

УДК 532.517.4

О СХОДИМОСТИ РАЗНОСТНОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗОНЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Д. И. Бобровский, И. В. Большаков, А. Н. Разин
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Предлагается новый подход для построения сходящегося разностного решения уравнений турбулентного перемешивания при взаимодействии ударной волны с зоной перемешивания. Алгоритм построения сходящегося решения реализован в рамках модели В. В. Никифорова в методиках ВИХРЬ и АРКТУР, предназначенных для моделирования одномерных течений с учетом турбулентного перемешивания. Приводятся результаты расчетов модельного опыта Погжи (1998 г.) на последовательности сгущающихся сеток, подтверждающие эффективность нового подхода, сформулирована технология проведения расчетов.

Ключевые слова: взаимодействие ударной волны с зоной турбулентного перемешивания, сходимость решения, расчеты опыта Погжи.

Введение

При моделировании течений, в которых турбулентное перемешивание (ТП) развивается на контактных границах (КГ) слоистых систем из неустойчивости Рихтмайера—Мешкова, существует проблема обеспечения сходимости разностного решения уравнений ТП при взаимодействии ударной волны (УВ) с зоной ТП. В расчетах на последовательности измельчающихся сеток ширина зоны ТП и характеристики турбулентности зависят от градиентов средних газодинамических величин на фронте УВ. Поскольку градиенты на фронте УВ обратно пропорциональны размеру счетной ячейки, результаты моделирования на последовательности сгущающихся сеток могут отличаться значительно. Ясно, что в таких условиях сложно интерпретировать результаты моделирования, а совершенствование математической модели становится затруднительным.

Вопросы моделирования взаимодействия УВ с зоной ТП с использованием модели В. В. Никифорова [1] рассматривались в [2, 3], однако удовлетворительного решения проблемы не было найдено. В настоящей работе рассматривается новый подход для построения сходящегося

разностного решения уравнений ТП и приводятся результаты расчетов опыта Погжи [4], подтверждающие эффективность нового подхода. Ключевым моментом данного подхода является поиск центра *конечно-разностной* УВ (в расчетах многослойных систем возможна ситуация с определением одновременно нескольких УВ), а единственным параметром является ширина фронта конечно-разностной УВ. При задании ширины фронта конечно-разностной УВ авторы использовали результаты [5], где вопрос о ширине фронта УВ изучался экспериментально.

Построение сходящегося решения

Построение сходящегося разностного решения при взаимодействии УВ с зоной ТП рассмотрим на примере моделирования опыта Погжи. В опыте ударная труба с поперечным сечением 8×8 см заполнялась двумя газами (SF_6 и воздух), первоначально разделенными пластиковой мембраной толщиной 0,3 мкм (рис. 1). Левый торец трубы, к которому примыкает воздух, закрыт жесткой стенкой. Начальное расстояние между КГ (мембраной) и жесткой стенкой ($r = 0$) составляет 30 см. На другом конце трубы

($r = 120$ см) формируется УВ с числом Маха $M = 1,45$, движущаяся по SF_6 . В опыте развитие зоны ТП происходит в результате ее взаимодействия с серией УВ, отраженных от левого торца ударной трубы. Схема постановки расчета приведена на рис. 1 (подробности постановки расчета и метод инициализации ТП см. в [6]), данные к расчету представлены в таблице.

Прежде всего продемонстрируем зависимость ширины зоны ТП и градиентов давления на фронте УВ, проходящей через зону ТП, от размера счетной ячейки в стандартных расчетах, выполненных по методике ВИХРЬ [7] с использованием модели Никифорова. Моделирование ТП начинается в момент времени $t \approx 47 \times 10^{-4}$ с, когда после взаимодействия УВ с КГ этап развития неустойчивости закончен и с использованием теоретической модели, предназначенной для расчета роста амплитуды пузырей и струй, определена ширина начальной зоны ТП [6]. В начальной зоне ТП задавались относительная интенсивность квадрата пульсаций плотности $R = 0,45$, кинетические энергии продольной и поперечной компонент скорости $e_1 = e_2 = 0,85 \text{ см}^2/\text{мс}^2$ (интенсивность турбулентности $I = 10\%$), скорость диссипации $Q = 20 \text{ см}^2/\text{мс}^3$.

Эволюция расчетных и экспериментальных положений границ зоны ТП показана на рис. 2. Профили градиентов давления на фронте УВ при $t \approx 57,5$ (в момент прохождения УВ через зону ТП) приведены на рис. 3. Результаты, представленные на рис. 2 и 3, получены на сетках 1N–8N (сетка 1N содержит 300 точек в области с воздухом и 900 точек в области с SF_6). Для сохранения начальной ширины зоны ТП при каждом измельчении сетки в два раза число точек, в которых задавались начальные значения турбу-



Рис. 1. Схема постановки расчета

лентных величин, увеличивалось в два раза (подробности см. в [8]).

Из рис. 2 следует отсутствие зависимости решения от размера счетной ячейки (h) до момента времени $t \approx 57$, т. е. момента взаимодействия отраженной от левого торца трубы УВ с зоной ТП. На отрезке времени $57 < t < 58$ отраженная от левого торца УВ проходит через зону ТП. Согласно рис. 3 ширина фронта конечно-разностной УВ зависит от h и составляет $\Delta \approx 0,4$

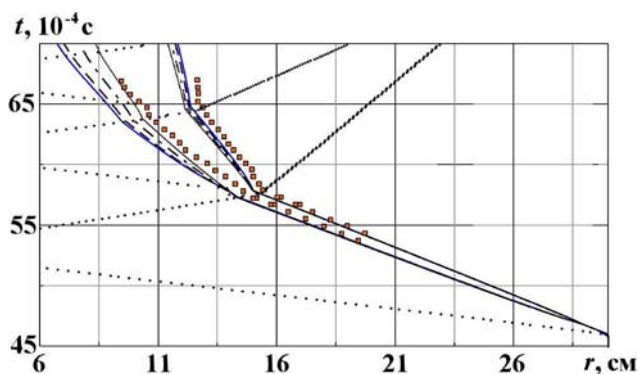


Рис. 2. Границы зон ТП и УВ в расчетах на сходимости: — — сетка 1N; - - - сетка 2N; - - - сетка 4N; — — сетка 8N; ■ — зона ТП в эксперименте; ... — УВ

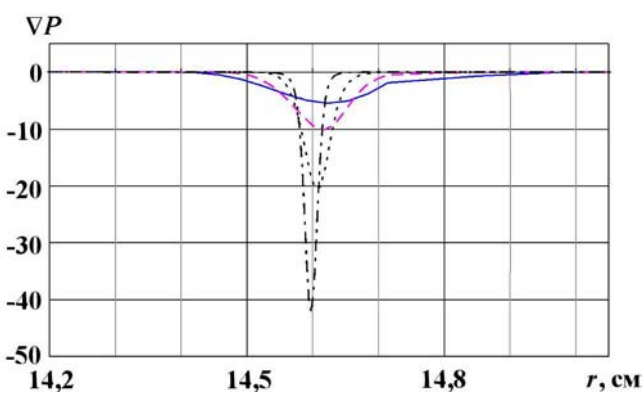


Рис. 3. Профили градиентов давления на фронте УВ, $t \approx 57,5$: — — сетка 1N; - - - сетка 2N; - - - сетка 4N; - - - сетка 8N

Параметры начального состояния системы

Вещество	r , см	ρ_0 , г/см ³	E_0 , см ² /мс ²	γ	C_V , 10 ² Дж/(кг·К)
Воздух	0–30	0,0012	2 083,33	1,400	7,079
SF_6 (эле-газ)	30–120	0,0060	1 773,05	1,094	6,059

на сетке $1N$, $\Delta \approx 0,2$ на сетке $2N$, $\Delta \approx 0,1$ на сетке $4N$, $\Delta \approx 0,05$ на сетке $8N$. Так как ширина фронта конечно-разностной УВ прямо пропорциональна, а градиенты средних газодинамических величин на фронте обратно пропорциональны размеру счетной ячейки h , разностное решение уравнений ТП при $t > 58$ становится зависимым от сетки, вследствие чего при $t > 58$ сходимость решения отсутствует. Масштаб зависимости ширины зоны ТП от размера счетной ячейки можно оценить по данным рис. 2: при $t = 70$ на сетке $1N$ расчетная ширина зоны ТП составляет $L \approx 5,05$ см, на сетке $8N$ $L \approx 3,03$ см.

Чтобы исключить зависимость градиентов средних газодинамических величин на фронте УВ от размера счетной ячейки, предлагается следующий подход в построении сходящегося решения уравнений ТП.

Примем, что используемая для решения уравнений газовой динамики разностная схема размывает фронт конечно-разностной УВ на четыре ячейки, т. е. ширина фронта конечно-разностной УВ $\Delta = 4h$ (h — линейный размер ячейки на фронте УВ). При сделанном предположении градиент давления на фронте конечно-разностной УВ можно аппроксимировать выражением

$$\nabla P = \frac{P_2 - P_1}{4h} = \frac{P_2 - P_1}{\Delta}, \quad (1)$$

где P_1, P_2 — давление перед и за фронтом УВ соответственно. Способ вычисления градиента по (1) довольно сложно реализовать в программных комплексах при моделировании многослойных систем, так как интенсивность конечно-разностной УВ меняется при движении в сложной системе. Проще реализуется расчет градиента давления на фронте конечно-разностной УВ в ячейке k по соотношению

$$\nabla P = \frac{2(P_{k+1} - P_{k-1}))}{\Delta}, \quad (2)$$

где k — номер ячейки разностной сетки.

Вычисление градиента давления через ширину фронта УВ (Δ), а не через размер ячейки (h) используем только на фронте УВ, т. е. в ячейках, где выполняется условие $\frac{\partial U}{\partial r} < 0$. Вне фронта УВ градиент давления определяем обычным образом, т. е. через линейный размер ячейки h .

При таком алгоритме вычисления градиентов на фронте УВ по задаваемой ширине фронта Δ и

размеру ячейки h точно находятся ячейки, принадлежащие фронту УВ, если известно положение центра волны. Скорректированные градиенты средних газодинамических величин используем только при вычислении генерационных членов в уравнениях ТП и не используем при интегрировании уравнений газовой динамики.

На рис. 4 (см. также цветную вкладку) представлены профили градиентов давления, рассчитанные на сетках $1N-16N$ по формулам (2). Как следует из представленных результатов, на последовательности сгущающихся сеток максимумы градиентов давления на фронте УВ близки, однако ширина фронта конечно-разностной УВ остается зависимой от размера счетной ячейки.

На рис. 5 и 6 (см. также цветную вкладку) приведены границы зон ТП и пульсации продольной компоненты скорости в расчетах на последовательности сгущающихся сеток для профилей градиентов давления, соответствующих рис. 4. Согласно данным рис. 5 и 6 ширина зоны ТП не зависит от h , но имеется зависимость от h пульсаций продольной компоненты скорости.

Для обеспечения независимости решения от h и по пульсациям скорости необходимо убрать зависимость ширины фронта конечно-разностной УВ от h . С этой целью рассчитанные по (2) профили градиентов давления (и других газодинамических величин) пересчитаем на заданную ширину фронта УВ (на ширину Δ). По профилю (2) находим ячейку, в которой достигается $\max(\nabla P)$. Эту ячейку принимаем за центр УВ. Затем заменяем профиль градиентов давления (2) на профиль треугольного импульса с

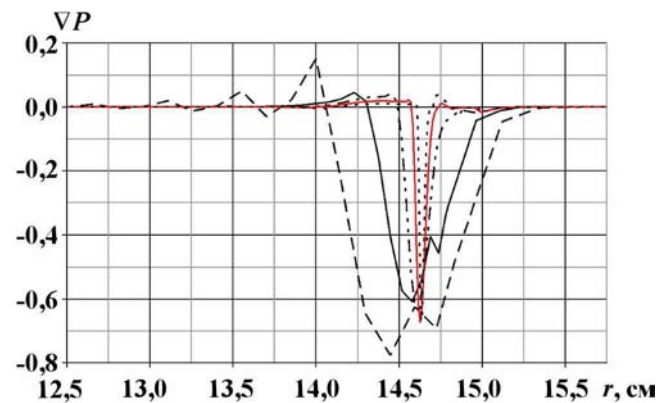


Рис. 4. Профили градиентов давления, $t \approx 57,5$:
 - - - сетка $1N$; — — — сетка $2N$; - - - - сетка $4N$;
 — · — · — сетка $8N$; - - - - сетка $16N$

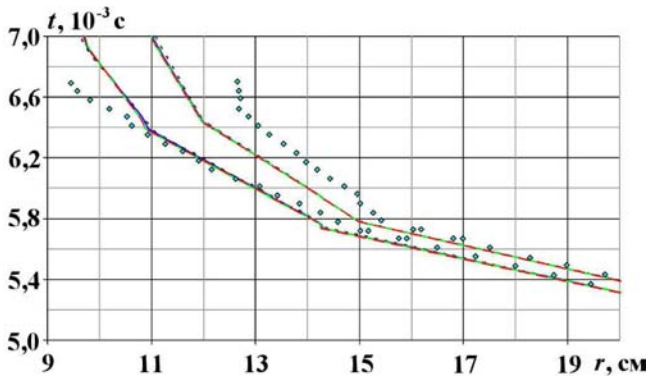


Рис. 5. Границы зон ТП, $\Delta = 1,2$: --- сетка 1N; — сетка 2N; —·— сетка 4N; ··· сетка 8N; \diamond — эксперимент

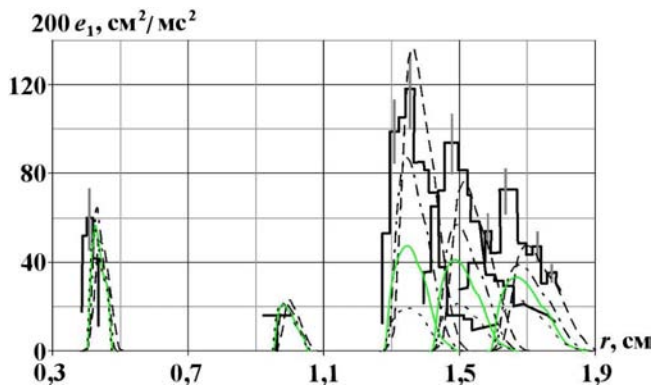


Рис. 6. Пульсации продольной компоненты скорости, $\Delta = 1,2$: --- сетка 1N; —·— сетка 2N; — сетка 4N; ··· сетка 8N; ——— эксперимент

вершиной в центре УВ. В вершине импульса градиент давления не меняем.

Пример расчета градиента давления на фронте УВ для $\Delta = 1,2$ представлен на рис. 7 (см. также цветную вкладку). Из представленных результатов следует, что максимальные значения градиентов давления отличаются друг от друга не более чем на 10%. Диапазон изменения градиентов в 10% можно уменьшить, определив P_2 и P_1 в формуле (1), например, в результате предварительного проведенного расчета. Пульсации продольной скорости в расчетах на сходимость для профилей градиентов, соответствующих рис. 7, показаны на рис. 8 (см. также цветную вкладку).

На рис. 9 приведены результаты расчетов ширины зоны ТП при различных значениях параметра Δ , которые демонстрируют, что в рассмотренном диапазоне изменения Δ ширина зоны перемешивания не изменяется.

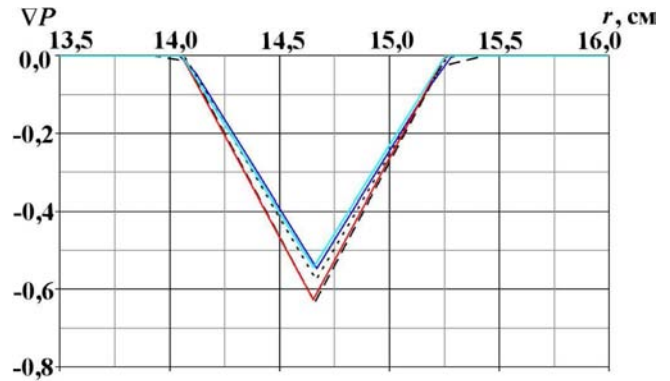


Рис. 7. Профили градиентов давления, $t \approx 57,5$; $\Delta = 1,2$: --- сетка 1N; — сетка 2N; —·— сетка 4N; ··· сетка 8N; —·— сетка 16N

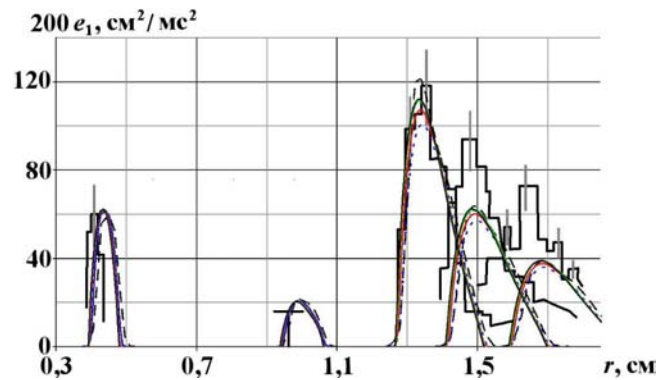


Рис. 8. Пульсации продольной скорости в расчетах на сходимость, $\Delta = 1,2$; $R = 0,45$; $e_1 = e_2 = 0,85$ ($I = 10\%$); $Q = 10$: --- сетка 1N; --- сетка 2N; — сетка 4N; ··· сетка 8N; —·— сетка 16N; ——— эксперимент

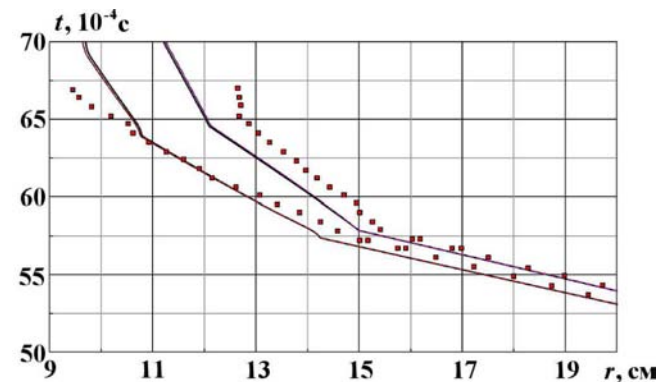


Рис. 9. Границы зон ТП для различных значений Δ , сетка 4N: — $\Delta = 0,2$; —·— $\Delta = 0,8$; ··· $\Delta = 1,2$; \blacksquare — зона ТП в эксперименте

Вопрос о ширине фронта УВ, проходящей через зону ТП, изучался экспериментально в [5]. В первой серии экспериментов ширина фронта УВ исследовалась для пары газов Аг—Не (число Атвуда $A = 0,82$, $M = 1,7$), во второй серии — для газов N_2 —Не (число Атвуда $A = 0,75$, $M = 2,0$). Согласно [5] в первой серии опытов ширина фронта УВ после прохождения зоны ТП, формирующейся на границе газов, изменялась в пределах $\Delta \approx 14$ — 16 мм, во второй серии опытов — в пределах $\Delta \approx 11$ — 13 мм. Как отмечается в [5], в экспериментах наблюдалась зависимость ширины фронта УВ от числа Атвуда: при увеличении числа A ширина фронта УВ увеличивалась. Таким образом, полученные в экспериментах оценки ширины фронта реальной УВ можно использовать в расчетах на сходимость.

О сходимости решения при взаимодействии УВ с зоной ТП

В практических задачах турбулентному перемешиванию предшествует этап развития неустойчивости. Для решения уравнений ТП необходимо задать начальные данные (начальную ширину зоны и характеристики турбулентности в ней), которые определяются в процессе моделирования этапа развития неустойчивости. В общем случае эта задача не имеет точного решения, в связи с чем при моделировании этапа развития неустойчивости, задании начальных условий для решения уравнений ТП (инициализации ТП) и обосновании результатов расчета возникают затруднения.

В работе [6] при разработке метода инициализации ТП использовалось предположение, что на момент перехода от этапа развития неустойчивости к ТП ширина возмущенной зоны в большей степени зависит от начальных значений амплитуды (a_0), длины волны возмущения (k_0) КГ, перепада плотностей на КГ и скорости УВ. В то же время такие характеристики турбулентности, как квадрат пульсаций плотности (R), компоненты кинетической энергии турбулентности в продольном и поперечном направлениях (e_1 , e_2), формирующиеся в возмущенной зоне на момент перехода от этапа развития неустойчивости к ТП, и скорость диссипации (Q), в большей степени зависят от свойств контактирующих газов и параметров УВ, падающей на КГ, и в меньшей степени — от a_0 , k_0 . В методе инициализации [6] нет зависимости характеристик турбулентности

от неизвестных значений a_0 и k_0 , а от начальной шероховатости КГ зависит лишь начальная ширина возмущенной зоны (L). Перспективность данного подхода для инициализации ТП следует из того, что современная диагностическая аппаратура позволяет измерять кинетическую энергию турбулентности (а по значениям кинетической энергии, замеренной в нескольких точках, и скорость диссипации) при проведении экспериментов.

Для оценки влияния начальных значений скорости диссипации на развитие ширины зоны ТП и эволюцию кинетической энергии турбулентности по методике ВИХРЬ проведено три расчета опыта Погжи на равномерной разностной сетке, содержащей 300 точек в области с воздухом и 900 точек в области SF_6 . В этих расчетах начальная интенсивность турбулентности $I = 10\%$, а скорость диссипации варьировалась: $Q = 3$; $Q = 8$; $Q = 20$.

УВ выходит на КГ при $t \approx 46$. После распада разрыва на КГ в воздух пойдет УВ, а в SF_6 — волна разрежения. В результате взаимодействия УВ с КГ *воздух*— SF_6 скорость КГ и число Атвуда принимают значения $U_{КГ} \approx 13$; $A \approx 0,69$.

Оценим по экспериментальным данным корректность задания начальной интенсивности турбулентности и скорости диссипации в выполненных расчетах. Согласно экспериментальным данным (см. рис. 6 и цветную вкладку) на самом близком от КГ датчике ($X = 24,9$ см) интенсивность турбулентности в расчетных единицах составляет $\approx 6\%$. Экспериментальное значение интенсивности турбулентности на датчике $X = 17,45$ см в расчетных единицах составляет $\approx 3,3\%$. В предположении линейности затухания кинетической энергии турбулентности начальная интенсивность турбулентности на КГ после прохождения УВ составит $\approx 7,5\%$. В эксперименте затухание продольной кинетической энергии турбулентности после прохождения УВ через КГ выше, чем при линейном законе, поскольку описывается формулой $e_1 \approx 540 \Delta R^{-1,35} = 540 (Ut)^{-1,35}$ (ΔR — расстояние от первоначального положения КГ в см). Следовательно, выбранная начальная интенсивность турбулентности в расчетах согласуется с экспериментальной.

Результаты моделирования приведены на рис. 10, 11, из которых следует: чем сильнее затухание турбулентности на отрезке времени $46 < t < 57$, тем меньше рост зоны ТП после взаимодействия с отраженной УВ и тем меньше

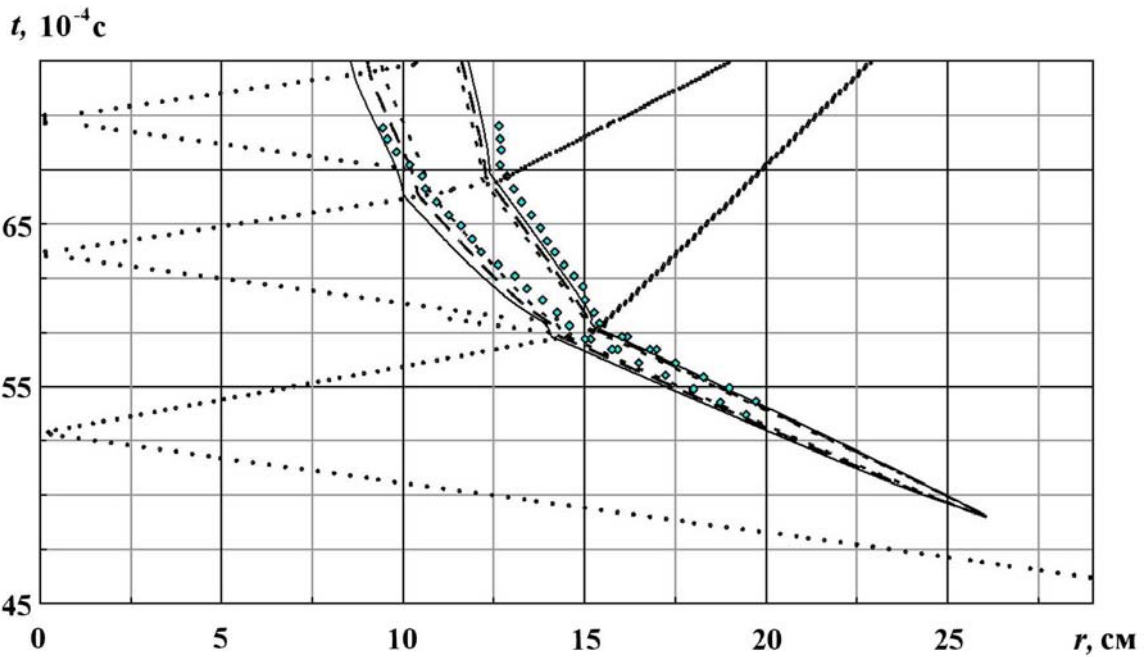


Рис. 10. (r, t) -диаграмма границ зоны ТП при различных значениях Q : - - - - $Q = 20$; - · - · - $Q = 8$; — — — $Q = 3$; \diamond — зона ТП в эксперименте; \cdots — УВ (методика ВИХРЬ)

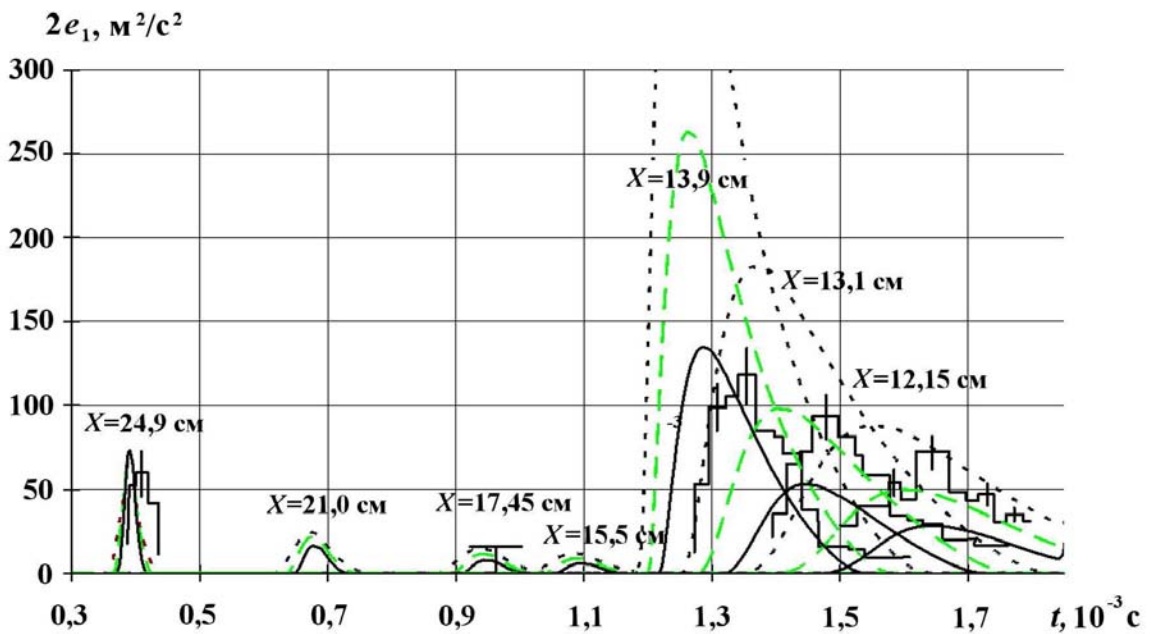


Рис. 11. Зависимость продольной кинетической энергии турбулентности от начального значения Q : - - - - $Q = 3$; - · - · - $Q = 8$; — — — $Q = 20$; — — — эксперимент

кинетическая энергия на датчиках $X = 13,9$ см; $X = 13,1$ см; $X = 12,15$ см. Отметим, что результат моделирования данной серии расчетов будет другим при измельчении разностной сетки ввиду зависимости от h градиентов средних газодинамических величин на фронте УВ. Таким обра-

зом, вопрос сходимости решения уравнений ТП при измельчении сетки имеет ключевое значение при обосновании результатов.

Рассмотрим результаты моделирования по методике АРКТУР [9] опыта Погжи с использованием нового подхода для обеспечения сходимости

сти решения. В расчетах на сходимость использовались сетки 1N, 2N, 4N, 8N, 16N (сетка 1N содержит 100 точек в воздухе и 300 точек в SF₆). В процессе счета в пяти эйлеровых датчиках накапливались значения среднего квадрата продольных пульсаций скорости $\overline{u'u'} = 200e_1$ в зависимости от времени $t - t_{SW}$, прошедшего после выхода первой УВ на границу газов ($t_{SW} \approx 4,6 \times 10^{-3}$ с). В расчетах начальная интенсивность турбулентности $I = 10\%$, что соответствует заданию $e_1 = e_2 = 0,85 \text{ см}^2/\text{мс}^2$, начальная скорость диссипации $Q = 10$, а начальное значение квадрата пульсаций плотности принималось равным $R = 0,45$.

Результаты расчетов на сходимость с использованием нового подхода для вычисления градиентов газодинамических величин на фронте УВ приведены на рис. 8, 12 (см. также цветную вкладку). Коррекция градиентов средних газодинамических величин на фронте УВ выполнялась по (2) лишь на первой УВ ($5,7 < t < 5,8$) с $\Delta = 1,2$. Отметим, что в расчетах имеется сходимость как по ширине зоны ТП, так и по пульсациям скорости.

Согласно данным рис. 12 на момент $t = 70$ расчетная и экспериментальная ширина зоны ТП значительно отличаются друг от друга. В расчетах опыта Погжи, проведенных ранее с другим методом инициализации (см., например, [10]), ширина зоны ТП ($L \approx 2,3$) несколько больше, чем приведенная на рис. 12, а пульсации скорости на датчиках заметно выше, чем в эксперименте (например, в [10] на датчике $X = 13,9 \text{ см}$ $2e_1 = 350 \text{ м}^2/\text{с}^2$). Разная ширина зоны ТП является следствием того, что в расчетах [10] интен-

сивность турбулентности после прохождения УВ через КГ задавалась выше, чем в расчетах, представленных на рис. 12. Из других особенностей расчета [10] отметим использование процедуры сглаживания градиентов средних газодинамических величин.

Результаты моделирования опыта [4], выполненные на равномерной разностной сетке (150 ячеек в воздухе и 600 ячеек в SF₆) по модели Никифорова, приведены также в [11]. В [11] наблюдается удовлетворительное согласие расчетных данных с экспериментом по ширине зоны ТП, однако расчетное усиление пульсаций скорости после взаимодействия отраженной от левого торца УВ с зоной ТП (на датчике $X = 13,9 \text{ см}$ $2e_1 = 220 \text{ м}^2/\text{с}^2$) больше, чем в эксперименте. Таким образом, в численных расчетах описать опытные данные [4] (одновременно ширину зоны ТП и поведение пульсаций продольной компоненты скорости) с хорошей точностью по модели Никифорова не удалось.

При оценке результатов численных расчетов необходимо принять во внимание две особенности постановки и проведения опыта. Перед проведением опытов [4] газы разделяются тонкой пленкой. Пленка разрывается УВ, падающей на КГ, в результате чего формируется начальная зона перемешивания. При этом механические свойства пленки могут оказывать существенное влияние на весь дальнейший процесс эволюции зоны ТП. Влияние свойств пленки на ширину зоны ТП подробно исследовалось Е. Е. Мешковым совместно с французскими экспериментаторами (результаты не опубликованы). Опыты показали, что в зависимости от свойств пленки в одних и тех же опытах конечная ширина зоны ТП может отличаться до двух раз. Кроме того, при движении рассеивающих лазерное излучение примесных частиц (скорость которых измеряется в методе доплеровской анемометрии) в быстропеременном потоке газа их скорость может отклоняться от локального значения скорости газа. Поскольку в [4] эти вопросы не изучались, данные [4], по-видимому, следует воспринимать как ориентировочные, пока не будут проведены аналогичные опыты другими экспериментаторами. Тем не менее с точки зрения тестирования методик расчета ТП данный опыт выгодно отличается от опытов, в которых извлекается лишь информация об эволюции ширины зоны ТП. Информация, полученная в эксперименте [4], позволяет протестировать как качество моделирования ширины зоны ТП, так и

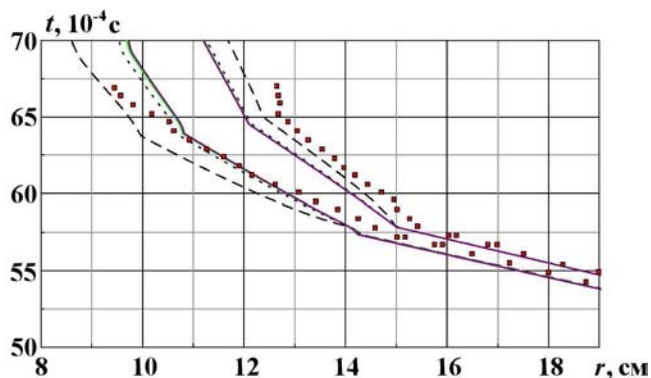


Рис. 12. Границы зоны ТП в расчетах на сходимость, $\Delta = 1,2$; $R = 0,45$; $e_1 = e_2 = 0,85$ ($I = 10\%$); $Q = 10$: — — — сетка 1N; ····· сетка 2N; — — — сетка 4N; — — — сетка 8N; ■ — зона ТП в эксперименте

энергетику турбулентности. Измеренные в опыте пульсации скорости позволяют с удовлетворительной точностью выполнить инициализацию ТП в расчете. Кроме того, опытные данные дают информацию о затухании турбулентности как после прохождения через КГ первой УВ, так и после взаимодействия отраженной от левого торца трубы УВ с зоной ТП. В то же время при моделировании опытов, где извлекается лишь информация об эволюции ширины зоны ТП, результаты численного расчета можно приблизить к экспериментальной информации путем варьирования начальной шероховатости КГ (неопределенных параметров) и выбора счетной сетки.

Используя полученную выше информацию и учитывая неопределенность в начальной шероховатости КГ в практических задачах, авторы предлагают следующую технологию проведения исследований по развитию неустойчивости и ТП на КГ слоистых систем.

Задаем начальные значения амплитуды и длины начального возмущения КГ: a_0 , k_0 . Рассчитываем эволюцию начального возмущения по теоретической модели, как это описано в [6]. Неопределенность в задании a_0 , k_0 учтем путем варьирования начальных значений кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации на этапе перехода от развития неустойчивости к ТП, т. е. при задании начальных значений $e_1 = e_2$ и Q . С этой целью выполним две серии расчетов.

Согласно опытам Погжи в первой серии расчетов (всего три расчета) можно принять $I \approx 10\%$; при этом $Q \sim 5e_1$ в первом расчете, $Q \sim 10e_1$ во втором расчете, $Q \sim 20e_1$ в третьем расчете. Меньшему значению скорости диссипации будет соответствовать большее перемешивание слоев после взаимодействия УВ, отраженной от левой границы, с зоной ТП. Затем проводится вторая серия численных экспериментов (также три расчета) с увеличенной начальной интенсивностью турбулентности: $I \approx 20\%$. Расчеты второй серии будем трактовать как моделирование, при котором шероховатость фронта УВ, падающей на КГ, в практических задачах дополнительно усиливает интенсивность турбулентности после взаимодействия УВ с КГ.

При проведении одномерных расчетов на современных вычислительных системах данный подход вполне возможен. Анализ полученных результатов покажет пределы устойчивого поведения КГ при взаимодействии с УВ. Предложен-

ный подход может уточняться по мере появления новой информации по росту зоны ТП и эволюции кинетической энергии турбулентности при взаимодействии зоны ТП с УВ (необходимо провести опыты, подобные опыту Погжи, для других пар рабочих газов). Для уточнения ширины фронта УВ при прохождении ею зоны ТП следует провести опыты, аналогичные [5].

Заключение

Построено сходящееся разностное решение уравнений ТП модели Никифорова при развитии зоны перемешивания на КГ разноплотных газов под действием УВ. Эффективность нового подхода продемонстрирована на примере моделирования опыта Погжи. При моделировании ТП в многослойных системах ключевым моментом нового подхода является поиск центра конечно-разностных УВ, находящихся в зонах ТП.

Предложена технология численного исследования возможного поведения КГ при развитии неустойчивости Рихтмайера—Мешкова.

Список литературы

1. 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.
2. Никифоров В. В. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания в неавтономных течениях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1993. Вып. 1. С. 3—13.
3. Козлов В. И. Моделирование взаимодействия ударных волн и турбулентности // 8-е Харитоновские тематические чтения. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 258—265.
4. Poggi F., Thorembey M.-H., Rodriguez G. Velocity measurements in turbulent gaseous mixtures induced by Richtmyer-Meshkov instability // Physics of Fluids. 1998. Vol. 10, No 11. P. 2698—2700.
5. Shestachenko O. E., Kucherenko Yu. A., Piskunov Yu. A. et al. Investigation of dispersion of stationary shock wave upon tur-

- bulent layer passage // IWPCTM7. St.-Petersburg, Russia, 1999. P. 118—123.
6. *Разин А. Н.* О начальной интенсивности турбулентности и росте зоны турбулентного перемешивания при неустойчивости Рихтмайера—Мешкова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 1. С. 29—43.
 7. *Андронов В. А., Козлов В. И., Никифоров В. В. и др.* Методика расчета турбулентного перемешивания в одномерных течениях (методика ВИХРЬ) // Там же. 1994. Вып. 2. С. 59—64.
 8. *Разин А. Н., Козлов В. И., Сапожников И. В.* О сходимости разностного решения уравнений турбулентного перемешивания для безударных течений // Там же. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2000. Вып. 2—3. С. 3—12.
 9. *Разин А. Н., Долголёва Г. В., Мжачих С. В. и др.* 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—133.
 10. *Козлов В. И., Сапожников И. В.* Моделирование нестационарных турбулентных течений на основе модифицированной модели Никифорова // 8-е Харитоновские тематические чтения. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 266—272.
 11. *Козлов В. И., Разин А. Н.* Поведение средних квадратов пульсаций скорости при взаимодействии зоны турбулентного перемешивания с ударными волнами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2001. Вып. 3. С. 3—8.

Статья поступила в редакцию 18.07.11.
