

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ОДНОМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО СОВРЕМЕННЫМ МЕТОДИКАМ РАСЧЕТА

А. Н. Разин, Ю. А. Трутнев, Е. В. Шапоренко

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

Обсуждаются результаты численного моделирования одномерных течений с учетом турбулентного перемешивания. Класс рассмотренных течений ограничен задачами, в которых турбулентность развивается в газовых системах под действием ударных волн. Описывается постановка известных опытов, при проведении которых получены наиболее информативные экспериментальные данные. Приводятся результаты численного моделирования выбранных опытов.

### Введение

Для численного моделирования развития неустойчивости и турбулентного перемешивания (ТП), возникающих после прохождения ударной волны (УВ) через контактную границу (КГ), в научных центрах различных стран разработано значительное число методик. Краткое описание современных численных методик расчета ТП рассмотрено в работах [1, 2].

Чтобы оценить возможности той или иной методики расчета, в предлагаемой работе делается попытка сравнить результаты численного моделирования известных опытов, полученные с использованием различных современных методик расчета турбулентных течений. Результаты расчетов, полученные по современным методикам, взяты из опубликованных статей. При сопоставлении результатов численного моделирования ТП класс рассмотренных задач ограничен одномерными течениями, в которых турбулентность развивается на КГ разноплотных газов под действием УВ.

Работа состоит из двух частей. В первой части дается краткая характеристика наиболее известных и информативных опытов по исследованию ТП, развивающегося в одномерных течениях под действием УВ в газах. Экспериментальная информация служит основным источником данных для отработки физических моделей и численных методик расчета ТП. Некоторые результаты моделирования ТП в одномерных течениях с использованием современных методик расчета демонстрируются во второй части.

### 1. Экспериментальная информация

Постановка экспериментов по исследованию ТП на границе газ-газ под действием УВ в одномерных

течениях приведена на рис. 1. В ударную трубу круглого или прямоугольного сечения закачиваются два (двухслойная система) или три (трехслойная система) газа при определенном давлении. Для предотвращения взаимодиффузии газов до начала проведения опытов газы, как правило, разделяются тонкой мембраной. В экспериментах форму мембраны задают в зависимости от целей исследования (плоская, синусоидальная с заданными значениями амплитуды и длины волны начального возмущения и т. п.).

Для изучения развития неустойчивости и ТП на КГ разноплотных газов в экспериментах на одном конце трубы (на рис. 1 – на левом) формируется УВ. При выходе УВ на контактную границу пленка разрывается на кусочки различных размеров, создавая тем самым спектр начальных возмущений. Варьируя начальное давление в газах, при одинаковых условиях формирования УВ можно получить различные скорости движения УВ в газах и, таким образом, изучить влияние числа Маха падающей на КГ УВ на скорость роста ширины зоны ТП (ЗТП).

В зависимости от целей исследования второй конец трубы закрывается жесткой стенкой или соединяется с выходной камерой большого объема, чтобы возмущения с правого торца трубы не приходили на исследуемую КГ. В первом случае в опыте изучается развитие неустойчивости на КГ и последующее взаимодействие отраженной от правого торца УВ с зоной ТП, сформировавшейся в окрестности КГ после прохождения УВ. Во втором случае ставится задача исследовать развитие неустойчивости и ТП лишь после взаимодействия УВ с КГ. Изменяя наборы газов в экспериментах можно изучить влияние сжимаемости газов и перепада плотностей на КГ на развитие ширины зоны ТП в широком диапазоне чисел Маха падающей на контактную границу УВ.

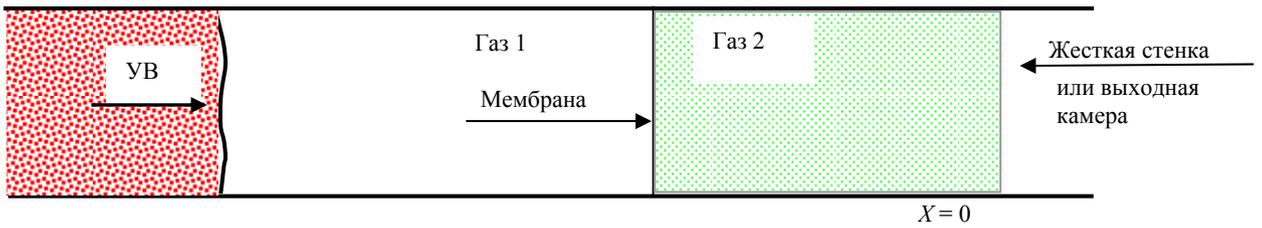


Рис. 1. Схема проведения опытов в двухслойных системах

Вследствие наличия пограничного слоя вблизи стенок течение в трубе не является одномерным. Чем меньше начальное давление в рабочих газах, тем интенсивнее развивается пограничный слой. И только вдоль оси (плоскости) симметрии трубы течение остается одномерным при условии, что развивающийся вдоль поверхности трубы пограничный слой не распространяется на все сечение трубы.

В большей части опытов с использованием различных диагностических методов замеряется лишь ширина ЗТП на различные моменты времени. Первые эксперименты по изучению развития неустойчивости на КГ в подобной постановке проведены Е. Е. Мешковым в 1969 году [3]. Горизонтальная ударная труба имела сечение  $12 \times 4$  см. В качестве рабочих газов использовались Air-CO<sub>2</sub>, He-R22, R22-He, Air-R22, He-Air, He-CO<sub>2</sub>, Air-He. Начальные возмущения КГ задавались в виде синусоиды с амплитудой  $a_0 = 2$  мм,  $a_0 = 4$  мм и длиной волны  $\lambda = 40$  мм. Перед выполнением опытов газы находились при атмосферном давлении, а число Маха УВ, падающей на КГ, составляло  $M \approx 1,5$ . В результате проведения опытов получены зависимости скорости роста амплитуды начального возмущения от времени.

В [4] группой Е. Е. Мешкова исследовалось ТП на КГ как в двухслойных (Air-He), так и в трехслойных системах (Air-He-Air, Air-Xe-He) под действием серии УВ (падающей и отраженных от жесткой стенки). Результаты опыта Air-He-Air в настоящее время используются в качестве тестовой задачи при отработке методик расчета ТП при слиянии двух зон ТП, возникающих на границах Air-He и He-Air. В [4] приведены также данные по ТП на КГ Air-He в цилиндрической геометрии.

В последующие годы интерес к исследованию ТП значительно возрос. В работе [5] ТП изучалось на КГ He-Ar, Ar-He при изменении отношения плотностей на КГ в диапазоне  $3 \times 10^{-2} \div 30$ . Там же для вычисления скорости роста ширины зоны ТП предложена приближенная формула в виде линейной функции времени.

Турбулентное перемешивание, развивающееся на КГ под действием падающей на КГ УВ (диапазон чисел  $M = 1,32 \div 1,66$ ), и последующее развитие зоны после ее взаимодействия с отраженной от жесткой стенки УВ изучались в работе [6] для следующих пар газов Air-SF<sub>6</sub>, Air-He, Air-CO<sub>2</sub>, Air-R22 на вертикальной ударной трубе.

Влияние толщины и свойств мембраны на ТП ис-

следовалось, например, в работах [7, 8]. В экспериментах [7] УВ падала на границу Air-He (конфигурация тяжелый-легкий), вызывая развитие неустойчивости на ней, двигалась по He до закрытого торца трубы, отражалась от торца трубы и взаимодействовала с зоной ТП. Опыты [7] продемонстрировали, что влияние толщины разделительной пленки на скорость роста ширины зоны ТП с течением времени становится значительным.

Аналогичные исследования выполнены авторами [8] для набора газов Air-SF<sub>6</sub> (конфигурация легкий-тяжелый) при числе Маха падающей на КГ УВ  $M = 1,25$ . В первой серии опытов задавалось одномодовое возмущение в виде синусоиды с амплитудой  $a_0 = 4$  мм и длиной волны  $\lambda = 26$  мм. Анализируя результаты этих экспериментов, авторы пришли к выводу, что при выбранной амплитуде начального возмущения толщина мембраны не оказывает видимого влияния на скорость роста ширины зоны ТП. Во второй серии опытов исследование проводилось при малой амплитуде многомодового случайного возмущения. Для этой серии опытов скорость роста зоны ТП оказалась не зависимой от толщины пленки лишь до момента прихода на зону ТП ударной волны, отраженной от торца трубы. В дальнейшем скорость развития ширины ЗТП определялась толщиной мембраны. Влияние свойств разделительной пленки на скорость роста ЗТП особенно заметно проявилось в опытах с парой газов Air-Air.

В экспериментах [9–11] начальные давления рабочих газов были меньше атмосферного, что позволило увеличить число Маха падающей на КГ УВ. Так, в работе [11] рассмотрено развитие ТП на границах CO<sub>2</sub>-He, CO<sub>2</sub>-Ar и CO<sub>2</sub>-Kr при  $M = 2,4; 3,1; 4,5; 5,3$  (начальное давление газов 1500 Па), уточнен линейный закон роста ширины зоны ТП, предложенный Зайцевым в работе [5], дается сравнение результатов экспериментов со степенным законом роста ширины ЗТП. В [10] ТП исследуется в диапазоне изменения чисел Маха  $M = 1,28 \div 4,2$  для пяти наборов рабочих газов. Там же оценивается толщина пристенного пограничного слоя. Рост ширины зоны ТП на границе Air-SF<sub>6</sub> при изменении чисел Маха падающей на КГ УВ в диапазоне  $M = 1,18 \div 1,98$  и после взаимодействия зоны с отраженной от жесткой стенки УВ рассмотрен в работе [9].

Описанные выше экспериментальные данные дают полезную информацию для понимания характера развития ТП при различных постановках опытов и используются при построении оценочных моделей, предна-

значенных для описания эволюции ширины зоны ТП. Однако данные о эволюции ширины зоны ТП не позволяют протестировать правильность численного моделирования отдельных характеристик турбулентности, например эволюцию кинетической энергии турбулентного поля, изменение анизотропии турбулентности, скорости диссипации и т. п. Экспериментальная информация по отдельным характеристикам турбулентности замерялась в опытах [12, 13].

В работе [13] изучалось развитие ТП на границе воздух-SF<sub>6</sub> под действием УВ. В этих экспериментах впервые были проведены измерения мгновенных значений скорости течения в ЗТП. С помощью лазерной доплеровской анемометрии исследована эволюция пульсаций продольной (параллельной оси ударной трубы) компоненты массовой скорости течения до и после взаимодействия ЗТП с УВ, отраженными от торца ударной трубы. В результате статистического усреднения по многократным измерениям получены зависимости от времени среднего квадрата пульсаций продольной компоненты скорости в пяти эйлеровых точках.

В следующих опытах рассмотрено взаимодействие изотропной турбулентности со стационарной УВ [12]. Опыт проводился в аэродинамической трубе с сечением 150 × 150 мм. Однородное изотропное поле турбулентности получалось с помощью решетки сверхзвуковых сопел, расположенных на начальном участке трубы. Эквивалентный шаг решетки  $m = 6$  мм, число Маха потока  $M_0 = 2,8$ . Стационарная УВ образовывалась на противоположном конце трубы в результате обтекания двух треугольных призм (расположенных ниже по течению от решетки). Течение вдоль плоскости симметрии трубы оставалось близким к одномерному, что позволяет использовать одномерные методики для моделирования взаимодействия УВ с изотропной турбулентностью. Этот опыт отличается от [13] отсутствием этапа развития неустойчивости и содержит всю необходимую информацию для постановки численного расчета.

Из многочисленных опубликованных экспериментальных данных наибольшее внимание в предлагаемой работе уделяется численному моделированию опытов [4, 12, 13]. Выбор указанных опытов продиктован двумя причинами: во-первых, данные опыты наиболее часто используются при тестировании различных методик (имеется большой численный материал), во-вторых, в опытах варьировались постановочные параметры (число Маха падающей на КГ ударной волны, степень разности плотностей и сжимаемости газов). Плоский опыт [4] позволяет проверить правильность моделирования эволюции зон ТП, развивающихся в трехслойной газовой системе (Air-He-Air) на двух КГ и последующем слиянии этих зон. В работе [4] также рассмотрено развитие ширины зоны ТП в цилиндрической геометрии в двухслойной газовой системе. Данные опытов [12, 13] привлекательны тем, что они позволяют проверить, насколько хорошо та или иная численная методика описывает основные характеристики турбулентности при наличии УВ.

## 2. Результаты моделирования известных опытов

В 1989 году на 2-й международной конференции по ТП была сформирована система тестов для отработки методик расчета турбулентных течений. С тех пор экспериментаторами различных стран проведены новые опыты, в которых получены более информативные данные о развитии ТП. В частности, помимо изучения эволюции ширины зоны ТП в новых опытах замерялись некоторые характеристики турбулентности. Ввиду отсутствия единого набора современных тестов, разработчики методик для тестирования своих пакетов программ используют эксперименты, информация которых наиболее доступна для них (как правило, разработчики методик используют результаты опытов, поставленных в своих лабораториях). По этой причине сопоставление результатов моделирования ТП, полученных по различным методикам, представляет определенные трудности.

Ниже рассмотрены результаты моделирования четырех опытов. Первый опыт выполнен в цилиндрической геометрии в двухслойной газовой системе. Подобные опыты, но в плоской геометрии, проводились в научных лабораториях Франции, Англии, Америки, Израиля, Испании, СССР (России). Во втором опыте изучалось ТП в трехслойной газовой системе. После прохождения УВ через КГ ТП развивается сначала на каждой КГ независимо, а впоследствии обе зоны ТП смыкаются. Опыты в трехслойных газовых системах являются единичными. При проведении этих двух экспериментов замерялась лишь ширина зоны ТП.

В следующих двух опытах (Poggi и Varre) помимо измерения ширины зоны ТП изучалась эволюция некоторых характеристик турбулентности. Эти опыты стали значительным шагом в деле изучения турбулентности. На взгляд авторов результаты моделирования этих опытов в большей степени, чем опыты [4–11], показывают возможности физической модели, заложенной в том или ином пакете программ.

**Цилиндрический опыт Е. Е. Мешкова.** Начальная геометрия задачи ( $r = 0$  – ось симметрии трубы,  $r = 10$  – стенка трубы) показана на рис. 2, исходные данные для расчета представлены в табл. 1. Размерности, используемые в расчетах: длина [см], время [ $10^{-4}$  с], плотность [ $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>], давление [ $10^{-1}$  бар]. Во всех областях используется уравнение состояния идеального газа с выравниванием температур компонентов смеси в смешанных ячейках. Момент окончания расчета  $t = 1,4$ .

При заданном значении энергии в ОЭ на границе Air-ОЭ происходит распад произвольного разрыва и налево (к оси симметрии) побежит УВ. При выходе УВ на границу He-Air мембрана разрывается на кусочки различных размеров, тем самым создавая спектр начальных возмущений. С этого момента времени на КГ начинает развиваться неустойчивость.

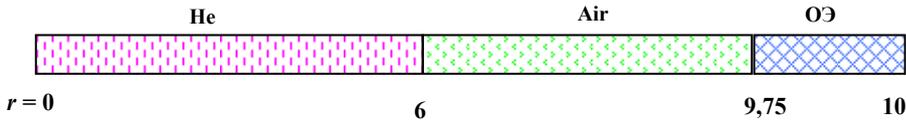


Рис. 2. Начальная геометрия расчета

Таблица 1

Исходные данные к расчету

Вещество	$N$	$\rho_0$	$E_0$	$P_0$	$c_v$	$\gamma$
He	126	0,1663	96,688	10,13	0,3334	1,63
Воздух	148	1,205	20,757	10,13	0,07158	1,405
O <sub>2</sub>	64	19,0	35,68	452,0	1,0	1,6667

В таблице:  $N$  – число счетных точек в области;  $\rho_0$  – начальная плотность вещества;  $E_0$  – начальная удельная внутренняя энергия вещества;  $P_0$  – начальное давление;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $c_v$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме; O<sub>2</sub> – область энерговыделения.

Результаты расчетных и экспериментальных данных, полученные по усовершенствованной В. И. Козловым [14, 15] модели В. В. Никифорова, представлены на рис. 3. Расчеты по программе РАЗЕС проводились на четырех сетках 1N, 2N, 4N и 8N, чтобы продемонстрировать сходимость решения. Данные рис. 3 свидетельствуют, что

- на сетках 4N и 8N решения совпадают (достигнута сходимость решения);
- глубина проникновения тяжелого газа в легкий (Air в He) лучше описывается усовершенствованной моделью, чем глубина проникновения легкого газа в тяжелый (He в Air).

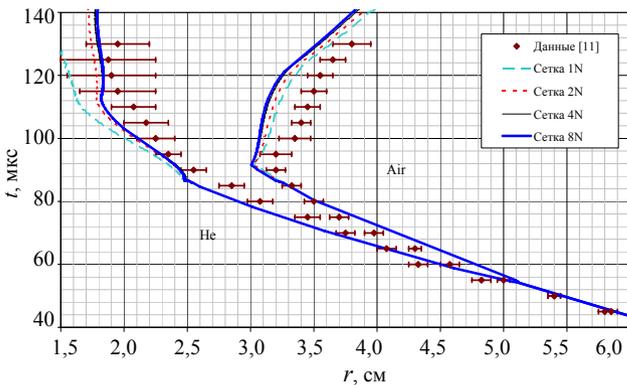


Рис. 3.  $r$ - $t$  диаграммы границ зоны ТП, расчет по РАЗЕС

Моделирование цилиндрического опыта Е. Е. Мешкова проводилось и ранее по модели В. В. Никифорова с использованием методик ТОГА [4] и ВИХРЬ [16]. В указанных работах расчетная эволюция ширины ЗТП хорошо согласуется с экспериментальной. Следует отметить, что постановки расчетов [4, 16] отличаются от

постановки расчета, выполненного по методике РАЗЕС, методом инициализации ТП и уравнениями состояния в смешанных ячейках. Метод инициализации ТП, использованный в работе [4, 16], имеет несколько неопределенных параметров (изменяя параметры, можно добиться удовлетворительного описания ширины зоны ТП) и в настоящее время не используется в расчетах, так как он не имеет теоретического обоснования (недостатки этого метода описаны в [17]). Вместо него предложено два других метода [15, 18], основанных на расчете этапа развития неустойчивости по теоретическим моделям (исходными параметрами расчета служат амплитуда и длина волны начального возмущения). При расчете этапа развития неустойчивости с использованием теоретических подходов [15, 18] в модели В. В. Никифорова (и усовершенствованной модели) глубина проникновения тяжелого газа в легкий (Air в He) лучше описывается, чем глубина проникновения легкого газа в тяжелый. С целью устранения этого дефекта продолжается работа по совершенствованию модели ТП.

**Смыкание зон ТП – плоский опыт Е. Е. Мешкова.** На практике приходится моделировать развитие ТП в многослойных системах, в которых неустойчивость развивается на нескольких КГ и может впоследствии привести к смыканию зон ТП. В этой связи для тестирования численных методик представляет интерес плоский опыт Е. Е. Мешкова [4]. В этом опыте рассматривается развитие неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и ТП на двух КГ (рис. 4). Ударная труба имеет прямоугольное сечение  $12 \times 4$  см. В качестве рабочих газов использовались воздух (Air) и гелий (He). УВ формировалась на правой границе трубы и перемещалась из Air в He и далее в Air. Число Маха УВ в Air  $M \approx 1,3$ .



Рис. 4. Начальная геометрия задачи

Нумерация КГ в расчете показана на рис. 4. Начальные параметры веществ даны в табл. 2. Плотности газов соответствуют начальному давлению в газах, равному  $P_0 = 1$  атм, а удельная внутренняя энергия – начальной температуре  $20^\circ\text{C}$ . В расчетах используется уравнение состояния идеального газа. Размерности задачи: мг, см,  $10^{-4}$  с.

Таблица 2  
Параметры начального состояния системы

Вещество	$\rho_0$	$\gamma$	$P_0$	$E_0$
He	0,1663	1,63	10,13	96,688
Air	1,205	1,405	10,13	20,757

При заданном на правой границе давлении  $P = 18$ , что соответствует постановке опыта, в Air формируется УВ. Число Маха УВ связано с давлением за фронтом УВ соотношением

$$M = \sqrt{\frac{P + P_0 h}{P_0 (1 + h)}} \approx 1,29; \quad h = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}.$$

Плотность и массовая скорость газа за фронтом УВ при заданных условиях находятся из условий Ренкина-Гюгонио

$$\rho = \rho_0 \frac{M^2}{(1 - h) + h M^2} = 1,8; \quad u = (1 - h) c_0 \frac{M^2 - 1}{M} = -1,47,$$

где  $c_0 = 3,43$  – скорость звука в Air перед фронтом УВ, скорость УВ в Air  $D = M c_0 = 4,42$ . Время выхода УВ на КГ 3 составляет  $t_1 = 35,2/D \approx 7,96$ .

На рис. 5 показаны  $r-t$  диаграммы границ зон ТП, полученные в расчете по методике ВИХРЬ с использованием модели В. В. Никифорова и в экспериментах. Из рис. 5 следует, что границы зон ТП и  $r-t$  диаграмма УВ, полученные в расчете, оказываются сдвинутыми относительно экспериментальных точек. При этом в эксперименте взаимодействие отраженной от левого торца УВ с зоной ТП Air-He начинается раньше, чем в расчете на время  $t \approx 0,5$ . Такое расхождение может быть связано с систематическими ошибками измерения времени и положения границ зон ТП в эксперименте. Расчетные данные, построенные в переменных  $(r + 0,5; t - 0,5)$ , удовлетворительно согласуются с экспериментальной информацией, хотя несколько хуже, чем дан-

ные методики ТОГА [4]. По-видимому, причины имеющихся расхождений в результатах расчетов, выполненных по методикам ВИХРЬ и ТОГА те же, что и в расчетах предыдущего опыта.

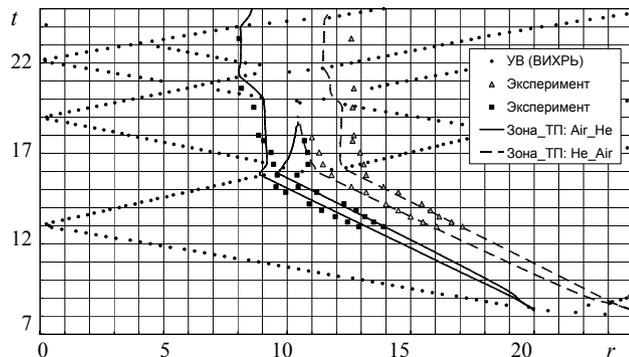


Рис. 5.  $r-t$  диаграммы границ зон ТП и УВ, расчет по методике ВИХРЬ

### Опыт Poggi et al.

В двух предыдущих опытах исследовалось развитие только ширины ЗТП. Для тестирования физической модели ТП этой информации недостаточно, поскольку желательно на экспериментальных данных проверять, насколько та или иная модель способна описать эволюцию кинетической энергии турбулентности, скорость диссипации, изменение турбулентных величин при взаимодействии турбулентного поля с УВ и т. д. В следующих двух опытах такая информация была получена.

В опыте [13] вертикальная ударная труба с поперечным сечением  $8 \times 8$  см заполнена двумя газами ( $\text{SF}_6$  внизу и воздух сверху), первоначально разделенными пластиковой мембраной толщиной  $0,3$  мкм. Торец трубы, к которому примыкает воздух, закрыт жесткой стенкой. Начальное расстояние между КГ (мембраной) и жесткой стенкой составляет  $30$  см. На другом конце трубы формируется УВ с числом Маха  $M = 1,45$ , движущаяся по  $\text{SF}_6$ . В опыте развитие зоны ТП происходит в результате ее взаимодействия с серией УВ, отраженных от левого торца ударной трубы.

Характеристики пленки (разнотолщинность, прочность и т. д.) оказывают на начальном этапе некоторое влияние на развитие возмущений в окрестности контактной границы. Для того чтобы фиксировать начальный масштаб возмущений, рядом с мембраной размещалась сетка из тонкой проволоки с шагом сетки  $1030$  мкм и диаметром проволоки  $80$  мкм. После про-

хождения УВ мембрана движется в сторону сетки и разрушается на ней, в результате чего формируется начальная зона развития турбулентности. При этом масштаб начальных возмущений определяется размером ячейки проволоочной сетки, а зона перемешивания оказывается более однородной по поперечному сечению трубы. Согласно [13], сетка сама по себе не вызывает какого-либо измеримого уровня турбулентности.

Для определения зависимости положения и ширины ЗТП от времени в экспериментах использовался теневой метод (шлирен-визуализация). С помощью лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) также измерялась величина компоненты скорости, параллельной оси ударной трубы. Статистическая обработка результатов измерений скорости позволила определить эволюцию среднего квадрата продольных пульсаций скорости газовой смеси. В экспериментах расположение ЛДА датчиков было выбрано последовательно в точках 5,1; 12,55; 16,1; 16,9 и 17,85 см вниз по течению от начального положения КГ (соответственно 24,9; 17,45; 13,9; 13,1; 12,15 см от левого торца трубы). Полученные в экспериментах данные дают информацию о степени затухания турбулентности после прохождения УВ через КГ, о степени усиления пульсаций скорости в результате взаимодействия отраженной от левого торца УВ с турбулентным полем (отношение значений квадрата пульсаций скорости на датчиках 13,9 и 17,45 см) и последующим затуханием турбулентности.

В эксперименте на правой границе на расстоянии 120 см от левого торца ударной трубы задается постоянное давление 2,15 бар, что приводит к формированию УВ в SF<sub>6</sub> со скоростью фронта 19,7 см/мс. Время окончания расчета  $t = 7$  мс (система единиц: [г], [см], [мс]).

**Расчеты по усовершенствованной модели В. В. Никифорова.** На рис. 6 показаны зависимости положения границ ЗТП от времени и  $X-t$  диаграмма УВ, полученные в расчете по методике РАМЗЕС с использованием усовершенствованной В. И. Козловым модели В. В. Никифорова. На рисунке время отсчитывается от момента начала расчета (время выхода УВ на КГ  $t \approx 4,55$  мс), а начало координат совмещено с левой границей задачи (жесткой стенкой). Зависимости от времени среднего квадрата пульсаций продольной компоненты скорости в точках расположения датчиков представлены на рис. 7.

Представленные на рис. 6 (смотри также рис. 3) результаты свидетельствуют, что в усовершенствованной В. И. Козловым модели В. В. Никифорова глубина проникновения тяжелого газа в легкий описывается лучше, чем глубина проникновения легкого газа в тяжелый (проводится работа по устранению отмеченного дефекта). Данные рис. 7 позволяют заключить, что усовершенствованная В. И. Козловым модель В. В. Никифорова удовлетворительно воспроизводит экспериментальную информацию по значениям пульсаций продольной компоненты скорости.

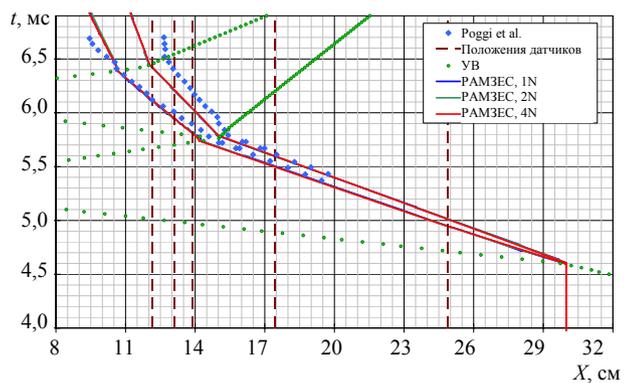


Рис. 6.  $X-t$  диаграммы границ ЗТП и УВ, методика РАМЗЕС

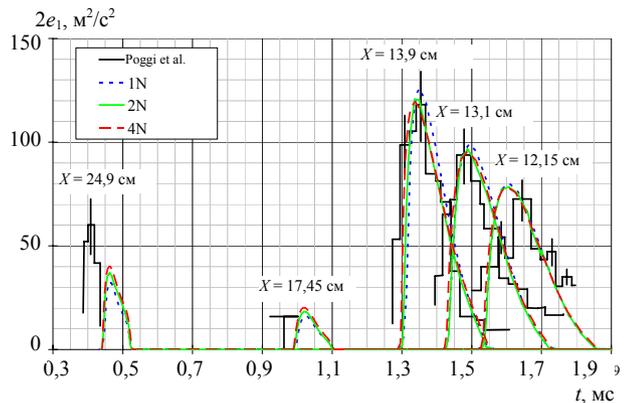


Рис. 7. Зависимость от времени среднего квадрата пульсаций продольной компоненты скорости, методика РАМЗЕС

### Прямое численное моделирование опыта Poggi.

Результаты расчетов опыта Poggi, полученные с использованием прямого численного моделирования, представлены в [19–21]. На рис. 2 и 17 в работе [19] показано сравнение данных прямого численного моделирования с экспериментальной информацией. Как следует из рис. 2, расчетная ширина ЗТП на отрезке времени  $0,0006 < t < 0,0013$  с (от момента взаимодействия падающей УВ с КГ до прихода первой ОУВ на сформировавшуюся зону ТП) несколько превосходит экспериментальное значение, в то же время ширина ЗТП после взаимодействия со второй отраженной от торца трубы УВ ( $t > 0,0019$  с) несколько меньше экспериментального значения.

Рассмотрим теперь степень усиления кинетической энергии турбулентности в результате взаимодействия турбулентного поля с УВ. На рис. 17 работы [19] расчетное значение пульсаций продольной компоненты скорости приведено только для двух датчиков: 125,5 мм и 169 мм. Тем не менее по данным рис. 17 можно заключить, что усиление пульсаций продольной компоненты скорости после взаимодействия УВ с турбулентным полем в расчете примерно в 5 раз выше (коэффициент усиления пульсаций в расчете  $\xi \approx 190:6 \approx 32$ ), чем в эксперименте ( $\xi \approx 95:15 \approx 6$ ). При этом численное значение кинетической энергии для датчика 169

мм ( $\approx 190 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) примерно в 2 раза превосходит экспериментальное значение ( $\approx 95 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ).

Результаты моделирования опыта Roggi представлены также в работах [20, 21]. Не останавливаясь на детальном анализе этих данных, отметим лишь, что в расчетах [20, 21] получено еще более значительное усиление пульсаций скорости после взаимодействия УВ с турбулентным полем по сравнению с экспериментальными данными.

Таким образом, приведенные в [19–21] результаты моделирования опыта Roggi показали, что с использованием прямого численного моделирования не удалось с хорошей точностью описать усиление кинетической энергии турбулентности после взаимодействия УВ с зоной ТП.

**Расчеты по BHR модели.** Результаты расчетов опыта Roggi по BHR модели приведены в работе [22]. На рис. 2, 6 в работе [22] дается сопоставление расчетной и экспериментальной информации по ширине ЗТП и по усилению продольных пульсаций скорости. Сравнивая данные BHR модели с экспериментальной информацией можно заключить, что расчетные данные как по ширине ЗТП, так и по эволюции продольной кинетической энергии заметно отличаются от экспериментов. В 2006 году расчеты опыта Roggi были вновь проведены по BHR модели и доложены на десятой международной конференции по ТП [23]. Как отмечают авторы [23], предсказанные в расчете значения для турбулентной кинетической энергии значительно превосходят экспериментальную информацию и попытки приблизить расчетные данные к эксперименту пока не привели к успеху.

**Расчеты по GSG модели.** Удовлетворительные данные по моделированию опыта Roggi получены в работе [24] с использованием полуэмпирической модели турбулентности, содержащей пять уравнений для корреляций. На рис. 3, 4 [24] показано сравнение расчетной и экспериментальной информации по ширине ЗТП и усилению пульсаций продольной компоненты скорости. Эволюция границ ЗТП, полученная в расчетах (см. рис. 3 в работе [24]), удовлетворительно согласуется с экспериментальной информацией. Данные рис. 4 свидетельствуют, что степень усиления пульсаций продольной компоненты скорости в расчете ( $\xi \approx 160:15 \approx 10$ ) удовлетворительно соответствует эксперименту ( $\xi \approx 95:15 \approx 6$ ). Скорость затухания пульсаций скорости на последних трех датчиках (после взаимодействия УВ с ЗТП) также неплохо соответствует экспериментальной информации.

#### Опыт Barre et al.

В опыте Barre et al. (1996) [12] в сверхзвуковой аэродинамической трубе исследовалось взаимодействие изотропной турбулентности со стационарной УВ. Однородное изотропное поле турбулентности формировалось с помощью решетки сверхзвуковых сопел (шаг решетки  $m = 6$  мм), расположенных на входе в трубу. Стационарная УВ образовывалась ниже по течению от решетки сопел вследствие образования ножки Маха при обтекании двух треугольных призм. Число Маха

перед ножкой составило  $M_0 = 2,8$ . Измерения мгновенных значений скорости течения в различных точках вдоль плоскости симметрии течения проводились методами лазерной доплеровской анемометрии и теплоанемометрии. Статистическая обработка результатов измерений позволила получить среднеквадратичные значения продольных и поперечных пульсаций скорости, а также интегрального масштаба турбулентности.

Схема проведения опыта представлена на рис. 8.

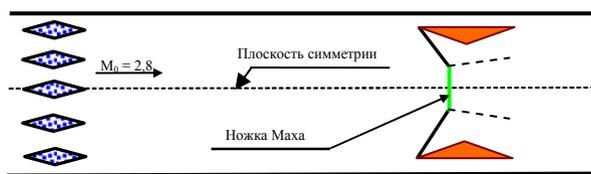


Рис. 8. Схема проведения опыта

Непосредственно за решеткой сопел поток характеризуется сложной структурой, обусловленной маховским взаимодействием волн от различных сопел. Вследствие затухания и обмена энергией между продольной и поперечной компонентами течения поле турбулентности с хорошей точностью становится однородным и изотропным непосредственно перед УВ.

**Расчеты по усовершенствованной модели В. В. Никифорова.** В расчетах по методике РАМЗЭС не ставилось цели промоделировать эволюцию турбулентного поля от решетки сопел вплоть до УВ. В целях упрощения расчетов и получения стационарного решения перед фронтом УВ на каждом счетном шаге по времени задавались значения кинетической энергии продольной и поперечной компонент турбулентного течения, скорости диссипации энергии турбулентности и относительной интенсивности среднего квадрата пульсаций плотности (все остальные турбулентные величины в начальный момент времени полагаются равными своим фоновым значениям). Постановка задачи для численного моделирования взаимодействия УВ с турбулентным полем приведена в работе [16]. Для лучшего понимания характера течения в окрестности плоскости симметрии предварительно выполнено моделирование течения в трубе без учета турбулизации течения.

На рис. 9, 10 представлены результаты расчетов, выполненных по усовершенствованной модели на последовательности сгущающихся сеток и данные [12] (изменение среднего квадрата продольных пульсаций скорости  $\overline{u'^2} / \left( \overline{u'^2} \right)_0$ , отнесенное к его значению перед

фронтом УВ, и изменение степени анизотропии поля  $u'/v'$  – отношения среднеквадратичных значений продольной и поперечной пульсаций скорости). Изменение масштаба турбулентности в расчете при взаимодействии турбулентного поля с УВ показано на рис. 11 в сравнении с экспериментальными данными.

При анализе полученных результатов примем во внимание замечание, сделанное в работе [25] (см. под-

пись к рис. 1). В этом замечании отмечается, что в диапазоне изменения пространственной координаты  $0 < X < 3$  мм (в окрестности фронта УВ) экспериментальные данные являются сомнительными. Приведенные на рис. 9, 11 данные свидетельствуют, что по усовершенствованной модели получено удовлетворительное описание экспериментальной информации по изменению среднего квадрата продольных пульсаций скорости и масштаба турбулентности при взаимодействии турбулентного поля с УВ.

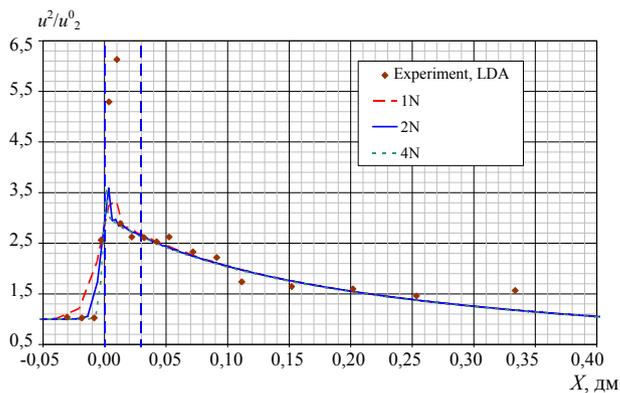


Рис. 9. Изменение среднего квадрата продольных пульсаций скорости при прохождении через УВ, расчеты по РАМЗЭС

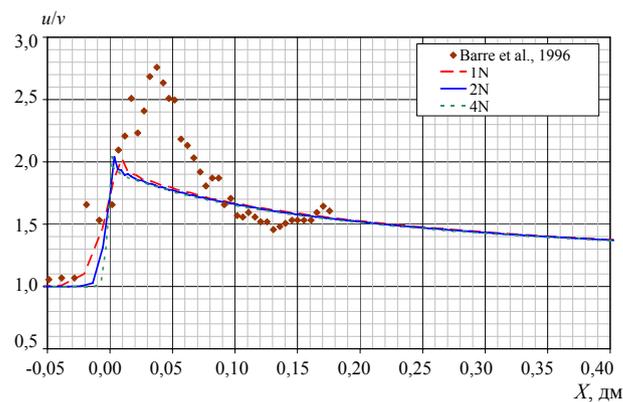


Рис. 10. Изменение степени анизотропии при прохождении через УВ, расчеты по РАМЗЭС

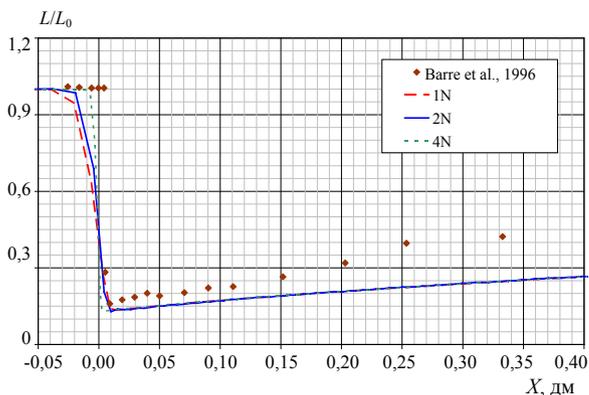


Рис. 11. Изменение масштаба турбулентности при прохождении через УВ, расчеты по РАМЗЭС

**Расчеты по Two-time-scale модели.** Результаты расчета опыта Barre, выполненные по two-time-scale

модели, представлены в работе [25]. На рис. 1 и 4 в работе [25] расчетные данные сравниваются с экспериментальными, полученными с помощью термоанемометрии и лазерной доплеровской анемометрии (в работе [25] не приведены результаты изменения степени анизотропии в процессе взаимодействия УВ с турбулентным полем). Приведенные в [25] результаты показывают, что расчетные данные довольно хорошо соответствуют экспериментальным.

### Моделирование других опытов

Выше рассмотрены результаты численного моделирования четырех экспериментов, при проведении которых получены информативные данные для тестирования физических моделей ТП. По представленным материалам можно заключить, что опыты Barre и Roggi (наиболее информативные и сложные для моделирования) активно используются французскими исследователями и в РФЯЦ-ВНИИЭФ для отработки физических моделей и численных методик.

Ранее было продемонстрировано, что не все современные методики описывают с желаемой точностью характеристики турбулентности при наличии УВ. Однако эти методики можно использовать для описания эволюции ширины ЗТП (при надлежащем решении проблем численного моделирования). В периодической литературе имеется довольно обширный материал, в котором представлены результаты расчетов ширины ЗТП, развивающейся на КГ газов под действием УВ. Рассмотрим некоторые из таких расчетов.

В работе [26] приведены результаты прямого (2D) численного моделирования экспериментов Collins [27]. Для повышения точности вычислений использовались WENO (weighted essentially non-oscillatory) схемы вплоть до 11-го порядка точности. Инициализация расчетов выполнялась в виде одно- и двухмодовых возмущений КГ. Скорость роста амплитуды, полученная в расчете, хорошо согласуется с экспериментальными данными и нелинейными аналитическими моделями. В работе [26] также представлены результаты 2D и 3D моделирования опытов Vetter [9]. Показано, что результаты 3D расчета лучше, чем 2D результаты, описывают экспериментально измеренную ширину ЗТП.

3D LES моделирование развития ширины ЗТП в опыте [9] выполнено в работе [28]. Численный метод основан на гибридной схеме расчета: в области скачка используется WENO схема, в области гладкости течения расчет ведется по TCD (turned centered difference) оптимизированной схеме. В процессе расчета сетка перестраивалась по AMR методу. Рассчитанная скорость роста ЗТП до и после взаимодействия возмущенной КГ с УВ вполне удовлетворительно согласуется с экспериментально измеренной скоростью.

В работе [29] сообщаются результаты экспериментального и численного исследования развития неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в ударной трубе сечением  $200 \times 100$  мм, число Маха падающей на КГ ударной волны  $M = 1,26$ . Развитие неустойчивости изучается в трехслойной газовой системе Air-SF<sub>6</sub>-Air (на двух КГ). Авторы работы предлагают читателю визуально

сравнить результаты экспериментов и численного моделирования, выполненного по коду TURMOIL 3D. Такой подход можно было бы понять, если бы отсутствовала теоретическая и экспериментальная информация по скорости роста амплитуды начальных возмущений и ширины зоны ТП после взаимодействия УВ с контактной границей.

Как продемонстрировано выше, использование BHR модели для описания характеристик турбулентности в экспериментах Poggi не увенчалось успехом, тем не менее BHR модель дает неплохие результаты в расчетах развития ширины ЗТП при наличии УВ. Численное моделирование ТП при участии УВ представлено в работе [30] в широком диапазоне изменения чисел Маха падающей на КГ ударной волны и различных наборов газов. Описываются два метода инициализации расчетов, демонстрируется влияние чисел Маха и Атвуда на скорость роста зоны, дается сравнение с данными экспериментов по скорости роста ширины ЗТП.

Ранее были представлены удовлетворительные результаты моделирования опыта Poggi с использованием GSG модели. В [31] GSG модель использовалась для моделирования экспериментов Vetter [9] при  $M = 1,5$ . В работе результаты расчетов сравниваются с данными экспериментов и DNS моделирования. В работе [31] также описывается метод инициализации ТП. Авторы отмечают, что при использовании для инициализации одномодового возмущения контактной границы GSG модель описывает рост зоны ТП только до момента прихода на КГ отраженной от торца трубы ударной волны. После взаимодействия ОУВ с зоной ТП рост ширины зоны ТП в эксперименте значительно превосходит рост ЗТП в численном расчете.

## Заключение

Приведены результаты моделирования четырех опытов. В трех экспериментах (два опыта Е. Е. Мешкова и опыт Poggi) неустойчивость и ТП возникают на КГ разноплотных газов, в четвертом опыте (Barre) исследовано взаимодействие УВ с изотропной турбулентностью. В опытах Е. Е. Мешкова замерялась только ширина ЗТП в двухслойной цилиндрической и трехслойной плоской системах. В двух других опытах (Poggi и Barre) получена информация об эволюции кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы.

**DNS и LES моделирование.** В большинстве расчетов получено удовлетворительное согласие численной и экспериментальной ширины ЗТП после первого взаимодействия УВ с КГ. Имеются расчеты [19], в которых после взаимодействия ЗТП (сформировавшейся под действием падающей на КГ ударной волны) с отраженной УВ развитие ширины ЗТП отличается от экспериментального. Усиление кинетической энергии турбулентности при взаимодействии с УВ в опыте Poggi описывается DNS методами не удовлетворительно [19–21].

**К-ε модель.** Работы, в которых К-ε модель исполь-

зуется для моделирования ТП, возникающего на КГ газовых слоев под действием УВ, на сегодняшний день практически отсутствуют. В работе [32] приводятся результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по ширине ЗТП на границе продукты взрыва-Air.

В работе [33] на фронте УВ величина турбулентных потоков ограничивалась алгебраическими соотношениями с использованием условий реализуемости. В таком виде К-ε модель апробировалась на известных экспериментах [4, 6]. Можно отметить удовлетворительное согласие с данными экспериментов по ширине ЗТП.

**Two-time-scale подход с К-ε моделью.** Хорошее согласие расчетных и опытных данных по характеристикам турбулентности получено при моделировании опыта Barre. Информации по моделированию эволюции ширины ЗТП в газовых слоях при наличии УВ с использованием two-time-scale подхода не найдено.

**Усовершенствованная модель В. В. Никифорова.** В цилиндрическом опыте Е. Е. Мешкова и опыте Poggi глубина проникновения тяжелого газа в легкий по усовершенствованной модели В. В. Никифорова описывается лучше, чем глубина проникновения легкого газа в тяжелый. Моделирование этих опытов проводилось и ранее по модели В. В. Никифорова с использованием методики ТОГА [4]. В указанных работах расчетная эволюция ширины ЗТП хорошо согласуется с экспериментальной. Однако отметим, что математическая постановка расчетов в работе [4] несколько отличалась от постановки расчета по усовершенствованной модели. На сегодняшний день усовершенствованная модель В. В. Никифорова является единственной, которая с удовлетворительной точностью описывает характеристики турбулентности как в опыте Barre, так и в опыте Poggi.

**BHR модель.** Результаты моделирования опыта Poggi, приведенные в [22, 23], свидетельствуют, что расчетные данные как по ширине ЗТП, так и по изменению кинетической энергии турбулентности в результате взаимодействия УВ с турбулентным полем значительно отличаются от экспериментальных данных. В то же время в работе [33] представлены удовлетворительные данные по описанию ширины зоны ТП в широком диапазоне чисел Маха падающей на КГ ударной волны и различных наборов газов. При моделировании экспериментов авторы использовали два метода инициализации ТП.

**GSG модель.** Модель использовалась для расчета опытов Vetter [9] и Poggi [13]. Результаты расчетов опыта Poggi вполне удовлетворительны как по описанию ширины зоны ТП, так и по характеристикам турбулентности. В работе [31] при моделировании опыта Vetter начальная шероховатость КГ задавалась в виде одномодового возмущения. Приведенные в работе [31] данные свидетельствуют, что в расчетах опыта Vetter близкие к эксперименту результаты по ширине ЗТП наблюдаются только до момента возвращения на КГ отраженной от торца трубы УВ. После взаимодействия отраженной от торца трубы УВ с зоной ТП рост ширины ЗТП в эксперименте значительно превосходит рост ЗТП в числен-

ном расчете.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке научной школы академика РАН Ю. А. Трутнева (код школы: НШ-5406.2006.2).

### Список литературы

1. Разин А. Н., Трутнев Ю. А. Обзор современных методик расчета турбулентного перемешивания // См. наст. вып. С. 3–13.
2. Cheng B. An overview of mix models // Proceedings 10<sup>th</sup> IWPCTM, Paris, France, 2006. P. 52.
3. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. 1969, № 5. С. 151–158.
4. Андронов В. А., Бахрах С. М., Мешков Е. Е., Никифоров В. В., Певницкий А. В., Толшмяков А. И. Экспериментальное исследование и численное моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях // Докл. АН СССР. 1982. Т. 264, № 1. С. 76–82.
5. Зайцев С. Г., Лазарева Е. В., Чернуха В. В., Беляев В. М. // Докл. АН СССР. 1985, № 1. Т. 283. С. 94–98.
6. Brouillette M., Sturtevant B. // Phys. Fluids A. 1993. Vol. 5(4). P. 916.
7. Bliznetsov M. V., Vlasov Y. A., Dudin V. I. et al. // Proceedings 6<sup>th</sup> IWPCTM, Marseille, France, 1997. P. 90.
8. Erez L., Sadot O. et al. // Shock Wave. 2000. Vol. 10. P. 241.
9. Vetter M., Sturtevant B. // Shock Wave. 1995. Vol. 4. P. 247.
10. Houas L., Chemouni I. // Phys. Fluids. 1996. Vol. 8(2). P. 614.
11. Jourdan G., Houas L., Haas J.-F., Ben-Dor G. // J. Fluid Mech. 1997. Vol. 349. P. 67.
12. Barre S., Alem D. and Bonnet J. P. Experimental Study of a Normal Shock/Homogeneous Turbulence Interaction // AIAA Journal. 1996. Vol. 34, N 5. P. 968–974.
13. Poggi F., Thoremby M.-H., Rodriguez G. // Phys. Fluids. 1998. Vol. 10, N 11. P. 2698.
14. Козлов В. И. Моделирование взаимодействия ударных волн и турбулентности // 8<sup>е</sup> Харитоновские тематические научные чтения. 2006. С. 258.
15. Козлов В. И., Сапожников И. В. Моделирование нестационарных турбулентных течений на основе модифицированной модели Никифорова // 8<sup>е</sup> Харитоновские тематические научные чтения. 2006. С. 266.
16. Разин А. Н. Численное моделирование турбулентного перемешивания по модели В. В. Никифорова. Проблемы и пути развития // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2003. Вып. 1–2. С. 3.
17. 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 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2007. Вып. 1. С. 121.
18. Разин А. Н. Развитие неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и турбулентное перемешивание в плоской трехслойной газовой системе // Там же. 2005. Вып. 1–2. С. 34.
19. Mugler C., Gauthier S. Two-dimensional Navier-Stokes simulation of gaseous mixture induced by Richtmyer-Meshkov instability // Physics of Fluids. 2000. Vol. 12(7). P. 1783.
20. Змитренко Н. В., Ладонкина М. Е., Тишкин В. Ф. Численное исследование турбулентного перемешивания для одной задачи о развитии неустойчивости Рихтмайера – Мешкова // Вопросы атомной науки и техники/ Сер. Математическое моделирование физических процессов/ 2004. Вып. 1. С. 12.
21. Синькова О. Г., Стаценко В. П., Янилкин Ю. В. Численное моделирование опыта по исследованию турбулентного перемешивания после неоднократного прохождения ударной волны через границу раздела // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2004. Вып. 3. С. 17.
22. Valerio E., Zeitoun D., Jourdan G., Haas J.-F. Study of Shock/Interface Interaction Turbulent Energy // Proceedings 7<sup>th</sup> IWPCTM, 1999, St.-Petersburg, Russia. P. 339.
23. Gore R., Steinkamp M. Validation of the BHR Turbulence Transport Model. Part 2 – Shocked Flows // Proceedings 10<sup>th</sup> IWPCTM, 2006, Paris, France.
24. Souffland D., Gregoire O., Gauthier S., Poggi F., Koenig J. Measurements and simulations of the turbulent energy levels in mixing zones generated in shock tubes // Proceedings 6<sup>th</sup> IWPCTM, 1997, Marseille, France. P. 486.
25. Gregoire O., Souffland D., Gauthier S., Schiestel R. A two-time-scale turbulence model for compressible flows: Turbulence dominated by mean deformation interaction // Physics of Fluids. 1999. Vol. 11(12). P. 3793.
26. Schilling O., Latini M., Don Wai-Sun, Bihari B. Investigation of the large-scale and statistical properties of Richtmyer-Meshkov instability-induced mixing // Proceedings 9<sup>th</sup> IWPCTM, 2004, Cambridge, UK.
27. Collins B., Jacobs J. PLIF flow visualization and measurements of the Richtmyer-Meshkov instability of an air/SF<sub>6</sub> interface // J. Fluid Mech. 2002. Vol. 464. P. 113.
28. Hill D., Pullin D., Deiterding R. Large-eddy simulation of Richtmyer-Meshkov instability with re-shock // Proceedings 9<sup>th</sup> IWPCTM, 2004, Cambridge, UK.
29. Holder D., Barton C. Shock tube Richtmyer-Meshkov experiments: inverse chevron and half height // Proceedings 9<sup>th</sup> IWPCTM, 2004, Cambridge, UK.
30. Valerio E., Jourdan G., Houas L., Zeitoun D., Besnard D. Modelling of Richtmyer-Meshkov instability-induced turbulent mixing in shock-tube experiments // Phys. Fluids. 1999. Vol. 11(1). P. 214.
31. Gregoire O., Souffland D. Simulations of compressible mixing flows using a second order turbulence model // Proceedings 7<sup>th</sup> IWPCTM, 1999, St.-Petersburg, Russia. P. 252.
32. Stadnik A. L., Statsenko V. P., Yanilkin Yu. V., Zhmailo V. A. Proceedings 7<sup>th</sup> IWPCTM. 1999. P. 326. St. Petersburg, Russia.
33. Gauthier S., Bonnet M. A K-ε model for turbulent mixing in shock-tube flows induced by Rayleigh-Taylor instability // Physics of Fluids. 1990. Vol. 2(9). P. 1685.

Статья поступила в редакцию 11.12.2007.