

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО МЕТОДИКЕ КОРОНА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ОПЫТОВ ПО ТУРБУЛЕНТНОМУ ПЕРЕМЕШИВАНИЮ В ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

В. И. Козлов, А. Н. Разин, Е. В. Шапоренко, И. Ю. Шебаршина

ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Выполнено численное моделирование газодинамических опытов по развитию турбулентного перемешивания, возникающего на контактных границах трехслойных газовых систем после прохождения ударной волны. Расчеты проведены по методике КОРОНА с использованием двумерной версии модифицированной модели турбулентного перемешивания В.В.Никифорова. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными по ширине зон турбулентного перемешивания.

Введение

К настоящему времени на основе модели В. В. Никифорова разработано несколько пакетов программ [1] для расчета турбулентного перемешивания (ТП), развивающегося в одномерных и двумерных течениях. Для совершенствования физической модели, тестирования численных методик и отработки технологии проведения расчетов проводятся расчеты как модельных опытов, так и практических задач. В предлагаемой работе представлены результаты численного моделирования газодинамических опытов по развитию ТП, возникающего на контактных границах (КГ) трехслойных газовых систем после прохождения ударной волны (УВ). Расчеты выполнены с использованием пакета программ КОРОНА [2]. В комплексе КОРОНА для учета ТП реализована двумерная версия модифицированной модели Никифорова (модификация одномерной модели Никифорова описана в работах [3, 4], двумерная версия представлена в работе [5]). Ранее по комплексу КОРОНА проведены расчеты ряда газодинамических опытов по ТП, развивающегося в одномерных течениях. Во всех расчетах получено удовлетворительное согласие с данными экспериментов, как по ширине зоны ТП, так и по характеристикам турбулентности.

Информативных экспериментальных данных по ТП в двумерных течениях заметно меньше, чем для одномерных течений. При этом не все опубликованные экспериментальные данные пригодны для проверки качества описания численными методиками процесса эволюции ТП (от начала формирования зоны ТП до развитой турбулентности) на КГ слоистых систем при наличии УВ.

В работах [6, 7] представлены результаты экспериментального и численного исследования развития ТП на границе двухслойной газовой системы. В первой

серии опытов УВ двигалась из воздуха в гелий с числом Маха $M = 1,3$, КГ располагалась наклонно к фронту УВ. Картина течения в экспериментах визуализировалась с помощью теневого метода и лазерного ножа. Фотоизображение зоны ТП, полученное в эксперименте, передавалось с негатива на компьютер для преобразования плотности почернения в объемные концентрации. В работе приводятся фотографии развития ТП, полученные теньевым методом, методом лазерного ножа, а также их сравнение с расчетами по методике ЭГАК–Т. Во второй серии опытов набор газов остался прежним, а КГ придали форму прямой ступеньки.

Для тестирования двумерных методик расчета ТП, развивающегося на КГ слоистых систем из неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, подходят опыты Е. Е. Мешкова с соавторами [6, 7], выполненные в конфигурации с наклонной КГ (в этом опыте на теневых фотографиях явно прослеживается зона ТП). В то же время следует отметить, что в данном эксперименте ширина зоны ТП при перемещении вдоль КГ меняется незначительно. Таким образом, для детального тестирования методик расчета ТП, развивающегося в существенно двумерных течениях, нужны дополнительные опыты и такие опыты выполнены группой Н. В. Невмержицкого [8, 9]. Экспериментальная информация [8, 9] является полезной как для отработки алгоритмов отслеживания контактных границ в двумерных методиках, так и для тестирования развития ширины зоны ТП во времени в двумерных течениях.

В данной работе представлены результаты численного моделирования опытов [8, 9] с учетом ТП. Качество описания эволюции зон ТП в численном расчете зависит как от используемой модели ТП, так и от метода инициализации ТП (расчета этапа развития неустойчивости и формирования начальных условий для решения уравнений ТП). В описываемых далее двумерных рас-

четах для инициализации счета ТП использовался упрощенный вариант одномерного алгоритма, предложенный в работе [4]. Авторы считают, что дальнейшее уточнение использованного в расчетах метода инициализации позволит улучшить описание развития зон ТП.

Постановка расчетов

Из представленных в работах [8, 9] экспериментальных данных для моделирования выбраны три задачи. В первой задаче в центральном слое циркулирует ударная волна, в двух других – волна разрежения. Отличия в геометрии задач и перепада плотностей на КГ обуславливают значительные различия в характере движения КГ.

Постановка расчетов для моделирования трех опытов и размеры области решения в сантиметрах показаны на рис. 1. С целью экономии времени расчета на момент начала расчета положение УВ задается ближе к КГ₁.

При выходе УВ на первую контактную границу КГ₁ на ней происходит распад разрыва с образованием УВ, уходящей в газ 2 (центральный слой), и отраженной волны (ударной или волны разрежения), уходящей в газ 1. При этом разделительная пленка разрушается на фрагменты различных размеров, создавая спектр начальных возмущений, граница раздела газов ускоряется, в результате чего на ней возникает неустойчивость

Рихтмайера–Мешкова (на наклонной КГ после взаимодействия с УВ развивается также неустойчивость Кельвина–Гельмгольца). После взаимодействия УВ, прошедшей первую КГ, со второй контактной границей КГ₂ на ней также развивается неустойчивость Рихтмайера–Мешкова и в дальнейшем формируется зона ТП. Таким образом, в рассматриваемых системах ТП развивается на двух КГ под действием падающих ударных волн и волн, циркулирующих в центральном слое. В рассматриваемых экспериментах отраженная от жесткой стенки (нижней границы задачи) УВ на момент окончания расчета не успевает вернуться на контактные границы между газами.

Во всех расчетах для вычисления термодинамических параметров каждого из газов использовалось уравнение состояния идеального газа с соответствующим показателем адиабаты. Начальные данные для сжатого ударной волной воздуха в таблице соответствуют числу Маха $M = 1,3$.

Начальное положение фронта УВ, движущейся сверху вниз, выбрано таким образом, чтобы к моменту подхода УВ к верхней КГ в численных расчетах была полностью сформирована конечно-разностная УВ.

Для моделирования опытов использовалась расчетная сетка, содержащая 270 точек по лагранжеву направлению (вдоль трубы) и 50 точек в поперечном (эйлеровом) направлении с автоматической расстановкой точек.

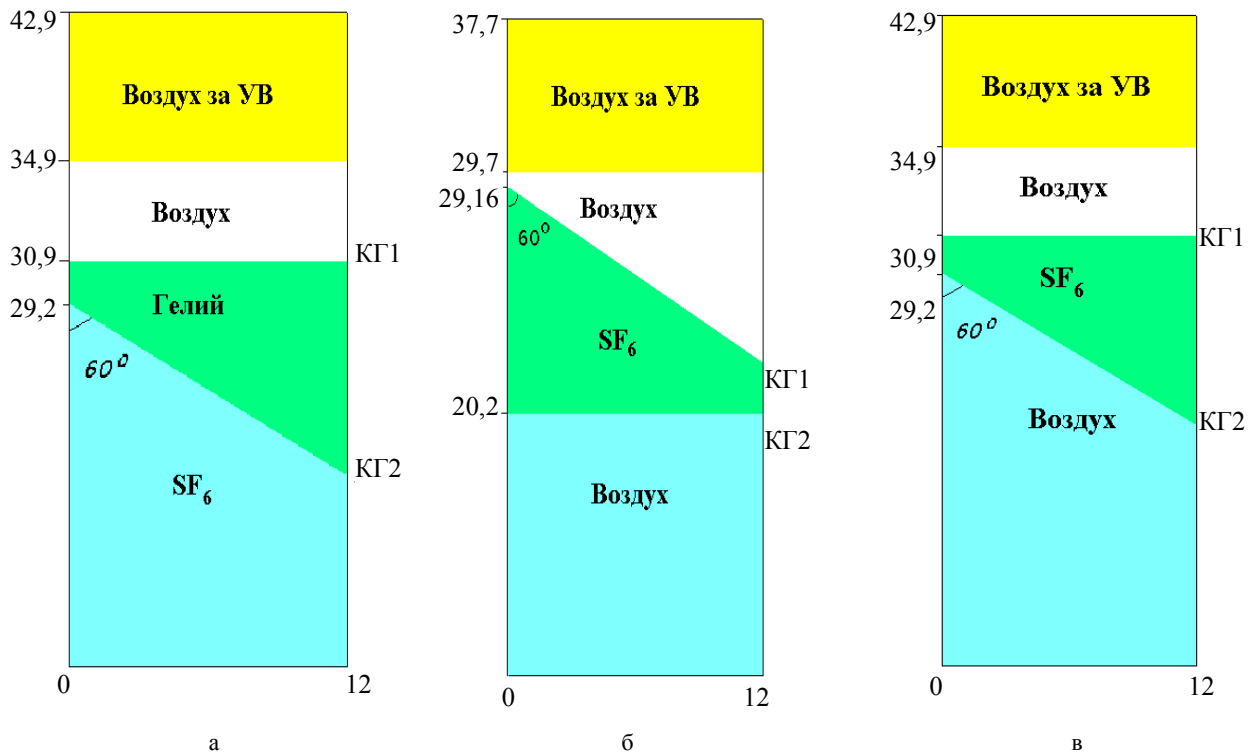


Рис. 1. Начальная геометрия: а – задача 1; б – задача 2; в – задача 3

Вещество		γ	Плотность $\rho \left(10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	Давление $P(0,1 \text{ атм})$	Энергия $E \left(10^8 \frac{\text{эрг}}{\text{г}} \right)$	Скорость $U(10^2 \text{ м/с})$
Воздух	начальное состояние	11,4	1,205	10	20,7	0
	за УВ		1,8264	18,05	24,7	-1,51
Гелий		1,63	0,167	10	95,048	0
SF ₆ (элегаз)		1,094	6,5	10	16,4	0

Во всех расчетах на правой и левой границах задачи использовалось граничное условие «жесткая стенка». На верхней границе задано давление $P = 18,05$ и скорость $U = -1,51$, на нижней – $P = 10$.

В описываемых расчетах инициализация счета ТП осуществлялась следующим образом. По мере выхода первой УВ на каждую из КГ рассчитывалось локальное значение скорости роста возмущения по начальным параметрам возмущения с использованием соотношения Рихтмайера, обобщенного на нелинейный случай в пренебрежении «сжатием» возмущения (см. [4]). В свою очередь, начальные значения турбулентных величин рассчитывались по соотношениям, предложенным в работах [4].

При вычислении термодинамических параметров в смешанных ячейках использовалась модель термодинамически равновесной гетерогенной смеси (авторы Л. Ф. Гударенко, В. Г. Куделькин). Условия равенства давлений и температур компонентов и условия аддитивности удельного объема и энергии приводят к следующей системе уравнений:

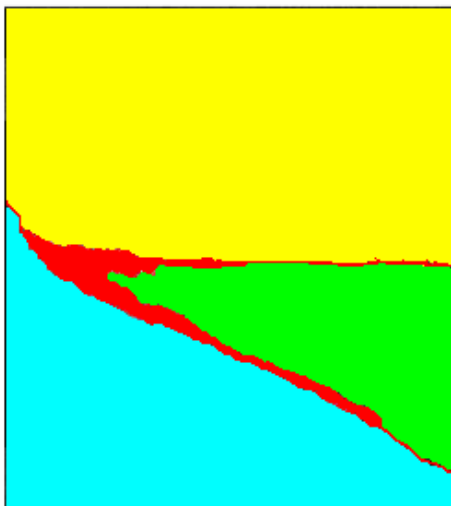
$$P = P_i(\rho_i, T); \quad \frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\rho_i}; \quad E = \sum_{i=1}^N c_i E_i(\rho_i, T),$$

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

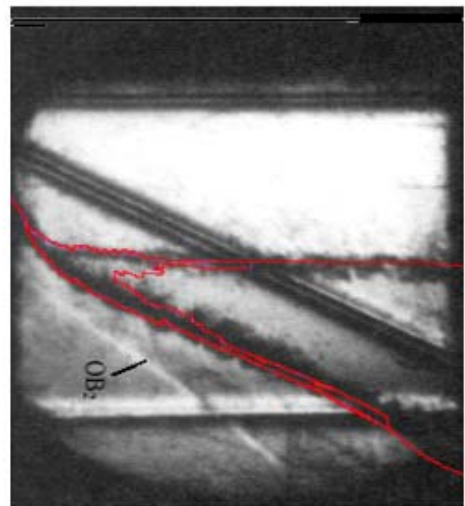
Результаты моделирования задачи 1

Начальная геометрия задачи показана на рис. 1,а, состав веществ приведен в таблице. Число Маха падающей на КГ₁ стационарной ударной волны равно $M = 1,3$.

На рис. 2 в левом столбце показаны распределение веществ и положение зон перемешивания, полученные в расчете по методике КОРОНА. В правом столбце приведены экспериментальные теневые фотографии с наложенными на них границами зон ТП, рассчитанными по методике КОРОНА. За нулевой момент времени ($t = 0$) в экспериментах принимается время прихода УВ на верхнюю контактную границу КГ₁.

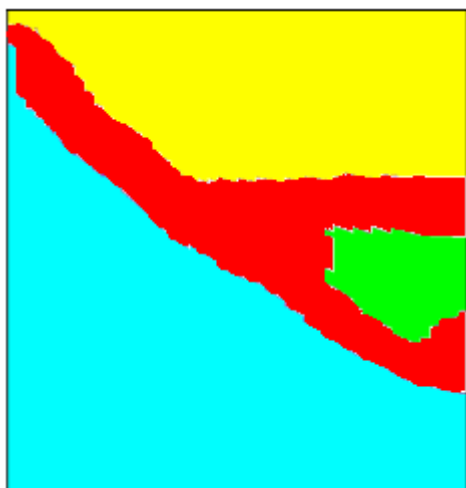


425 мкс

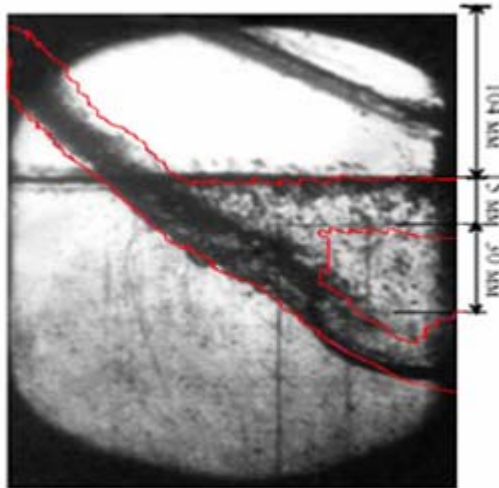


425 мкс

Рис. 2. Сравнение положения зон ТП, полученных в расчете по комплексу КОРОНА, с экспериментальными данными, задача 1 (см. также с. 34)



938 мкс



938 мкс

Рис. 2. Окончание

Как следует из рис. 2, положение верхней границы зоны ТП на КГ₁ (воздух–гелий) и нижней границы зоны на КГ₂ (гелий–SF₆), полученное в расчете, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На рис. 2 на экспериментальных фотографиях между зонами ТП наблюдаются локальные потемнения. Мы предполагаем, что неоднородные потемнения между зонами ТП на теневых фотографиях обусловлены

значительной завихренностью потока и, как следствие, большими флуктуациями плотности смеси в центральном слое.

На рис. 3 показано положение границ зон ТП в окрестности контактных границ воздух–гелий и гелий–SF₆, полученное в экспериментах и расчетах на момент времени $t = 838$ мкс.

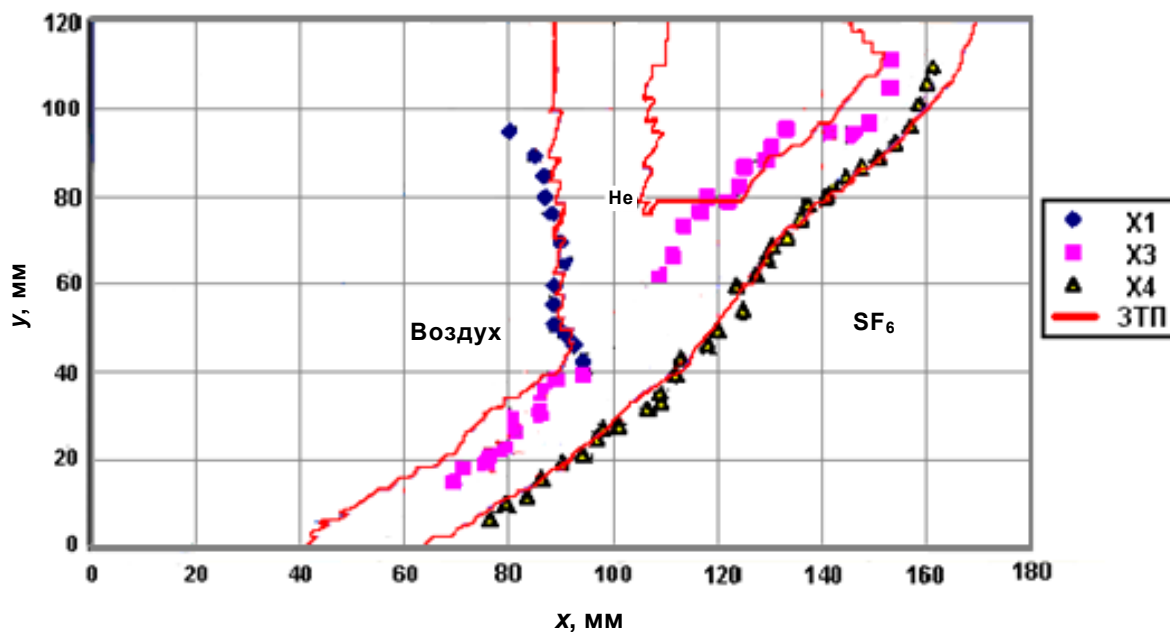


Рис. 3. Экспериментальное и расчетное положение границ зон ТП, $t = 838$ мкс, задача 1: X1 – левая граница зоны ТП на КГ₁, эксперимент; X3 – левая граница зоны ТП на КГ₂, эксперимент; X4 – правая граница зоны ТП на КГ₂, эксперимент; ЗТП – положение границ зон ТП в расчете

Результаты моделирования задачи 2

Начальная геометрия расчетов приведена на рис. 1,б, параметры веществ – в таблице. КГ₁, разделяющая воздух и SF₆, расположена под углом 60° к направлению движения УВ; КГ₂ расположена поперек ударной трубы. Число Маха падающей на КГ₁ стационарной ударной волны $M = 1,3$.

Неустойчивость Рихтмайера–Мешкова на КГ₁ и КГ₂ развивается после взаимодействия УВ с контактными границами, на рост ширины зон ТП в окрестности контактных границ оказывают влияние волны, циркулирующие в центральном слое (в SF₆).

На рис. 4 в левом столбце показано распределение

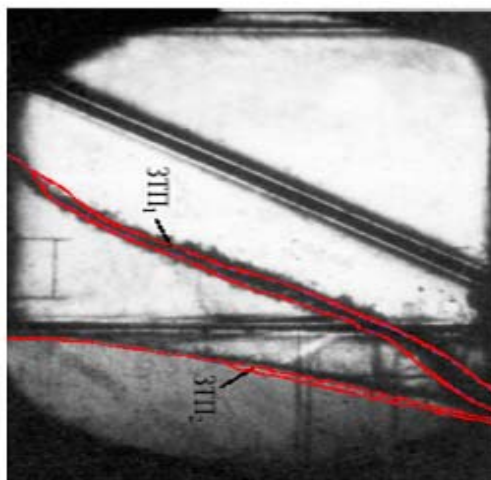
веществ и положение зон перемешивания, полученные в расчете по методике КОРОНА. В правом столбце приведены экспериментальные теневые фотографии с наложенными на них границами зон ТП, рассчитанными по методике КОРОНА. За нулевой момент времени ($t = 0$) принимается время прихода УВ в среднюю точку наклонной контактной границы КГ₁.

На рис. 5 на момент времени $t = 583$ мкс представлены границы зон ТП около КГ воздух – SF₆ и SF₆ – воздух, полученные в экспериментах и расчетах по методике КОРОНА.

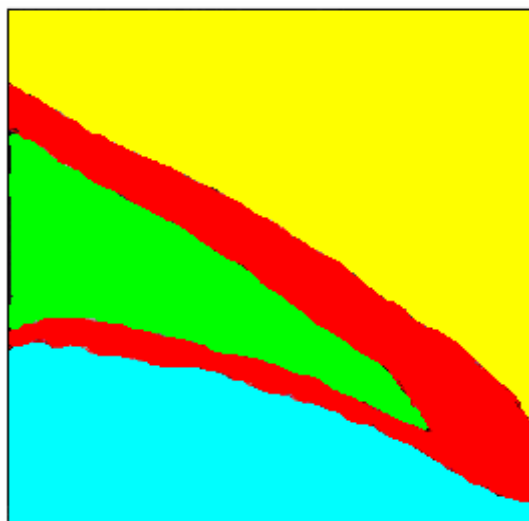
Как следует из рис. 4 и 5, результаты расчетов по положению и ширине зон ТП удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.



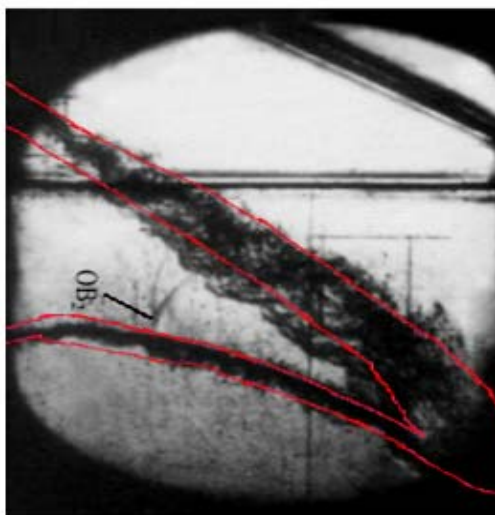
367 мкс



367 мкс



750 мкс



750 мкс

Рис. 4. Сравнение положения зон ТП, полученных в расчете по комплексу КОРОНА, с экспериментальными данными, задача 2

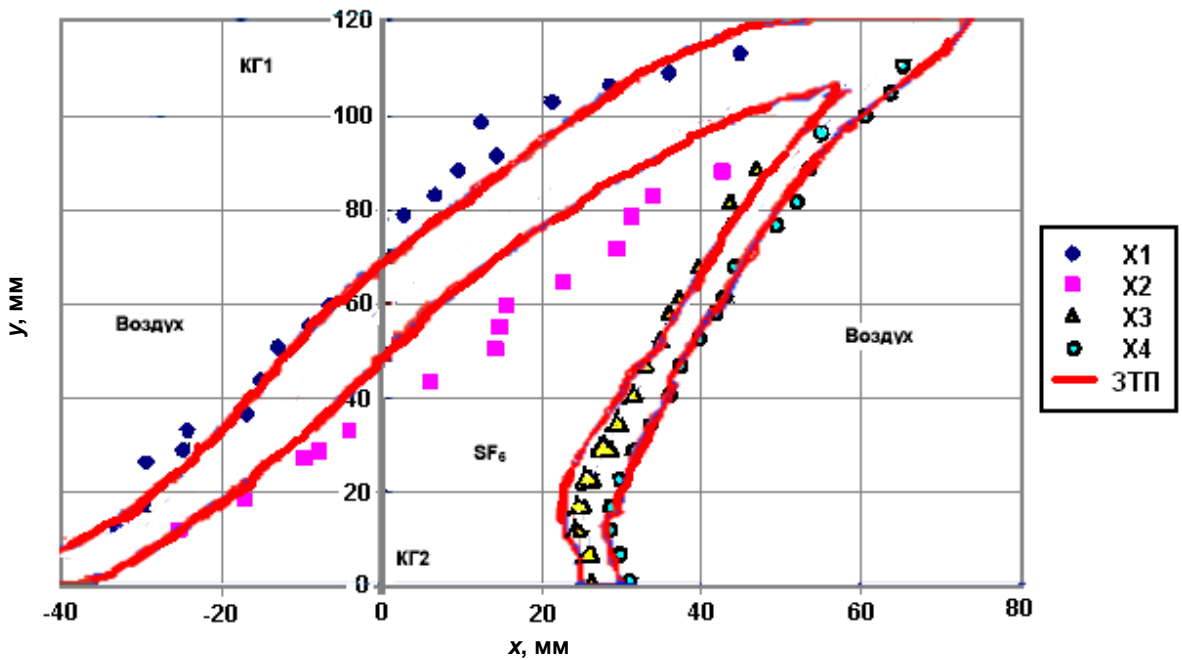


Рис. 5. Экспериментальное и расчетное положение границ зон ТП, $t = 583 \mu\text{с}$, задача 2: X1 – левая граница зоны ТП на КГ₁, эксперимент; X2 – правая граница зоны ТП на КГ₁, эксперимент; X3 – левая граница зоны ТП на КГ₂, эксперимент; X4 – правая граница зоны ТП на КГ₂, эксперимент; ЗПТ – положение границ зон ТП в расчете

Результаты моделирования задачи 3

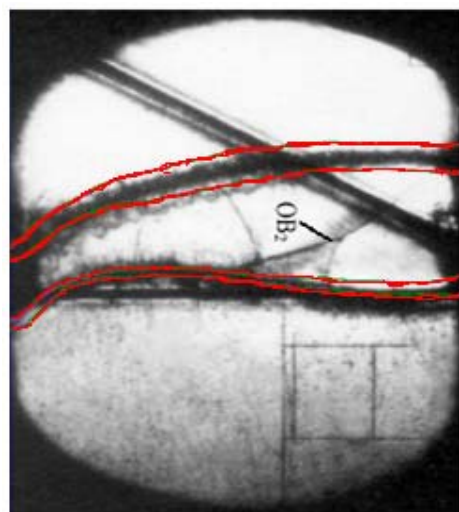
Начальная геометрия для расчета показана на рис. 1, в, состав веществ приведен в таблице. Контактная граница воздух–SF₆ (КГ₁) расположена параллельно фронту набегающей УВ, граница SF₆–воздух (КГ₂) наклонена под углом в 60°. Ударная волна, идущая по воздуху с числом Маха $M = 1,3$, сначала взаимодействует с КГ₁. При выходе УВ, движущейся по SF₆, на КГ₂ на ней происходит распад разрыва, в результате чего в центральный слой распространятся волна разряжения, а

в воздух – УВ. Зоны ТП в окрестности контактных границ развиваются при участии волн, циркулирующих в центральном слое.

На рис. 6 в левом столбце показано распределение веществ и положение зон перемешивания, полученные в расчете по методике КОРОНА. В правом столбце приведены экспериментальные теневые фотографии с наложенными на них границами зон ТП. За нулевой момент времени ($t = 0$) в экспериментах принимается время прихода УВ на верхнюю контактную границу КГ₁.



600 мкс

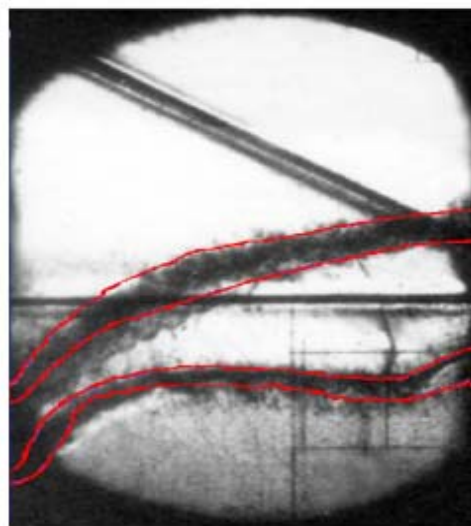


600 мкс

Рис. 6. Сравнение положения зон ТП, полученных в расчете по комплексу КОРОНА, с экспериментальными данными, задача 3 (см. также с. 37)



833 мкс



833 мкс

Рис. 6. Окончание

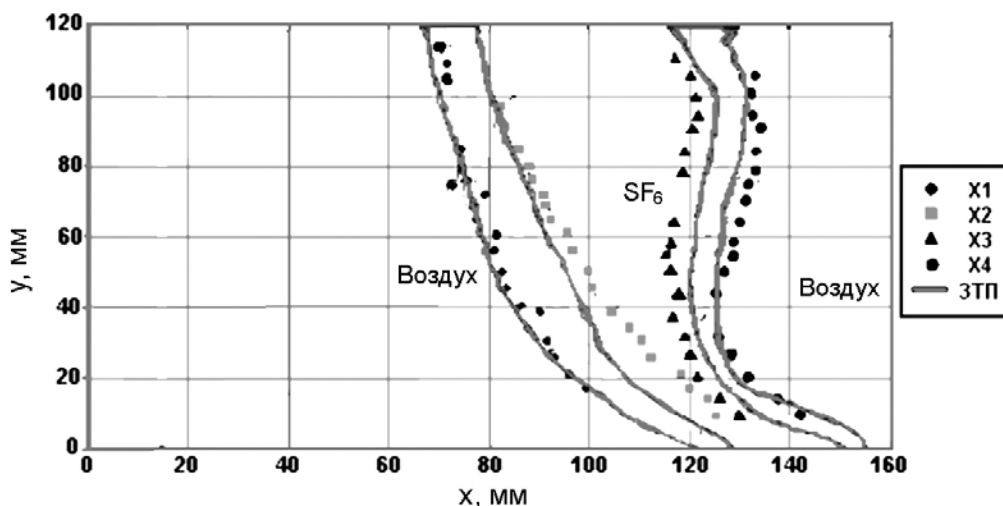


Рис. 7. Экспериментальное и расчетное положение границ зон ТП, $t = 783$ мкс, задача 3: X1 – левая граница зоны ТП на КГ₁, эксперимент; X4 – правая граница зоны ТП на КГ₁, эксперимент; X3 – левая граница зоны ТП на КГ₂, эксперимент; X2 – правая граница зоны ТП на КГ₂, эксперимент; ЗТП – положение границ зон ТП в расчете

На рис. 7 на момент времени $t = 83$ мкс приведены экспериментальные и полученные в расчете по комплексу КОРОНА положения границ зон ТП.

Как следует из рис. 6 и 7 зоны перемешивания, полученные в расчетах, удовлетворительно описывают экспериментальную информацию.

Заключение

Представлены результаты численного моделирования опытов, проведенных Н. В. Невмержицким с коллегами. В опытах исследовалось развитие ТП на контактных границах трехслойных газовых систем после прохождения УВ. Расчеты выполнены по методике

КОРОНА с использованием двумерной версии модифицированной модели В.В. Никифорова.

Все рассмотренные задачи представляют интерес для тестирования методик расчета ТП. В задаче 1 ТП развивается на фоне существенно двумерного течения и охватывает большую часть центрального слоя трехслойной газовой системы. В задаче 2 интенсивность ТП на КГ₁ и КГ₂ заметно различна: на первой КГ зона ТП изменяется значительно при перемещении вдоль КГ, на второй контактной границе ТП развивается менее интенсивно, при этом ширина зоны ТП при перемещении вдоль КГ меняется слабо. В задаче 3 ТП развивается на контактных границах, которые значительно деформируются в процессе движения.

Результаты моделирования ТП, развивающегося в сложных двумерных течениях, можно признать вполне удовлетворительными. Необходимы дальнейшие методические работы над методом инициализации ТП.

Список литературы

1. Разин А. Н., Долголева Г. В., Мжачих С. В., Рожков А. А., Шапоренко Е. В., Юдинцев В. Ф. Развитие методик и программ расчета турбулентных течений с использованием модели В. В. Никифорова // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2007. Вып. 1. С. 121.
2. Скрыпник С. И., Рудько Н. М. Королев Р. А., Ляпин В. В., Попов А. В. Численное решение двумерных уравнений газовой динамики с теплопроводностью с использованием переменного по размеру разностного шаблона // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2007. Вып.1. С. 14.
3. Козлов В. И. Моделирование взаимодействия ударных волн и турбулентности // 8-е Харитоновские чтения. 2006. С. 258.
4. Козлов В. И., Сапожников И. В. Моделирование нестационарных турбулентных течений на основе модифицированной модели Никифорова // 8-е Харитоновские чтения. 2006. С. 266.
5. Козлов В. И., Гужова А. Р., Янилкин Ю. В. Двумерная версия модифицированной модели Никифорова // 11-е Харитоновские чтения, 2009.
6. Дудин В. И., Мешков Е. Е., Подувалов А. Н. и др. Исследование развития возмущений и турбулентного перемешивания на границе газ–газ методом лазерного ножа: Препринт № 49. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1996.
7. Башуров В. В., Бондаренко Ю. А., Губков Е. В. и др. Экспериментальное и численное исследование развития двумерных возмущений контактной границы, ускоряемой серией ударных волн: Препринт № 45. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1996.
8. Сеньковский Е. Д., Невмержицкий Н. В., Разин А. Н. и др. Эксперименты по исследованию турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах // 9-е Харитоновские тематические чтения. Саров. 2007. С. 637.
9. Невмержицкий Н. В., Разин А. Н., Трутнев Ю. А. и др. Исследование развития турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах с наклонной контактной границей // ВАНТ. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. 2008. Вып. 2. С.12

Статья поступила в редакцию 26.03.2009