

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБОБЩЕНИЯ МЕТОДА ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕД

Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Е. В. Бодров, С. В. Фролов,
К. В. Анисифоров, О. Л. Кривонос, А. Р. Гавриш, А. С. Соколова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В зонах турбулентного перемешивания (ЗТП) веществ, развивающихся при неустойчивостях Кельвина – Гельмгольца, Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова [1–4], параметры течения (плотности, скорости, энергия) не постоянные во времени несколько изменяются, т. е. пульсируют. Течение в ЗТП рассматривают как результат наложения на усредненный поток движений (турбулентных пульсаций) различных масштабов [5]. Под масштабом движения понимают порядок величины расстояния, на протяжении которого существенно меняется скорость движения. Для анализа турбулентных течений вводят число Рейнольдса турбулентных пульсаций [5]:

$$Re_\lambda \sim \frac{U_\lambda \lambda}{\nu}, \quad (1)$$

где λ – масштаб пульсаций, U_λ – порядок величины скорости пульсаций, ν – коэффициент кинематической вязкости.

С ростом Re_λ в развитом турбулентном потоке появляются все более крупномасштабные пульсации, энергия от крупномасштабных пульсаций передается мелкомасштабным, где и происходит ее диссипация.

Для анализа турбулентности часто применяется разложение пульсаций гидродинамических величин (плотности, скорости) в ЗТП в ряд Фурье. Для точек внутри ЗТП строят, например, среднюю спектральную плотность $E(k)$ в зависимости от модуля волнового вектора $k = 2\pi/\lambda$ в логарифмическом масштабе и сравнивают ее с колмогоровским спектром и экспериментальными данными (если таковые имеются). Как правило, полученный спектр пульсаций должен быть близок к колмогоровскому спектру, при котором $E(k) \sim k^{-5/3}$.

На рис. 1а для примера представлен спектр пульсаций компонент скоростей [5] по трем направлениям (x, y, z), полученный численным методом в расчетах ЗТП на границе *воздух-SF₆* при числах Маха УВ $M = 10,6$. По графику видно, что скорости в ЗТП по трем направлениям различны.

Для тестирования современных численных методов требуются экспериментальные данные о пульсациях скоростей. Эти данные исследователи пытаются получить с применением метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [6]. Этим методом

регистрируют пульсации скорости в одной точке ЗТП. При этом, для получения полной картины течения, наряду с методом ЛДА необходимо применение другого метода для определения границ зоны, что достаточно дорого. На рис. 1б представлены профили скорости в ЗТП на границе *гелий-CO₂*, полученные методом ЛДА в экспериментах работы [7]. По графику видно, что при средней скорости течения в ЗТП ≈ 240 м/с пульсации скорости составляют ≈ 50 м/с. На границе *воздух-CO₂* в этой работе пульсации составили ≈ 20 м/с при средней скорости течения в зоне ТП ≈ 200 м/с.

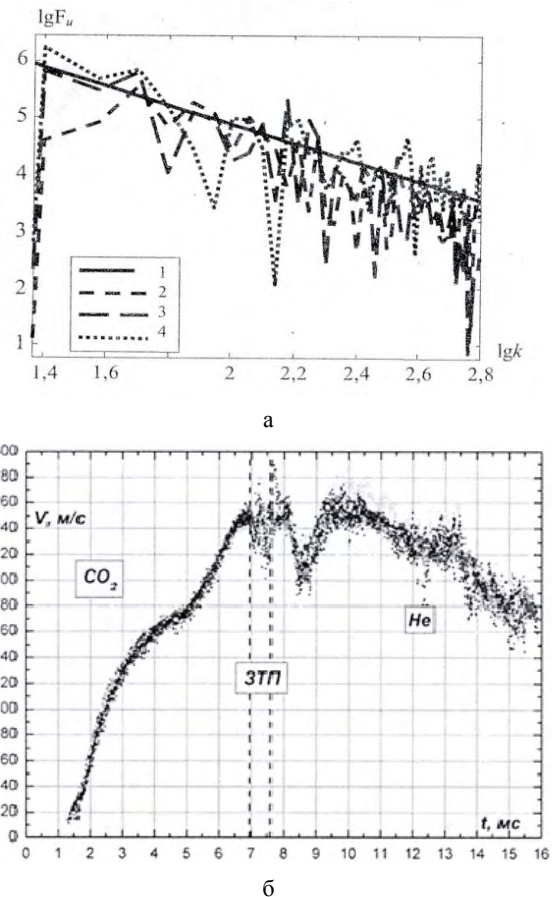


Рис. 1. Расчетный спектр пульсаций компонент скорости в ЗТП: а – на границе *воздух-SF₆*: 1 – колмогоровский спектр; 2, 3, 4 – вариант расчета; k – волновое число; F_u – относительная скорость; u_i – компоненты скорости; б – профили скорости в экспериментах с системой *гелий-CO₂*

Альтернативным методом определения пульсаций скорости в ЗТП может быть PIV-метод (Particle Image Velocimetry – цифровая трассерная визуализация) [8]. Метод часто применяется для исследования пульсаций скорости в однофазных течениях. Авторы в экспериментах отработали этот метод для определения пульсации скорости в двухфазных течениях, которыми являются ЗТП жидких и газовых сред. Суть PIV-метода заключается в том, что в одно из перемешивающихся веществ, как и в методе ЛДА, добавляются твердые взвешенные частицы (трассеры), которые регистрируются в ЗТП видеокамерой при подсветке течения импульсами плоского тонкого лазерного луча (1–2 мм), разнесенными во времени. По величине смещения частиц и времени между лазерными импульсами определяются скорости частиц, а затем – пульсации скоростей. Принимается, как

и в методе ЛДА, что скорость частицы равна массовой скорости течения в ЗТП. Результаты обработки этого метода представлены в данном докладе.

Применяемое для PIV-метода оборудование

Практический интерес представляют пульсации в ЗТП в диапазоне величин ускорений течения от $10^2 g_0$ до $10^5 g_0$ ($g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$) и числах Маха ударной волны в газах от $M = 1,1$ до $M = 10$. Для измерений пульсаций скорости в указанных интервалах величин мы применяли оборудование, обеспечивающее пространственное разрешение на уровне $0,05 \text{ мм}$, временное – 7 нс . Блок-схема соединения аппаратуры и схема видеорегистрации представлены на рис. 2 и 3.

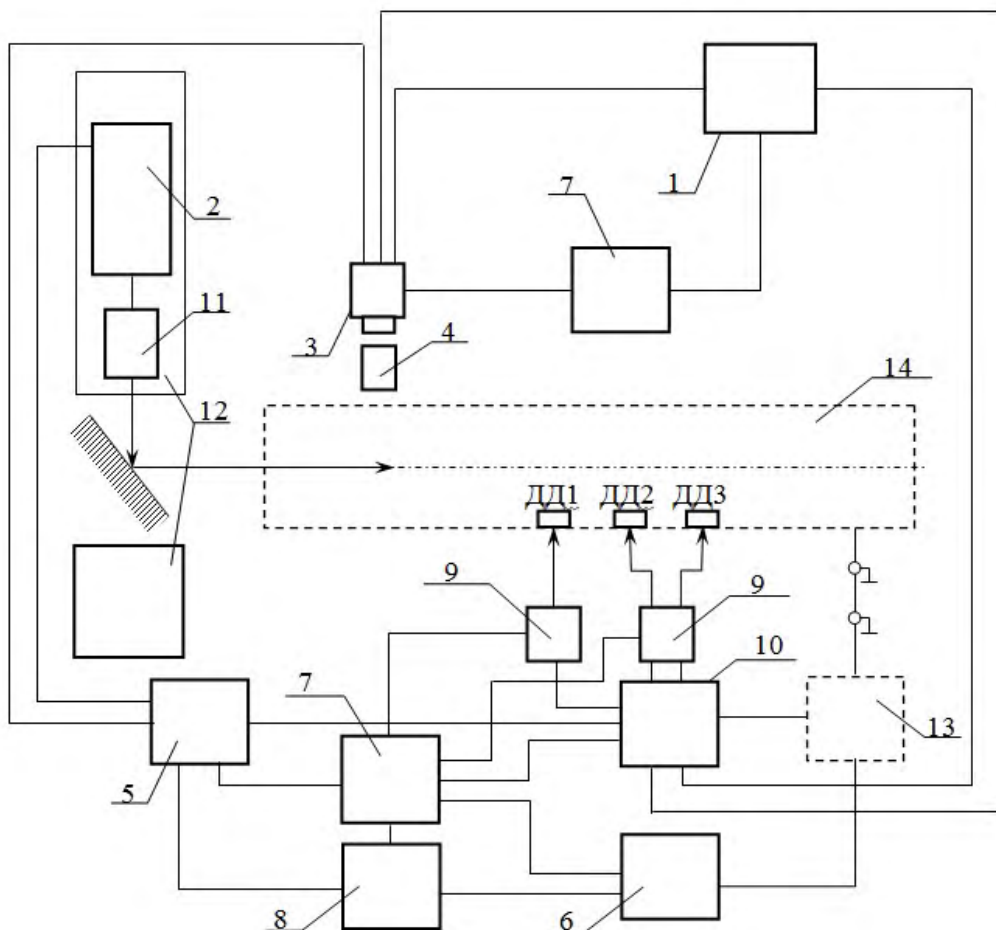


Рис. 2. Блок-схема оборудования PIV-метода: 1 – персональный компьютер; 2 – лазерная установка (532 нм, длительность импульса 7 нс); 3 – видеокамера CCD (ПЗС-матрица 2000×2000 пикселей, размер пикселя – 7 мкм); 4 – оптический телескоп; 5 – генератор задержек и импульсов (разрешение – 10 пс); 6 – блок формирования высоковольтного импульса; 7 – источник бесперебойного питания; 8 – генератор испытательных импульсов; 9 – усилитель заряда; 10 – осциллограф; 11 – телескоп для создания лазерного ножа; 12 – теневая установка ИАБ-451; 13 – установка запуска ударной трубы; 14 – ударная труба (легкогазовая пушка); ДД₁ – датчики давления

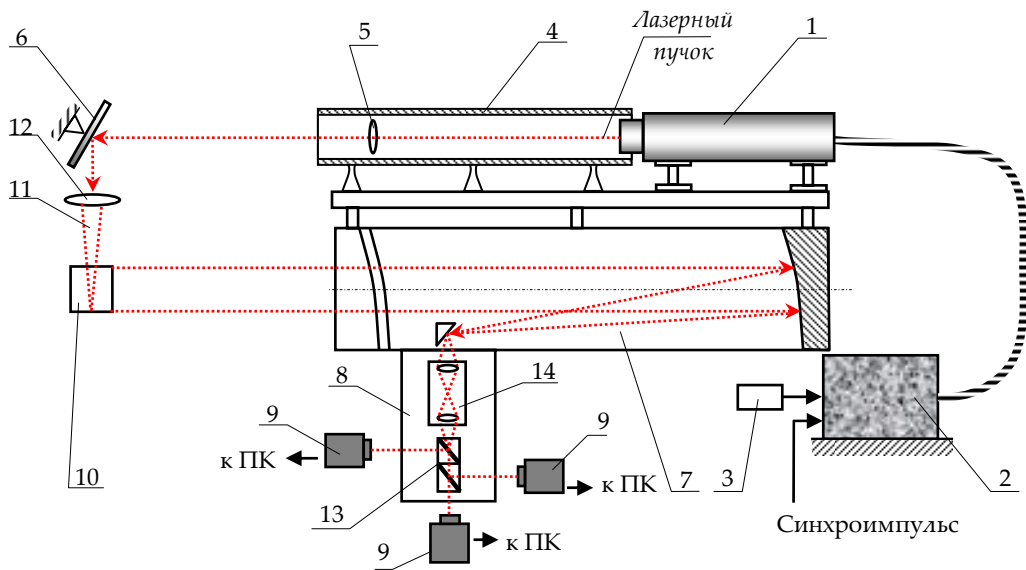


Рис. 3. Схема видеорегистрации течения PIV-методом: 1 – лазерная головка; 2 – блок питания лазера; 3 – пульт управления; 4 – труба защитная; 5 – короткофокусная цилиндрическая линза; 6 – поворотное зеркало; 7 – оптическая система ИАБ-451; 8 – трехканальный оптический модуль; 9 – видеокамера CCD; 10 – экспериментальная сборка; 11 – лазерный нож; 12 – длиннофокусная цилиндрическая линза; 13 – светоделительные кубики; 14 – телескоп

Отработка PIV-метода на экспериментах по исследованию ТП при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на границе газ-жидкость

Эксперименты проводились на ударной трубе (УТ), схема которой приведена на рис. 4.

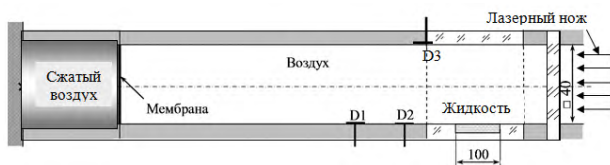
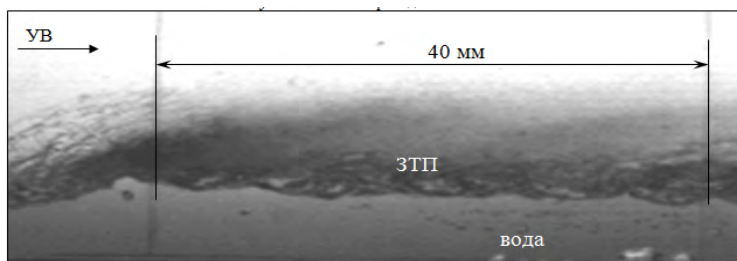


Рис. 4. Схема проведения опытов: D1, D2, D3 – отметки времени (датчики давления) для определения скорости ударной волны

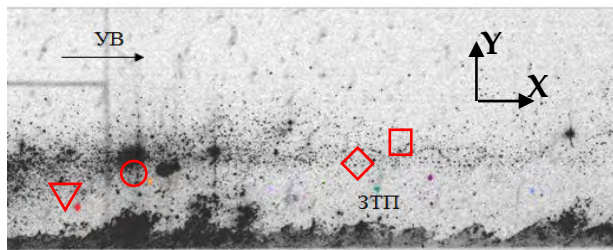
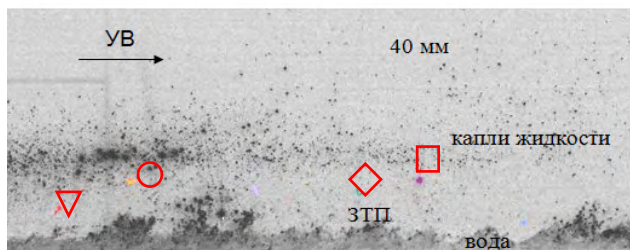
Камера высокого давления УТ заполнялась сжатым воздухом с начальным давлением 5,5 ати. В камере низкого давления и в измерительной секции находился воздух при атмосферных условиях. После разрушения мембраны в канале трубы формировалась ударная волна с числом Маха $M \approx 1,3$. Со временем она скользила по поверхности жидкости, находящейся в кювете. Это приводило к развитию на

контактной границе воздуха и жидкости неустойчивости Кельвина – Гельмгольца и последующему турбулентному перемешиванию веществ. В качестве жидкости применялась вода (опыт № 1502) и водный раствор этилового спирта (опыт № 1626) плотностью $\approx 0,92 \text{ г/см}^3$. В раствор спирта добавлялись мелкие (менее 0,5 мм) частицы (трассеры) из полипропилена аналогичной плотности, т. е., частицы находились во взвешенном состоянии в растворе. В воду трассеры не добавлялись. На рис. 5 и 6 представлены полученные видеокдры течения. На рис. 6а (для сравнения) представлена кинограмма эксперимента с водой при регистрации течения в проходящем свете. На рис. 6а разрешается лишь интегральная ширина зоны турбулентного перемешивания, структура зоны не просматривается. В опытах № 1502 и 1626, хорошо разрешаются капли воды и твердые частицы (трассеры), по которым можно определить пульсации скорости в ЗТП. Сравнивая видеокдры рис. 5а с рис. 5б и рис. 5в, можно заключить, что ЗТП состоит из зоны капельного облака и, собственно, ЗТП.

На рис. 5 одни и те же частички показаны одинаковыми символами (между кадрами $\Delta t = 0,05 \text{ мс}$, число Маха $M = 1,3$, опыт № 1502).

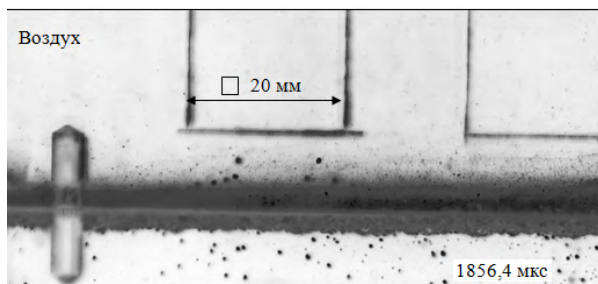


а

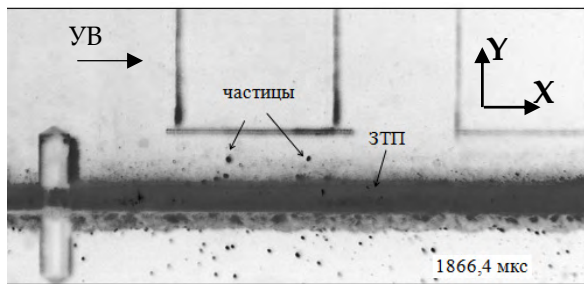


б

Рис. 5. Видеокadres регистрации турбулентного перемешивания на границе газ-вода: а - регистрация в проходящем свете, б - регистрация PIV-методом, УВ – направление ударной волны



а



б

Рис. 6. Развитие турбулентного перемешивания под действием скользящей УВ на границе раствора этилового спирта и воздуха: а – регистрация PIV-методом, б – опыт № 1626

Отработка PIV-метода на экспериментах по исследованию ТП при неустойчивости Релея–Тейлора на границе газ-жидкость

Эксперименты проводились на легкогазовой пушке (см. рис. 7). В качестве жидкости применялся водный раствор этилового спирта. В раствор добавлялись мелкие белые частицы из полипропилена. Слой жидкости массой ≈ 50 г наливался в прозрачный контейнер, который помещался в канал легкогазовой пушки. Объемы пушки над и под слоем заполнялись сжатым воздухом равного давления. После разрыва диафрагмы газ из-под слоя вытекал в атмо-

сферную среду, под действием давления над слоем ускорялся. На границе воздух-жидкость развивалась неустойчивость Релея – Тейлора, которая со временем приводила к турбулентному перемешиванию веществ.

На рис. 7б символами ∇ \circ \square \triangle \diamond обозначены одни и те же частицы.

На видеокadres и в жидкости и в ЗТП хорошо разрешаются трассеры. Зная их пролетное расстояние и время между видеокadresами, можно определить скорость трассеров.

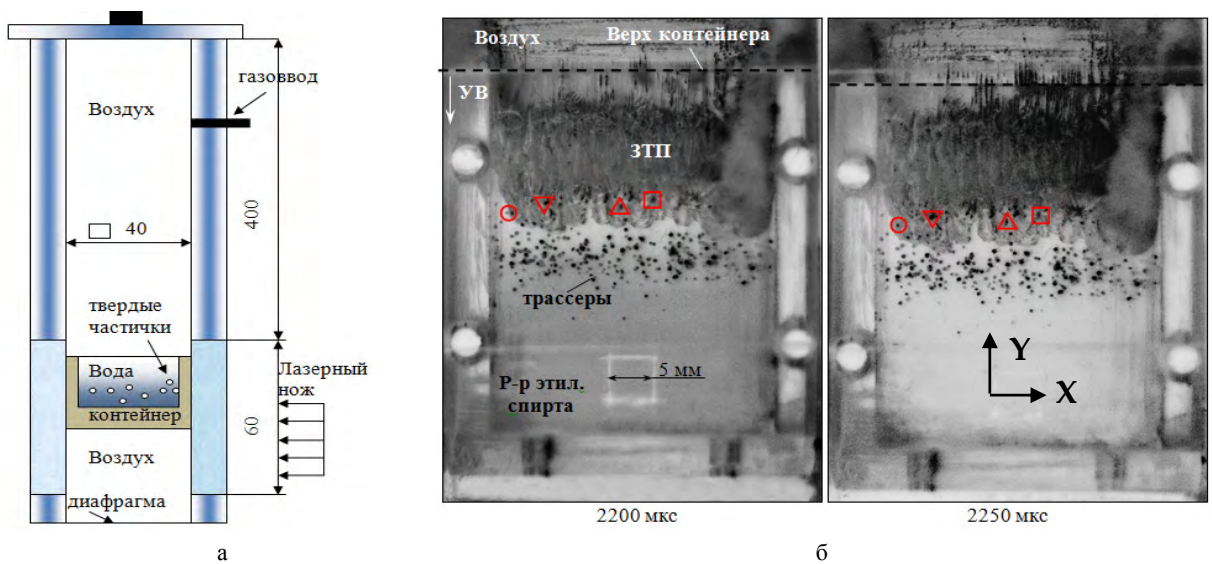


Рис.7. Постановка эксперимента, опыт № 1611 (размеры в мм): а – схема постановки эксперимента, б – видеокadres течения

Отработка PIV-метода на экспериментах по исследованию ТП газов при неустойчивости Рихтмайера–Мешкова

Эксперименты проводились на воздушной ударной трубе (см. рис. 9) при числе Маха ударной волны $M = 1,5$. Исследовалось развитие турбулентного перемешивания (ТП) на контактных границах воздух-SF₆, воздух-CO₂.

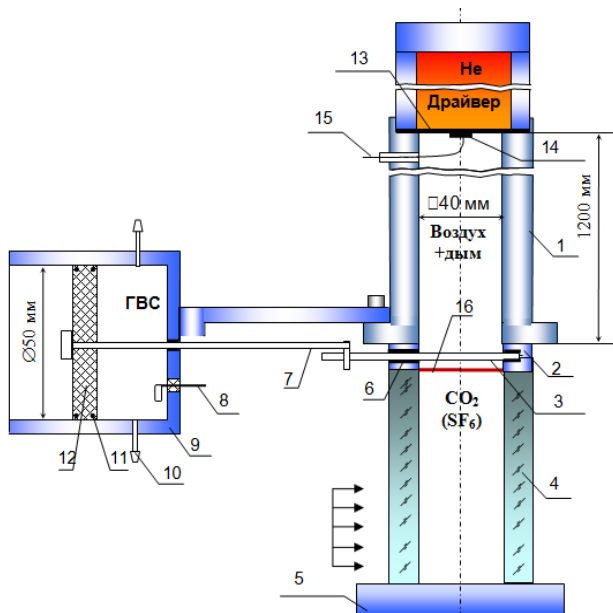


Рис. 8. Схема ударной трубы с устройством выдвигной заслонки: 1 – ударная труба; 2 – корпус заслонки; 3 – заслонка; 4 – измерительная секция ударной трубы; 5 – жесткая стенка (прозрачное оргстекло); 6 – прокладки; 7 – шток; 8 – электроввод; 9 – цилиндр; 10 – газоввод; 11 – уплотнительное кольцо; 12 – поршень; 13 – мембрана; 14 – нихромовая проволока; 15 – электропровод; 16 – узкая полимерная пленка

Газы в трубе изначально разделялись быстроходной выдвигной заслонкой 3. В легкий газ (воздух) для визуализации границ ЗТП добавлялся сигаретный дым. На расстоянии примерно 5 мм под заслонкой (в тяжелом газе) располагалась узкая (2 мм) черная полимерная пленка толщиной 1–2 мкм. Заслонка выдерживалась из трубы поршнем 12, который ускорялся продуктами взрыва смеси ацетилена и кислорода. После разрыва мембраны ударная волна приходила на границу газов, затем разрушала полимерную пленку на мелкие фрагменты. Со временем фрагменты пленки попадали в ЗТП и служили в ней трассерами. По скоростям фрагментов пленки определялись величины пульсаций скорости. На рис. 9 представлены видеокadres ТП на границе воздух-CO₂, символами ∇ \circ \square \triangle \diamond обозначены одни и те же частицы.

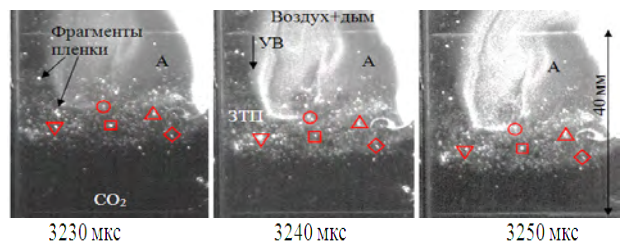


Рис. 9. Видеокadres ТП на границе воздух-CO₂, опыт № 1633: А – область дыма

Результаты обработки экспериментов

Обработка результатов экспериментов производилась по специальной математической программе ИФВ «QTSearcher». Программа определяла центр частиц и расстояние между этими центрами на разных видеокadres. По этому расстоянию и времени между видеокadres определялась скорость трассеров с погрешностью $\leq 15\%$.

Подчеркнем, в представленных экспериментах минимальный масштаб пульсаций λ не может быть меньше размера используемых трассеров (твердых частиц или фрагментов пленки).

На рис. 10 представлены графики значения скоростей U на длине x ЗТП, где x отсчитывается от вертикальной стенки контейнера (измерительной секции или кюветы с жидкостью).

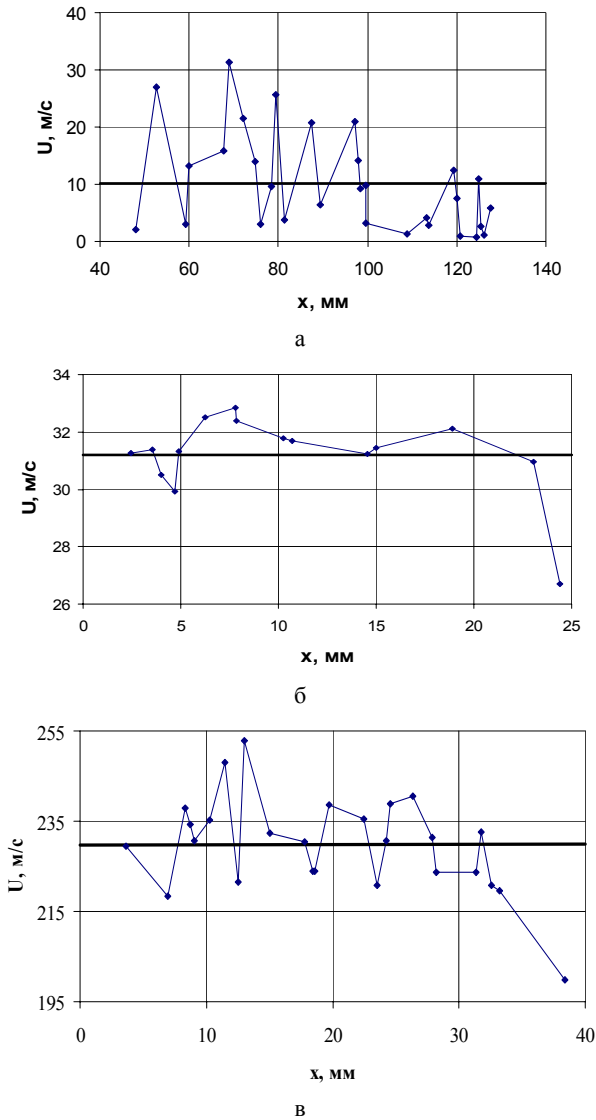


Рис. 10. Значения скоростей в ЗТП при неустойчивостях: а – Кельвина–Гельмгольца в опыте № 1626, где $M = 1,3$; б – Релея–Тейлора в опыте № 1611, где $g = 2,2 \times 10^3$ г; в – Рихтмайера–Мешкова в опыте № 1633, где $M = 1,5$

По графикам, рис. 10, видно, что:

- относительные пульсации скорости в зоне ТП при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца из-за сильного вихревого течения значительно выше, чем при неустойчивостях Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова;

- максимальные пульсации скорости в зоне ТП на границе *воздух*- CO_2 составляют ≈ 30 м/с, что коррелирует с пульсациями скорости, полученными методом ЛДА в работе [7].

Заключение

Показана возможность применения PIV-метода для исследования пульсаций скорости в ЗТП жидких и газовых сред. Его преимущества: относительная простота, наглядность, дешевизна, получение пульсаций по всей ширине ЗТП в одном опыте. Недостаток – трудность идентификации некоторых частиц на разных видеокадрах.

В ходе обработки метода получены новые результаты:

- зона турбулентного перемешивания, развивающаяся на контактной границе газ-жидкость, под действием скользящей воздушной ударной волны состоит из двух областей: собственно, из зоны перемешивания и капельного облака;

- относительные значения пульсаций скорости в ЗТП при неустойчивости Кельвина – Гельмгольца из-за сильного вихревого течения значительно выше, чем при неустойчивостях Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова.

Требуется дальнейшая экспериментальная и расчетная обработка метода с целью получения большого количества точек для разложения пульсаций скоростей в ряд Фурье, определения спектра пульсаций скорости.

Литература

1. Helmholtz H. L. F. Uber discontinuirlisch Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss. // Berlin, 1868. P. 215.
2. Taylor G. I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. // I. Proc. Roy. Soc. 1950. Vol. A201. P. 192.
3. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. // Commun. Pure Appl. Math. 1960. Vol. 13. P. 297.
4. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. // Изв. АН СССР, МЖГ. 1969. № 5. С. 151–158.
5. Янилкин Ю. В., Стаценко В. П., Козлов В. И. Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах // Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 507.
6. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия // Новосибирск: Наука, 1983. С. 214.
7. Тягтев А. А., Павленко А. В., Аринкин Н. Б. и др. Экспериментальное исследование характеристик зоны турбулентного перемешивания газовых сред, вызванной действием неустойчивости Релея–Тейлора, при числах Атвуда 0,2 и 0,8 / Международная конференция. XVII Харитоновские тематические научные чтения // Сборник трудов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 645–656.
8. Brucker C. Structure and dynamics of the wake of bubbles and its relevance for bubble interaction. // Phys. Fluids. 1999. Vol. 11. С. 1781.