

## ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

© 2019 г. К. В. Анисифоров<sup>a,\*</sup>, Е. В. Бодров<sup>a</sup>, А. Р. Гавриш<sup>a</sup>, О. Л. Кривонос<sup>a</sup>,  
А. С. Кучкарева<sup>a</sup>, Е. В. Левкина<sup>a</sup>, Н. В. Невмержицкий<sup>a,\*\*</sup>, Е. Д. Сеньковский<sup>a</sup>,  
Е. А. Сотсков<sup>a</sup>, Б. И. Ткаченко<sup>a</sup>, С. В. Фролов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики  
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

\* e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

\*\* e-mail: NVNevmerzhitskiy@vniief.ru

Поступила в редакцию 28.05.2018 г.

После доработки 06.07.2018 г.

Принята к публикации 15.08.2018 г.

Представлен лабораторный экспериментальный комплекс, позволяющий исследовать гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание с микронным пространственным и наносекундным временным разрешением с последующей высокоточной обработкой результатов. Приведены схема комплекса и измерительной аппаратуры, а также результаты применения комплекса в экспериментах по исследованию зон турбулентного перемешивания, развивающихся при неустойчивостях Рэлея–Тейлора, Кельвина–Гельмгольца на контактных границах газ–жидкость и неустойчивости Рихтмайера–Мешкова на контактной границе газов. Получены новые результаты: из зоны турбулентного перемешивания могут выбрасываться тонкие микрокумулятивные струи жидкости; после прохождения ударной волны по зоне турбулентного перемешивания газов зона стремится к однородной, ударная волна искажается и расширяется. Определены также размеры частиц жидкости в зоне турбулентного перемешивания веществ.

DOI: 10.1134/S0032816219020034

### ВВЕДЕНИЕ

Гидродинамические неустойчивости (г.н.) Рэлея–Тейлора, Рихтмайера–Мешкова, Кельвина–Гельмгольца [1–4] и вызванное ими турбулентное перемешивание (т.п.) затрудняют достижение высоких плотностей энергии при инерциальном термоядерном синтезе.

Для описания развития этих неустойчивостей применяются численные методы и различного рода полуэмпирические модели. Все они требуют калибровки по результатам экспериментов. В настоящее время имеется много экспериментальных данных о развитии г.н. и т.п., полученных на лабораторных комплексах с пространственным разрешением порядка 0.1 мм и временным ~1 мкс [5, 6]. Однако для верификации и валидации современных численных методик, т.е. экспериментального доказательства того, что методика пригодна для решения предлагаемых задач, необходимы тестовые экспериментальные сведения о:

- распределении фрагментов в зоне т.п. по размерам и скоростям;

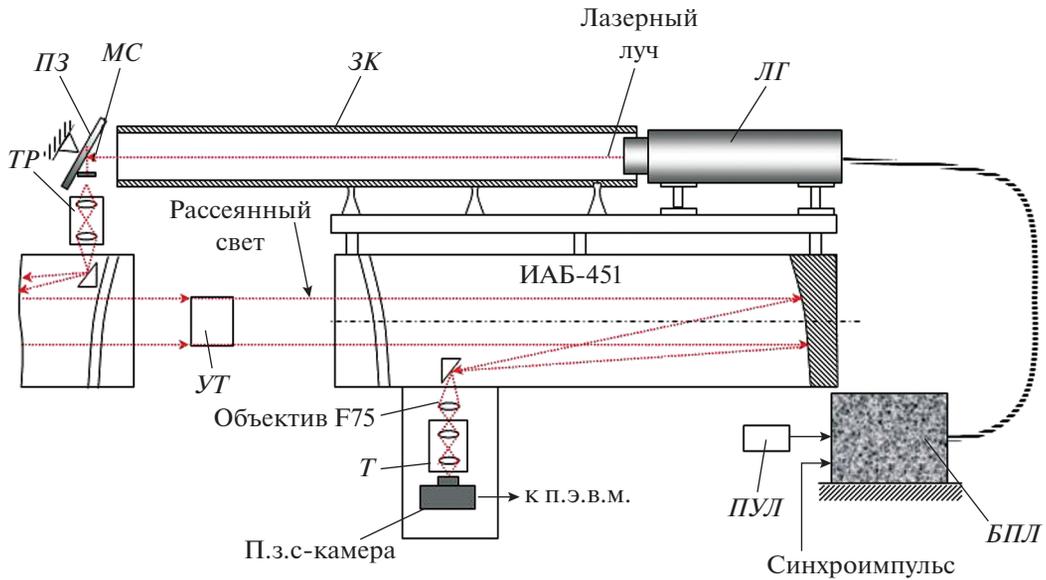
- взаимном влиянии турбулентности и ударных волн;

- времени перехода возмущений в стадию т.п.

Такие данные можно получить лишь с применением современной аппаратуры с высоким пространственным (микрон) и временным (наносекунды) разрешением, при этом система обработки данных должна обеспечивать высокую точность расчетов. Аппаратура должна быть объединена в специальный лабораторный экспериментальный комплекс. Ниже приведено описание разработанного авторами такого комплекса. Принцип его работы основан на регистрации турбулентного течения на контактных границах газ–жидкость и газов с различающейся плотностью цифровой аппаратурой при большом коэффициенте оптического увеличения (более  $10^{\times}$ ) и малой (4–7 нс) экспозиции видеокadra [7].

Ниже описана аппаратура и приведены некоторые экспериментальные результаты по исследованию г.н. и т.п., полученные с применением такого комплекса.

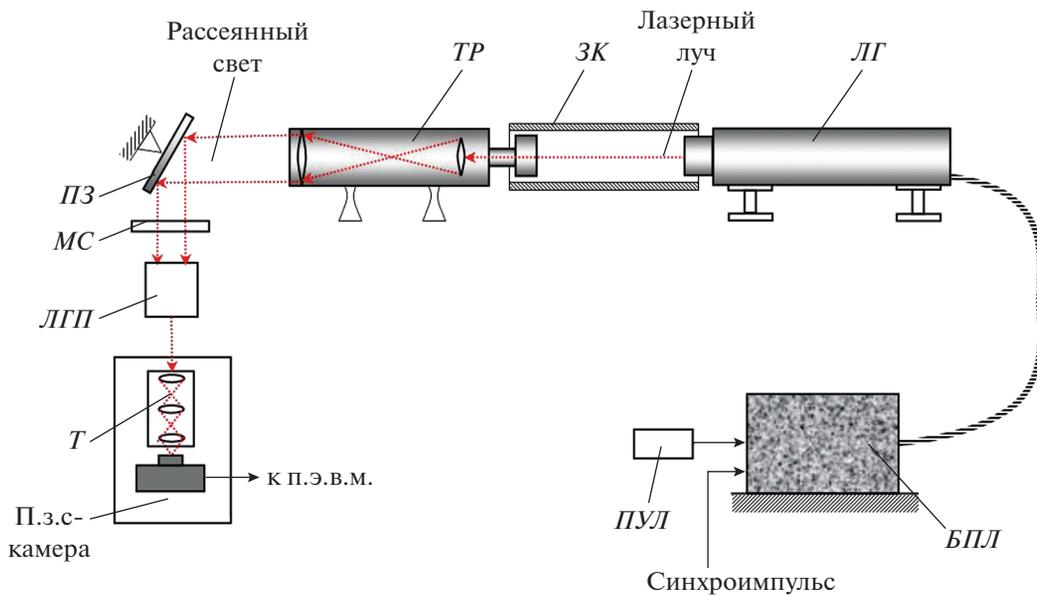




**Рис. 2.** Схема регистрации течения в режиме шлирен-метода. ЛГ – лазерная головка; ЗК – защитный кожух; МС – матовое стекло; ПЗ – поворотное зеркало; ТР – телескоп-рассеиватель; УТ – ударная труба (сечение); Т – телескоп из объектива  $5\times$  и окуляра  $5\times$ ; ПУЛ – пульт управления лазером; БПЛ – блок питания лазера; ИАБ-451 – теньевая установка.

• кварцевые датчики давления Д с плоским чувствительным элементом PS-01 (чувствительность 0.196 пКл/кПа, измеряемый диапазон давления 0.02–25 МПа) либо PS-02 (чувствительность 2.9 пКл/кПа, измеряемый диапазон давления 1–250 МПа) [8], пьезокерамические датчики

давления СПК-01 (измеряемый диапазон давления 0.1–2 МПа, приемный элемент сферический) [9], сульфат-литиевый датчик давления с коническим приемным элементом (чувствительность 25 пКл/атм, измеряемый диапазон давления 0.02–35 МПа);



**Рис. 3.** Схема регистрации течения в режиме рассеянного лазерного излучения. ЛГ – лазерная головка; ЗК – защитный кожух; МС – матовое стекло; ПЗ – поворотное зеркало; ТР – телескоп-рассеиватель; ЛГП – легкогазовая пушка (сечение); Т – телескоп из объектива  $1\times$  и окуляра  $10\times$ ; ПУЛ – пульт управления лазером; БПЛ – блок питания лазера.

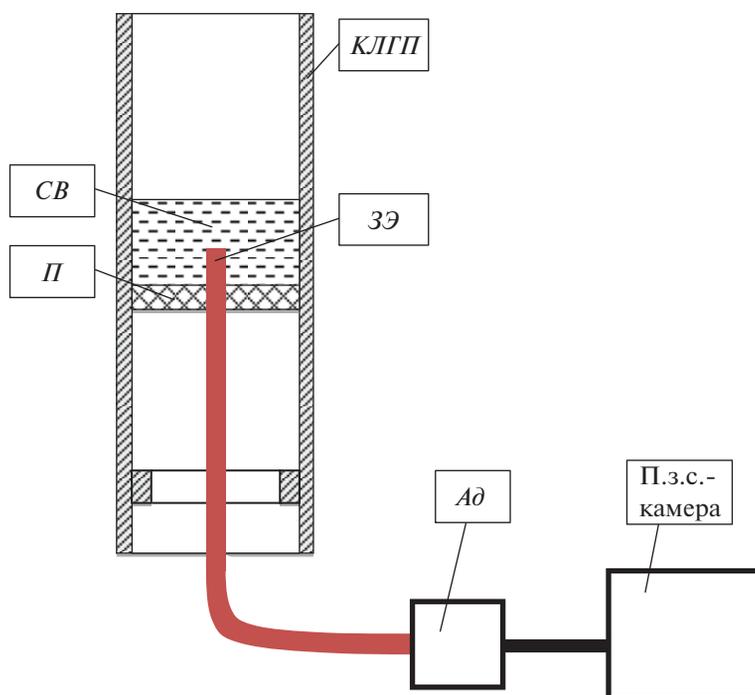


Рис. 4. Схема регистрации течения эндоскопом. КЛГП – канал легкогазовой пушки; ЗЭ – зонд эндоскопа; Ад – адаптер; СВ – слой воды; П – подложка (пенопласт).

– система синхронизации аппаратуры, содержащая:

- осциллограф DPO 4034;
- генератор задержек и импульсов ГЗИ для формирования по четырем каналам пусковых импульсов с TTL-логикой (5 В) с пикосекундной точностью, которые запускают в установленное время ЛУ, п.з.с.-камеру, пусковую высоковольтную установку ПВУ;
- источник бесперебойного питания smart-UPS 1500 Вт;
- генератор испытательных импульсов И1-11, запускаемый TTL-сигналом от ГЗИ, обеспечивающий подачу импульса 50 В ( $\pm 0.6\%$ ) на блок формирования импульса;
- блок формирования импульса БФИ для усиления импульса с И1-11 в 5 раз и запуска пусковой установки ударной трубы;
- пусковая высоковольтная установка ПВУ, представляющая собой конденсаторную батарею с выходным импульсным напряжением 20 кВ, используемым для пуска ударной трубы, ПВУ выдает синхроимпульс напряжением 25 В на осциллограф DPO 4034;

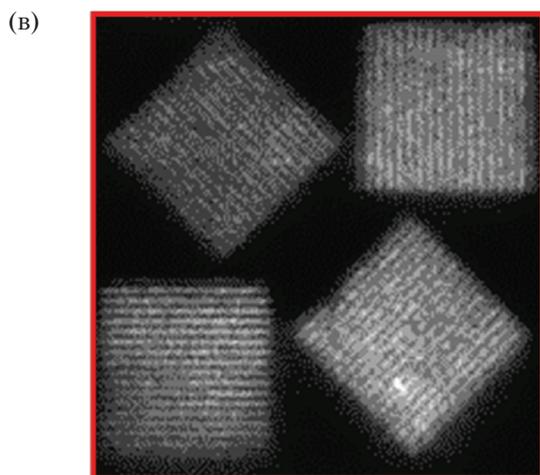
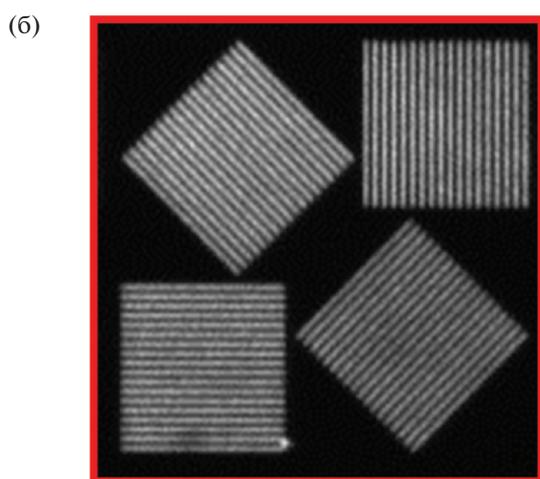
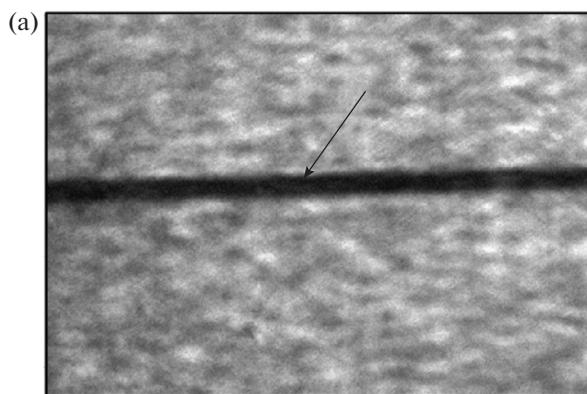
– система обработки данных, включающая в себя персональный компьютер, сканер, принтер, программное обеспечение (программы: “Autoview” [10], “Searcher”, Origin, Microsoft Excel).

– экспериментальное оборудование: ударные трубы и легкогазовые пушки (ускорительные каналы), предназначенные для создания газодинамических течений на контактных границах веществ, различающихся по плотности; внутреннее сечение применяемых нами ударных труб и легкогазовых пушек составляло  $40 \times 40 \text{ мм}^2$ , измерительные секции (каналы) этих установок были изготовлены из оптически прозрачного оргстекла, обрамленного в металлические обоймы со смотровыми окнами (конструкция и принцип их работы изложены в работах [11–15]).

### РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА

После монтажа ударной трубы (легкогазовой пушки), настройки оптической системы, ввода временных параметров и интервалов задержек регистрации аппаратуры (ЛУ, п.з.с.-камеры) осуществляются зарядка конденсаторной батареи пусковой установки и пуск комплекса от кнопки ГЗИ.

Комплекс работает в нескольких режимах: шлирен-метода (при числе Маха ударной волны в газах до  $M = 10$ ), в режиме регистрации течения при рассеянном лазерном излучении (при ускорении жидкого слоя до  $g = 10^6 \text{ м/с}^2$  и давлении в потоке до 500 атм), а также в режиме эндоскопа (при давлении в потоке до 10 атм). В режиме шлирен-метода (рис. 2) регистрируются ударные вол-



**Рис. 5.** Видеокадры тест-объектов: **а** – изображение проволоки (показано стрелкой) толщиной 0.15 мм, зарегистрированное шлирен-методом; **б** – изображение 25-го элемента мира № 1 с расстоянием между линиями 5.2 мкм, зарегистрированное в рассеянном лазерном излучении; **в** – изображение мира № 2 с расстояниями между линиями 10 мкм, зарегистрированное через эндоскоп.

ны, волны разрежения в течении, структура зоны перемешивания. Этот режим используется для исследования г.н. и т.п., как правило, в газах.

В режиме рассеянного лазерного излучения (рис. 3) регистрируются границы течения жидкости и газа, зона перемешивания веществ, ее структура, развитие возмущений и т.д.

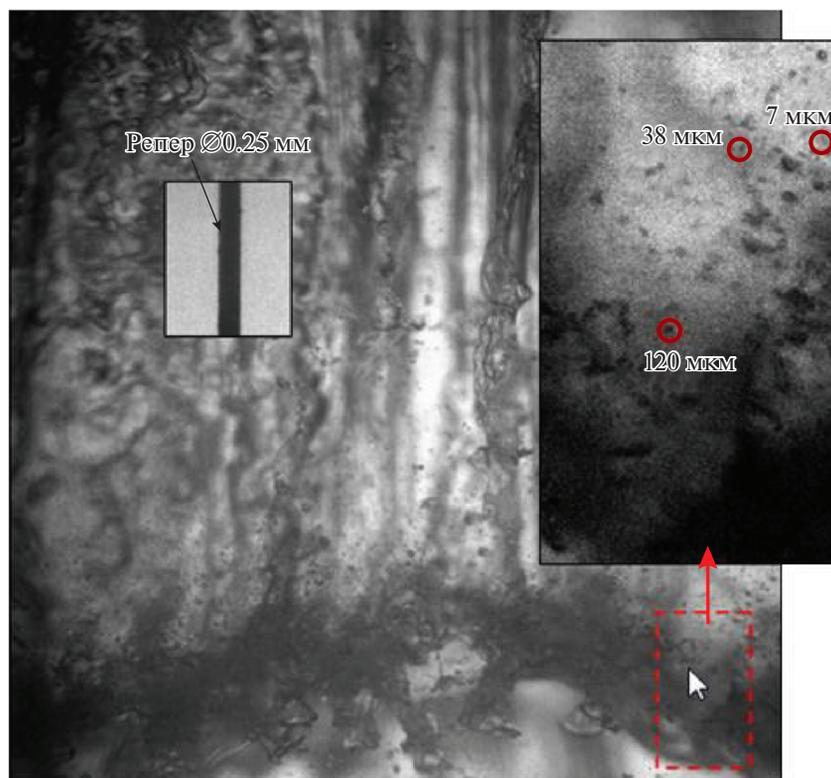
Режим эндоскопа (рис. 4) используется, как правило, для регистрации внутренней структуры течения, диспергирования жидких струй, капель под действием ударных волн; относительно тонкий (10 мм) и длинный (200 мм) зонд эндоскопа позволяет проникнуть в глубь зоны т.п., приблизиться к струе, находящейся в ударной трубе.

На рис. 5 приведены видеокадры, иллюстрирующие возможности пространственного разрешения аппаратуры комплекса при работе в этих режимах. По оценкам, разрешение комплекса составляет: в режиме шлирен-метода  $\approx 30$  мкм, при регистрации течения в рассеянном лазерном излучении  $\approx 5$  мкм, в режиме эндоскопа  $\approx 10$  мкм.

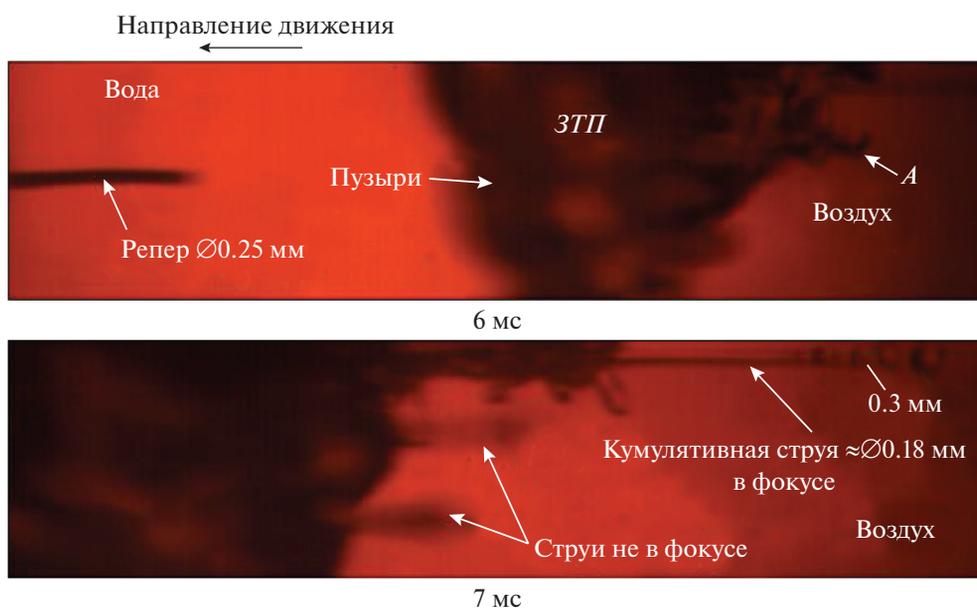
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Исследования неустойчивости Релея–Тейлора на границе газ–жидкость*

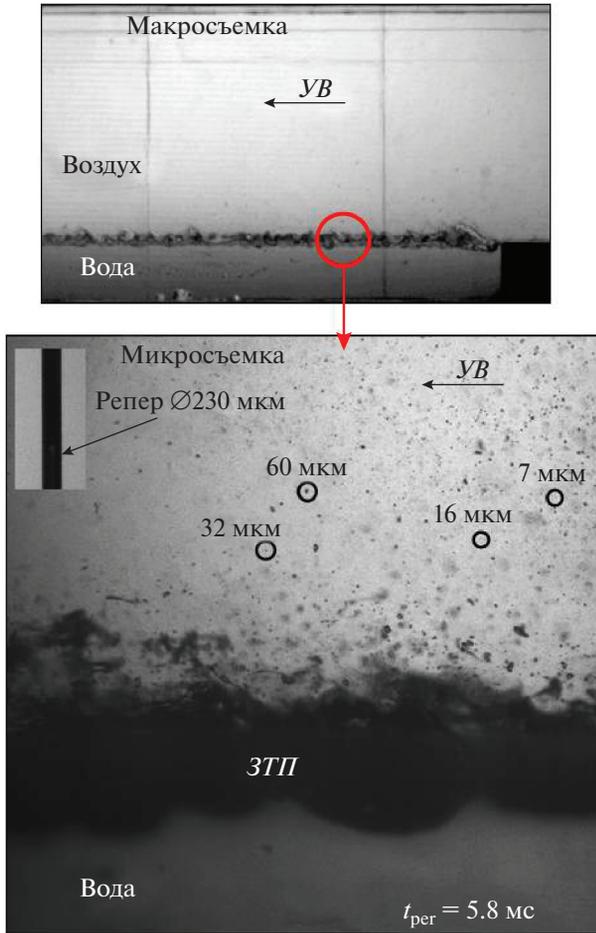
В тестовых испытаниях комплекс использовали в экспериментах по исследованию структуры зоны турбулентного перемешивания, развивающегося при неустойчивости Релея–Тейлора на границе газ–жидкость. В этих экспериментах вода заливалась в кювету размером  $20 \times 20 \times 5$  мм прозрачного контейнера, который ускорялся сжатым гелием в канале легкогазовой пушки. Схема пушки и принцип ее работы описаны в [14]. Ускорение жидкого слоя составляло  $g = 10^3 g_0$ , где  $g_0 = 9.8 \text{ м/с}^2$ . Регистрация проводилась в режиме рассеянного лазерного излучения через телескоп, состоящий из объектива  $1\times$  и окуляра  $10\times$ . Расстояние от объектива до области видеорегистрации составляло  $\sim 80$  мм, глубина резкости  $\sim 0.5$  мм. На рис. 6 и 7 представлены видеокадры микроструктуры зоны турбулентного перемешивания гелия и воды. На рис. 6 видно, что в зоне т.п. присутствуют нераспавшиеся струи жидкости и множество жидких частичек (капель). При исследовании структуры струй и пузырей зоны т.п. было обнаружено, что на границе раздела газ–жидкость могут образовываться кумулятивные микроструи жидкости (см. рис. 7), которые со временем распадаются на капли. Образование этих струй, по-видимому, связано со схлопыванием пузырьков газа, находящихся в зоне т.п.



**Рис. 6.** Структура зоны турбулентного перемешивания при развитии неустойчивости Релея–Тейлора на границе газ–жидкость.



**Рис. 7.** Проникновение струй жидкости в газ (стрелкой *A* показано начало образования струи, *ЗТП* – зона турбулентного перемешивания).



**Рис. 8.** Развитие зоны турбулентного перемешивания на границе газ–жидкость при неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (регистрация при рассеянном лазерном излучении). Стрелкой показано направление воздушной ударной волны *УВ*, *ЗТП* – зона турбулентного перемешивания.

#### *Исследование неустойчивости Кельвина–Гельмгольца*

В этих опытах воду наливали в кювету размером  $100 \times 10 \times 10$  мм, расположенную на нижней стенке оптически прозрачной измерительной секции воздушной ударной трубы (схема трубы, принцип ее работы и техника эксперимента подробно представлены в работе [15]). Регистрация в этих опытах проводилась в режиме рассеянного лазерного излучения через телескоп, состоящий из объектива  $1.5\times$  и окуляра  $16\times$ . Расстояние от объектива до области видеорегистрации составляло  $\sim 70$  мм, глубина резкости  $\sim 0.4$  мм. Касательно к поверхности жидкости распространялась воздушная ударная волна с числом Маха  $M = 1.3$ . Под действием этой волны на границе воздух–вода развивалась неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, которая приводила к перемешиванию ве-

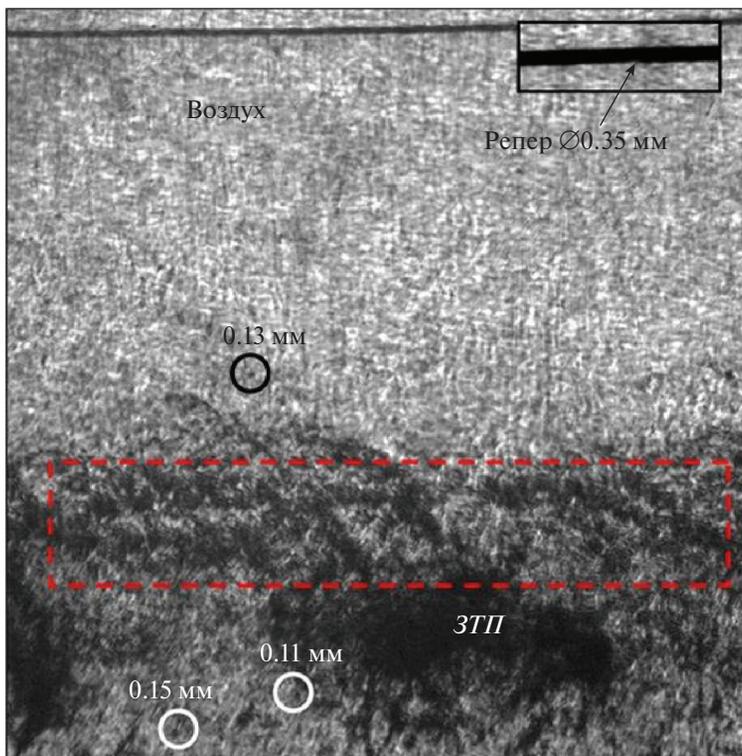
ществ. На рис. 8 представлены видеокadres данного течения, иллюстрирующие макрорежим регистрации (пространственное разрешение  $\sim 100$  мкм) и режим микрорегистрации. В режиме микрорегистрации удается разрешать движение частиц диспергированной воды размерами от 7 мкм и выше. По видеокadres микро съемки видно, что в верхней части зоны т.п. (со стороны воздуха) вода интенсивно диспергирует на капли, которые в макрокопическом режиме регистрации не разрешаются.

#### *Исследование неустойчивости Рихтмайера–Мешкова*

Данные эксперименты проводились также на ударной трубе в режиме регистрации течения шлирен-методом, глубина резкости составляла  $\approx 10$  мм (геометрия трубы, принцип ее работы и техника эксперимента подробно представлены в работах [12, 13]). Воздушная ударная волна с числом Маха  $M \approx 2.3$  распространялась через контактную границу между воздухом и аргоном. На контактной границе газов развивалась неустойчивость Рихтмайера–Мешкова, которая приводила к турбулентному перемешиванию веществ. Затем ударная волна отражалась от жесткой стенки, расположенной в нижней части трубы, и проходила через образовавшуюся ранее зону перемешивания. Опыты показали, что после прохождения отраженной волны через зону перемешивания последняя стремится к однородной, т.е. размеры вихрей зоны становятся примерно одинаковыми (рис. 9). При этом структура самой волны изменяется: волна искажается и расширяется (рис. 10). Образование однородной турбулентности может быть связано с дроблением вихрей зоны ударной волны и смещением спектра пульсаций турбулентных величин в сторону меньших масштабов. Искажение и расширение волны обусловлено ее прохождением по гетерогенной смеси двух газов (разные участки фронта волны движутся с различной скоростью по легкому и тяжелому газам) [12].

#### *Исследование микроструктуры распавшихся капель и струй жидкости*

На рис. 11а показан один из видеокadres, на котором удалось зарегистрировать фрагментацию капли воды с начальным диаметром 2 мм, находящуюся в ударной трубе, после воздействия на нее воздушной ударной волны с числом Маха  $M = 1.05$ . Каплю формировали на кончике иглы медицинского шприца. Под действием ударной волны она срывалась с иглы и разрушалась. Течение регистрировалось видеокамерой в режиме рассеянного лазерного излучения через оптиче-



**Рис. 9.** Структура зоны турбулентного перемешивания на границе воздух–аргон (штриховыми линиями обведена область однородной турбулентности).

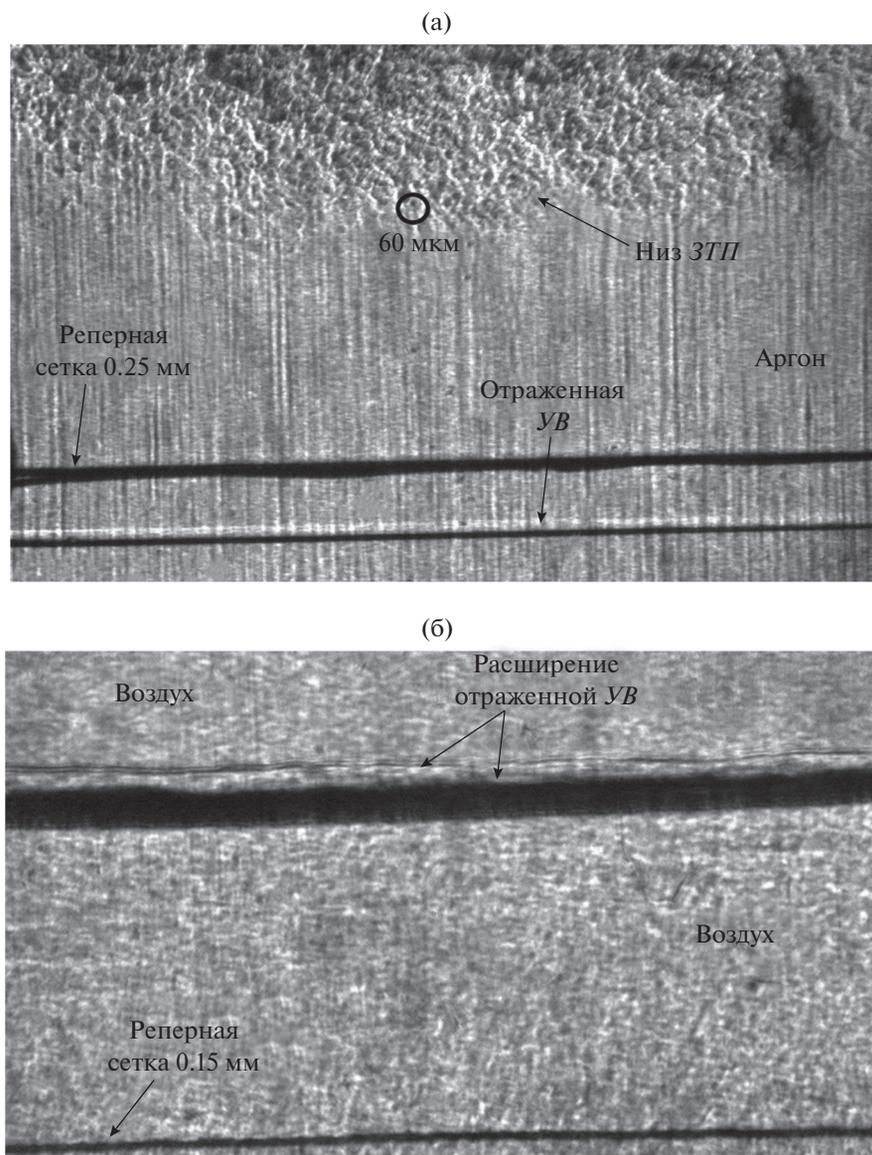
скую систему, состоящую из объектива 1.5<sup>х</sup> и окуляра 20<sup>х</sup>. Расстояние от объектива до капли составляло ~60 мм, глубина резкости ~0.3 мм. На видеокadre хорошо просматривается множество микрочастиц жидкости. На рис. 11б представлены видеокadre диспергирования струи воды диаметром 0.5 мм в ударной трубе под действием такой же, что и выше, ударной волны с регистрацией течения через эндоскоп в проходящем свете. Эндоскоп через адаптер был оптически соединен с видеокамерой. Расстояние от торца эндоскопа до струи составляло ~50 мм, глубина резкости ~0.4 мм. На видеокadre также хорошо разрешаются частицы жидкости размером от 17 мкм. Полученные данные позволяют рассчитать распределение частиц по размерам, прогнозировать время испарения частиц.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для измерения положения границ течения (границ зоны т.п., ударной волны, фронта микрочастиц и т.д.) в комплексе используется программа “Autoview” [10]. Для измерения размеров частиц и их скоростей в зоне перемешивания или диспергирования жидкостей нами разработана специальная математическая программа “Seag-

cher”. Алгоритм обработки видеокadre по этой программе достаточно громоздкий. Его изложение выходит за рамки данной работы. Отметим лишь основные принципы обработки видеокadre. Диаметр частицы определяется по площади ее изображения. Масштабирование размеров проводится по известному размеру репера (обычно проволочки диаметром 0.1–0.3 мм), введенного перед опытом в центр поля изображения. Обрабатываются только те частицы, которые лежат в фокусе оптической системы, т.е. с гистограммой почернения, равной гистограмме репера. Скорость частиц определяется при использовании двухимпульсной лазерной подсветки течения, разнесенной во времени. При этом пролетное расстояние частицы определяется по двум видеокadre относительно положения репера. Программа учитывает статическую и кинематическую нерезкость частиц, шумы матрицы видеокамеры, отражение света от одной частицы к другой.

По результатам метрологической экспертизы погрешности измерений составили: диаметра фрагментов зоны турбулентного перемешивания –  $\Delta d \leq 17\%$ ; скорости фрагментов зоны турбулентного перемешивания, ударной волны –  $\Delta U \leq 10\%$ ; давления в газодинамическом потоке –  $\Delta P \leq 10\%$ ; времени –  $\Delta t \leq 50$  нс.



**Рис. 10.** Видеокadres изображения ударной волны в газах: **а** – изображение отраженной УВ до прохождения зоны турбулентного перемешивания (ЗТП); **б** – изображение отраженной УВ после прохождения ЗТП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

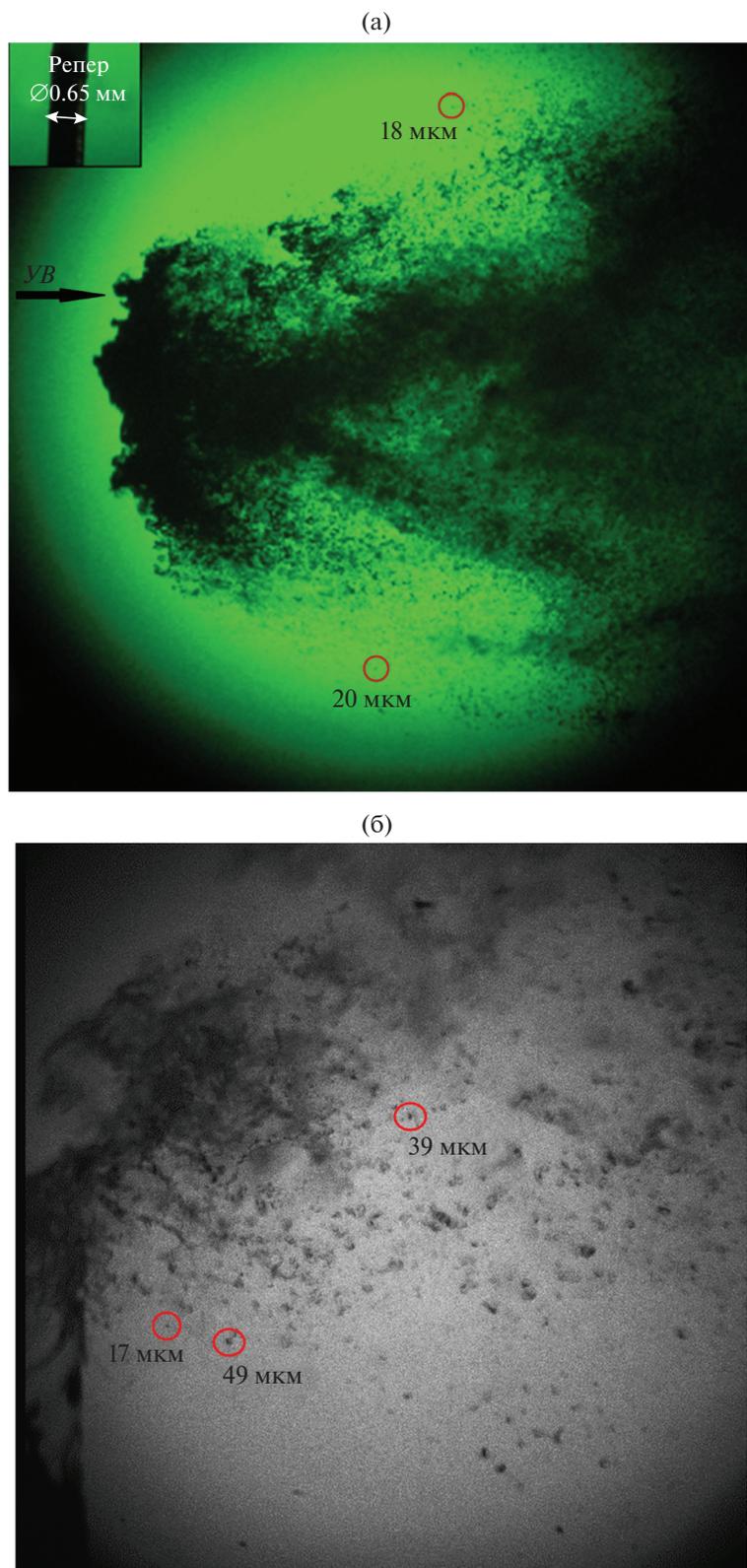
Разработан и изготовлен комплекс для исследования микроструктуры турбулентных течений. Комплекс позволяет исследовать течения с пространственным разрешением от 5 мкм и временным – от 7 нс.

С использованием комплекса получен ряд новых результатов:

- из зоны т.п., развивающейся при неустойчивости Релея–Тейлора на границе газ–жидкость, выбрасываются тонкие микрокумулятивные струи жидкости, образование которых можно связать со схлопыванием пузырьков газа в зоне;

- после прохождения ударной волны по зоне т.п. газов последняя стремится к однородной, что связано с разрушением крупных вихрей волной, структура фронта ударной волны при этом изменяется: волна искажается и расширяется при прохождении по гетерогенной двухфазной среде.

Зарегистрировано множество отдельных частиц в зоне турбулентного перемешивания жидкости и газа, а также фрагментов раздробленной капли (струи) жидкости, что позволяет построить распределение частиц по размерам и проводить высокоточную калибровку расчетных методик.



**Рис. 11.** а – капля воды после фрагментации; б – эндоскопия распавшейся струи воды в проходящем свете.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor G.I.* // I. Proc. Roy. Soc. 1950. V. A201. P. 192.
2. *Richtmyer R.D.* // Commun. Pure Appl. Math. 1960. V. 13. P. 297.
3. *Мешков Е.Е.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 5. С. 151.
4. *Helmholtz H.L.F.* Uber discontinuirlisch Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl, Berlin: Preus. Akad. Wiss, 1868.
5. *Biamino L., Mariani C., Jourdan G., Houas L., Vandenoombaerde M., Souffland D.* // Journal of fluids engineering. 2014. V. 136. № 9. P. 091204-1. doi 10.1115/1.4026562
6. *Meshkov E.* // Phil. Trans. R. Soc. A. 2003. V. 371. P. 20120288.
7. *Абакумов С.А., Кривонос О.Л., Невмержицкий Н.В., Руднев А.В., Сотсков Е.А., Сеньковский Е.Д., Точилина Л.В., Фролов С.В.* Патент на полезную модель № 139204 РФ // Бюлл. № 10. Опубл. 10.04.2014.
8. Датчик динамического давления PS-01. Паспорт. ООО "Глобал Тест". www.globaltest.ru
9. *Будников И.Н., Жиёмбетов А.К., Лобастов С.А., Михайлов А.Л., Сасик В.С., Смирнов Г.С.* // Труды Международной конференции "VII Харитоновские тематические научные чтения". Саров: Изда-  
тельско-полиграфический комплекс ФГУП  
РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 719.
10. *Poduvalov A.N.* // The Proc. of the 6th IWPTSM. France. Marseille, 1997. P. 411.
11. *Рахматулина Х.А., Семенова С.С.* Ударные трубы. М.: Изд-во Иностран. лит-ра, 1962.
12. *Разин А.Н., Невмержицкий Н.В., Сотсков Е.А., Сеньковский Е.Д., Кривонос О.Л., Левкина Е.В., Фролов С.В., Бодров Е.В., Анисифоров К.В.* // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58. № 2. С. 16. doi 10.15372/PMTF20170202
13. *Nevmerzhtskiy N.V.* // Phil. Trans. R. Soc. A. 2013. V. 371. № 2003. P. 20120291.
14. *Nevmerzhtskiy N.V., Sotskov E.A., Sen'kovskiy E.D., Krivonos O.L., Polovnikov A.A., Levkina E.V., Frolov S.V., Abakumov S.A., Marmyshev V.V.* // Journal of Fluids Engineering. 2014. V. 136. № 9. 091207. doi 10.1115/1.4027774
15. *Невмержицкий Н.В., Михайлов А.Л., Раевский В.А., Ляпеби Э., Осмон А., Сеньковский Е.Д., Сотсков Е.А., Вахмистров К.С., Давыдов Н.Б., Апрельков О.Н., Левкина Е.В., Кривонос О.Л., Соколова А.С.* // ВАНТ. Серия: Теоретическая и прикладная физика. 2014. Вып. 2. С. 33.