

УДК 532.517.4+519.63

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Н. В. Невмержицкий, А. Н. Разин, Е. Д. Сеньковский,
Е. А. Сотсков, А. А. Никулин, Л. В. Точилина,
О. Л. Кривонос, Е. В. Шапоренко

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

E-mails: NVNevmerzhitskiy@vniief.ru, A.N.Razin@vniief.ru, EDSenkovskiy@vniief.ru,
EASotskov@vniief.ru, LVTochilina@vniief.ru, OLKrivonos@vniief.ru

Приведены результаты экспериментальных и численных исследований процесса турбулентного перемешивания, возникающего на контактных границах трехслойных газовых систем при прохождении стационарной ударной волны с числом Маха $M \approx 1,3$. Эксперименты проводились в воздушной ударной трубе. В качестве рабочих газов использовались воздух, SF_6 , He. Структура течения регистрировалась шпирен-методом с лазерной подсветкой. Получены данные о характере турбулентного перемешивания в двумерных течениях.

Ключевые слова: трехслойные газовые системы, неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, турбулентное перемешивание.

Введение. В последние годы во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) создан ряд пакетов программ для моделирования двумерных течений с учетом турбулентного перемешивания (ТП). Однако имеющиеся экспериментальные данные о ТП в двумерных течениях не позволяют в полной мере провести тестирование численных методик. Так, в работах [1–3] представлены результаты экспериментов и некоторых расчетов, полученные при исследовании ТП, возникающего после прохождения ударной волны (УВ) через контактную границу (КГ), заданную в виде наклонной плоскости, прямой ступеньки или треугольной полости. В данных экспериментах ширина зоны ТП при перемещении вдоль КГ менялась незначительно, что не позволяет детально тестировать двумерные методики.

В [4, 5] приведены экспериментальные данные о ТП в трехслойных газовых системах. В этих опытах на контактных границах газов имелись один или два излома либо эти границы были плоскими и располагались под некоторым углом к направлению движения УВ. Выбранные условия экспериментов позволяли получить информацию для отработки алгоритмов, используемых в разрабатываемых методиках расчета ТП в двумерных течениях. Регистрация течения проводилась скоростной кинокамерой.

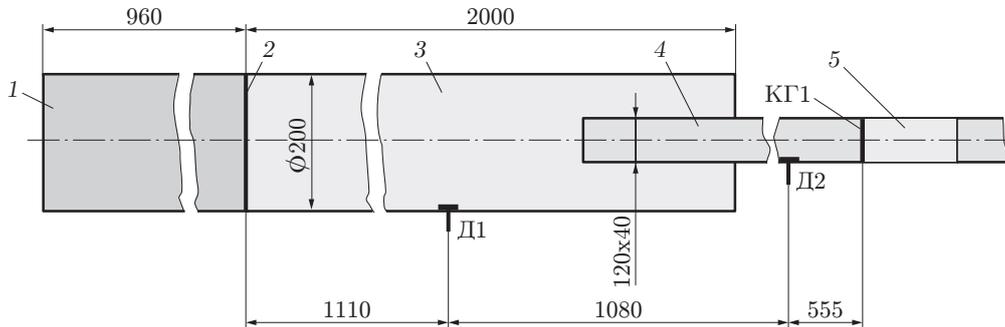


Рис. 1. Схема ударной трубы:

1 — камера высокого давления, 2 — мембрана, 3 — камера низкого давления, 4 — канал, 5 — измерительная секция, Д1, Д2 — датчики давления, КГ1 — первая контактная граница

После создания во ВНИИЭФ лазерного измерительно-вычислительного комплекса появилась возможность провести дополнительные экспериментальные исследования и получить более полную картину течения, чем в [4, 5]. В данной работе проводится сравнение некоторых результатов этих экспериментов с результатами численного моделирования.

1. Методика экспериментов. Схема воздушной ударной трубы представлена на рис. 1. Ударная труба состояла из камер высокого и низкого давления, канала и измерительной секции, включающей несколько отсеков. Камеры высокого и низкого давления разделялись мембраной, изготовленной из целлофана. Измерительные секции были изготовлены из оптически прозрачного оргстекла (рис. 2). Размеры внутреннего сечения секции 120×40 мм. Между стыками отсеков секции устанавливались разделительные полимерные пленки толщиной $\tau = 0,3 \div 1,0$ мкм, выполняющие функцию контактных границ. Выходной торец последнего отсека секции представлял собой жесткую стенку из оргстекла.

Объем измерительной секции между полимерными пленками (между КГ1 и КГ2) заполнялся либо гелием (скорость звука $C_0 \approx 965$ м/с, плотность $\rho_0 = 0,178$ г/л, показатель адиабаты $\gamma = 1,63$), либо элегазом SF_6 ($C_0 \approx 129,5$ м/с, $\rho_0 = 6,5$ г/л, $\gamma = 1,094$). Пространство между второй полимерной пленкой и жесткой стенкой заполнялось либо воздухом ($C_0 \approx 344$ м/с, $\rho_0 = 1,2$ г/л, $\gamma = 1,4$), либо элегазом. В камере низкого давления и канале (перед КГ1) находился воздух при атмосферных условиях. Контроль чистоты газов перед началом экспериментов осуществлялся с помощью интерферометра с погрешностью $\approx 3\%$. Камера высокого давления в ударной трубе заполнялась воздухом, сжатым до давления $\approx 2,7 \cdot 10^5$ Па. Мембрана разрушалась в результате электровзрыва наклеенной на нее нихромовой проволоки. После разрыва мембраны по камере низкого давления распространялась стационарная УВ.

В экспериментах начальные возмущения на КГ специально не задавались, они генерировались кусочками разрушающейся под действием УВ пленки с характерным размером $0,1 \div 2,0$ мм.

В результате взаимодействия УВ с КГ1 образуются УВ, движущаяся вниз по потоку (в центральном слое), и отраженная волна (ударная или разрежения), движущаяся вверх по потоку (в воздухе). При этом скорость движения границы раздела газов увеличивается и на ней развивается неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, приводящая к развитию процесса ТП. При выходе УВ на КГ2 на ней также происходит распад разрыва: в воздух или в SF_6 движется УВ, в центральный слой — УВ либо волна разрежения.

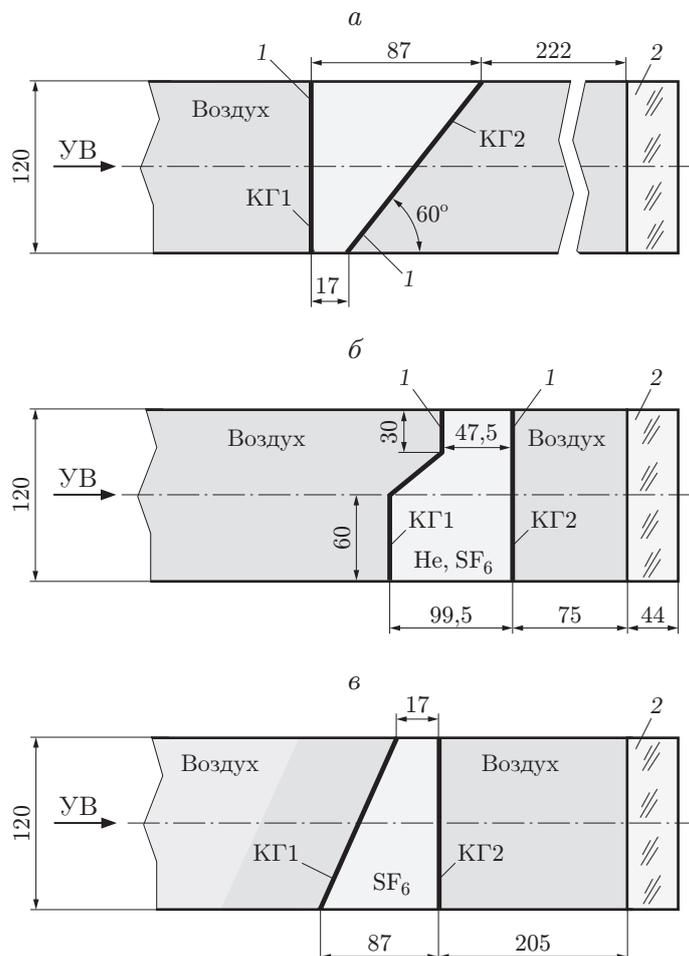


Рис. 2. Схемы экспериментов для различных вариантов геометрии измерительной секции:

a — вариант 1, *б* — вариант 2, *в* — вариант 3; 1 — тонкая пленка, 2 — жесткая стенка, КГ1, КГ2 — первая и вторая контактные границы

Регистрация течения проводилась с помощью шлирен-метода с лазерной подсветкой через теневую установку ИАБ-451. Схема установки, предназначенной для регистрации процесса, представлена на рис. 3. В экспериментах использовался лазер Brilliant В с длительностью импульса 4 нс, длиной волны 532 нм и энергией 180 мДж. Процесс регистрировался с помощью открытого затвора фотоаппарата при отсутствии внешнего освещения.

Скорость падающей УВ определялась по временным показаниям датчиков давления Д1, Д2 (пьезокерамические датчики с полосой пропускания ≈ 20 кГц и диаметром чувствительного элемента 10 мм) с учетом геометрии ударной трубы. Заряд, генерируемый пьезодатчиком, с помощью усилителя заряда УЗД-2 преобразовывался в электрический импульс, поступающий на осциллограф TDS-4034, информация с которого обрабатывалась на компьютере.

2. Экспериментальные данные. Ниже представлены результаты экспериментов, полученные при использовании различных вариантов геометрии измерительной секции.

2.1. *Вариант 1 (слои воздух — He — SF₆).* Картина течения в момент времени $t \approx 770$ мкс представлена на рис. 4. Время отсчитывается с момента прихода УВ на КГ1.

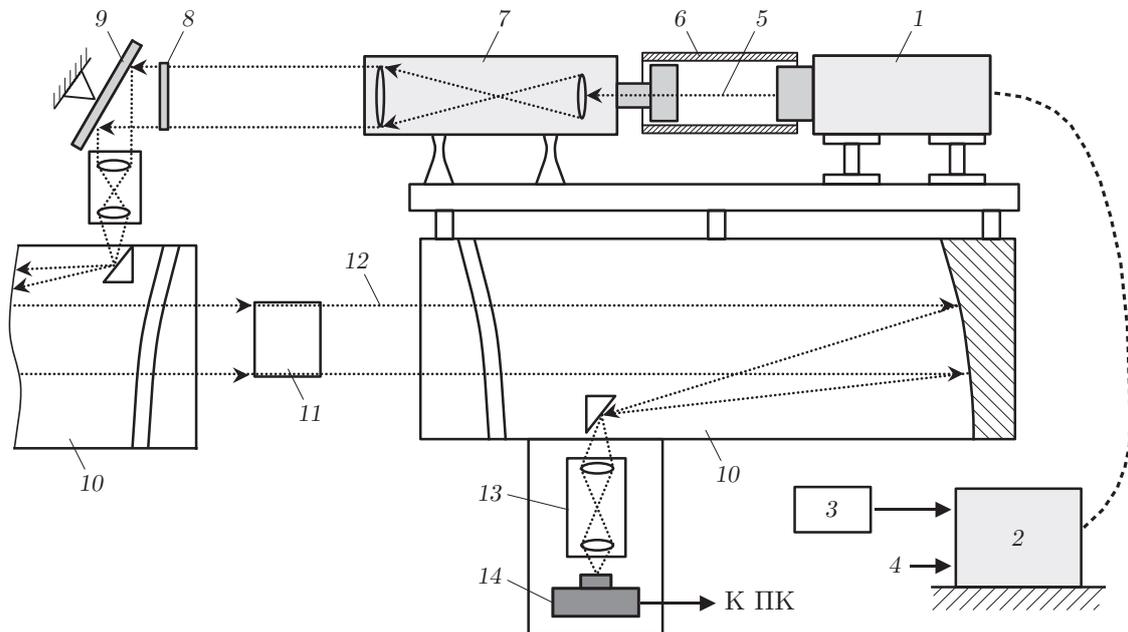


Рис. 3. Схема установки для регистрации процесса ТП с помощью шпирен-метода:

1 — лазерная головка; 2 — блок питания лазера; 3 — пульт управления; 4 — синхроимпульс; 5 — лазерный пучок; 6 — защитная труба; 7 — телескоп-рассеиватель; 8 — матовое стекло; 9 — поворотное зеркало; 10 — оптическая система ИАБ-451; 11 — измерительная секция; 12 — рассеянный свет; 13 — телескоп; 14 — цифровой фотоаппарат; ПК — персональный компьютер

При выходе УВ на КГ1 происходит распад разрыва, в результате чего в воздухе распространяется волна разрежения, в гелии — УВ (скорость УВ в гелии $D_{\text{He}} \approx 1050$ м/с). В процессе взаимодействия УВ, движущейся в гелии, с наклонной КГ2 на этой границе помимо неустойчивости Рихтмайера — Мешкова развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. Ударная волна, циркулирующая в центральном слое, формирует область повышенного давления в окрестности верхней стенки трубы. Под влиянием этого давления верхний участок КГ2 искривляется, ускоряется и начинает опережать нижний участок. К моменту времени $t \approx 770$ мкс большая часть гелия перемешивается с контактирующими газами.

2.2. *Вариант 1 (слои воздух — SF₆ — воздух)*. В отличие от эксперимента, описанного в подп. 2.1, в данном эксперименте легкий газ He в центральном слое заменен на тяжелый газ SF₆, а третьим слоем является воздух. На рис. 5 показаны поле течения в момент времени $t \approx 990$ мкс и направление движения УВ. Замена рабочих газов привела к существенному изменению структуры течения (ср. рис. 4, 5).

При выходе УВ на КГ1 происходит распад разрыва, в результате чего в слое воздуха и центральном слое распространяются УВ. Скорость УВ в SF₆ $D_{\text{SF}_6} \approx 190$ м/с. При прохождении УВ через КГ2 на этой границе помимо неустойчивости Рихтмайера — Мешкова развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. В результате взаимодействия УВ с КГ2 вниз по потоку (в воздухе) движется УВ со скоростью $D_{\text{air}} \approx 440$ м/с, в SF₆ распространяется волна разрежения. Поскольку $D_{\text{air}} > D_{\text{SF}_6}$, нижний участок УВ, движущийся по воздуху после прохождения КГ2, опережает верхний участок. В результате сложных взаимодействий волн, циркулирующих в центральном слое, формируется течение, показанное на рис. 5. Особенности наблюдаемого течения являются значительная

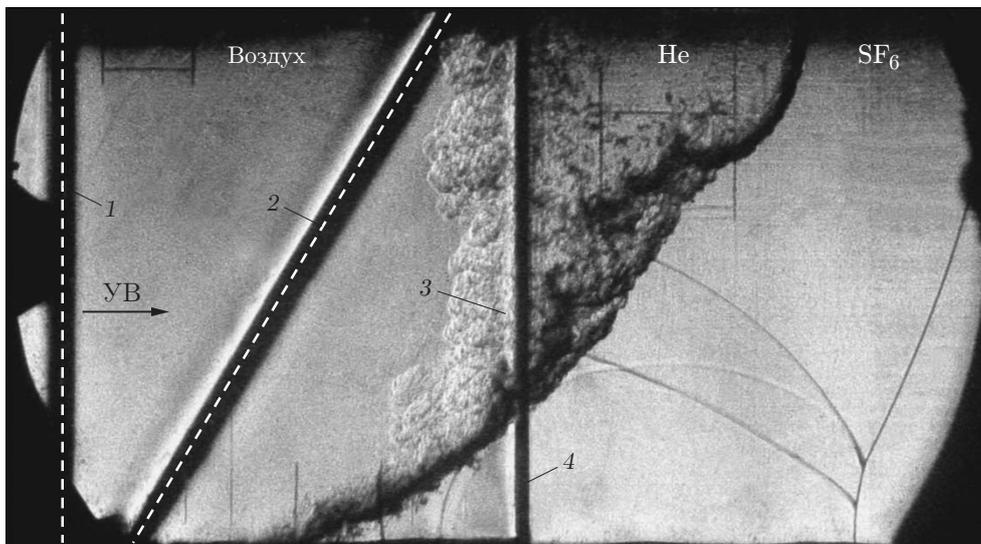


Рис. 4. Процесс ТП в слоях воздух — He — SF₆ при $t \approx 770$ мкс:
1 — КГ1, 2 — КГ2, 3 — зона ТП, 4 — технологический стык

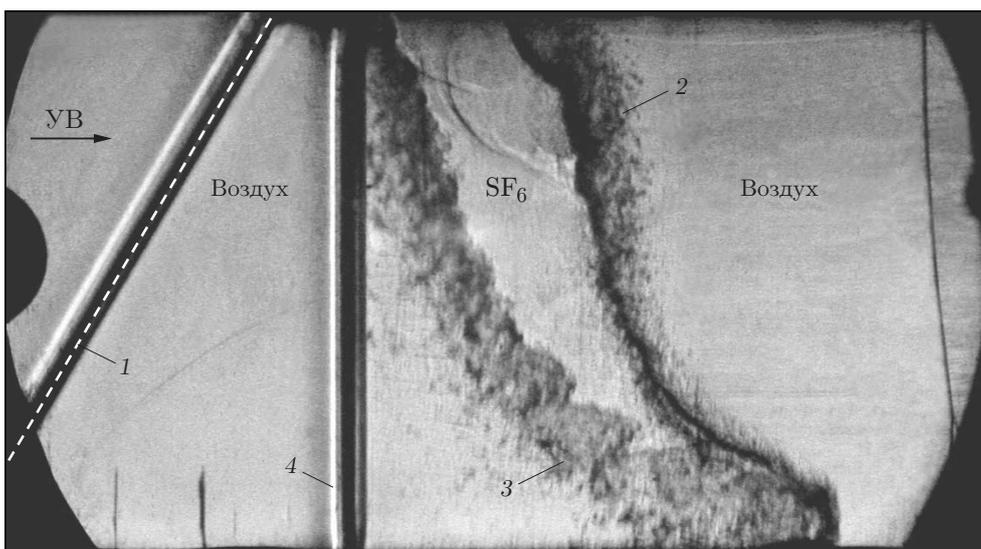


Рис. 5. Процесс ТП в слоях воздух — SF₆ — воздух при $t \approx 990$ мкс:
1 — КГ2, 2, 3 — зоны ТП, 4 — технологический стык

деформация слоев смешения в окрестности КГ и слияние зон ТП вблизи нижней стенки трубы.

2.3. *Вариант 2 (слои воздух — SF₆ — воздух)*. В данных экспериментах на КГ1 имелось два излома, КГ2 располагалась перпендикулярно направлению движения УВ. При прохождении ударной волны в точках излома КГ1 формируются два вихря. Картина течения в момент времени $t \approx 750$ мкс приведена на рис. 6. На КГ1 развивается как неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, так и неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. Из рис. 6 следует, что зоны ТП вне вихревых образований развиты слабо.

2.4. *Вариант 3 (слои воздух — SF₆ — воздух)*. В начальный момент времени КГ1 располагалась под углом 60° к направлению движения УВ, КГ2 — перпендикулярно направлению движения УВ. На рис. 7 показана картина течения в момент времени $t \approx 750$ мкс.

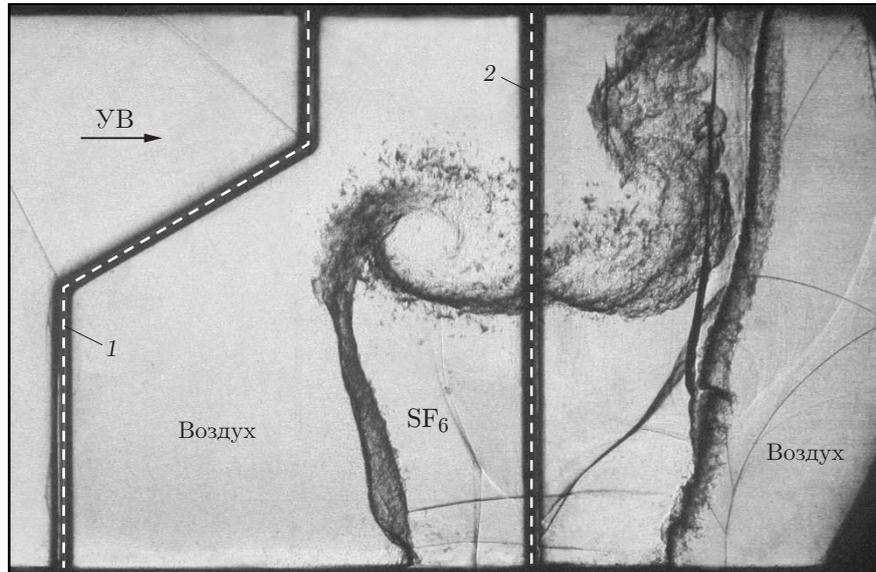


Рис. 6. Процесс ТП в слоях воздух — SF₆ — воздух (см. рис. 2,б) при $t \approx 750$ мкс:
1 — КГ1, 2 — КГ2

Особенность структуры течения в этих экспериментах заключается в том, что интенсивность ТП на КГ1 и КГ2 существенно различается: на КГ1 вследствие неустойчивости Кельвина — Гельмгольца зона ТП увеличивается значительно, на КГ2 ТП происходит менее интенсивно. Результаты экспериментов обрабатывались на компьютере.

Следует отметить, что за время каждого эксперимента отраженная от правого торца трубы УВ не успевала вернуться на КГ2.

3. Результаты расчетов. Расчеты выполнены в двумерной постановке с использованием пакета программ “Корона” [6]. В комплексе “Корона” с помощью разностной схемы второго порядка точности на сетке Лагранжа — Эйлера интегрируются уравнения Эйлера. Для учета ТП в пакете программ используются модель Никифорова [7] и ее модифицированная версия [8, 9]. При решении уравнений применяется метод расщепления по физическим процессам и пространственным направлениям.

Расчет ТП осуществлялся следующим образом. При выходе первой УВ на каждую из контактных границ по заданным значениям амплитуды ($a_0 \approx 0,1$ мм) и длины волны ($\lambda \approx 2$ мм) одномодового начального возмущения рассчитывается локальная скорость роста возмущения.

В настоящее время разработан ряд моделей для расчета динамики пузырьков и струй на стадии развития неустойчивости (см., например, [10]). Однако выбрать лучшую из этих моделей не представляется возможным. В представленных ниже расчетах амплитуда возмущений вычислялась по импульсной модели Рихтмайера, обобщенной на нелинейный случай [9, 11]. Момент t_n перехода к неустойчивости определялся с помощью условия $a_b \simeq (1 + A)\lambda$, где a_b — радиусы пузырьков; A — число Атвуда. Чтобы вычислить турбулентные характеристики, которые необходимо задать в начальной области расчетов шириной $L_0 = a_s + a_b$ (a_s — радиусы струй в момент t_n), нужно определить начальную интенсивность турбулентности $I = \sqrt{u_1'^2}/|U|$ согласно [12, 13]. По начальной интенсивности турбулентности I и известной скорости КГ U вычисляется продольная кинетическая

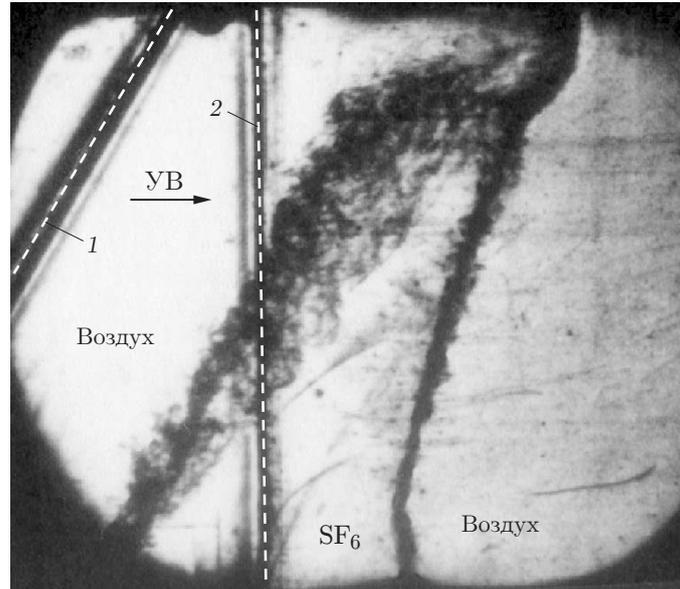


Рис. 7. Процесс ТП в слоях воздух — SF₆ — воздух (см. рис. 2,е) при $t \approx 750$ мкс:

1 — КГ1, 2 — КГ2

энергия турбулентности:

$$e_1 = \overline{u_1' u_1'} / 2 = (IU)^2 / 2.$$

Для поперечных пульсаций скорости полагаем $e_2 = e_1$. Скорость диссипации кинетической энергии Q вычисляется по соотношению $Q = \zeta e_1$. Величину ζ можно оценить следующим образом. Используя известные соотношения для скорости диссипации, скорости роста амплитуды начальных возмущений и интенсивности турбулентности

$$Q = \xi \frac{e^{3/2}}{L} = \xi \frac{(3e_1)^{3/2}}{L}, \quad L = \int_0^{t_n} \frac{da}{dt} dt = \int_0^{t_n} k_0 a_0 A |U| dt, \quad U = \frac{u_1'}{I},$$

находим

$$\zeta \approx \frac{3,7 \xi I}{a_0 k_0 A t_n},$$

где ξ — параметр модели иницирования ТП.

Относительная интенсивность пульсаций плотности определяется по формуле

$$R = \frac{\overline{\rho' \rho'}}{\rho^2} = \frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \frac{\rho_2 - \rho}{\rho},$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности газов слева и справа от КГ после прохождения УВ; ρ — средняя плотность смеси. Для средней плотности смеси используем приближение $\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2$. В этом случае величина R выражается через число Атвуда:

$$R = \beta A^2$$

(β — параметр модели).

Моделирование задач выполнялось в областях, формы и размеры которых показаны на рис. 2. В расчетах расстояние от входной границы трубы (от которой движется УВ) до

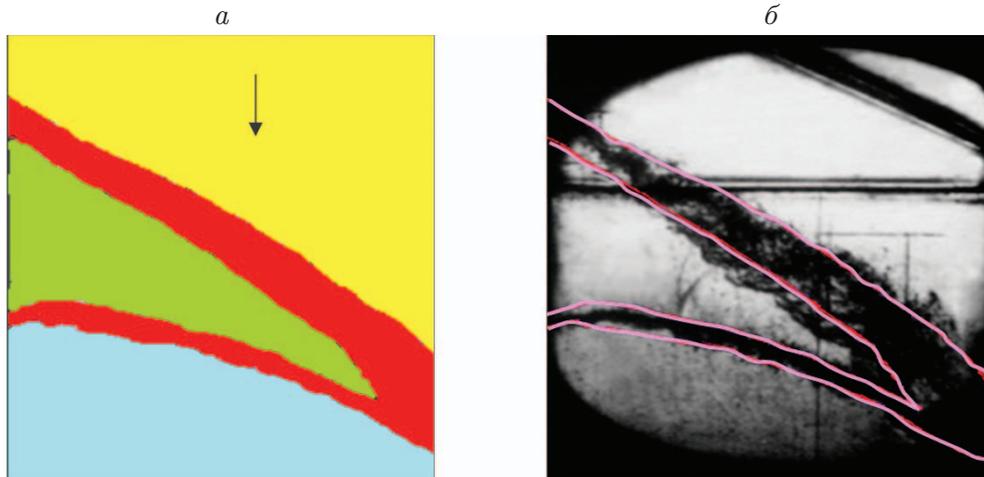


Рис. 8. Расчетные (а) и экспериментальные (б) данные для варианта 3 геометрии измерительной секции (слои воздух — SF₆ — воздух) при $t \approx 750$ мкс (стрелка — направление течения)

закрытого торца трубы составляло 50 см. На стенках трубы задавалось граничное условие непротекания. На торце трубы, где формируется УВ, задавалось давление $P = 1,8 \cdot 10^5$ Па, соответствующее давлению за фронтом УВ, на выходной границе трубы — $P = 10^5$ Па.

Параметры начального состояния газов в расчетах соответствовали экспериментальным данным. Термодинамические параметры газов в однородных ячейках сетки вычислялись по уравнению состояния идеального газа. При вычислении термодинамических параметров в ячейках разностной сетки, содержащих смесь газов, использовалась модель термодинамически равновесной гетерогенной смеси. Из условий равенства давлений и температур компонентов и условий аддитивности удельного объема и энергии следует система уравнений

$$P = P_i(\rho_i, T), \quad \frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\rho_i}, \quad E = \sum_{i=1}^N c_i E_i(\rho_i, T),$$

где c_i — массовая концентрация i -го компонента смеси; T , E_i , P_i , ρ_i — температура, удельная энергия, давление и плотность i -го компонента смеси; N — количество компонентов в смеси.

Ниже приведены результаты расчетов двух задач по модифицированной модели Никифорова. Расчеты выполнены на равномерной расчетной сетке: 270 ячеек в лагранжевом направлении (вдоль оси трубы) и 50 ячеек в поперечном направлении.

3.1. *Результаты моделирования задачи для варианта 3 (слои воздух — SF₆ — воздух)*. На рис. 8,а показаны распределение компонентов смеси и положение зон перемешивания, полученные в расчете, на рис. 8,б — экспериментальные теневые фотографии с наложенными на них границами зон ТП, рассчитанными с использованием пакета программ “Корона”. Начальному моменту времени ($t = 0$) соответствует момент прихода УВ в среднюю точку наклонной КГ1.

На рис. 9 показано положение границ зон ТП в момент времени $t = 750$ мкс, определенное в экспериментах и расчетах. Полученные экспериментальные данные соответствуют результатам эксперимента, представленным на рис. 7.

3.2. *Результаты моделирования задачи для варианта 1 (слои воздух — SF₆ — воздух)*. На рис. 10,а показаны распределение компонентов смеси и положение зон переме-

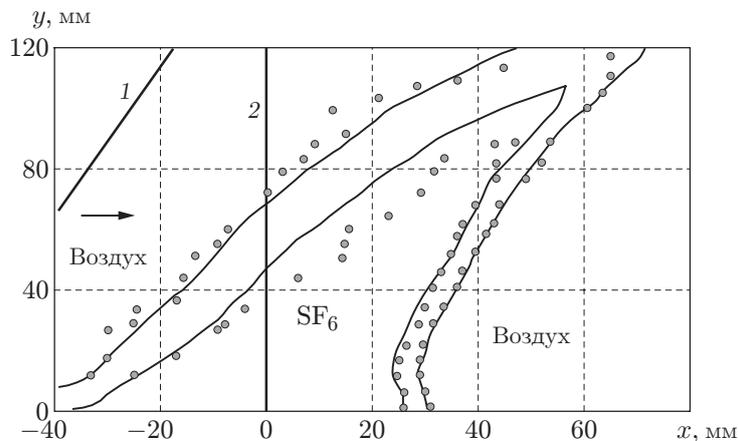


Рис. 9. Экспериментальное (точки) и расчетное (линии) положения границ зоны ТП при $t = 750$ мкс:

1 — КГ1, 2 — КГ2, стрелка — направление течения

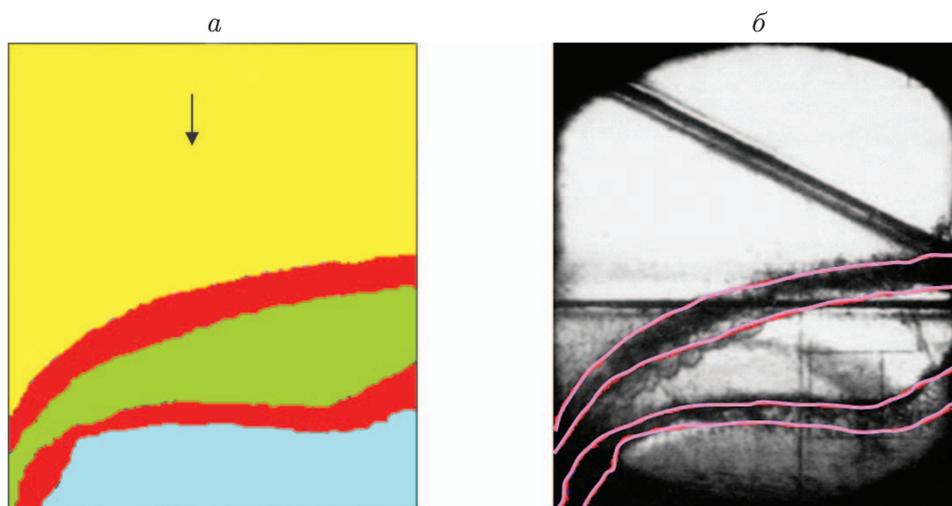


Рис. 10. Расчетные (а) и экспериментальные (б) данные для варианта 1 геометрии измерительной секции (слои воздух — SF_6 — воздух) при $t \approx 915$ мкс (стрелка — направление течения)

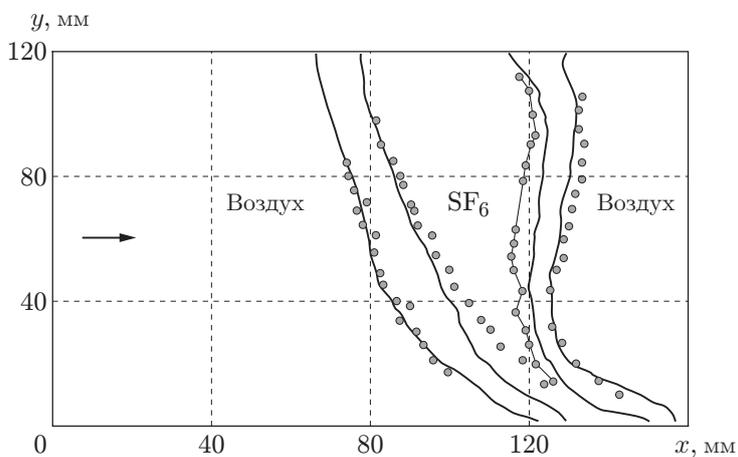


Рис. 11. Экспериментальное (точки) и расчетное (линии) положения границ зоны ТП при $t = 780$ мкс (стрелка — направление течения)

шивания, полученные в расчете, на рис. 10,б — экспериментальные теневые фотографии с наложенными на них границами зон ТП. Начальному моменту времени соответствует момент прихода УВ на КГ1.

На рис. 11 показано положение границ зон ТП в момент времени $t = 780$ мкс, определенное в эксперименте и расчете.

ЗАМЕЧАНИЕ. При проведении сравнения результатов численного моделирования ТП и экспериментальных данных следует учитывать, что точность моделирования задач с учетом ТП определяется: 1) точностью используемой модели ТП; 2) точностью модели, описывающей развитие неустойчивости течения; 3) точностью газодинамического расчета.

Заключение. Полученные в работе экспериментальные данные о характере развития ТП в сложных двумерных течениях представляют интерес при проведении верификации физических моделей и численных методик расчета ТП. Результаты выполненных расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дудин В. И., Мешков Е. Е., Подувалов А. Н. и др.** Исследование развития возмущений и турбулентного перемешивания на границе газ — газ методом лазерного ножа. Саров, 1996. (Препр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики; № 49-96).
2. **Башуров В. В., Бондаренко Ю. А., Губков Е. В. и др.** Экспериментальное и численное исследование развития двумерных возмущений контактной границы, ускоряемой серией ударных волн. Саров, 1996. (Препр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики; № 45-96).
3. **Невмержицкий Н. В., Разин А. Н., Сотсков Е. А. и др.** Исследование развития турбулентного перемешивания и возмущений в газах с повышенной сжимаемостью при числах Маха от 2 до 9 // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика.* 2007. Вып. 1. С. 134–142.
4. **Невмержицкий Н. В., Разин А. Н., Трутнев Ю. А. и др.** Исследование развития турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах с наклонной контактной границей // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика.* 2008. Вып. 2. С. 12–17.
5. **Сеньковский Е. Д., Невмержицкий Н. В., Разин А. Н. и др.** Эксперименты по исследованию турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах // *Сб. докл. междунар. конф. “9-е Харитоновские тематические научные чтения”*, Саров, 12–16 марта 2007 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2007. С. 637–642.
6. **Скрышник С. И., Рудько Н. М., Королев Р. А. и др.** Численное решение двумерных уравнений газовой динамики с теплопроводностью с использованием переменного по размеру разностного шаблона // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов.* 2007. Вып. 1. С. 14–26.
7. **Андронов В. А., Бахрах С. М., Мешков Е. Е. и др.** Экспериментальное исследование и численное моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях // *Докл. АН СССР.* 1982. Т. 264, № 1. С. 76–82.
8. **Гужова А. Р., Козлов В. И., Янилкин Ю. В.** Методика расчета двумерных турбулентных течений, основанная на модели Никифорова // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика.* 2003. Вып. 1/2. С. 43–52.
9. **Kozlov V. I., Sapozhnikov I. V.** Non-steady turbulent flows’ simulation on the base of modified Nikiforov model // *Proc. of the 10th Intern. workshop of the phys. of compressible turbulent mixing*, Paris, 17–21 July 2006. Bruyeres-le-Chatel: Commissariat a l’Energie Atomique, 2007. P. 140–144.

10. **Latini M., Schilling O., Don W.** High-resolution simulations and modeling of reshocked single-mode Richtmyer — Meshkov instability: Comparison to experimental data and to amplitude growth model predictions // *Phys. Fluids*. 2007. V. 19. 024104.
11. **Козлов В. И., Сапожников И. В.** Моделирование нестационарных турбулентных течений на основе модифицированной модели Никифорова // Сб. докл. междунар. конф. “8-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 21–24 марта 2006 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2006. С. 266–272.
12. **Mikaelian K. O.** Turbulent mixing generated by Rayleigh — Taylor and Richtmyer — Meshkov instabilities // *Physica D*. 1989. V. 36. P. 343–357.
13. **Разин А. Н.** Моделирование неустойчивости и турбулентного перемешивания в слоистых системах. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010.

*Поступила в редакцию 20/XII 2013 г.,
в окончательном варианте — 7/III 2014 г.*
