

## ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПО СМЕСИ ДВУХ ГАЗОВ

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

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Представлены результаты экспериментов по исследованию динамики ударной волны, проходящей по гомогенной и гетерогенной газовым смесям. Эксперименты проводились на ударной трубе. В качестве гомогенной смеси использовалась смесь гелия и  $SF_6$  различного процентного содержания. Гетерогенная газовая смесь создавалась истечением струи  $SF_6$  в воздух. Регистрация течения проводилась видеокамерами шлирен-методом при короткой (7 нс) четырехимпульсной лазерной подсветке.

Получена зависимость скорости ударной волны от процентного содержания гелия в гомогенной смеси, необходимая для тестирования численных методик. Установлено, что при прохождении воздушной ударной волны по струе  $SF_6$ , волна искажается, расширяется и расслаивается.

### Введение

При использовании полуэмпирических моделей турбулентности для расчета турбулентных течений при наличии ударных волн (УВ) возникает ряд чрезвычайно сложных проблем, обусловленных необходимостью вычислять градиенты средних газодинамических величин на фронте УВ, движущейся по турбулентному полю либо однородного газа, либо смеси разноплотных газов. Вследствие несовершенства современных численных методик эта задача на данный момент времени не решается с желаемой точностью. Если в численной методике для расчета средних газодинамических величин используется система уравнений Эйлера, то при измельчении разностной сетки градиенты средних газодинамических величин на фронте УВ неограниченно растут. Замена уравнений Эйлера на уравнения Навье–Стокса решает проблему неограниченности градиентов на фронте УВ. Однако остается нерешенным вопрос о ширине фронта УВ.

Вопросам сходимости разностного решения на фронте УВ и взаимодействию УВ с турбулентным полем посвящены, например, работы [1–6]. В [5] отмечается, что при значительных интенсивностях турбулентности перед фронтом УВ деформируется и становится неустойчивым (ширина фронта УВ меняется во времени и по пространству). Согласно [5] 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. По этой причине изучение обозначенной проблемы с использованием экспериментов является чрезвычайно важной задачей.

Турбулентное перемешивание веществ разной плотности может происходить в различных режимах, поскольку некоторые объемы газов находятся в гетерогенном состоянии, другие перемешиваются до гомогенного. Для тестирования численных методик, использующих концентрации при расчете течений неоднородных сред, необходимы опытные данные по уравнению состояния смеси и структуре УВ, прошедшей через гомогенную и гетерогенную смеси. В докладе приводятся результаты экспериментов, в которых исследовалась динамика УВ, движущейся по гомогенной и гетерогенной газовым смесям.

### Распространение ударной волны по гомогенной смеси $He-SF_6$

Эксперименты проводились на ударной трубе. Схема проведения опытов показана на рисунках 3а и 4а. Смесь двух разноплотных газов (гелия и  $SF_6$ ) различного процентного содержания готовилась в специальном объеме до начала проведения опытов. Точность процентного содержания

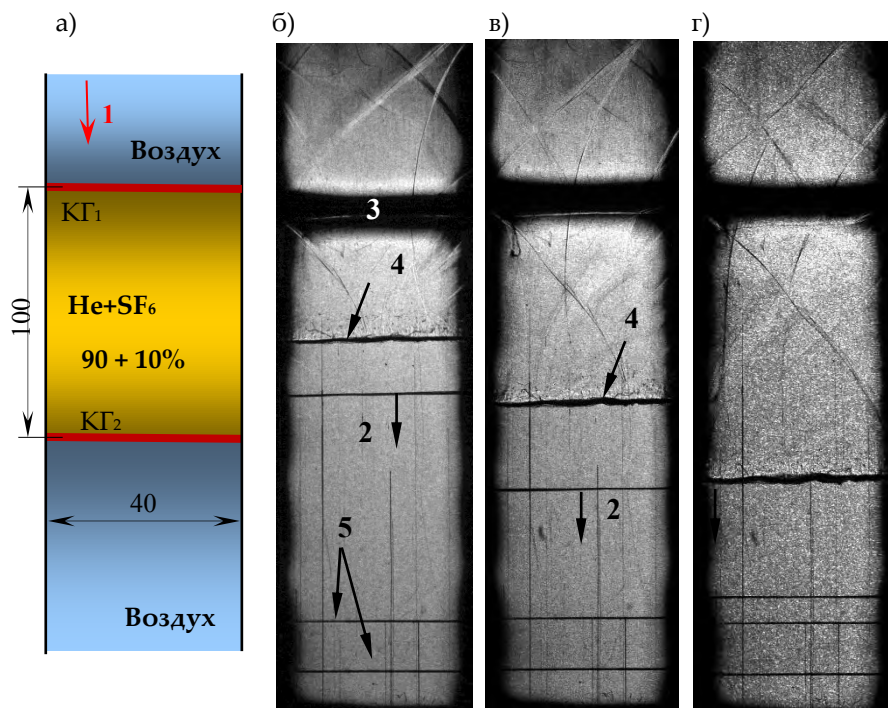
смеси – 99,8%. Смесью заполнялся объем измерительной секции ударной трубы, ограниченный с обеих сторон тонкими ( $\sigma = 1$  мкм) полимерными пленками, установленными в технологических стыках секции. Сформированная в верхней части трубы воздушная ударная волна с числом Маха  $M \approx 2,6$  двигалась вниз и проходила через газовую смесь. Под действием этой волны контактная граница  $КГ_1$  ускорялась, на ней развивалась неустойчивость Рихтмайера-Мешкова, которая со временем приводила к турбулентному перемешиванию воздуха и смеси. Регистрация течения проводилась ССD видеокамерами шлирен-методом при короткой (7 нс) четырехимпульсной лазерной (длина волны  $\lambda = 532$  нм) подсветке. Скорость ударной волны в смеси определялась по видеокадрам экспериментов. Выход ударной волны на вторую контактную границу  $КГ_2$  не регистрировался.

На рисунке 4 зона ТП развивается интенсивней, так как увеличение концентрации тяжелого газа  $SF_6$  приводит к увеличению числа Атвуда на  $КГ$ . Не наблюдается заметного изменения в структуре фронта УВ при его движении по гомогенной смеси газов. Но при 90% содержании  $SF_6$  в смеси зона ТП лежит настолько близко к фронту прошедшей УВ (из-за высокого сжатия  $SF_6$ ), что вихри, образующиеся в зоне перемешивания, как и в [7], деформируют фронт УВ (рисунки 4б и 4в).

Структура течения для некоторых опытов показаны на рисунках 3 и 4.

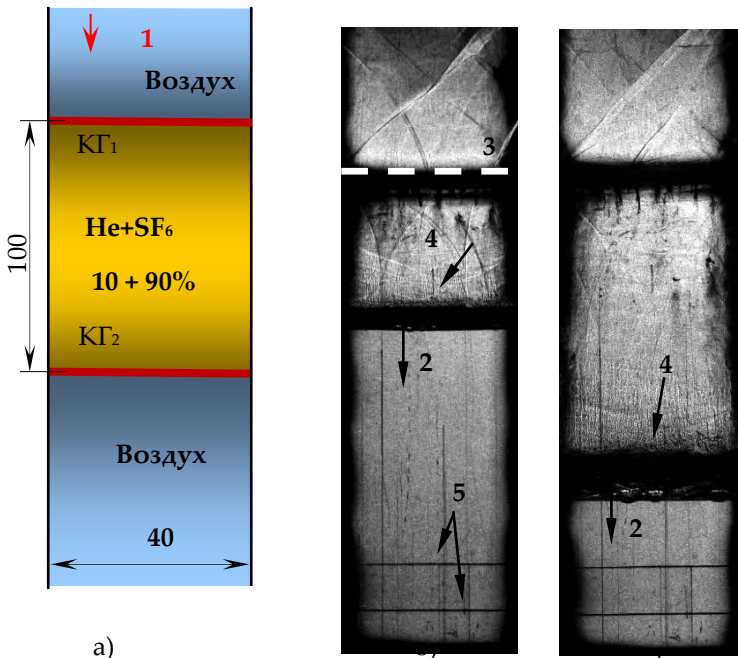
На рисунке 3 зона ТП развита слабо, так как здесь число Атвуда незначительно.

На рисунке 5 для числа Маха падающей ударной волны  $M = 2,6$  и нескольких значений концентраций гелия приведены экспериментальные и расчетные данные по скорости движения УВ. Расчетные значения получены по следующей модели уравнения состояния смеси.



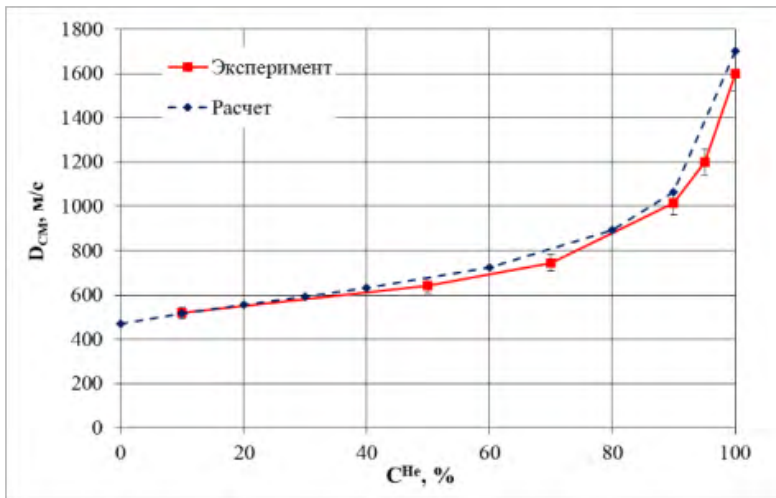
а) схема проведения опыта и состав смеси; б)  $t \approx 37$  мкс; в)  $t \approx 57$  мкс; г)  $t \approx 77$  мкс  
 1 – направление падающей УВ; 2 – УВ, движущаяся по смеси;  
 3 – технологический стык ( $КГ_1$ );  
 4 – зона ТП на  $КГ_1$ ; 5 – реперные линии

Рисунок 3. Прохождение УВ волны по смеси  $He+SF_6$



а) схема проведения опыта; б)  $t \approx 57 \text{ мкс}$ ; в)  $t \approx 127 \text{ мкс}$ ;  
1 – УВ перед падением на КГ1; 2 – УВ, движущаяся по смеси; 3 – технологический стык (КГ1);  
4 – зона ТП на КГ1; 5 – реперные линии

**Рисунок 4.** Прохождение УВ волны по смеси  $He+SF_6$



**Рисунок 5.** Зависимость скорости ударной волны от концентрации гелия

Смесь газов  $He+SF_6$  заменяется на однородный газ с плотностью  $\rho^m = C^{He} \rho^{He} + (1 - C^{He}) \rho^{SF_6}$  ( $C^{He}$  – концентрация He в смеси) и показателем адиабаты

$$\gamma^m = \frac{C_p^m}{C_v^m} = \frac{C^{He} C_v^{He} \gamma^{He} + (1 - C^{He}) C_v^{SF_6} \gamma^{SF_6}}{C^{He} C_v^{He} + (1 - C^{He}) C_v^{SF_6}}$$

которые вычисляются при следующих значениях исходных параметров  $He$  и  $SF_6$  соответственно  $\gamma^{He} = 1,63$ ,  $C_v^{He} = 3,3 \text{ Дж/г}\cdot\text{К}$ ;  $\rho^{He} = 0,000178 \text{ г/см}^3$ ;  $\gamma^{SF_6} = 1,094$ ,  $C_v^{SF_6} = 0,6058 \text{ Дж/г}\cdot\text{К}$ ,  $\rho^{SF_6} = 0,0065 \text{ г/см}^3$  – показатели адиабаты, удельные теплоемкости при постоянном объеме и плотности. Скорость рассчитывалась по одномерной газодинамической программе.

Несложно установить, что при концентрации гелия в смеси  $C_{\text{He}} \approx 83\%$  плотности смеси и воздуха одинаковы (числа Атвуда на контактных границах равны нулю). Следовательно при  $C_{\text{He}} > 83\%$  имеем  $\rho^m < \rho^{\text{Air}}$  (для  $C_{\text{He}} < 83\% - \rho^m > \rho^{\text{Air}}$ ).

Таким образом, значение  $C_{\text{He}} \approx 83\%$  является пограничным, при этом значении концентрации гелия в смеси меняется характер формирующегося течения: ударная волна распространяется из тяжелого газа (*воздуха*) в легкий (*гелий*).

### Распространение ударной волны по гетерогенной смеси воздух-SF<sub>6</sub>

Из-за относительно высокого коэффициента диффузии газов ( $\approx 0,15-2 \text{ см}^2/\text{с}$ ) получение гетерогенной газовой смеси в лабораторных условиях затруднительно. Поэтому моделирование прохождения УВ через такую смесь проводилось в экспериментах со струей SF<sub>6</sub>, истекающей в воздух. При истечении струи часть SF<sub>6</sub> была не перемешана на молекулярном уровне с воздухом, т.е., существовал гетерогенный участок SF<sub>6</sub>.

Эксперименты проводились на ударной трубе в постановке, представленной выше. На расстоянии  $\approx 80 \text{ мм}$  снизу от пленки (КГ<sub>1</sub>) устанавливался один или два газовода, по которым подавалась SF<sub>6</sub>. Над пленкой и под ней находился воздух при атмосферных условиях. Начальный диаметр струи составлял 2 мм; оценочная скорость течения струи – примерно 1 м/с; время истечения до прихода УВ – 2-5 с. Фронт УВ был перпендикулярен направлению течения струи. Скорость падающей волны D варьировалась от 470 м/с до 530 м/с.

На рисунке 6 представлены видеокадры течения в экспериментах.

По видеокадрам видно, что верхняя часть струи перемешалась на гомогенном уровне с воздухом, поэтому после прохождения УВ образовалась зона турбулентного перемешивания этой смеси и воздуха, находящегося над КГ<sub>1</sub>. При малом смещении УВ, распространяющейся вниз, существенного изменения структуры ее фронта не наблюдается: волна идет по гомогенной смеси. При движении волны по гетерогенному участку струи происходит искажение и расслоение (разветвление) фронта волны (рисунок 6).

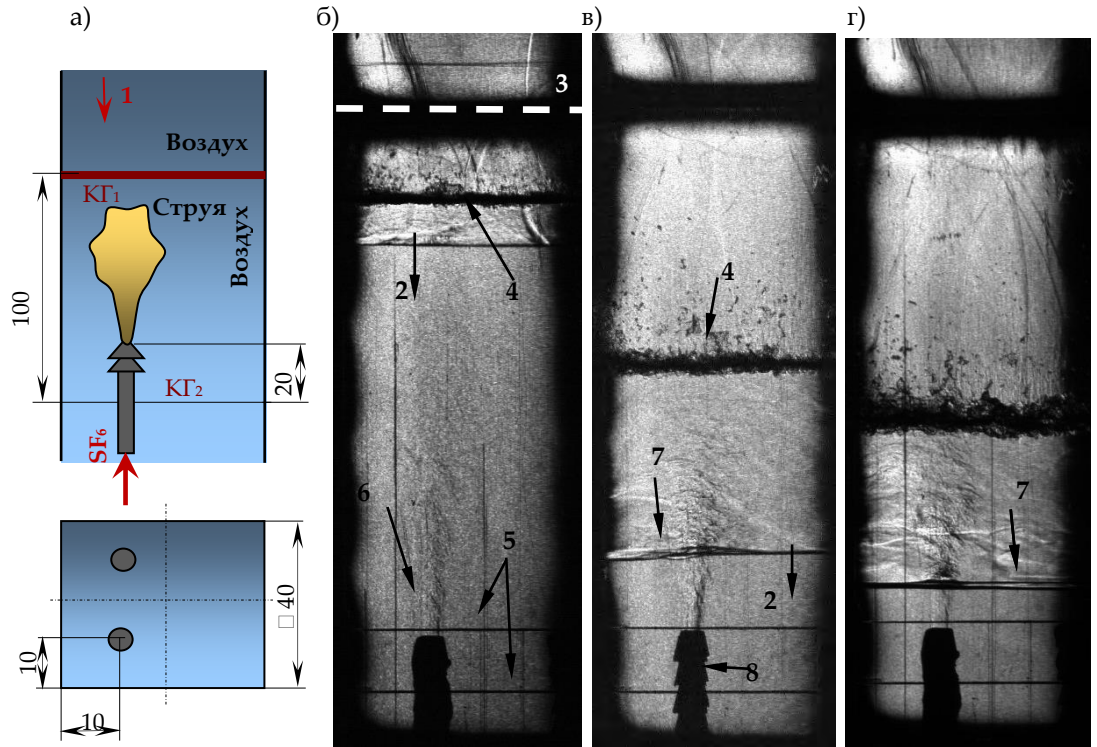
Эти эксперименты подтверждают, что пульсации плотности приводят к изменению структуры фронта УВ. Влияние скорости истечения струи на фронт УВ необходимо исследовать дополнительно.

### Выводы

Получено:

1. При прохождении УВ по гомогенной смеси гелия и SF<sub>6</sub> разного процентного содержания видимый на фотокадрах фронт волны деформируется слабо, значительно изменяется скорость волны. Существенное увеличение скорости ударной волны в смеси наблюдается при концентрации гелия  $> 80\%$ ;
2. После прохождении ударной волны через гетерогенную смесь воздуха и SF<sub>6</sub> происходит искажение и расслоение волны.

Результаты проведенных экспериментов могут быть использованы для тестирования численных методик.



а) схема проведения опыта; б) опыт № 1405,  $D = 530$  м/с,  $t \approx 50$  мкс; в) опыт № 1403,  $D = 477$  м/с,  $t \approx 230$  мкс; г) опыт № 1405,  $D = 530$  м/с,  $t \approx 180$  мкс  
1 – направление падающей УВ; 2 – УВ, движущаяся по смеси; 3 – технологический стык (КГ<sub>1</sub>);  
4 – зона ТП на КГ<sub>1</sub>; 5 – реперные линии; 6 – струя SF<sub>6</sub>; 7 – расслоение УВ; 8 – штуцер  
Время отсчитывается от прихода УВ на КГ<sub>1</sub>

**Рисунок 6.** Прохождение УВ волны по гетерогенной смеси  $He+SF_6$

### Список литературы

- 1 Бобровский Д.И., Большаков И. В., Разин А.Н. О сходимости разностного решения уравнений турбулентного перемешивания при взаимодействии зоны перемешивания с ударной волной // ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 2. С. 16-24.
- 2 Разин А.Н., Большаков И.В. Расчеты неустойчивости и турбулентного перемешивания по модели Никифорова // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т.21. № 4. С. 425-438.
- 3 Разин А.Н., Невмержицкий Н.В., Сотсков Е.А. и др. Экспериментальные исследования взаимодействия ударных волн с контактной границей и зоной турбулентного перемешивания разноплотных газов // ПМТФ. 2017. В печати.
- 4 Sinha K., Mahesh K., Candler G. Modelling shock unsteadiness in shock/turbulence interaction // Phys. Fluids. 2003. V. 15. No. 8. P.2290–2297.
- 5 Larsson J., Lele S. K. Direct numerical simulation of canonical shock/turbulence interaction // Phys. Fluids. 2009. V. 21. 126101.
- 6 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 7th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. St.-Petersburg, Russia. 1999. P.118-123.
- 7 Nevmerzhitskiy N.V. Some peculiarities of turbulent mixing growth and perturbations at hydrodynamic instabilities. Phil. Trans. R. Soc. A. 2013. Vol. 371. N 2003. P. 20120291.