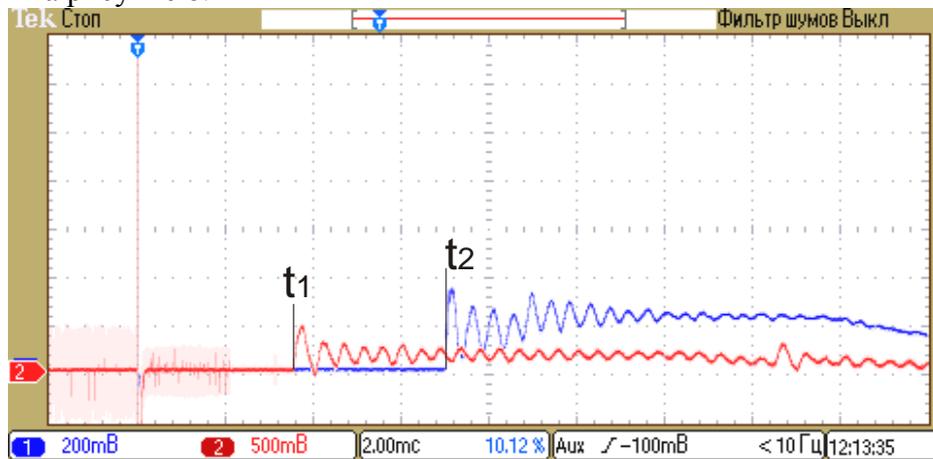
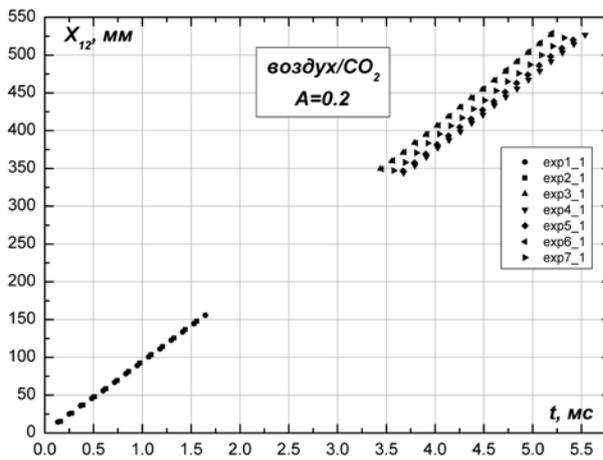


Рисунок 8 – «Снимок» экрана осциллографа в эксперименте №9. Регистрация сигнала с датчиков давления, расположенных в отсеке с легким газом

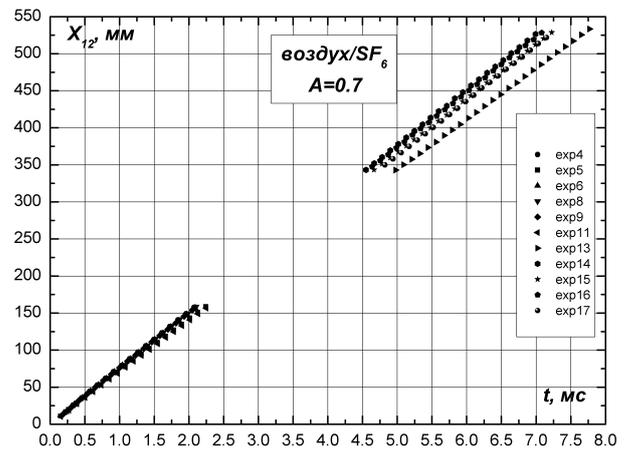
Датчики давления подключались на разные каналы осциллографа. При приходе УВ на датчик происходило возрастание амплитуды электрического сигнала на выходе датчика, регистрируемое осциллографом. Определяя время начального повышения амплитуды сигналов обеих зарегистрированных осциллограмм, и, зная расстояние d между датчиками, определялась скорость УВ D_1 в легком газе: $D_1 = d/(t_2 - t_1)$.

По фотоизображениям для каждого эксперимента с газовыми системами с $A=0.2$ и $A=0.7$ определены временные зависимости траектории фронта проникновения легкого вещества в тяжелое $X_{12}(t)$. Полученные зависимости представлены на рисунках 9 а) и 9 б).

Определение траектории фронта проникновения тяжелого вещества в легкое $X_{21}(t)$ наталкивается на определенные сложности. Основной причиной этого являются частицы жидкой разделительной мембраны, образующиеся после прохождения УВ через зону перемешивания на стадии нелинейного роста начальных возмущений и движущиеся вместе и за зоной перемешивания.



а) воздух/CO₂



б) воздух/SF₆

Рисунок 9 – Одномодовые 2D возмущения. Временные зависимости траектории фронта проникновения легкого вещества в тяжелое $X_{12}(t)$ для исследуемых газовых систем

На рисунке 10 а) показано одно из экспериментальных фотоизображений. На рисунке 10 б) приведена зависимость усредненной, по ширине фотоизображения, интенсивности прошедшего через измерительный отсек света в зависимости от координаты $\bar{I}(x)$. Фронт легкого в тяжелом X_{12} достаточно контрастен, тяжелого в легком X_{21} размыт по указанным выше причинам.

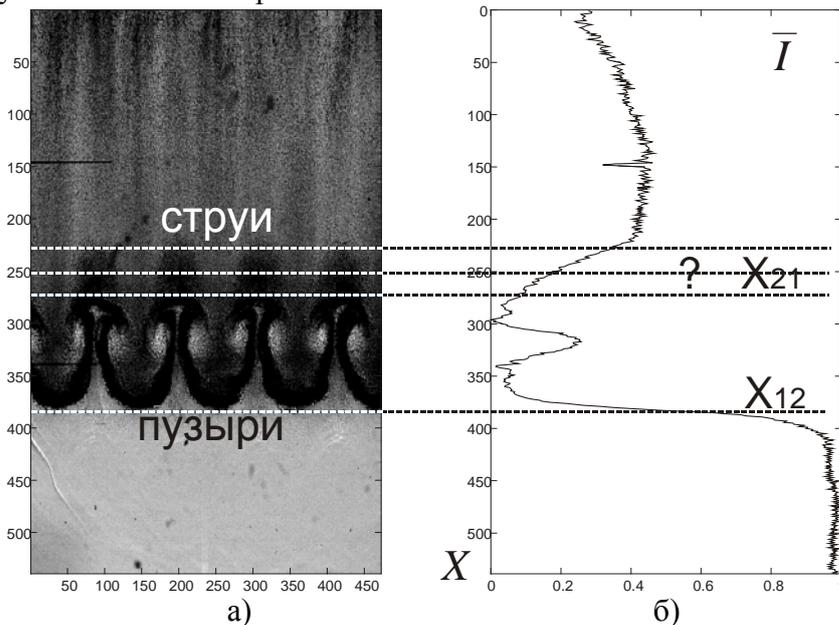


Рисунок 10 – а) экспериментальное фотоизображение; б) зависимость средней по ширине фотоизображения интенсивности прошедшего света $\bar{I}(x)$ в зависимости от координаты

Поэтому в данной работе применен следующий подход. Рассчитывались координаты $X_{21}(t)$ («струи») с использованием аналитической модели [4] и наносились на экспериментальные фотоизображения. Такой подход является качественным и сравнительным, поскольку параметры модели подбирали по результатам экспериментов проведенных при других условиях формирования контактной границы.

Кратко опишем приведённую в [4] модель. Развитие возмущений границы раздела исследуемых сред после прохождения ударной волны описывается двумя уравнениями:

1. Начальное развитие возмущений до момента t^* ($t \leq t^*$):

$$h = h_0 + 2\alpha\Delta Vt,$$

где $h = h^b$ или h^s (ширина зоны перемешивания относительно середины начальных возмущений в сторону тяжелого вещества или легкого, соответственно) и $\alpha = \alpha^b$ или α^s (безразмерная константа); $h_0 = h_0^b$ или h_0^s (начальная (в момент времени $t = 0$) ширина возмущений в тяжелом и легком, соответственно), t – время после взаимодействия с УВ. То есть до момента t^* возмущения развиваются прямо пропорционально времени ($h \sim t$).

2. Развитие возмущений после момента t^* ($t \geq t^*$):

$$h = h^* \left(1 + \frac{\dot{h}^*}{\Theta h^*} (t - t^*)\right)^\Theta,$$

где $h^* = h_0 + 2\alpha A \Delta V t^*$, $\dot{h}^* = 2\alpha A \Delta V$ и $\Theta (= \Theta^b$ или $\Theta^s)$ безразмерный параметр, определенный из экспериментов [4]. После момента t^* возмущения развиваются по степенному закону ($h \sim t^\Theta$).

3. Момент времени t^* определяется как:

$$t^* = \frac{(1+2\alpha\beta A)h_{before} - h_{after}}{2\alpha A \Delta V},$$

где $h_{before} = h_0^b + h_0^s$, $h_{after} = h_{before} \left(1 - \frac{\Delta V}{W}\right)$, $\alpha = \alpha^b + \alpha^s$, β – безразмерная константа.

Для моделирования экспериментов необходимо 2 типа входных параметров:

1. Динамические параметры (определяемые в эксперименте ($A, W_i, \Delta V_{shock}$)); (A – число Атвуда, W_i – скорость УВ, ΔV_{shock} – «скачок» скорости на границе раздела разноплотных газов после прохождения УВ).

2. Безразмерные параметры ($\alpha^b, \alpha^s, \theta^b, \theta^s$ и β). Использованы безразмерные параметры как в работе [4], указанные в таблице 2:

Таблица 2 – Безразмерные параметры

α^b	α^s	θ^b	θ^s	β
0.06	0.1	0.25	0.36	6

Результат такой обработки проиллюстрирован на рисунках 11, 12 для системы газов воздух/SF₆ и на рисунке 13 для системы газов воздух/CO₂. Фронт проникновения X₂₁ (струи) рассчитан по экспериментальным данным и модели [4]

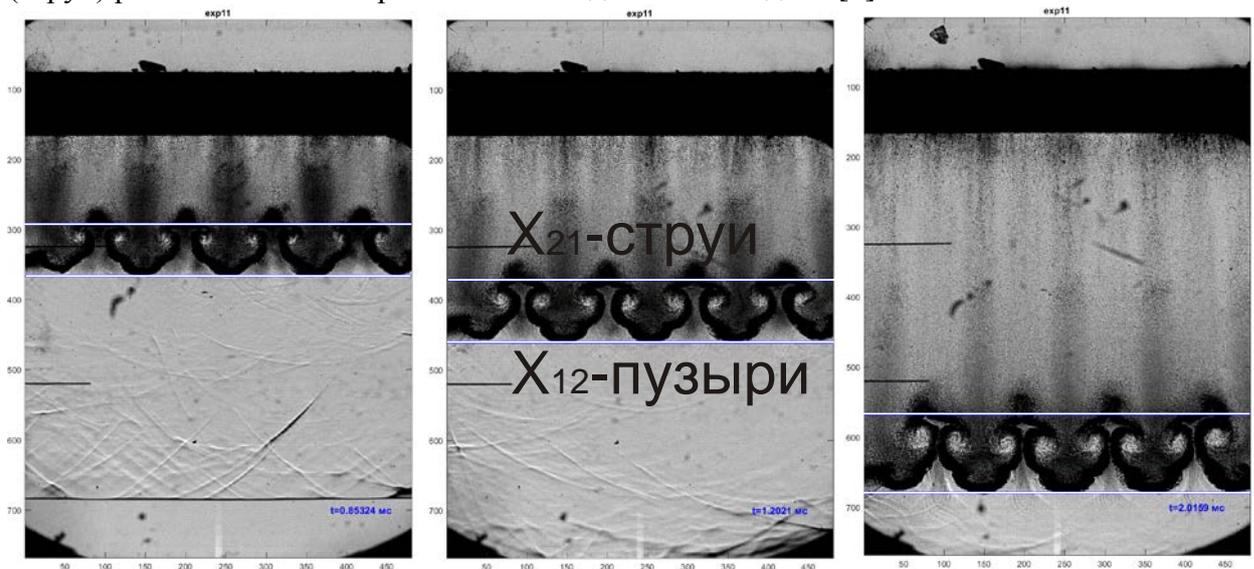


Рисунок 11 – Эксперимент № 11. Экспериментальные фотоизображения развития возмущений на ранней стадии для системы газов воздух/SF₆. Фронт X₁₂ проникновения пузырей определен экспериментально, фронт струй X₂₁ рассчитан по модели [4]

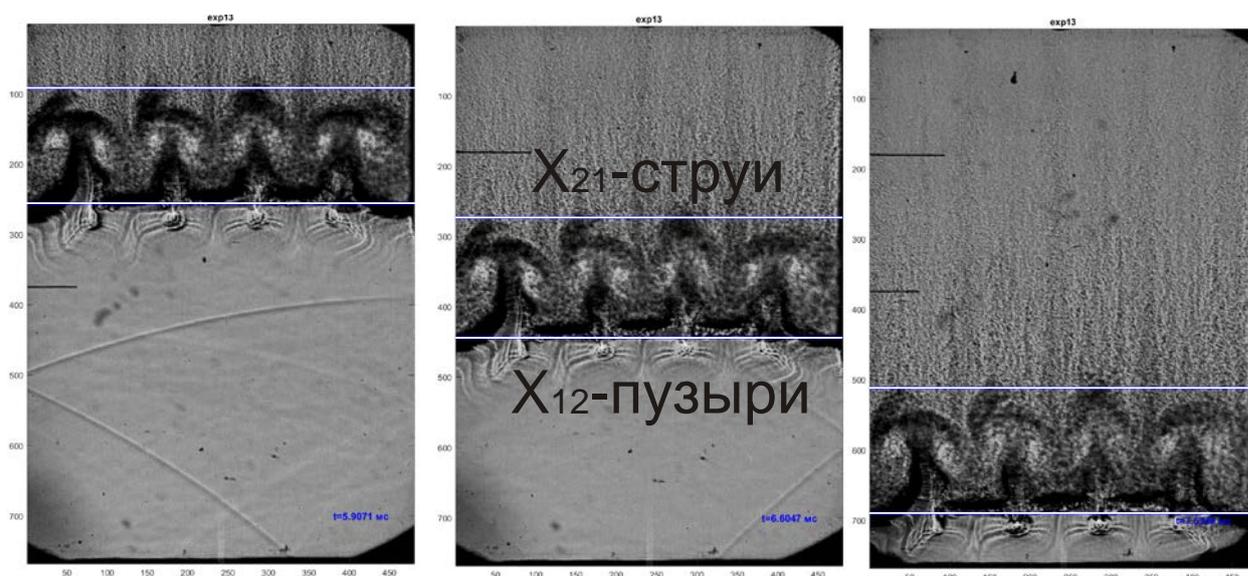


Рисунок 12 – Эксперимент № 13. Экспериментальные фотоизображения развития возмущений на поздней стадии для системы газов воздух/SF₆. Фронт X₁₂ проникновения пузырей определен экспериментально, фронт струй X₂₁ рассчитан по модели [4]

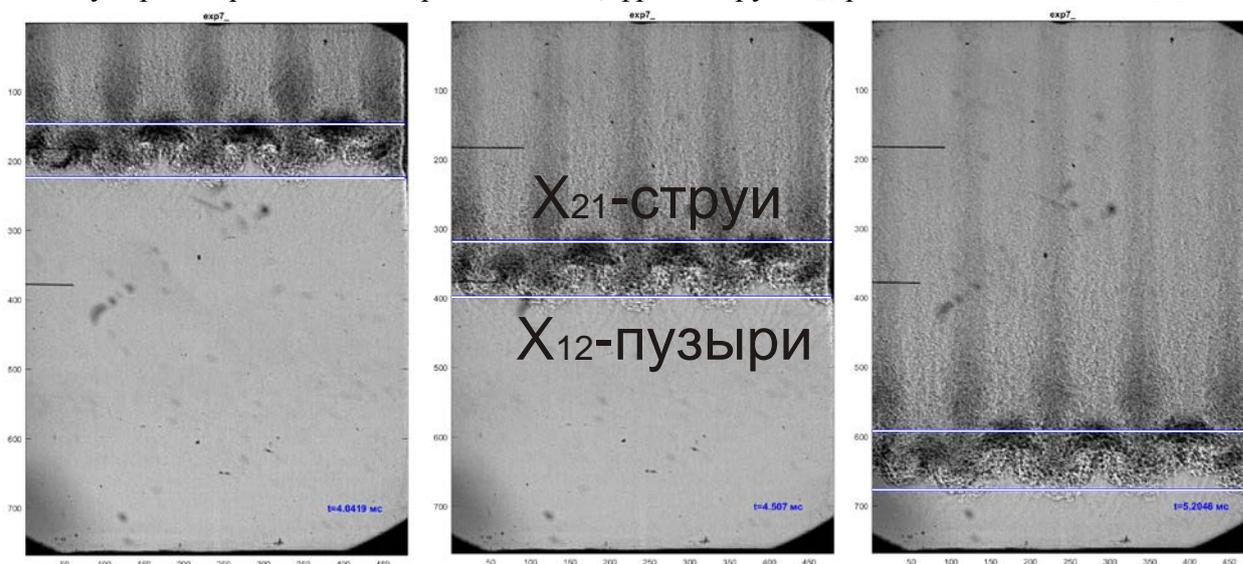
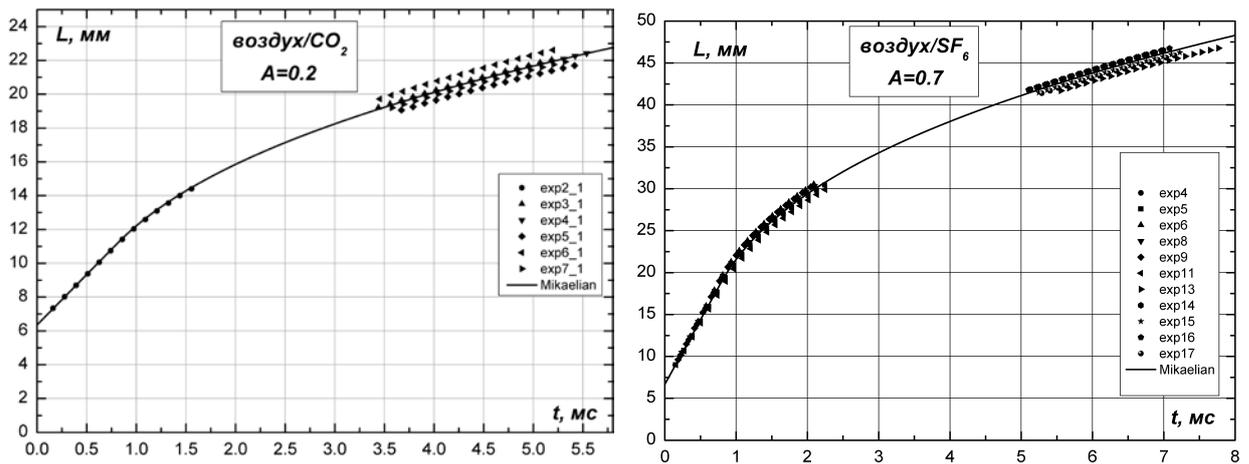


Рисунок 13 – Эксперимент № 7. Экспериментальные фотоизображения развития возмущений на поздней стадии для системы газов воздух/CO₂. Фронт X₁₂ проникновения пузырей определен экспериментально, фронт струй X₂₁ рассчитан по модели [4]

Полученные временные зависимости ширины зоны перемешивания $L(t)$ представлены на рисунке 14

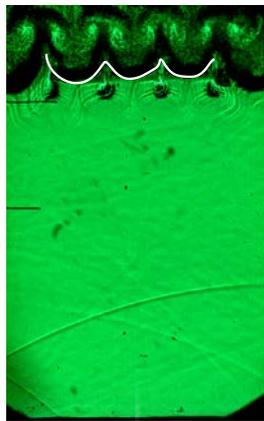


а)

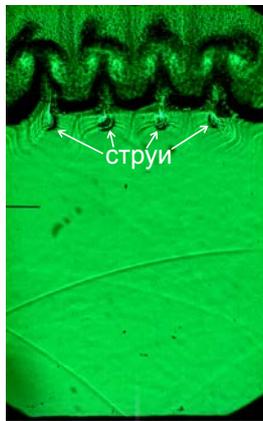
б)

Рисунок 14 – Одномодовые 2D возмущения. Временные зависимости ширины зоны перемешивания для исследуемых газовых систем а) воздух/ CO_2 , б) воздух/ SF_6 . Символами обозначены экспериментальные значения с использованием модели [4], сплошной линией расчет по модели [4]

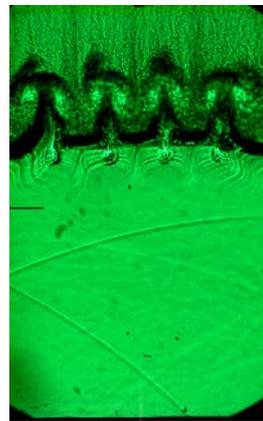
При проведении экспериментов с системой газов воздух/ SF_6 ($A=0.7$) были отмечены особенности в развитии возмущений. Как видно из рисунка 15 при $t > 5$ мс начинается взаимодействия начальных возмущений: 1) со временем меняется форма пузыря – происходит его «сплющивание»; 2) визуализируются струи, развивающиеся снизу основных (на противоположном фронте зоны перемешивания).



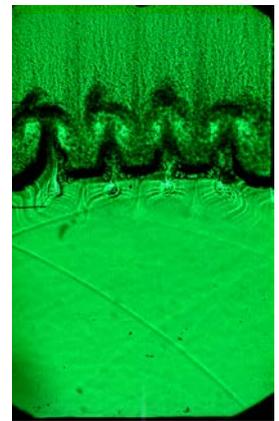
$t = 5.44$ мс



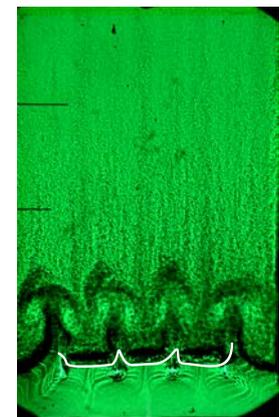
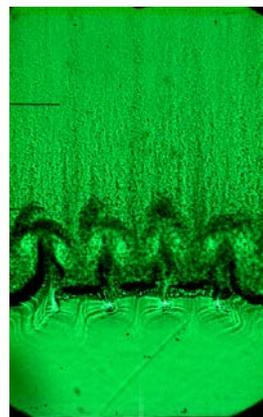
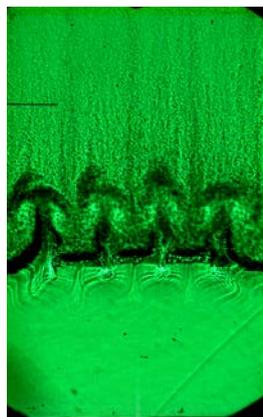
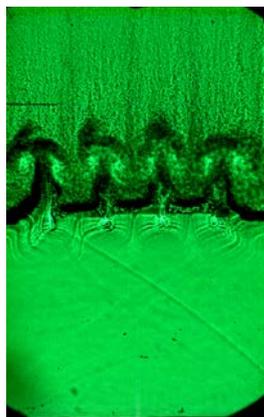
$t = 5.67$ мс



$t = 5.91$ мс



$t = 6.14$ мс



$t = 6.37 \text{ мс}$

$t = 6.72 \text{ мс}$

$t = 6.95 \text{ мс}$

$t = 7.3 \text{ мс}$

Рисунок 15 – Эксперимент № 13. Развитие возмущений на поздней стадии с системой газов воздух/SF₆ (A=0.7)

Похожий результат – взаимодействие струй и их деформация наблюдался в экспериментах [6]. В [6] делается вывод, что «сплющивание» пузыря (flattening of the bubble) и появление струи (turbulent mix region ... beneath the spike) снизу основной происходит при комбинации в эксперименте высокого числа Маха УВ и высокого числа Атвуда (в [6] эксперимент проведен при A=0.95 и числе Маха УВ M=1.95). В [7] наблюдалась описанная выше вторая особенность – формирование струй с противоположной стороны зоны перемешивания.

В наших экспериментах число Маха УВ составляло M=1.2, A=0.7 и похожие эффекты в развитии возмущений.

Развитие возмущений для обеих серий экспериментов находится на нелинейной стадии. Перехода в развитую турбулентность не происходит.

Исследование развития неустойчивости РМ на контактных границах разноплотных газовых сред с 3D начальными возмущениями

Постановка экспериментов

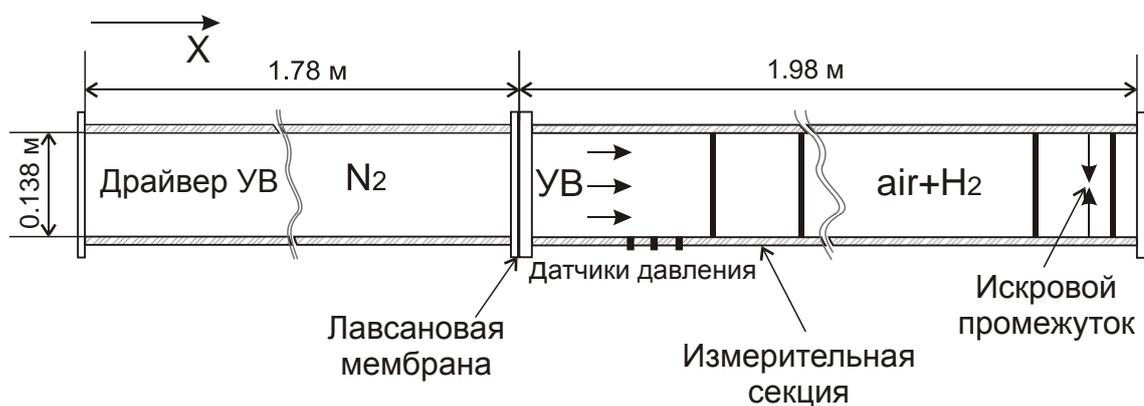
Установка

На многофункциональной ударной трубе (МУТ) проведены две серии экспериментов в двух различных вертикальных конфигурациях ударной трубы, схемы которых представлены на рисунке 16 а) и б). Разные конфигурации использовались для создания в трубе контактных границ разной формы и перепада плотностей, которые в обоих случаях представляли собой пламена, распространяющиеся в смесях с 6 % и 16 % водорода в воздухе для конфигураций схем 16 а) и б), соответственно.

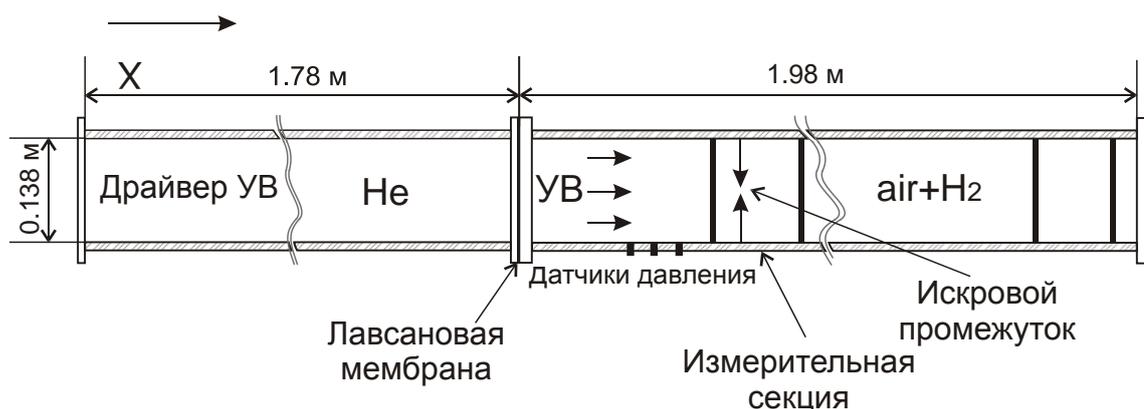
В обеих сериях экспериментов драйвер УВ длиной 1.78 м располагался в верхней части ударной трубы. Перед проведением эксперимента драйвер УВ отделялся от нижней части ударной трубы мембраной из лавсановой пленки и наполнялся азотом N₂ при 3 атм, (см. на рисунке 16 а)) или гелием He при 4 атм, (см. на рисунке 16 б)).

Нижняя часть ударной трубы длиной 1.98 м включала в себя две измерительных секции с оптическими окнами, с тремя установленными в боковой стенке датчиками давления и искровым промежутком. Два дифференциальных пьезодатчика (позволяют регистрировать производную давления, зависимость P(t) восстанавливается интегрированием) использовались для регистрации времени прихода УВ в сечения ударной трубы, в которых они были установлены. По этим измерениям оценивалась скорость УВ. Третий датчик давления (тензодатчик) регистрировал динамику надатмосферного давления в канале ударной трубы в процессе эксперимента. Взаимодействие ударной волны с неустойчивой контактной границей (фронтом пламени) исследовалось в измерительных секциях с помощью высокоскоростной теневой фоторегистрации.

Перед экспериментом нижняя часть ударной трубы предварительно вакуумировалась, а затем заполнялась до атмосферного давления предварительно перемешанной водородо – воздушной смесью заданного состава.



а) концентрация водорода в воздухе 6%;



б) концентрация водорода в воздухе 16 %

Рисунок 16 – Схема МУТ при проведении экспериментов с 3D начальными возмущениями (неустойчивость РМ)

Каждый эксперимент начинался с инициирования пламени высоковольтным разрядом в искровом промежутке. Фронт пламени, распространяющийся в водородо-воздушной предварительно перемешанной среде, представлял собой границу раздела разноплотных газов: тяжелый газ – несгоревшая водородо – воздушная смесь, а легкий газ – продукты сгорания водорода в воздухе.

В определенный момент времени, после инициирования пламени, лавсановая мембрана, разделяющая драйвер УВ и исследуемые газы, принудительно разрывалась. После разрыва мембраны, формировалась стационарная УВ, которая распространялась по тяжелому газу и импульсно ускоряла границу раздела разноплотных газов.

В результате импульсного ускорения начальные возмущения границы раздела разноплотных газов (пламени) трансформировались под действием неустойчивости РМ. Развитие возмущений на поверхности пламени является объектом настоящего экспериментального исследования.

Начальная граница раздела газов. 3D возмущения

Эксперименты были проведены в двух однородных смесях водорода в воздухе: 6 % и 16 % по объёму. Концентрация водорода определяет перепад плотности на поверхности пламени, а также форму пламени, что позволяет изменять, как число Атвуда, так и геометрию границы раздела газов, варьируя концентрацию водорода в смеси. Число Атвуда можно оценить, используя расчётные значения коэффициента расширения смеси в ламинарном пламени (отношение плотностей перед и после пламени – $n = \sigma$). $n = \sigma = 2.6$ и 4.8 [8] для концентрации водорода в смеси 6 % и 16 %, соответственно.

Тогда числа Атвуда $A = (n-1)/(n+1)$ равны 0.44 и 0.66, для 6 % и 16 %, соответственно.

Элементарная оценка толщины ламинарного пламени приведена в [9]:

$$l \approx \lambda \frac{C}{U}$$

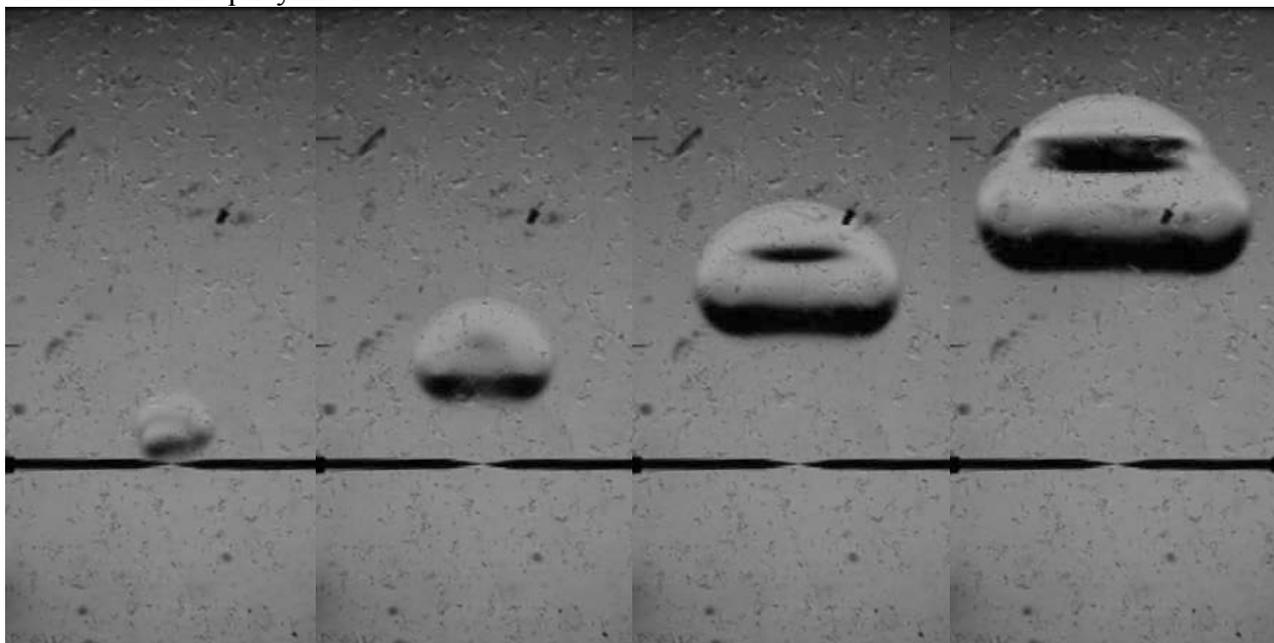
где длина свободного пробега $\lambda \approx 7 \cdot 10^{-6}$ см, скорости звука, усреднённой по исходной и сгоревшей смесям, $C([\text{H}_2] = 6\%) \approx 450$ м/с и $C([\text{H}_2] = 16\%) \approx 574$ м/с, скоростях ламинарного горения $U([\text{H}_2] = 6\%) \approx 0.04$ м/с и $U([\text{H}_2] = 16\%) \approx 0.41$ м/с. Скорости звука и скорости горения приведены в [8]. По этой оценке ширина ламинарного пламени, которое разделяет газы разной плотности, составляет 0.8 мм и 0.1 мм, для концентрации водорода 6 % и 16 %, соответственно. Такие значения являются рекордно низкими в экспериментах по изучению гидродинамических неустойчивостей РТ и РМ и турбулентного перемешивания разноплотных сжимаемых газовых сред, при использовании «без мембранной» технологии создания границы раздела, как в России, так и за рубежом.

Таким образом, пламя можно назвать «идеальной» контактной границей раздела при исследовании гидродинамических неустойчивостей на ударных трубах.

1) 6 % водорода H_2 в воздухе

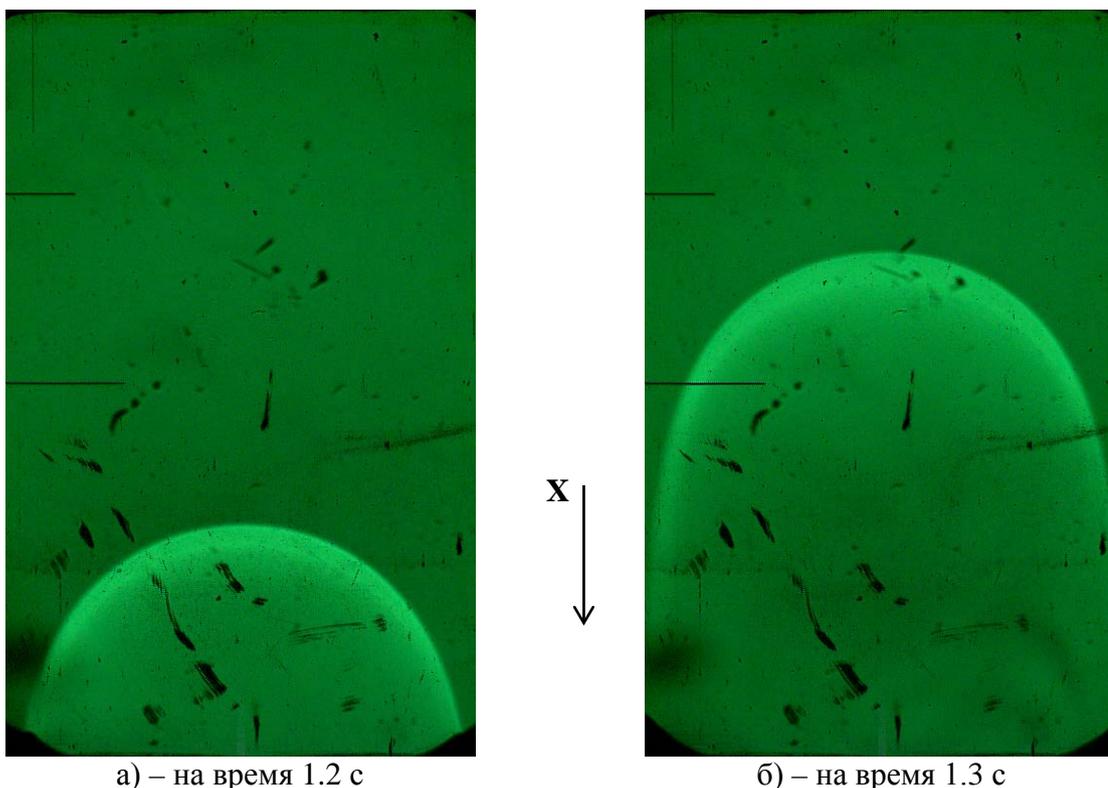
После инициирования горения в смеси с концентрацией водорода 6% в воздухе реализуется режим всплывающего пламени – скорость горения оказывается меньше скорости всплытия пламени под действием силы Архимеда. При этом пламя распространяется вверх в виде локализованного очага (см. рисунок 17).

В 6 % смеси всплытие очага в вертикально расположенной трубе сопровождается образованием вихря, который связан с очагом, всплывает вместе с ним и подкачивает с периферии канала несгоревшую смесь в область всплывающего пламени. По достижении пламенем поперечных размеров канала, оно заполняет сечение канала (138×138 мм²), при этом вихрь разрушается, а пламя далее распространяется в вверх в виде полусферы, как это показано на рисунке 18.



а) – на время 87.5 мс б) – на время 175 мс в) – на время 262 мс г) – на время 350 мс

Рисунок 17 – 6 % водорода H_2 в воздухе. Распространение пламени в канале ударной трубы непосредственно после инициирования горения



а) – на время 1.2 с

б) – на время 1.3 с

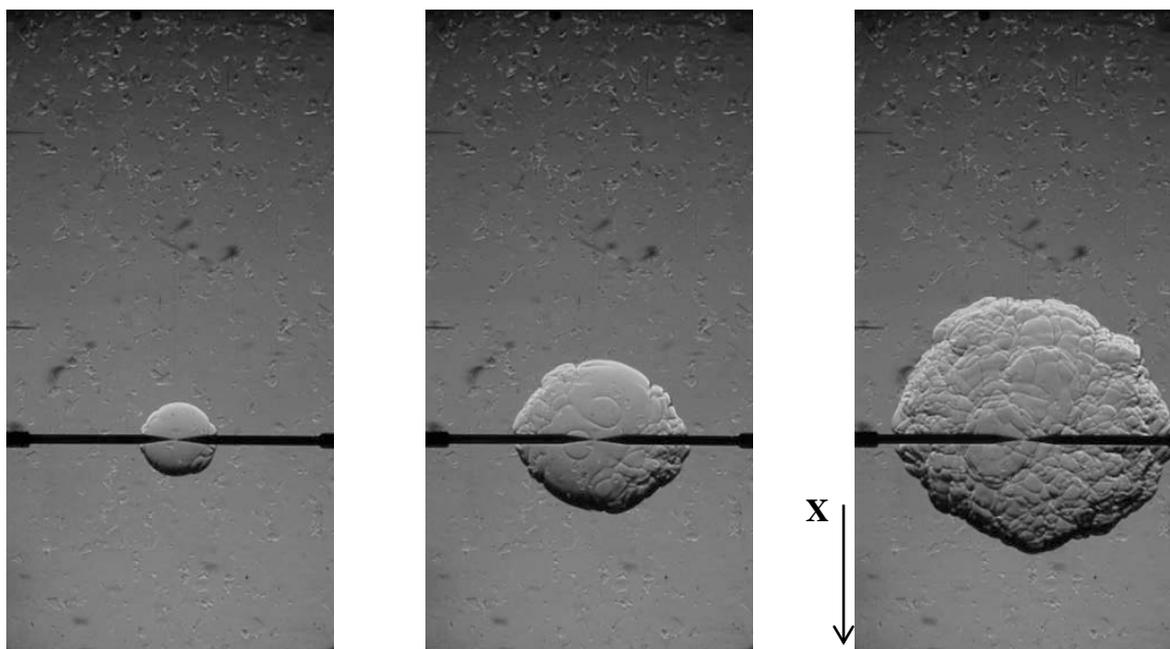
Рисунок 18 – 6 % водорода H_2 в воздухе. Распространение пламени в канале МУТ

Такое полусферическое пламя, может быть использовано в качестве тонкой трехмерной границы раздела сред разной плотности: тяжелый газ – несгоревшая водородо – воздушная смесь, легкий газ – продукты сгорания её в остаточном воздухе. Фронт горения в 6 %-ой смеси представляет собой гладкую, тонкую поверхность, что говорит о ламинарном характере пламени. Видимая скорость пламени на расстоянии $X = 630$ мм от точки инициирования составляла ≈ 0.5 м/с.

2) 16 % водорода H_2 в воздухе

Пламя в 16 %-ой водородо-воздушной смеси гораздо слабее подвержено влиянию силы Архимеда, чем пламя в 6 %-ой смеси. После инициирования, в области искрового промежутка образуется очаг пламени по форме близкий к сфере. Фронт горения распространяется (см. рисунок 19) во всех направлениях практически с одинаковой скоростью ≈ 6 м/с.

Такой очаг пламени, как и в случае 6 %-ой смеси, является трехмерной границей раздела разноплотных газов. Фронт пламени, даже визуально, очень тонкий, поверхность его имеет небольшие возмущения, что позволяет использовать такой очаг в качестве модельного, квазисферического объекта с геометрическими возмущениями при экспериментальных исследованиях неустойчивости РМ.



а) – на время 5 мс

б) – на время 10 мс

в) – на время 15 мс

Рисунок 19 – 16 % водорода H_2 в воздухе. Формирование разноплотной газовой системы с контактной границей – пламенем в канале ударной трубы после инициирования горения

Экспериментальные результаты и их обсуждение

1) 6% водорода H_2 в воздухе

Учитывая описанные выше начальные условия: границу раздела, конфигурацию газов в первоначальном состоянии и в процессе эксперимента на момент раскрытия лавсановой мембраны, отделяющей драйвер УВ от остальной части ударной трубы, схема эксперимента выглядит следующим образом.

В драйвере УВ – азот при избыточном давлении, далее тяжелый газ – несгоревшая водородо – воздушная смесь с концентрацией водорода 6%, затем легкий газ – продукты сгорания.

В такой конфигурации УВ распространялась из тяжелого газа в легкий. В этом случае, после взаимодействия УВ с границей раздела разноплотных газов наблюдается «инверсия» начальных возмущений границы раздела, что продемонстрировано на рисунках 19 (нижний ряд изображений) и 20. На рисунке 20 изображения перевернуты, и ось X направлена вверх.

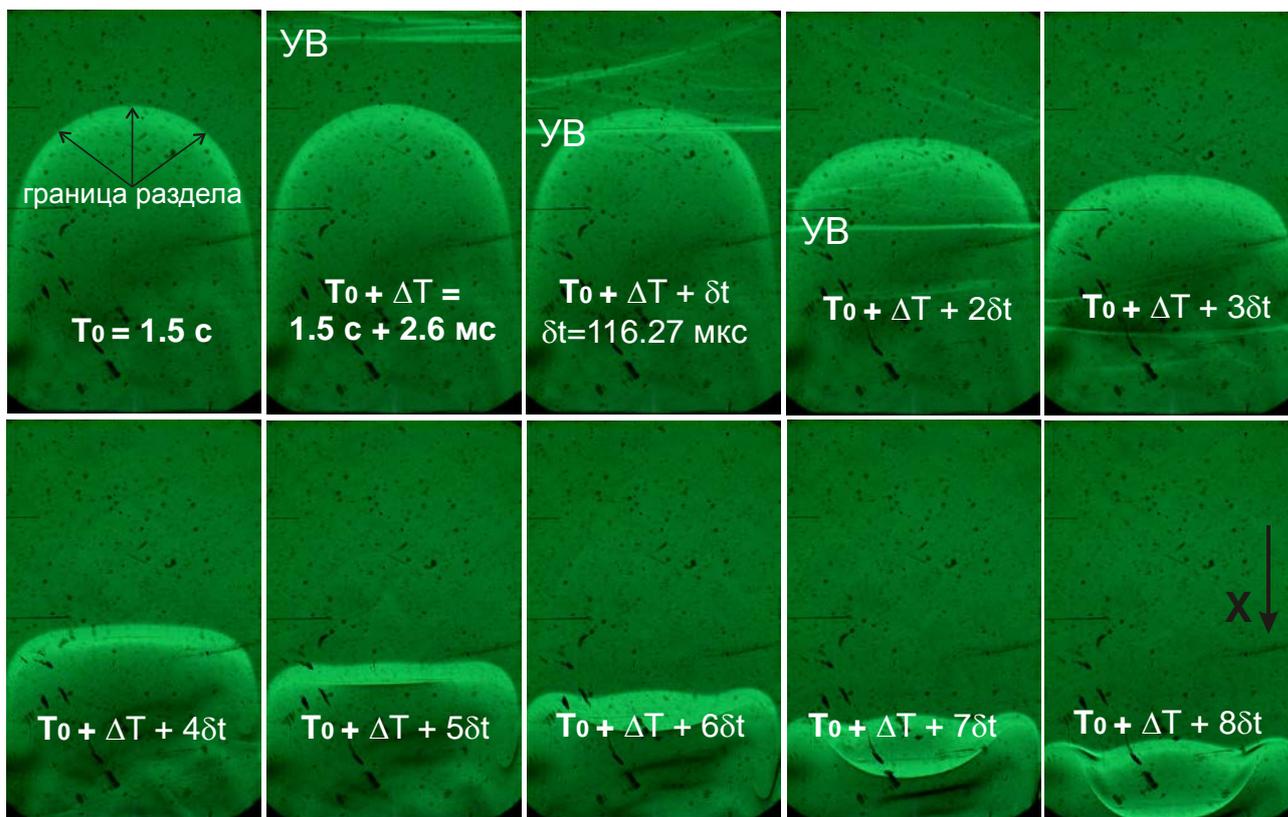


Рисунок 20 – 6 % водорода H_2 в воздухе. Взаимодействие УВ с фронтом пламени (верхний ряд). Последующая геометрическая «инверсия» начального возмущения границы раздела разноплотных газов показана на изображениях нижнего ряда

В эксперименте управляющий импульс на систему принудительного раскрытия лавсановой мембраны подавался через $T_0 = 1.5$ сек после инициирования горения. Ещё через ~ 2.7 мс УВ достигала границы раздела разноплотных газов. Происходило сжатие газов, начальное 3D возмущение геометрии границы раздела (полусферический фронт пламени) геометрически инвертировалось.

Дальнейшее развитие такого возмущения границы раздела покажем по фотоизображениям из аналогичного эксперимента.

Здесь на систему принудительного раскрытия лавсановой мембраны, синхронизирующий импульс подавался через $T_0 = 1.9$ с после инициирования горения (см. рисунок 21). Ещё через 6.3 мс исследуемая граница раздела достигала измерительной секции ($T_0 + \Delta T$) (первое изображение в последовательности). Взаимодействие УВ с фронтом пламени с последующей «инверсией» геометрии квазисферической контактной границы раздела произошло раньше и не было визуализировано. Последующие изображения в интервале длительностью ~ 1 мс иллюстрируют развитие возмущения контактной границы раздела газов на более поздней стадии в сравнение с экспериментом описанным выше.

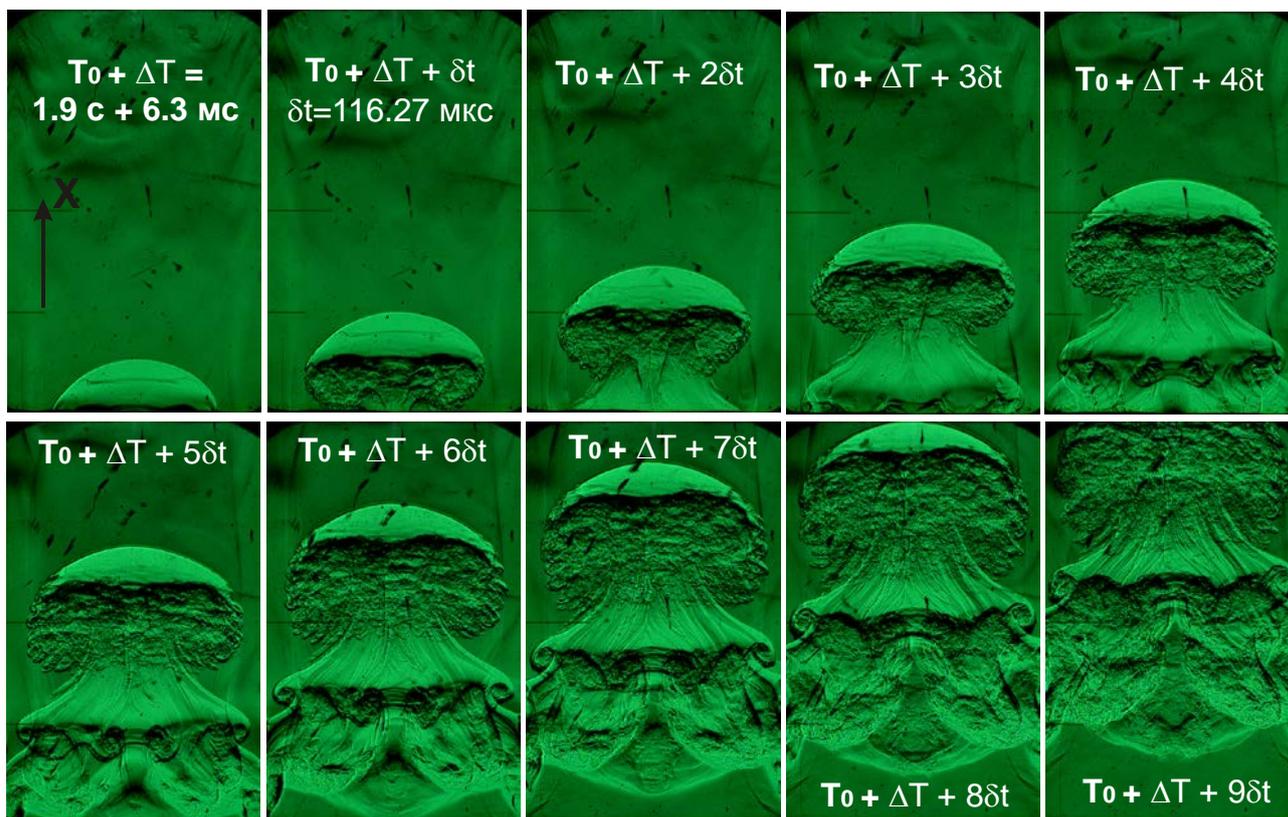


Рисунок 21 – 6 % водорода H_2 в воздухе. Развитие 3D возмущения после взаимодействия с УВ, изображения перевернуты по сравнению с рисунком 20

Струя тяжелого газа, проникающего в легкий, со временем, увеличивается в размерах. Гладкий куполообразный верх струи устойчив, однако края этого купола ускоренно теряют гладкость, активно разрушаясь под действием неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Внутри струи хорошо видны множественные вихревые течения. В нижней части основной струи формируются вторичные струи.

Экспериментальная временная зависимость изменения давления в канале ударной трубы представлена на рисунке 22. В момент времени $t = 0$ давление в канале ударной трубы равняется атмосферному. Затем, после воспламенения, ламинарное горение приводит к плавному нарастанию давления до ~ 130 кПа к моменту ~ 1.9 с, соответствующего приходу на координату датчика УВ. После чего давление импульсно нарастает до ~ 200 кПа. Затухающие осцилляции на профиле давления определяются переходной характеристикой измерительной системы.

По оценкам, такой перепад давления соответствует числу Маха УВ ~ 1.23 .

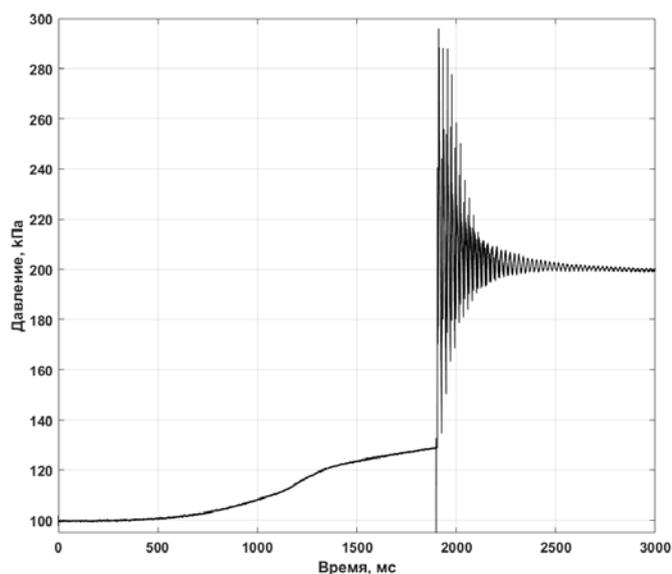


Рисунок 22 – Временная зависимость изменения давления в канале ударной трубы в эксперименте при концентрации водорода в воздухе 6 % по объёму

2) 16 % водорода H_2 в воздухе

Экспериментальные изображения начальной стадии развития 3D возмущения границы раздела разноплотных газов формы близкой к сферической после взаимодействия с УВ проиллюстрировано на рисунке 23.

Момент времени $t = 0$ соответствовал моменту инициирования горения водородо-воздушной смеси. Через $T_0 = 12.8$ мс от момента инициирования горения УВ достигала исследуемой границы раздела. Последующие изображения в течение ~ 0.5 мс иллюстрируют развитие возмущения границы раздела.

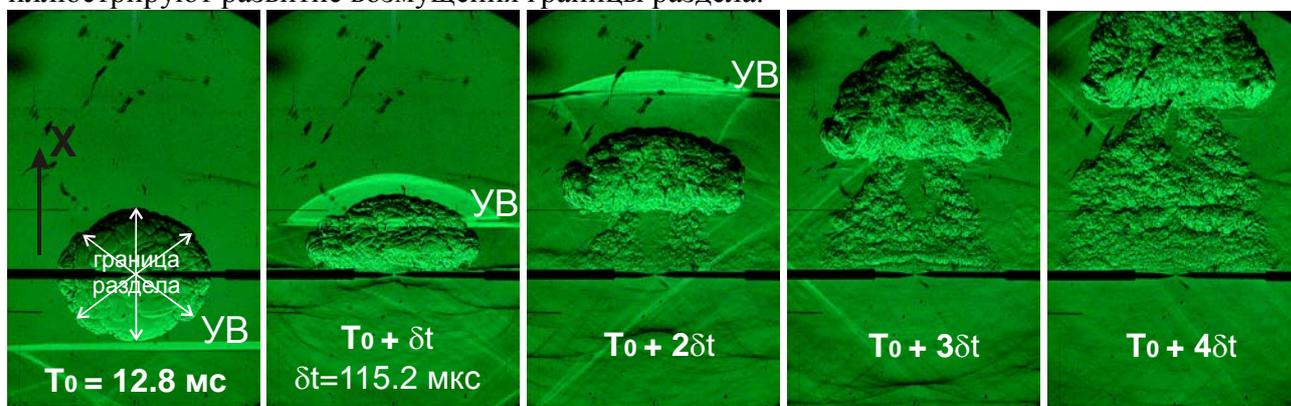


Рисунок 23 – 16% водорода H_2 в воздухе.

Начальная стадия развития 3D возмущения после взаимодействия с УВ

Сначала УВ, движется из тяжелого газа в легкий, после чего опять выходит в тяжелый. Поэтому граница раздела в виде полусферы, расположенная раньше по направлению распространения УВ, инвертируется. На границу раздела в виде полусферы, расположенную далее, УВ приходит со стороны легкого газа. Здесь инверсии не происходит. Таким образом, нижняя граница очага уплощается и даже вдавливается внутрь, в то время как верхняя граница остается выпуклой. Очевидно, что после прохождения УВ очаг пламени получает от неё завихренность, далее распространяясь вместе с вихрем, который снизу подкачивает несгоревшую смесь в очаг пламени, тем самым интенсифицируя горение в очаге. Такой очаг пламени представляет собой пузырь

лёгкого вещества в тяжёлом и эволюция такого очага может моделировать развитие неустойчивости РМ на трёхмерной контактной границе.

Плоская УВ после взаимодействия с 3D возмущением преломляется и принимает сферическую форму, так как скорость звука в продуктах сгорания выше, чем в несгоревшей смеси. Скорость УВ в несгоревшей смеси, определенная по экспериментальным фотоизображениям, составила ~ 535 м/с, что соответствует числу Маха УВ $M \sim 1.5$. После прохождения УВ, граница раздела разноплотных газов близкая к сферической становится полусферической, со временем увеличивающейся в размерах. Изменение формы начального возмущения происходит как за счет действия неустойчивости РМ, так и, по-видимому, за счет химической реакции горения, поскольку расширение очага пламени резко ускоряется после прохождения ударной волны.

После прохождения очага пламени за ударной волной формируется неоднородное течение - за сферической частью волны течение «фокусируется», что приводит к сжатию ядра потока, в то время как периферия потока вынуждена расширяться, что ясно демонстрирует третий кадр на рисунке 23. На четвёртом кадре того же рисунка передний фронт пламени принимает конусообразную форму, что обусловлено той же неоднородностью течения за фронтом УВ.

За фронтом волны пламя принимает форму «гриба», что объясняется образованием связанного с пламенем вихря. Пламя вместе с вихрем смещается по потоку вверх, при этом за очагом тянется длинный и, по-видимому, плоский шлейф пламени, обусловленный горением в гидродинамической «тени» электродов, где скорость течения невелика, что создает условия для стабилизации пламени. В отсутствии электродов пламя полностью сносилось бы течением, и длинный шлейф пламени не должен был образовываться.

Более поздняя стадия развития пламени проиллюстрирована на рисунке 24. Здесь время после инициирования горения, до момента достижения УВ исследуемой границы раздела, составило $T_0 \sim 14.4$ мс.

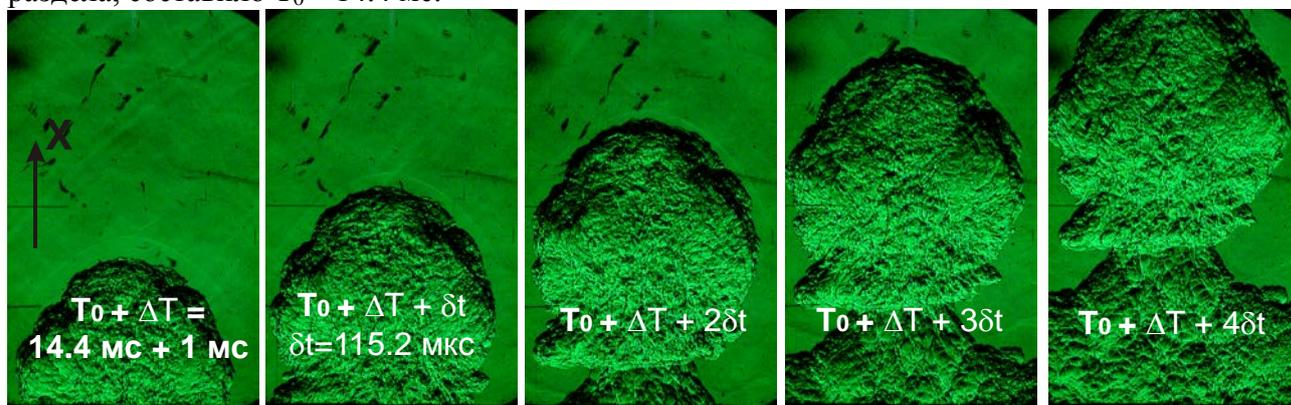


Рисунок 24 – 16 % водорода H_2 в воздухе. Поздняя стадия развития 3D возмущения после взаимодействия с УВ

Экспериментальная временная зависимость изменения давления в канале ударной трубы представлена на рисунке 25. В момент времени $t = 0$ давление в канале ударной трубы равняется атмосферному, происходит воспламенение водородо – воздушной смеси. Ко времени $t = 12$ мс УВ достигает координаты датчика, что на графике соответствует импульсному возрастанию давления до ~ 250 кПа.

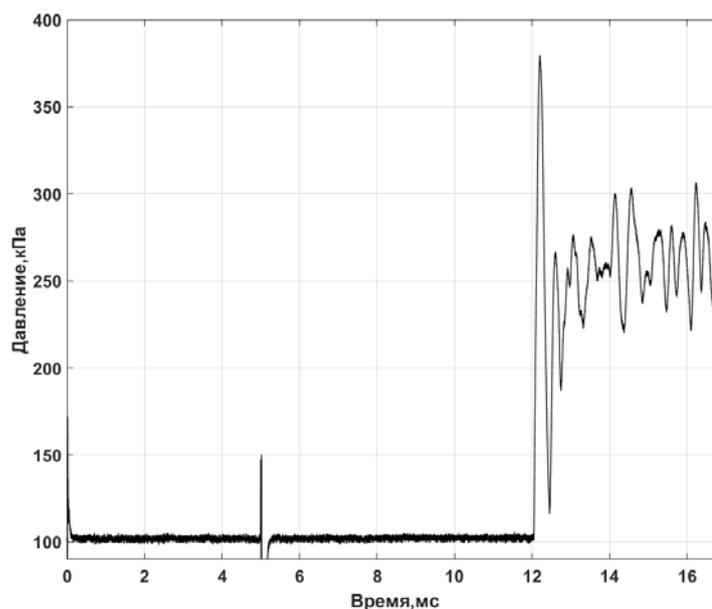


Рисунок 25 – Временная зависимость изменения давления в канале ударной трубы в эксперименте при концентрации водорода в воздухе 16 %

Таким образом, к преимуществам предложенного и реализованного способа формирования пламенем границы раздела разноплотных газов следует отнести:

- отсутствие пленки и низкие значения толщины диффузионного слоя ($< 1\text{ мм}$);
- возможность варьирования числом Атвуда и геометрии возмущений при изменении состава смеси, условий поджига (многоочечный, поверхностный);
- возможность увеличения чисел Маха при понижении начального давления смеси.

При концентрациях водорода меньше 8 % пламя можно считать “замороженным”. При повышении концентрации водорода, пламя может оказывать влияние на развитие неустойчивости через изменение характеристик течения.

В смесях с концентрацией водорода более 10 % скорость горения становится сравнимой со скоростью роста ЗТП, поэтому изменение формы пламени происходит не только за счёт воздействия на него неустойчивости, но и за счёт распространения самого пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовалось развитие неустойчивости РМ, возникающей на контактных границах разноплотных газовых сред с заданными одномерными 2D и квазисферическими 3D возмущениями.

Проведены эксперименты, направленные на исследование развития *одномерных* начальных возмущений контактной границы раздела разноплотных газовых сред, под действием неустойчивости РМ. Использовались газовые системы с начальным числом Атвуда 0.2 и 0.7. Число Маха ударной волны в экспериментах составляло ~ 1.2 .

Экспериментально определены временные зависимости траектории фронта проникновения легкого вещества в тяжелое $X_{12}(t)$ («пузырей»). Координаты $X_{21}(t)$ («струй») находились с использованием аналитической модели [4] и наносились на экспериментальные фотоизображения. Сравнительный качественный анализ показывает удовлетворительное согласие экспериментальных данных и модели.

При проведении экспериментов с системой газов воздух/SF₆ (A=0.7) были отмечены особенности в развитии возмущений. На поздней стадии развития взаимопроникновения сред со временем меняется форма возмущений – происходит столкновение «пузырей» и их «сплющивание», что, возможно, приводит к формированию «струй», развивающихся в местах столкновения с противоположной стороны основных «струй» тяжелого газа, проникающих в легкий газ.

Развитие возмущений для обеих серий экспериментов находится на нелинейной стадии. Перехода в развитую турбулентность не происходит.

Предложен и реализован новый способ формирования границы раздела разноплотных газов в экспериментах на ударных трубах по изучению гидродинамических неустойчивостей РТ и РМ контактных границ разноплотных газов. В этом способе система разноплотных газов формируется в результате горения бедной водородо-воздушной смеси, а фронт пламени является контактной границей. Апробация способа проведена в 2-ух экспериментальных сериях, отличающихся концентрацией водорода в воздухе (6 % и 16 %) и позволивших создать различную 3D геометрию контактной границы разноплотных газов.

В экспериментах с 6 % водорода в воздухе, со временем, фронт пламени движущийся со скоростью ~ 0.5 м/с, образовывал гладкую, тонкую полусферу. Скорость движения фронта пламени существенно меньше скорости развития неустойчивости РМ на контактной границе. При использовании 16 %-ой водородо-воздушной смеси, формировался очаг пламени по форме близкой к сферической, увеличивающийся со скоростью ~ 6 м/с.

После взаимодействия УВ с границей раздела разноплотных газовых сред наблюдалась «инверсия» начального возмущения. Дальнейшее развитие 3D возмущения в экспериментах с использованием 6 %-ой водородо-воздушной смеси определяется в основном действием неустойчивости РМ и практически не зависит от горения водорода, поскольку скорость течения за фронтом ударной волны на пару порядков больше скорости горения. Изменение формы начального возмущения в экспериментах с 16 %-ой водородо-воздушной смесью происходит как за счет действия неустойчивости РМ, так и, отчасти, за счет химической реакции горения, поскольку в этом случае отличие скорости течения за фронтом ударной волны не столь сильно (примерно на порядок величины) превышает скорость горения.

По оценкам, ширина пламени, которое образует границу раздела разноплотных газов, составляет $\sim 0.1 - 0.8$ мм. Такое значение является рекордно низким в экспериментах на ударных трубах по изучению гидродинамических неустойчивостей РТ и РМ и турбулентного перемешивания сжимаемых газовых сред, как в России, так и за рубежом, при использовании «без мембранной» технологии создания границы раздела.

Таким образом, к преимуществам предложенного и реализованного способа формирования границы раздела разноплотных газов следует отнести:

- низкие значения толщины диффузионного слоя (< 1 мм);
- возможность варьирования числом Атвуда и геометрии возмущений при изменении состава смеси, условий поджига (многоточечный, поверхностный);
- возможность увеличения чисел Маха при понижении начального давления смеси.

При концентрациях водорода меньше 8 % пламя можно считать “замороженным”. При повышении концентрации водорода, пламя может оказывать влияние на развитие неустойчивости через изменение характеристик течения.

В смесях с концентрацией водорода более 10 % скорость горения становится сравнимой со скоростью роста ЗТП, поэтому изменение формы пламени происходит не только за счёт воздействия на него неустойчивости, но и за счёт распространения самого пламени.

Полученные результаты полезны при развитии моделей и верификации численных методов используемых в задачах, учитывающих влияние неустойчивости РМ и турбулентного перемешивания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Richtmyer R. Taylor instability in a shock acceleration of compressible fluids // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1960. Vol. 13. pp. 297-319.
2. Meshkov E. Instability of the interface of two gasses accelerated by a shock wave // Izv. Akad. Nauk. SSSR, Mekh. Zhidk. Gaza. 1969. Vol. 4. No. 151.
3. Авраменко М.И. О k-ε модели турбулентности. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005.
4. Mikaelian K.O. Testing an analytic model for Richtmyer–Meshkov turbulent mixing widths // Shock Waves. 2015. No. 25.
5. Jones M.A., Jacobs J.W. A membraneless experiment for the study of Richtmyer–Meshkov instability of a shock-accelerated gas interface // Phys. Fluids. 1997. Vol. 9. No. 3078.
6. Motl B., Oakley J., Ranjan, D., Weber, C., Anderson, M., Bonazza R. Experimental validation of a Richtmyer–Meshkov scaling law over large density ratio and shock strength ranges // PHYSICS OF FLUIDS 21, 126102, 2009.
7. Orlicz G.S., Balakumar B.J., Tomkins C.D., Prestridge K.P. A Mach number study of the Richtmyer–Meshkov instability in a varicose, heavy-gas curtain // PHYSICS OF FLUIDS. 2009. Vol. 21. No. 064102.
8. Yanez J., Kuznetsov M., Grune J. Flame instability of lean hydrogen-air mixtures in a smooth open-ended vertical channel, 2015.
9. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. Москва: Наука, 1980.