

сферических очагов пламени происходит на фоне и под действием периодического течения, вызванного стоячей акустической волной.

Экспериментально было исследовано развитие пламен в смесях  $[H_2]=14-18\%$  под действием поля искусственной гравитации, созданного волной расширения в вакуум. Было показано, что пламя в смеси  $[H_2]=16\%$  обладает максимальной чувствительностью к воздействию сил инерции.

Таким образом, осциллирующее пламя в смеси  $[H_2]=16\%$  управляется, по-видимому, совместным влиянием неустойчивости Релея-Тейлора и растяжением пламени.

### Список литературы

1. Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников, С.П. Медведев, С.В. Хомик "Термогазодинамика, горения и взрыва водорода", Санкт-Петербург: изд. Санкт-Петербургского университета, 2009.

## ЭВОЛЮЦИЯ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ПРОШЕДШЕЙ ЧЕРЕЗ ЗОНУ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ

*Н.В. Невмержицкий, А.Н. Разин, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, О.Л. Кривonos,  
Е.В. Левкина, Е.В. Бодров, К.В. Анисифоров, С.В. Фролов, А.С. Кучкарева*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Представлены экспериментальные результаты исследования поведения фронта ударной волны, прошедшей через зону турбулентного перемешивания, развивающегося на контактных границах *воздух-СО<sub>2</sub>*, *воздух-SF<sub>6</sub>*, *воздух-He* и *воздух-Xe-воздух*.

Эксперименты проводились на ударной трубе. Регистрация течения осуществлялась видеокамерами при короткой (7 нс) лазерной подсветке.

Получено, что при прохождении ударной волны через зону перемешивания ее фронт искажается и расширяется.

### Введение

При численном моделировании обжатия слоистых систем с использованием уравнений Эйлера (расчет средних газодинамических величин) и полуэмпирических моделей турбулентности (расчет турбулентных характеристик) чрезвычайную сложность представляют течения, развивающиеся под действием ударных волн (УВ). Значительную трудность в расчетах течений с УВ представляет задача качественного описания структуры фронта УВ при ее движении по турбулентному полю однородного газа или смеси разноплотных газов. Задача является актуальной поскольку точность вычисления генерационных членов на фронте УВ при решении уравнений ТП определяется точностью описания структуры фронта УВ. При изучении структуры фронта УВ рассматриваются три случая: 1) движение УВ по покоящемуся однородному газу; 2) движение УВ по турбулентному полю однородного газа; 3) движение УВ по турбулизованной смеси нескольких газов различающихся плотностей.

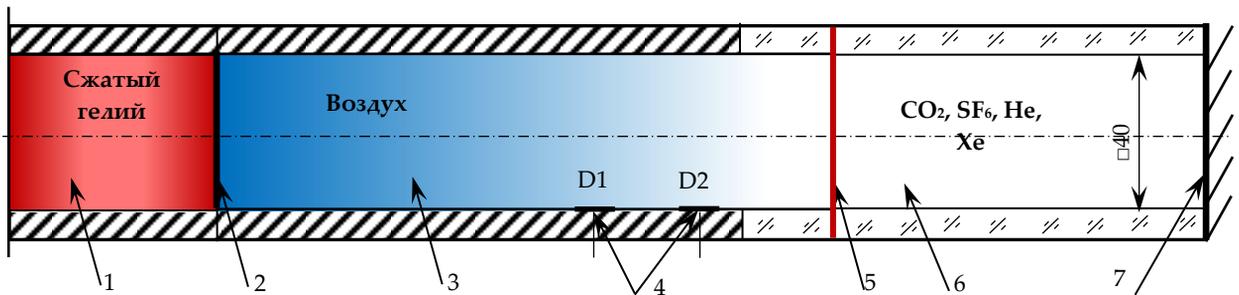
Взаимодействию УВ с турбулентным полем посвящены, в частности, работы [1–5], в которых отмечается, что при значительных интенсивностях турбулентности перед фронтом УВ он деформируется и становится неустойчивым (ширина фронта УВ меняется во времени и по пространству). Согласно [1–4] в зависимости от величины флуктуаций давления перед фронтом УВ наблюдается два режима взаимодействия: режим со скачком величин на фронте и неустойчивый режим со сглаженными профилями величин на фронте. Поскольку в численных методиках генерация турбулентности определяется градиентами средних газодинамических величин, для повышения точности расчета генерационных членов уравнений ТП на фронте УВ следует каким-

либо образом учитывать изменение структуры фронта УВ при ее взаимодействии с турбулентным потоком. Отметим, что на современном этапе развития вычислительной техники и численных методов невозможно с желаемой точностью смоделировать в практических задачах (в том числе и с использованием уравнений Навье-Стокса) взаимодействие УВ с турбулентным полем без привлечения экспериментальных данных.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эволюции фронта УВ, прошедшей через турбулентное поле газов.

### Техника экспериментов

Эксперименты проводились на ударной трубе, схема которой приведена на рисунке 1. Измерительная секция ударной трубы разделялась одной (или двумя) полимерными пленками на два (три) отсека. Верхний отсек секции заполнялся воздухом. Нижний отсек от атмосферной среды отделялся жесткой стенкой. В него закачивался рабочий газ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Xe}$ ) до атмосферного давления. Камера высокого давления (драйвер) ударной трубы заполнялась сжатым гелием. Когда избыточное давление в драйвере достигало определенного значения ( $\approx 25$  атм), происходил саморазрыв диафрагмы, и в камере низкого давления формировалась плоская УВ.



- 1 – камера высокого давления; 2 – диафрагма; 3 – камера низкого давления;  
4 – отметчики времени; 5 – полимерная пленка (контактная граница газов);  
6 – измерительная секция; 7 – жесткая стенка

Рисунок 1. Схема ударной трубы

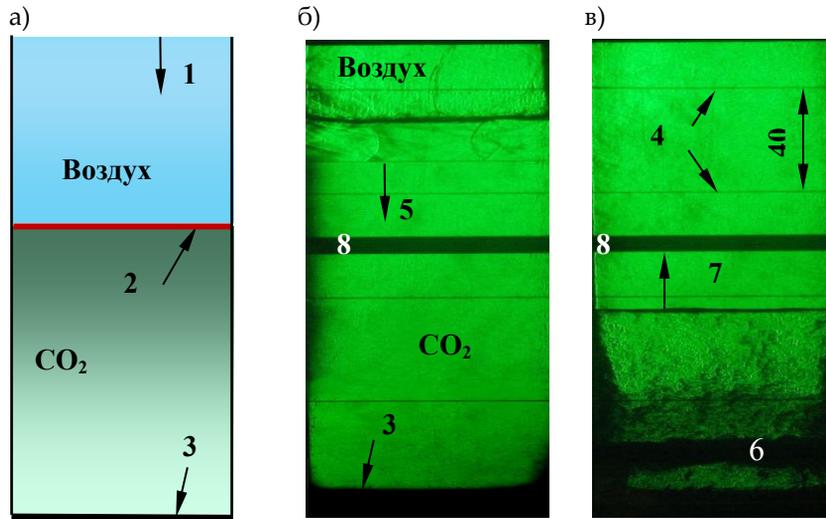
При выходе УВ на контактную границу (КГ) пленка разрывается на фрагменты различных размеров, создавая спектр начальных возмущений на КГ, а граница раздела газов импульсно ускоряется. На контактной границе развивается неустойчивость Рихтмайера-Мешкова, приводящая со временем к образованию зоны ТП двух разноплотных газов. Прошедшая контактную границу УВ сначала движется по покоящемуся газу, затем отражается от жесткой стенки и движется по возмущенному потоку однородного газа. Далее УВ взаимодействует с образовавшейся ранее на КГ зоной турбулентного перемешивания газов и движется вверх по потоку.

Скорость падающей на первую контактную границу УВ определялась по показаниям отметчиков времени D1 и D2 и расстоянию между ними. В качестве отметчиков использовались пьезокерамические датчики давления PS-01 (полоса пропускания  $\sim 20$  кГц, диаметр чувствительного элемента – 10 мм). Регистрация течения проводилась тремя видеокамерами CCD шлирен-методом через трехканальный оптический модуль в макроскопическом (пространственное разрешение  $n = 0,07$  мм) и микроскопическом ( $n = 0,01$  мм) режимах. Две камеры работали в однокадровом режиме, третья – в двухкадровом. Подсветка процесса осуществлялась четырехимпульсным лазером с короткой (7 нс) длительностью импульса (длина волна излучения – 532 нм). Схема регистрации процесса представлена в [6].

### Результаты экспериментов

Видеокадры опытов с двухслойной системой воздух- $\text{CO}_2$  при скорости падающей на КГ ударной волны  $M \approx 2,4$  показаны на рисунке 2 (режим макросъемки) и рисунке 3 (режим микросъемки). При движении УВ по покоящемуся газу ширина фронта УВ зависит от

молекулярной вязкости потока, интенсивности УВ и оценивается в несколько длин свободного пробега молекул. В представленных на рисунке 1 опытах ширина изображения фронта волны равна  $\approx 0,2$  мм. За фронтом УВ просматривается структура возмущенного потока.



а) схема постановки опыта; б) видеокادر,  $t \approx 95$  мкс; в) видеокادر,  $t \approx 465$  мкс  
1 – направление падающей на КГ ударной волны; 2 – контактная граница;  
3 – жесткая стенка; 4 – реперные линии; 5 – УВ, прошедшая КГ; 6 – зона ТП;  
7 – УВ, прошедшая зону ТП; 8 – шпилька

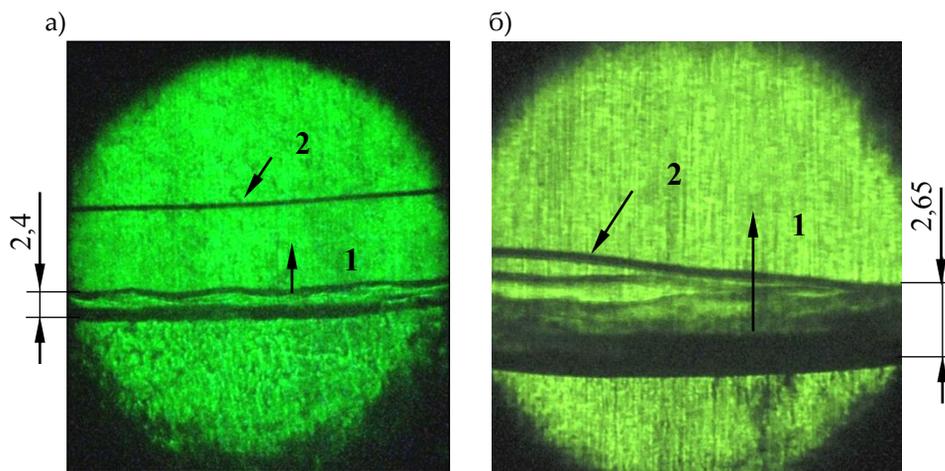
Время отсчитывается от прихода УВ на КГ

**Рисунок 2.** Эксперименты со слойкой воздух- $\text{CO}_2$  (макросъемка)

После прохождения отраженной УВ через зону ТП фронт УВ деформируется и уширяется (рисунок 3). Ширина фронта УВ в значительной степени определяется масштабом флуктуаций потока перед фронтом УВ и в зоне ТП, интенсивностью УВ и турбулентной вязкостью, которая при больших числах Рейнольдса превосходит молекулярную вязкость потока. В этом случае вопрос о структуре фронта УВ очень сложен. С увеличением флуктуаций фронт УВ деформируется и становится неустойчивым: мгновенная пространственная структура фронта изменяется беспорядочно от разрывной до относительно гладкой.

На полученных в режиме микросъемки (рисунок 3) видеокадрах можно наблюдать деформацию фронта УВ, его уширение и “расслоение”. Ширина фронта УВ составляет 2,4 мм на момент времени  $t \approx 445$  мкс и 2,65 мм на момент времени  $t \approx 620$  мкс. Нестационарность и деформация фронта УВ наблюдаются и на большом удалении УВ от зоны ТП. Предполагается, что чередование темных и серых оттенков во фронте УВ обусловлено наличием участков локального уплотнения и разрежения потока во фронте, сформировавшихся под воздействием осцилляций газодинамических величин (пульсаций плотности, скорости) в зоне перемешивания.

Схема проведения опытов с контактной границей воздух- $\text{SF}_6$  и видеокadres поля течения представлены на рисунке 4 (режим макросъемки) на 4 момента времени. Согласно представленным видеокадрам фронт УВ после взаимодействия с зоной ТП расширяется и за время наблюдения остается нестационарным. Как следует из видеокadres микросъемки окрестности фронта УВ (здесь не приводятся), ширина фронта изменяется в пределах 1-3 мм.

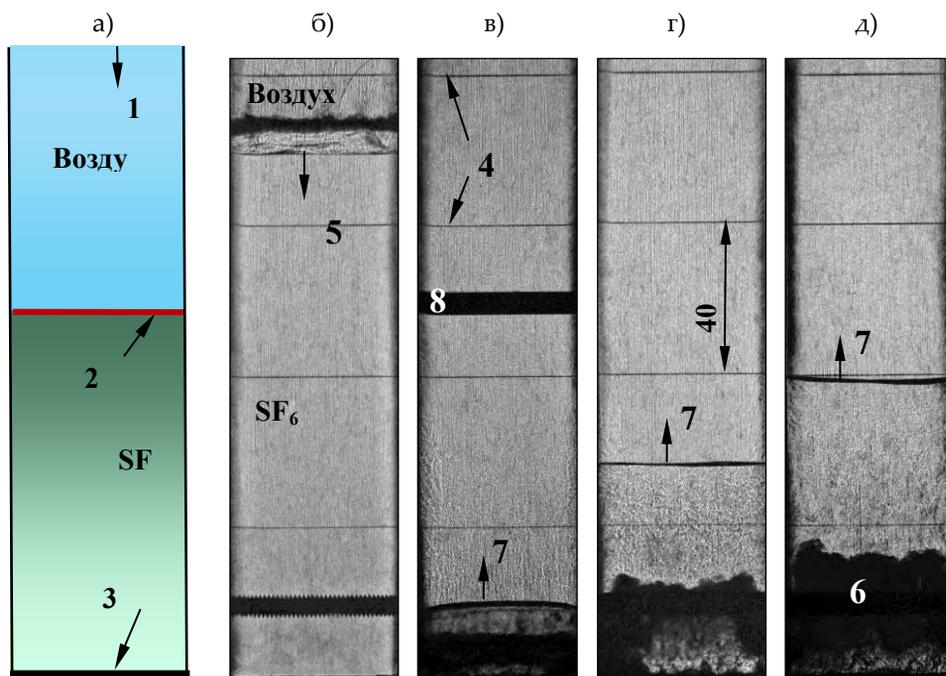


а)  $t \approx 445$  мкс; б)  $t \approx 620$  мкс

1 – УВ, прошедшая зону ТП; 2 – реперная проволочка диаметром 0,24 мм

*Время отсчитывается от прихода УВ на КГ*

**Рисунок 3.** Фронт УВ в опытах со слойкой *воздух-CO<sub>2</sub>* (микросъемка, размеры в мм)

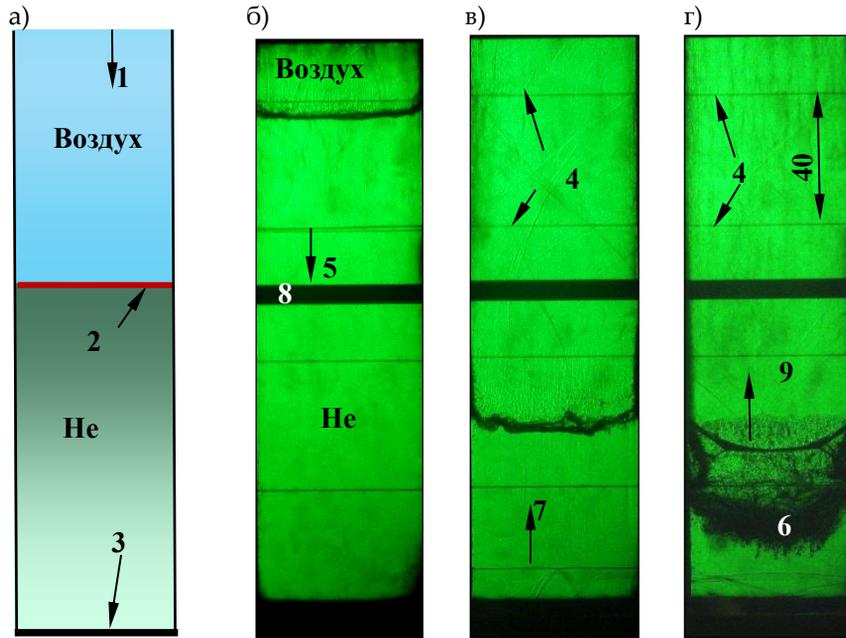


а) схема постановки опыта, б)  $t \approx 124$  мкс; в)  $t \approx 495$  мкс; г)  $t \approx 575$  мкс; д)  $t \approx 615$  мкс

1 – направление падающей на КГ ударной волны; 2 – контактная граница; 3 – жесткая стенка;  
 4 – реперные линии; 5 – УВ, прошедшая КГ; 6 – зона ТП; 7 – УВ, прошедшая зону ТП; 8 – шпилька  
*Время отсчитывается от прихода УВ на КГ*

**Рисунок 4.** Эксперименты со слойкой *воздух-SF<sub>6</sub>* (макросъемка)

В следующих сериях экспериментов структура фронта УВ изучалась после прохождения ударной волной зоны перемешивания со стороны легкого газа. На рисунке 5 приведена схема постановки опытов с парой газов *воздух-He* и видеокadres структуры течения.



а) схема постановки опыта, б)  $t \approx 60 \mu\text{с}$ ; в)  $t \approx 195 \mu\text{с}$ ; г)  $t \approx 260 \mu\text{с}$   
(время отсчитывается от прихода УВ на КГ)  
1 – направление падающей на КГ ударной волны; 2 – контактная граница;  
3 – жесткая стенка; 4 – реперные линии; 5 – УВ, прошедшая КГ;  
6 – зона ТП; 7 – УВ, отраженная от жесткой стенки; 8 – шпилька;  
9 – УВ, прошедшая зону ТП

### Рисунок 5. Эксперименты со слойкой *воздух-He*

По рисунку 5 видно, что ширина изображения ударной волны, прошедшей КГ, и волны, отраженной от жесткой стенки, не значительна ( $\approx 0,2$  мм). Значит, газодинамические флуктуации в однородном газе (гелии) в данной постановке экспериментов не влияют на ширину фронта УВ. После прохождения ударной волной зоны перемешивания фронт волны расширяется, возле стенок измерительной секции образуются так называемые  $\lambda$ -конфигурации. Однако после прохождения ударной волны через зону перемешивания со стороны тяжелого газа (рисунки 1 и 4) фронт УВ деформируется, но на стенках трубы  $\lambda$ -конфигурации не формируются. Формирование  $\lambda$ -конфигураций происходит при взаимодействии УВ с пограничным слоем (рисунок 5г) в случае выхода УВ на КГ со стороны легкого газа.

В следующей серии экспериментов структура фронта УВ изучалась после прохождения ударной волной зоны перемешивания также со стороны легкого газа. На рисунке 6 приведена схема постановки опытов с трехслойной системой *воздух-He-воздух* и видеокдры структуры течения.

Изображение фронта УВ после отражения от жесткой стенки (до момента прохождения зоны перемешивания на КГ<sub>2</sub>) показано на рисунке 6б. После прохождения волной зоны ТП на КГ<sub>2</sub> наблюдается расширение фронта УВ (рисунок 6в). В опыте, как и в предыдущей серии экспериментов, формирование  $\lambda$ -конфигурации происходит после взаимодействия УВ с пограничным слоем (рисунки 6в и 6г).

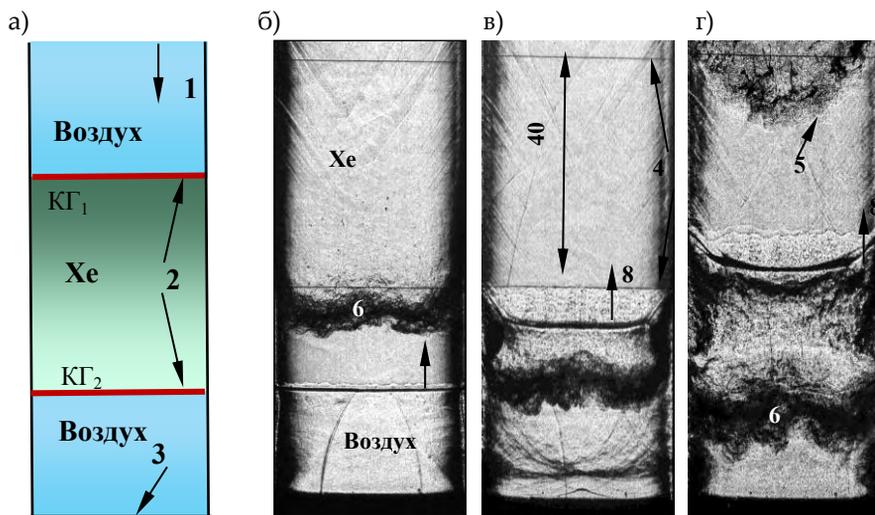
### Заключение

По результатам экспериментов можно заключить:

1. При движении ударной волны по покоящемуся газу ширина изображения фронта УВ не изменяется и составляет 0,2 мм.

2. После прохождения ударной волной зоны перемешивания волна деформируется, «расслаивается» и становится нестационарной; ширина фронта УВ увеличивается до  $\approx 3$  мм. При удалении от зоны перемешивания фронт УВ в течении всего времени наблюдения остается нестационарным.

3. После прохождения ударной волной зоны турбулентного перемешивания со стороны легкого газа в окрестности стенок ударной трубы формируются  $\lambda$ -конфигурации с отрывом пограничного слоя.



а) схема постановки опыта, б)  $t \approx 650$  мкс; в)  $t \approx 700$  мкс; г)  $t \approx 750$  мкс

1 – направление падающей ударной волны; 2 – контактные границы; 3 – жесткая стенка;

4 – реперные линии; 5 – зона ТП на КГ<sub>1</sub>; 6 – зона ТП на КГ<sub>2</sub>; 7 – УВ, отраженная от жесткой стенки; 8 – УВ, прошедшая зону ТП на КГ<sub>1</sub>

Время отсчитывается от прихода УВ на КГ<sub>1</sub>

**Рисунок 6.** Эксперименты со слойкой *воздух-Хе*

### Список литературы

1. Lele S.K., Larsson J. Shock-turbulence interaction: what we know and what we can learn from petascale simulations // Journal of Physics: Conference Series 180. 2009. 012032.
2. Bermejo-Moreno I., Larsson J., Lele S.K. LES of canonical shock-turbulence interaction // Centre for Turbulence Research, Annual Research Briefs. 2010. P.209–222.
3. Sinha K., Mahesh K., Candler G. Modelling shock unsteadiness in shock/turbulence interaction // Phys. Fluids. 2003. V. 15. No. 8. P.2290–2297.
4. Larsson J., Lele S.K. Direct numerical simulation of canonical shock/turbulence interaction // Phys. Fluids. 2009. V. 21. 126101.
5. Shestachenko O.E., Kucherenko Yu.A., Piskunov Yu.A. et al. Investigation of dispersion of stationary shock wave upon turbulent layer passage // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. St.-Petersburg, Russia. 1999. P.118-123.
6. Разин А.Н., Невмержицкий Н.В., Сотсков Е.А. и др. Экспериментальные исследования взаимодействия ударных волн с контактной границей и зоной турбулентного перемешивания различных газов // ПМТФ, 2017 (в печати).