

УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА В ЗАДАЧЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Ю. В. Янилкин
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Работа посвящена численному моделированию развития отдельного локального возмущения в зоне турбулентного перемешивания, возникающей вследствие неустойчивости Рэлея—Тейлора при постоянном ускорении контактной границы между двумя разноплотными газами. С помощью прямого трехмерного численного моделирования по методике ЭГАК (без моделей турбулентности и вязкости) проведено численное исследование поведения полусферического возмущения на контактной границе двух сред, одна из которых много тяжелее другой. Зона турбулентного перемешивания в задаче формируется вследствие фоновых возмущений контактной границы, заданных в начальный момент времени. Получены закономерности роста отдельных возмущений контактной границы на фоне развития турбулентного перемешивания. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами соответствующих экспериментов Невмержицкого и др.

Ключевые слова: неустойчивость Рэлея—Тейлора, зона турбулентного перемешивания, локальное возмущение, прямое численное моделирование, методика ЭГАК.

Введение

Турбулентная стадия развития неустойчивости Рэлея—Тейлора (НРТ) является одним из наиболее сложных и в то же время важных гидродинамических процессов. Исследованию данного процесса посвящено множество теоретических и экспериментальных работ. Эта задача рассматривалась и численно (см., например, [1—8]).

Теоретически рассматриваемое течение выходит на автомодельный режим. Для автомодельности требуется, чтобы в течении реализовалось развитое турбулентное перемешивание, т. е. чтобы в нем присутствовали представительный спектр вихрей и полномасштабный инерционный интервал.

В течение многих лет исследователи обсуждают проблему определения значения константы α_b для линейного (относительно пройденного контактной границей (КГ) пути) закона роста "пузырей" на автомодельной стадии. У разных авторов оно разное (разброс данных составляет

0,015—0,075), при этом больше всего отличаются друг от друга расчетные и экспериментальные данные.

Вторая проблема связана с вопросами, когда происходит выход течения на автомодельную стадию и какова скорость роста ширины зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) до выхода на нее. Анализ экспериментальных данных в [9] и численных расчетов в работах [7, 8] показывает, что на начальном участке течения число Рейнольдса (в численных расчетах схемное число Рейнольдса, определяемое схемной вязкостью) недостаточно велико и автомодельность отсутствует. Поэтому константа α_b может быть корректно определена лишь при достижении достаточно большого числа Рейнольдса. Формально α_b , определяемая по наклону кривой $\sqrt{L}(t)$, на начальном участке больше, чем на автомодельном, и уменьшается со временем. Некоторые авторы включают начальный участок течения в зону автомодельности, при этом получая не совсем корректные данные по константе автомодельно-

сти [9]. Другие авторы считают, что начальные данные помнятся так долго, что теоретический автомоделный участок течения вообще не наступает или наступает с другими значениями константы α_b [2, 10]. В этих работах численно получено, что α_b зависит от начального спектра возмущений КГ. Отметим также работу [11], в которой отрицается зависимость автомоделной константы от начального спектра возмущений и получено очень хорошее согласие с известными экспериментальными данными. В целом в настоящее время все же превалирует мнение, что константа автомоделности в значительной степени зависит от спектра начальных возмущений.

В связи с наличием зависимости скорости роста ЗТП от начального спектра возмущений (даже если лишь на начальной стадии) интерес представляет также задача о влиянии на закономерности роста ЗТП локальных возмущений (ЛВ) КГ. Эта задача рассматривалась экспериментально и расчетно-теоретически в работах [12–16]. Представляет интерес также задача об обратном влиянии турбулентности на развитие ЛВ. В работе [14] проведены экспериментальные исследования указанной задачи на ранних этапах развития процесса.

Известно, что рост ЛВ на границе сильно разнородных веществ (число Атвуда $A \sim 1$) в условиях неустойчивости Рэлея–Тейлора при постоянном ускорении g происходит по автомоделному закону [12]. При этом форма возмущения остается подобной, а размер возмущения пропорционален gt^2 . Согласно С. Ф. Гаранину [12] глубина проникновения легкого вещества в тяжелое в двумерном (2D) случае происходит по закону $R_l \cong \beta \left(\frac{\rho_h - \rho_l}{\rho_h + \rho_l} \right) \frac{gt^2}{2}$, где $\beta \cong 0,27$ — константа, определяющая рост вершины "2D канавки". Константа роста, полученная в численных расчетах Гараниным, несколько отличается от аналитических значений и составляет $\beta \cong 0,44$.

Согласно этим результатам при условии, что ЗТП состоит из множества независимых 2D ЛВ, скорость ее роста должна быть около 0,3, но этого не наблюдается в экспериментах. Причина — взаимодействие пузырей внутри ЗТП, которое уменьшает скорость роста ЛВ. В этом случае (при взаимодействии) ЛВ поглощаются турбулентной зоной, они фактически и формируют ЗТП.

Интерес представляет вопрос о влиянии ЗТП на рост ЛВ. Если подобное влияние имеется, то

ситуация значительно усложняется. Рассмотрению данной задачи посвящено небольшое количество публикаций. Первые экспериментальные и расчетные исследования были проведены в работе [13]. Более представительные экспериментальные исследования проведены в работе [14], в которой данное течение было исследовано на ранней стадии развития ЛВ, что позволило сделать вывод о значительном влиянии ЗТП на развитие ЛВ. В работе [15] экспериментальное исследование было продолжено на существенно более длительные времена, что позволило выявить закономерности развития ЛВ по отношению к ЗТП на поздних стадиях их развития. Расчетно-теоретическое исследование задачи на ранних этапах, т. е. повторение работы [14], было проведено в работе [16], и в этой работе были подтверждены основные выводы экспериментального исследования. Из сказанного следует, что в случае наличия лишь одного ЛВ, отличающегося от множества начальных фоновых возмущений, формирующих турбулентную зону, возможны следующие варианты:

1. ЛВ независимо от начальной амплитуды постепенно поглощается турбулентной зоной.
2. В зависимости от соотношения амплитуд ЛВ и фоновых возмущений реализуются режимы с различными значениями β , которые в частном случае (при $\beta = \text{const}$) могут быть автомоделными.

Основной результат, полученный в экспериментах [15], — то, что ЗТП не поглощает ЛВ, а снижает постоянную его автомоделного роста в зависимости от начальных условий. При этом на поздних стадиях процесса скорости роста ЛВ приближаются к скорости роста ЗТП. В 2D расчетах работы [16] вывод о том, что ЗТП не поглощает ЛВ, а лишь снижает скорость его роста, нашел полное подтверждение. Однако этот вывод был сделан при двух допущениях: во-первых, исследование носило 2D характер; во-вторых, рассматривался лишь начальный этап развития ЛВ.

Данная работа является попыткой численного исследования взаимодействия ЛВ с ЗТП на достаточно поздних этапах развития процесса, позволяющего выявить закономерности развития ЛВ по отношению к ЗТП на этих стадиях, т. е. задачи, экспериментально исследованной в работе [15]. Численные исследования проводились по методике ЭГАК [17] (без моделей турбулентности и без учета молекулярной вязкости) в 2D и трехмерной (3D) постановках. Однако,

справедливости ради, необходимо отметить, что для поздней стадии развития процесса проведение расчетов в 2D геометрии не имеет особого смысла по той причине, что на поздних стадиях 2D возмущения не сохраняют свою форму из-за развития турбулентного перемешивания на границе такого ЛВ.

Автор благодарен Г. С. Фирсовой (безвременно ушедшей), которая выполнила большинство из приведенных в данной работе расчетов по методике ЭГАК.

Постановка задач и расчетов

По постановке задачи близки к тем, что были исследованы в работе [15]. На рис. 1, *a* представлена начальная геометрия 2D задачи, а на рис. 1, *б* — 3D задачи.

В области $30 \text{ см} < x < 60 \text{ см}$ задано вещество с плотностью $\rho_t = 1,0 \text{ г/см}^3$, а в области $x \leq 30 \text{ см}$ задано вещество с плотностью $\rho_l = 0,01 \text{ г/см}^3$; $-36 \text{ см} \leq y \leq 36 \text{ см}$, $-36 \text{ см} \leq z \leq 36 \text{ см}$. Число Атвуда $A \approx 1$. В 2D случае третье направление отсутствует.

Сетка квадратная (2D) или кубическая (3D). Размер ячейки в интересующей области $h = 0,5 \text{ мм}$. Общее число счетных ячеек в 3D задаче $1440 \times 1440 \times 1200 \approx 2,5 \cdot 10^9$. ЗТП формировалась от начальной возмущенной зоны на КГ. Начальные фоновые возмущения для инициирования турбулентного перемешивания задавались заменой $\sim 30\%$ пограничных ячеек тяжелой области на легкое вещество. Распределение задавалось с использованием датчика случайных чисел. Таким образом, начальная ширина ЗТП составляла $R_{turb0} = 0,5 \text{ мм}$ (рис. 2).

К случайным начальным возмущениям добавлялось ЛВ в виде круглой цилиндрической канавки радиусом R_{l0} в центре линии КГ в 2D случае и полусферы радиусом R_{l0} в центре плоскости

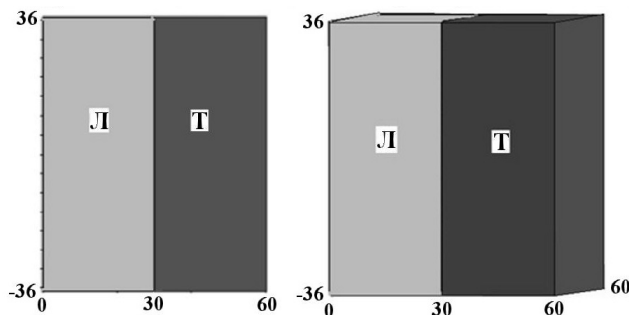


Рис. 1. Начальная геометрия задач: *a* — 2D; *б* — 3D

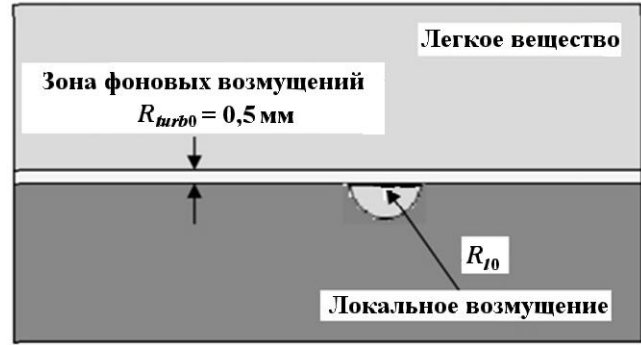


Рис. 2. Начальные возмущения на КГ

КГ в 3D случае (см. рис. 2). Эта выемка делалась в тяжелом веществе и заполнялась легким веществом. Радиусы возмущения $R_{l0} = 2,5; 3,5; 4; 5 \text{ мм}$.

Введем в рассмотрение удобную для дальнейшего использования относительную амплитуду ЛВ $\tilde{R}_{l0} = R_{l0}/R_{turb0}$.

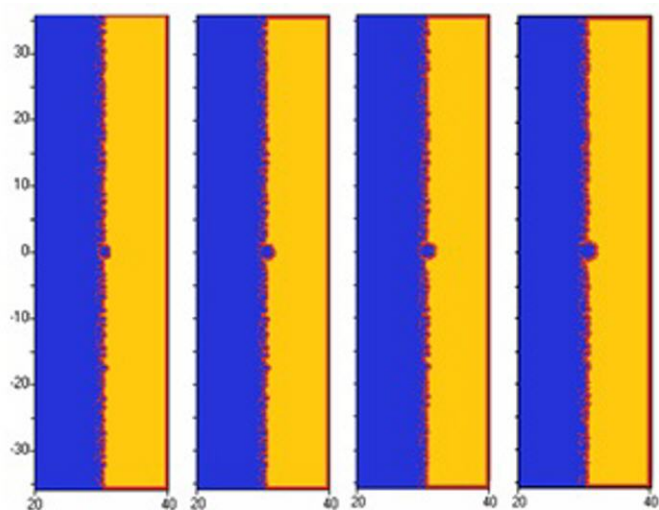
Результаты 2D расчетов

На рис. 3, 4 показаны конфигурации системы на различные моменты времени (вместо времени указан пройденный путь $S = gt^2/2$) в расчетах с $R_{l0} = 2,5 \text{ мм}$ ($\tilde{R}_{l0} = 5$), $R_{l0} = 3,5 \text{ мм}$ ($\tilde{R}_{l0} = 7$), $R_{l0} = 4 \text{ мм}$ ($\tilde{R}_{l0} = 8$) и $R_{l0} = 5 \text{ мм}$ ($\tilde{R}_{l0} = 10$).

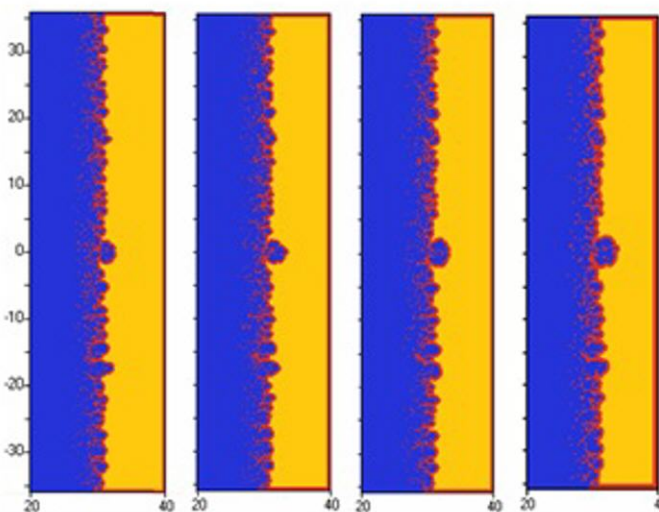
На рис. 5 приводятся зависимости глубины проникания пузырей легкого газа в тяжелый $L(S)$ и амплитуды ЛВ $R(S)$.

Прежде всего отметим, что скорость роста глубины проникания $L(S)$ легкого вещества в тяжелое в ЗТП в зависимости от пройденного пути после некоторого переходного этапа ($S \leq 30 \text{ мм}$) выходит на постоянное значение, что является необходимым условием автомодельного режима течения. Граница фронта проникания определяется по уровню объемной доли легкого газа 0,09. Значение скорости $\alpha_b \approx 0,1$ на этом участке такое же, как в задаче без ЛВ (данный расчет здесь не приводится). Это естественно, так как ЗТП определяется по ячейкам вне области, занятой ЛВ.

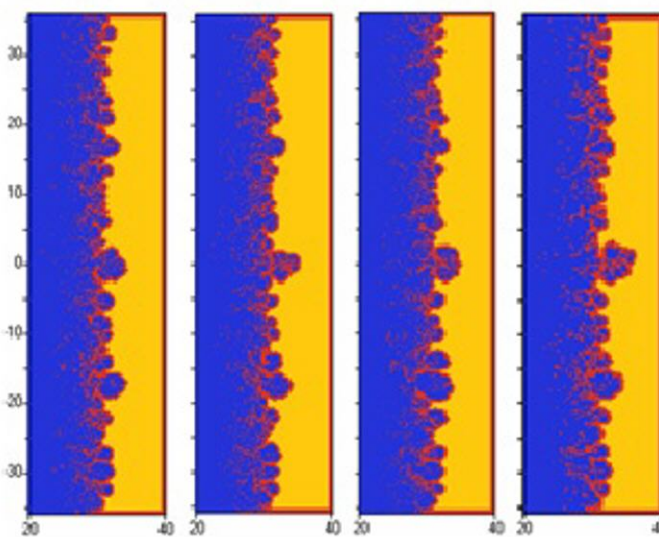
Как показано в работе [5], скорость роста пузыря с начальным радиусом 5 мм на начальном участке зависимости $R(S)$ составляет $\beta = \frac{dR}{dS} \approx 0,3$, что близко к константе роста, полученной Гараниным. Отметим, что в работе [5] исследо-



a

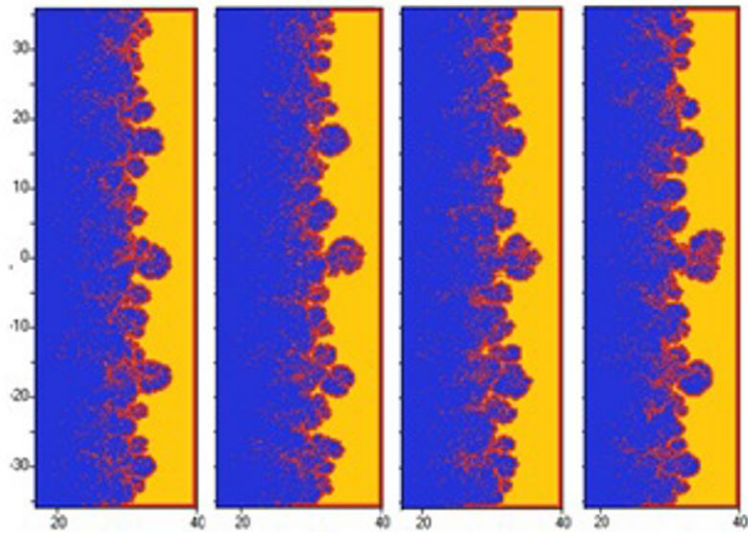


б

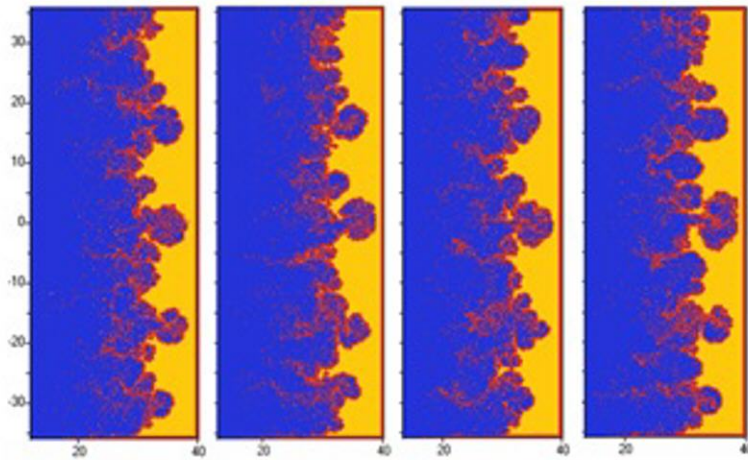


в

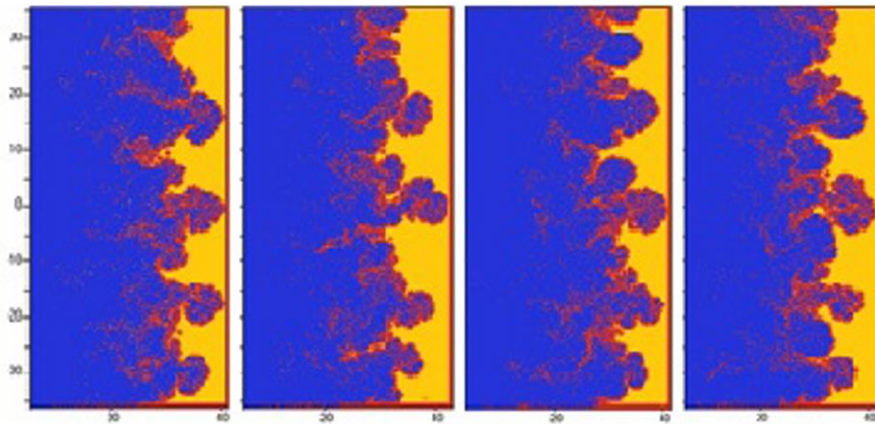
Рис. 3. Развитие 2D ЛВ и ЗПТ: *a* — $S = 2$ мм; *б* — $S = 8$ мм; *в* — $S = 18$ мм; слева направо — $\tilde{R}_{l0} = 5$; $\tilde{R}_{l0} = 7$; $\tilde{R}_{l0} = 8$; $\tilde{R}_{l0} = 10$



a

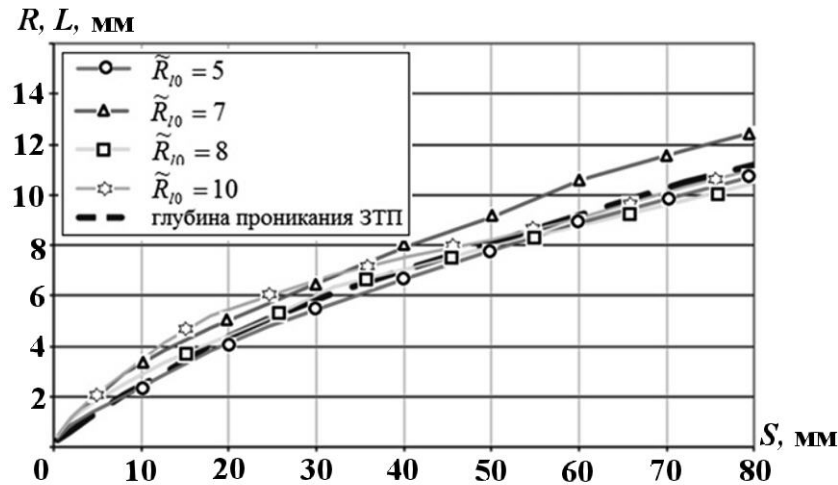


б



в

Рис. 4. Развитие 2D ЛВ и ЗТП: *a* — $S = 32$ мм; *б* — $S = 50$ мм; *в* — $S = 72$ мм; слева направо — $\tilde{R}_{l0} = 5$; $\tilde{R}_{l0} = 7$; $\tilde{R}_{l0} = 8$; $\tilde{R}_{l0} = 10$

Рис. 5. Зависимости от S амплитуды и глубины проникания легкого вещества в тяжелое

вания проведены на моменты времени, когда пройденный путь составляет около $S = 10$ мм. Таким образом, на начальной стадии процесса ЗТП не оказывает заметного влияния на скорость роста ЛВ (в свою очередь, ЛВ, естественно, не оказывает никакого влияния на рост ЗТП)*. Однако ситуация меняется с течением времени, а именно, при $S \sim 20$ мм скорость роста ЛВ начинает уменьшаться, и при $S \sim 50$ мм ЛВ поглощается ЗТП (см. рис. 4).

В остальных расчетах работы [5] скорость роста амплитуды ЛВ на начальном этапе постепенно уменьшается с уменьшением его начального радиуса, однако она заметно больше скорости проникания легкого вещества в тяжелое. С течением времени (при $S \sim 15 \div 25$ мм) скорость начинает уменьшаться и ЛВ поглощается ЗТП.

Исключение составляет поведение ЛВ с амплитудой $\tilde{R}_{l0} = 7$: оно продолжает расти с большей скоростью, нежели ЗТП, до $S \sim 60$ мм, и только после этого его скорость становится близкой к скорости роста ЗТП. Напрашивается вывод, что в этом расчете начальные фоновые возмущения таковы, что с течением времени они слились с ЛВ. В результате скорость роста возникшего более крупного пузыря оказывается выше скорости основных пузырей, создающих ЗТП.

Таким образом, численные исследования подтвердили результаты, полученные Гараниным. Однако автоматический режим, полученный Гараниным с $\beta = 0,3$, в расчетах реализуется

лишь на начальном этапе, причем только тогда, когда начальная амплитуда R_{l0} намного больше начальной амплитуды фоновых возмущений R_{turb0} , формирующих ЗТП. В случае, когда в начальный момент времени присутствуют ЛВ и возмущения, определяющие в дальнейшем ЗТП, реализуется множество автомодельных решений, в которых β является функцией отношения \tilde{R}_{l0} и $\alpha_b < \beta < 0,3$.

На поздней стадии ЛВ поглощается ЗТП или растет с такой же скоростью, что и ЗТП, однако время наступления этой стадии зависит как от начального ЛВ, так и от спектра фоновых возмущений на КГ, которые сложным образом взаимодействуют с ЛВ. Отметим еще раз, что эти результаты получены для 2D возмущений по 2D методике. Экспериментально такие течения не реализуются, так как любое 2D возмущение с течением времени покрывается 3D возмущениями и развитие как фоновых возмущений, так и ЛВ происходит 3D образом.

Результаты 3D расчетов

На рис. 6, 7 показаны конфигурации системы на несколько моментов времени в расчетах с $\tilde{R}_{l0} = 10$, $\tilde{R}_{l0} = 8$, $\tilde{R}_{l0} = 6$, $\tilde{R}_{l0} = 5$. Видно, как со временем в ЗТП происходит объединение вихрей и увеличение их размеров. Аналогично увеличиваются и размеры ЛВ, однако при меньших размерах скорость роста уменьшается.

* В настоящей работе начальная стадия процесса не исследовалась.

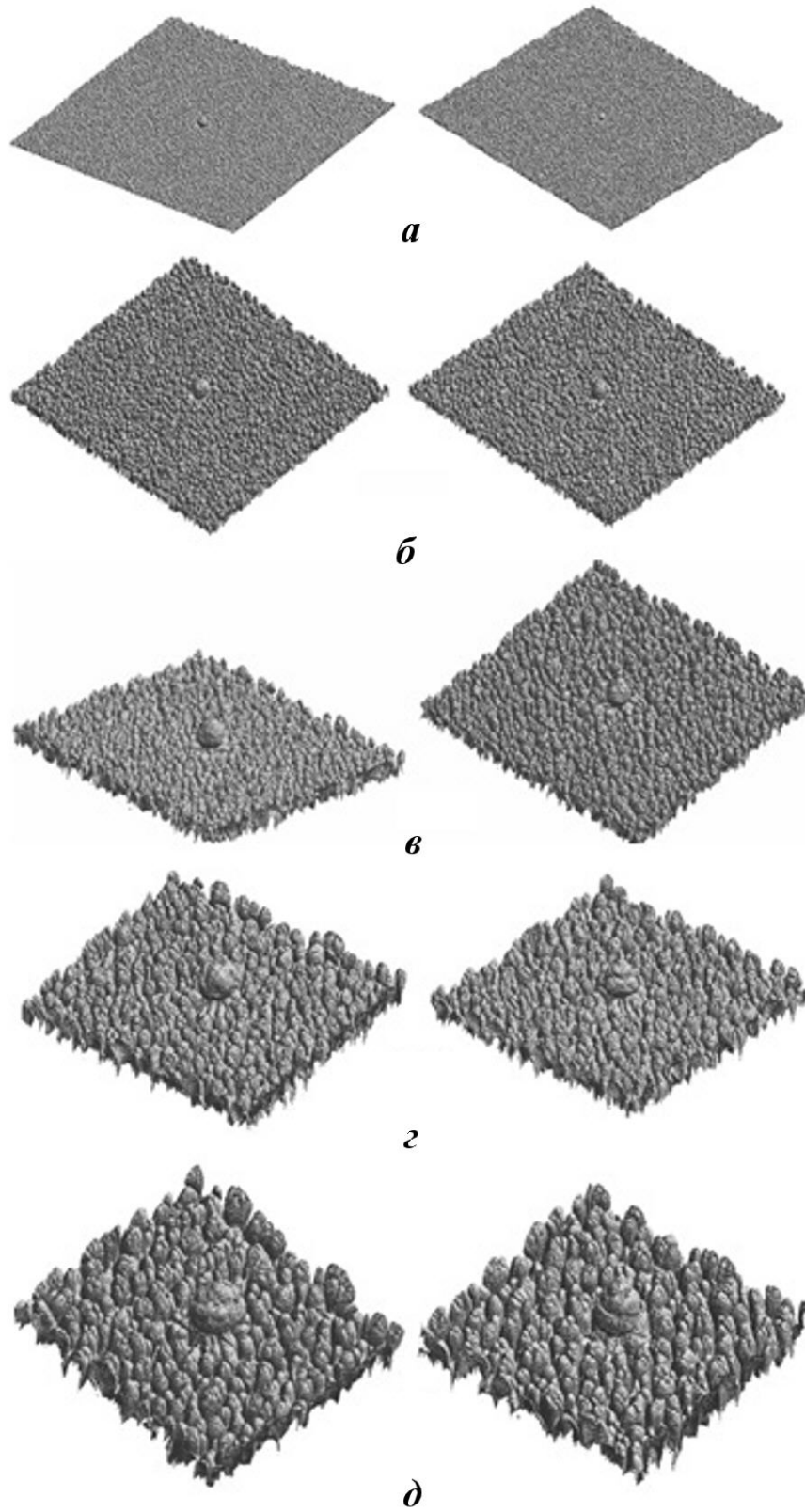


Рис. 6. Картины ЛВ и ЗТП на различные моменты времени при $\tilde{R}_{l0} = 10$ (слева) и $\tilde{R}_{l0} = 8$ (справа): *a* — $S = 2$ мм; *б* — $S = 8$ мм; *в* — $S = 18$ мм; *г* — $S = 32$ мм; *д* — $S = 50$ мм

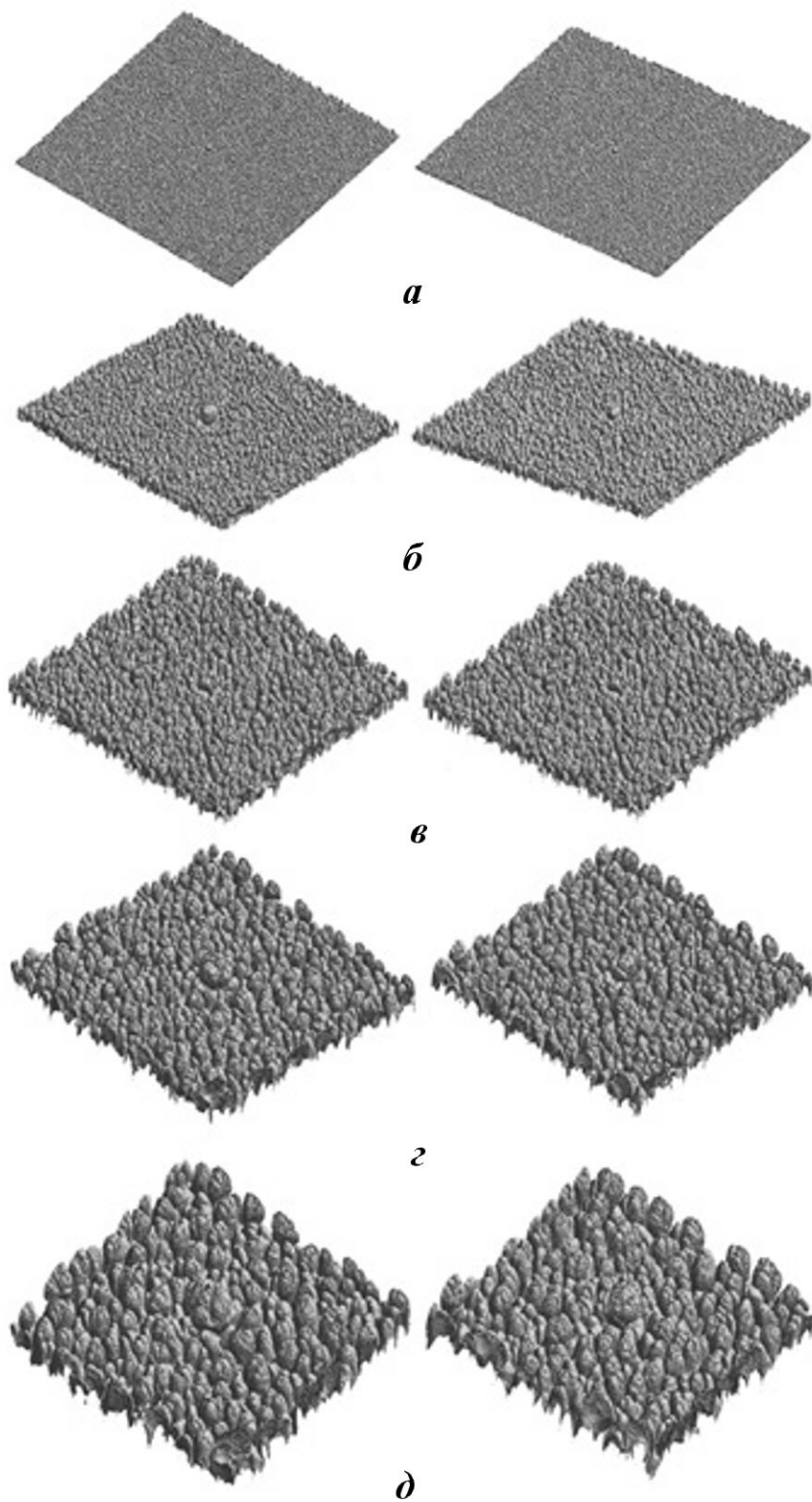


Рис. 7. Картины ЛВ и ЗТП на различные моменты времени при $\tilde{R}_{l0} = 6$ (слева) и $\tilde{R}_{l0} = 5$ (справа): *а* — $S = 2$ мм; *б* — $S = 8$ мм; *в* — $S = 18$ мм; *г* — $S = 32$ мм; *д* — $S = 50$ мм

На рис. 8, 9 показано развитие ЛВ на различные моменты времени в проекции $y = \text{const}$, проходящей через начальный центр ЛВ. Эти рисунки наглядно демонстрируют отмеченные выше закономерности.

Из рис. 6–9 видно, что ЛВ растет сначала в виде полусферической выемки, увеличиваясь в ширину и высоту, а со временем принимает различную форму в зависимости от своих начальных размеров.

Интегральные данные по расчетам приводятся на рис. 10 в виде зависимостей $R(S)$ амплитуды ЛВ от пройденного пути. Как и в 2D задаче, скорость роста глубины проникания $L(S)$ легкого вещества в тяжелое в ЗТП в зависимости от пройденного пути после некоторого переходного этапа ($S \leq 30$ мм) выходит на постоянное значение $\alpha_b \approx 0,11$, что является необходимым условием автомоделного режима течения.

Как показано в работе [5], в расчетах скорость роста пузыря с начальным радиусом 5 мм на начальном участке зависимости $R(S)$ составляет $\beta = \frac{dR}{dS} \approx 0,6$. На этой стадии процесса ЗТП не оказывает заметного влияния на скорость роста 3D ЛВ (в свою очередь, ЛВ, естественно, не оказывает никакого влияния на рост ЗТП). Однако ситуация меняется с течением времени: уже при $S \sim 5 \div 10$ мм скорость роста ЛВ начинает уменьшаться и при $S \sim 25 \div 30$ мм принимает значение $\beta \approx 0,35$, которое не меняется до окончания расчета (см. рис. 10).

В остальных расчетах работы [5] скорость роста амплитуды ЛВ на начальном этапе постепенно уменьшается с уменьшением его начального радиуса, однако она существенно больше скорости проникания легкого вещества в тяжелое в ЗТП. С течением времени уже при $S \sim 5 \div 10$ мм скорость роста ЛВ начинает уменьшаться и при $S \sim 25 \div 30$ мм принимает значение, которое не меняется до окончания расчета (см. рис. 10). При этом значение этой постоянной скорости коррелирует с начальным размером ЛВ.

Обсуждение результатов и выводы

Как в 2D, так и 3D задачах скорость роста α_b глубины проникания $L(S)$ легкого вещества в тяжелое в ЗТП в зависимости от пройденного пути после некоторого переходного этапа выходит на постоянное значение, что является необходимым условием автомоделного режима течения. В 2D задаче $\alpha_b \approx 0,1$, в 3D задаче $\alpha_b \approx 0,11$. Бли-

зость этих значений свидетельствует о том, что основные закономерности турбулентности в ЗТП корректно моделируются и в 2D приближении.

Качественно поведение ЛВ похоже в 3D и 2D случаях. На начальном этапе процесса ЛВ растут с существенно большими скоростями по сравнению с ростом ЗТП. Затем скорость начинает уменьшаться, и начиная с какого-то момента времени рост ЛВ продолжается с некоторой постоянной скоростью, причем время выхода на этот режим не сильно зависит от начального размера ЛВ. Принципиальная разница в поведении ЛВ заключается в том, что в 2D случае эта скорость совпадает со скоростью ЗТП, и это означает, что ЗТП поглощает ЛВ, а в 3D случае — заметно превышает, поглощения не происходит. Конечно, этот вывод справедлив для моментов времени, достигнутых в проведенных расчетах. Дальнейшее поведение ЛВ необходимо исследовать в существенно больших геометриях, что требует огромных машинных ресурсов.

В заключение рассмотрим результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными [14, 15]. Прежде всего отметим, что в серии экспериментов [14] для инициализации турбулентности задавалось фоновое возмущение КГ с амплитудой около 0,25 мм, т. е. оно имело размеры одной счетной ячейки в расчетах. Таким образом, фоновые возмущения КГ в экспериментах и расчетах имели один и тот же размер. Однако в этой серии экспериментов, во-первых, радиусы ЛВ менялись в пределах 0,5–3 мм и, во-вторых, данные получены только для начального этапа процесса. В рассматриваемой же здесь серии экспериментов [15] начальные возмущения не задавались, возмущения получались естественным путем от имеющихся неоднородностей на УВ или по каким-то другим причинам. Поэтому при сравнении результатов надо иметь в виду, что с точки зрения начальных данных расчеты и эксперименты отличаются. Наличие достаточно больших с точки зрения ЛВ фоновых возмущений приводит к более сильному взаимодействию их с ЛВ и соответственно уменьшению скорости роста ЛВ.

На рис. 11 приводятся расчетные зависимости скорости роста на начальном линейном участке (до $S \sim 10$ мм) от соотношения амплитуд ЛВ и фоновых возмущений (рисунок воспроизводится по работе [14]). На этом же рисунке приводятся экспериментальные данные. Видно достаточно хорошее согласие расчетов и экспериментов между собой.

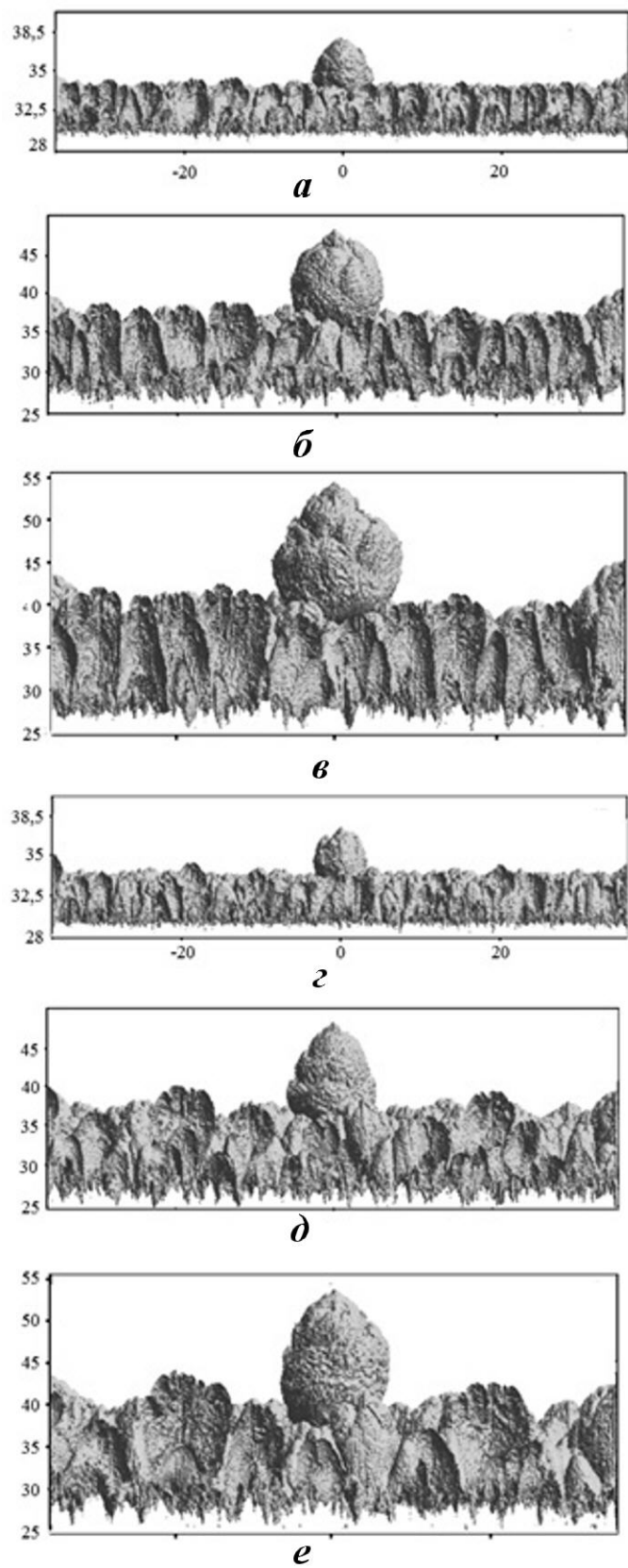


Рис. 8. Развитие ЛВ с $\tilde{R}_{l0} = 10$ (а-в) и $\tilde{R}_{l0} = 8$ (г-е): а — $S = 18$ мм; б — $S = 40,5$ мм; в — $S = 60,5$ мм; г — $S = 18$ мм; д — $S = 40,5$ мм; е — $S = 60,5$ мм

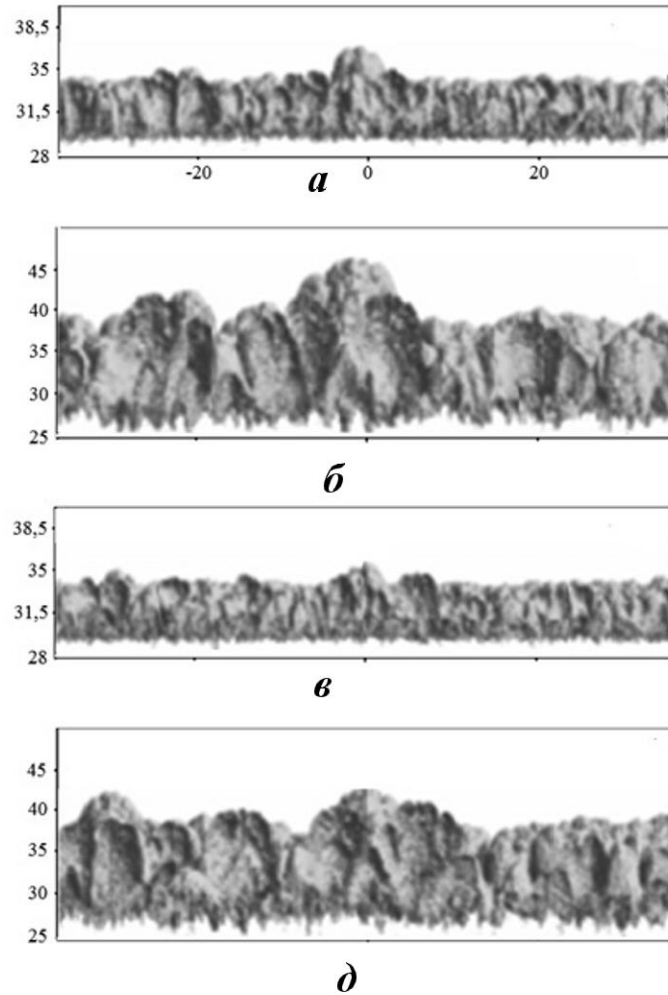


Рис. 9. Развитие ЛВ с $\tilde{R}_{l0} = 6$ (*a*, *б*) и $\tilde{R}_{l0} = 5$ (*в*, *г*): *a* — $S = 18$ мм; *б* — $S = 40,5$ мм; *в* — $S = 18$ мм; *г* — $S = 40,5$ мм

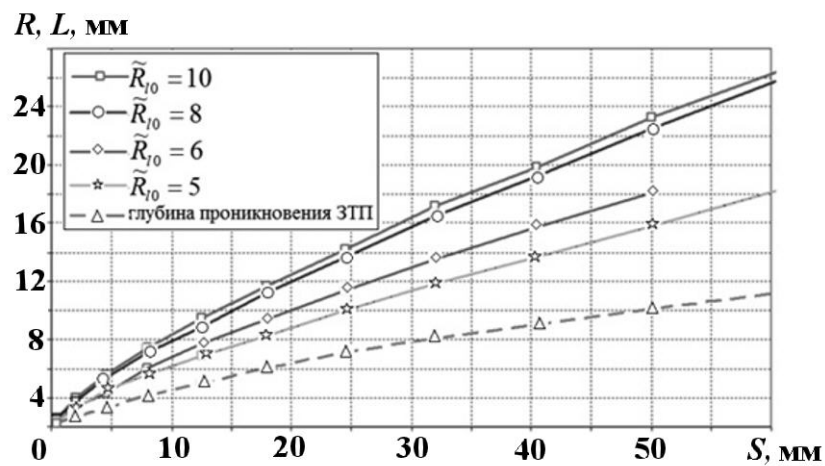


Рис. 10. Расчетные зависимости амплитуды ЛВ и глубины проникания легкого вещества в тяжелое в ЗПТ

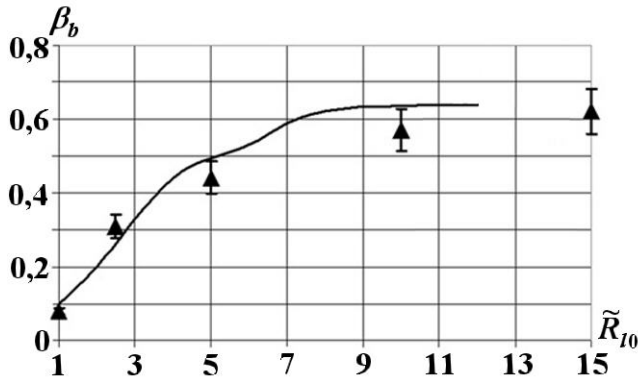


Рис. 11. Зависимости скорости роста амплитуды ЛВ от \tilde{R}_{10} на начальной стадии: — — расчет; \blacktriangle — эксперимент

На рис. 12 приведены экспериментальные зависимости из работы [15] амплитуды ЛВ от удвоенного пройденного расстояния. Там же приводятся зависимости глубины проникания легкого вещества в тяжелое в ЗТП.

На рис. 13 приводятся значения скоростей роста ЛВ на втором этапе процесса: от $S = 10$ мм до $S = 80$ мм (по рис. 12). Согласие можно считать удовлетворительным, если иметь в виду, что экспериментальные данные снимались по трем точкам рис. 12, точность определения которых невысока. На рис. 13 приведены также погрешности, полученные по крайним точкам

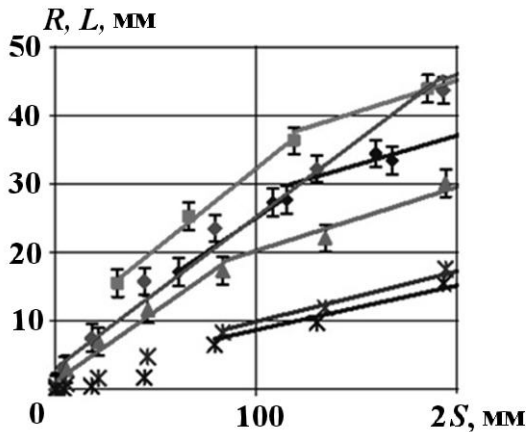


Рис. 12. Развитие амплитуды ЛВ и глубины проникания легкого вещества в тяжелое в ЗТП (эксперименты [15], фрагмент): \blacklozenge — $R_{10} = 3$ мм; \blacksquare — $R_{10} = 6$ мм; \circ — $R_{10} = 6$ мм; \blacktriangle — $R_{10} = 2$ мм; \ast — глубина проникания ЗТП (результаты двух экспериментов); \bar{I} — погрешность

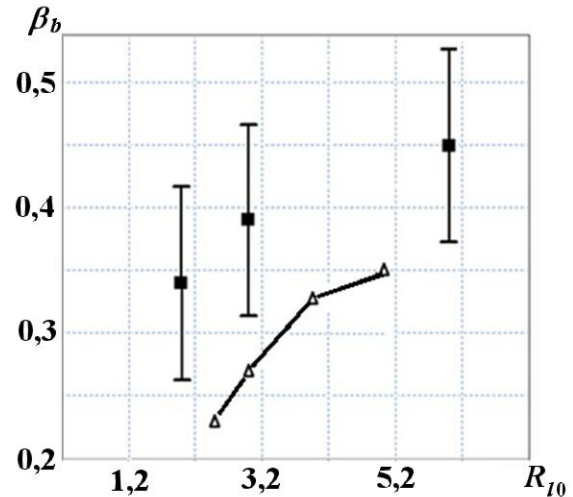


Рис. 13. Зависимости скорости роста амплитуды ЛВ от R_{10} на второй стадии процесса: \blacktriangle — расчет; \blacksquare — эксперимент; \bar{I} — погрешность

указанных экспериментальных погрешностей на рис. 12 (данные снимались с оригинального рисунка из [5]). Отметим, что скорость роста глубины проникания легкого вещества в тяжелое в ЗТП согласуется с рис. 11 и составляет $\sim 0,11$.

Заключение

В работе с использованием методики ЭГАК проведено численное моделирование развития ЛВ на КГ двух сред с числом Атвуда $A \sim 1$ на фоне развития ЗТП, возникающей при ускорении КГ в поле тяжести. Проведены 2D и 3D расчеты задачи, когда в начальный момент времени на КГ присутствуют как ЛВ, так и фоновые возмущения, определяющие в дальнейшем развитие ЗТП.

На начальном (первом) этапе развития процесса рост амплитуды ЛВ происходит по тому же квадратичному (относительно пройденного пути) закону, что и для ЗТП. Однако константа автомодельности меняется в зависимости от соотношения амплитуд ЛВ и фоновых возмущений. Это означает, что реализуется множество автомодельных решений для роста амплитуды ЛВ. Скорость роста в 2D случае меняется от 0,3 до 0,1, в 3D — от 0,6 до 0,1. Этот результат был получен ранее как экспериментально [14], так и численно [16]. В настоящей работе рассмотрены существенно более поздние времена. На втором этапе скорость роста ЛВ замедляется и выходит на другое постоянное значение (в зависимости от

пройденного пути), которое до значений 5–6 мм коррелирует с начальной амплитудой ЛВ, однако при амплитудах около 6 мм перестает зависеть от нее. На третьем этапе в 2D случае скорость роста ЛВ становится близкой к скорости роста ЗТП и ЗТП поглощает ЛВ или ЛВ движется с такой же скоростью, становясь частью зоны. В 3D случае ЛВ растет с большей скоростью по сравнению со скоростью роста ЗТП на обоих этапах, но все же на первом этапе превышение скорости роста значительно больше. Вопрос о том, происходит ли слияние ЛВ и ЗТП, остался открытым как в экспериментальных, так и численных работах. Во всяком случае в рассмотренные промежутки времени такое слияние не наблюдается.

Время перехода с первого этапа на второй в расчетах определяется как отношением амплитуд ЛВ к фоновым возмущениям, так и спектром фоновых возмущений.

В расчетах не рассматривались режимы течения, возникающие при взаимодействии ЛВ друг с другом, что в конце концов должно приводить к автомодельному режиму развития ЗТП с $\alpha_b \approx 0,11$. Это должно произойти, когда ширина ЗТП во много раз превысит размер максимальных начальных возмущений и расстояний между этими ЛВ.

Таким образом, показано, что если при развитии турбулентного перемешивания на КГ имеются ЛВ, то они в значительной степени могут исказить скорость роста ширины ЗТП в сторону увеличения. На начальной стадии процесса масштабы увеличения скорости коррелируют как с размерами ЛВ, так и с их формой (2D или 3D). Однако на более поздних стадиях их поведение неконтролируемо и зависит от размеров ЛВ и продолжительности развития процесса. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при экспериментальных измерениях ширины ЗТП.

Список литературы

1. *Анучина Н. Н., Кучеренко Ю. А., Неуважев В. Е. и др.* Турбулентное перемешивание на ускоряющейся границе разноплотных жидкостей // МЖГ. 1978. № 6. С. 157–160. *Anuchina N. N., Kucherenko Yu. A., Neuvazhaev V. E. i dr.* Turbulentnoe peremeshivanie na uskoryayushcheysya granitse raznoplottykh zhidkostey // MZhG. 1978. N 6. S. 157–160.

2. *Youngs D. L.* 3D numerical simulation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability // Phys. Fluids. 1991. Vol. A3(5). P. 1312–1319.
3. *Dimonte G., Youngs D. L., Dimits A. et al.* A comparative study of the turbulent Rayleigh–Taylor instability using high-resolution three-dimensional numerical simulations: The Alpha-Group collaboration // Ibid. 2004. Vol. 16, No 5. P. 1668–1693.
4. *Stadnik A. A., Statsenko V. P., Yanilkin Yu. V., Zhmailo V. A.* Direct numerical simulation of gravitational turbulent mixing // 5rd Int. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. Stony Brook, USA, 1995.
5. *Жмайло В. А., Стадник А. Л., Стаценко В. П., Янилкин Ю. В.* Прямое численное моделирование гравитационного турбулентного перемешивания // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1996. Вып. 1–2. С. 29–37. *Zhmaylo V. A., Stadnik A. L., Statsenko V. P., Yanilkin Yu. V.* Pryamoe chislennoe modelirovanie gravitatsionnogo turbulentnogo peremeshivaniya // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Teoreticheskaya i prikladnaya fizika. 1996. Vyp. 1–2. S. 29–37.
6. *Sin'kova O. G., Stadnik A. L., Statsenko V. P., Yanilkin Yu. V., Zhmailo V. A.* Three-dimensional direct numerical simulation of gravitational turbulent mixing // Proc. 6th Int. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. Marseille, France, 1997. P. 470–479.
7. *Yanilkin Yu. V., Statsenko V. P., Rebrov S. V., Sinkova O. G., Stadnik A. L.* Study of gravitational turbulent mixing at large density differences using direct 3D numerical simulation // 8th Int. Seminar on Turbulent Mixing of Compressible Matter (8th IWPCTM). Pasadena, USA, 2001.
8. *Янилкин Ю. В., Стаценко В. П., Ребров С. В., Синькова О. Г., Стадник А. Л.* Исследование гравитационного турбулентного перемешивания при больших разноплотностях с помощью прямого трехмерного численного моделирования // Вопросы атомной науки и техники. Сер.

- Математическое моделирование физических процессов. 2002. Вып. 2. С. 3—9.
Yanilkin Yu. V., Statsenko V. P., Rebrov S. V., Sinkova O. G., Stadnik A. L. Issledovanie gravitatsionnogo turbulentnogo peremeshivaniya pri bolshikh raznoplnotnyakh s pomoshchyu pryamogo trekhmernogo chislennogo modelirovaniya // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov.* 2002. Vyp. 2. S. 3—9.
9. *Кучеренко Ю. А., Шестаченко О. Е., Пискунов Ю. А., Свиридов Е. В., Медведев В. Н., Байшев А. И.* Экспериментальные исследования автомодельного режима перемешивания разноплотных газов в поле тяжести Земли // *Тез. докл. Межд. конф. "Забабахинские науч. чтения".* Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2001. С. 108.
Kucherenko Yu. A., Shestachenko O. E., Piskunov Yu. A., Sviridov E. V., Medvedev V. N., Bayshev A. I. Eksperimentalnye issledovaniya avtomodelnogo rezhima peremeshivaniya raznoplnotnykh gazov v pole tyazhesti Zemli // *Tez. dokl. Mezhd. konf. "Zababakhinskie nauch. chteniya".* Snezhinsk: RFYaTs-VNIITF, 2001. S. 108.
10. *Kuchugov P., Zmitrenko N., Rozanov V., Yanilkin Yu.* The evolution model of Rayleigh—Taylor instability development // *J. of Russian Laser Research.* 2012. Vol. 33, No 6. P. 517—530.
11. *Glimm J., Sharp D. H., Kaman T., Lim H.* New directions for Rayleigh-Taylor mixing // *Philosophical Transactions of the Royal Society A.* 2013. Vol. 371, No 2003. P. 20120183.
12. *Гаранин С. Ф.* Автомодельное развитие неустойчивости Рэлея—Тейлора в районе угловых точек // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика.* 1994/95. Вып. 3/1. С. 12—17.
Garanin S. F. Avtomodelnoe razvitie neustoychivosti Releya—Teylora v rayone uglovykh tochek // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Teoreticheskaya i prikladnaya fizika.* 1994/95. Vyp. 3/1. S. 12—17.
13. *Волченко О. И., Жидов И. Г., Невмержицкий Н. В., Рогачёв В. Г.* Развитие локализованных возмущений на неустойчивой границе ускоряемого слоя // *Письма в ЖТФ.* 1989. Т. 15. Вып. 1. С. 47—50.
Volchenko O. I., Zhidov I. G., Nevmerzhitskiy N. V., Rogachev V. G. Razvitie lokalizovannykh vozmushcheniy na neustoychivoy granitse uskoryaemogo sloya // *Pisma v ZhTF.* 1989. T. 15. Vyp. 1. S. 47—50.
14. *Сотсков Е. А., Невмержицкий Н. В., Мешков Е. Е., Близнетсов М. В., Дреннов А. О., Сеньковский Е. Д.* Исследование развития локального возмущения и его взаимодействия с зоной турбулентного перемешивания на границе газ—студень // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика.* 2003. Вып. 1—2. С. 57—59.
Sotskov E. A., Nevmerzhitskiy N. V., Meshkov E. E., Bliznetsov M. V., Drennov A. O., Senkovskiy E. D. Issledovanie razvitiya lokalnogo vozmushcheniya i ego vzaimodeystviya s zonoй turbulentnogo peremeshivaniya na granitse gaz—studen // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Teoreticheskaya i prikladnaya fizika.* 2003. Vyp. 1—2. S. 57—59.
15. *Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Кривонос О. Л., Калмыков А. В., Половников А. А., Левкина Е. В., Мармышев В. В., Фролов С. В., Абакумов С. А.* Развитие локального возмущения на границе газ—жидкость при неустойчивости Рэлея—Тейлора // *Тр. межд. конф. "XIII Харитоновские тематические науч. чтения".* Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. С. 587—591.
Nevmerzhitskiy N. V., Sotskov E. A., Senkovskiy E. D., Krivonos O. L., Kalmykov A. V., Polovnikov A. A., Levkina E. V., Marmyshev V. V., Frolov S. V., Abakumov S. A. Razvitie lokalnogo vozmushcheniya na granitse gaz—zhidkost pri neustoychivosti Releya—Teylora // *Tr. mezhd. konf. "XIII Kharitonovskie tematicheskie nauch. chteniya".* Sarov: FGUP "RFYaTs-VNIEF", 2011. S. 587—591.
16. *Раевский В. А., Синицына С. Н., Янилкин Ю. В.* Численное моделирование влияния зоны турбулентного перемешивания на рост локального возмущения в условиях неустойчивости Рэлея—Тейлора // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика.* 2003. Вып. 1—2. С. 28—33.

- Raevsky V. A., Sinitsyna S. N., Yanilkin Yu. V.* Chislennoe modelirovanie vliyaniya zony turbulentnogo peremeshivaniya na rost lokalnogo vozmushcheniya v usloviyakh neustoychivosti Releya—Teylora // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Teoreticheskaya i prikladnaya fizika.* 2003. Vyp. 1—2. S. 28—33.
17. *Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Бондаренко Ю. А., Гаврилова Е. С., Гончаров Е. А., Горбенко А. Д., Городничев А. В., Губков Е. В., Гужова А. Р., Дегтяренко Л. И., Жарова Г. В., Колобянин В. Ю., Софронюв В. Н., Стадник А. Л., Ховрин Н. А., Чернышова О. Н., Чистякова И. Н., Шемяков В. Н.* Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды // *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ.* 2008. Вып. 12. С. 54—65.
- Yanilkin Yu. V., Belyaev S. P., Bondarenko Yu. A., Gavrilova E. S., Goncharov E. A., Gorbenko A. D., Gorodnichev A. V., Gubkov E. V., Guzhova A. R., Degtyarenko L. I., Zharova G. V., Kolobyenin V. Yu., Sofronov V. N., Stadnik A. L., Khovrin N. A., Chernyshova O. N., Chistyakova I. N., Shemyakov V. N.* Eylerovy chislennye metodiki EGAK i TREK dlya modelirovaniya mnogomernykh techeniy mnogokomponentnoy sredy // *Trudy RFYaTs-VNIIEF. Sarov: RFYaTs-VNIIEF.* 2008. Vyp. 12. S. 54—65.

Статья поступила в редакцию 18.02.19.

NUMERICAL STUDY OF THE INTERRELATION OF TURBULENT MIXING AREA AND LOCAL DISTURBANCES OF INTERFACE IN THE GRAVITATIONAL TURBULENT MIXING PROBLEM / Yu. V. Yanilkin (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod Region).

The paper discusses the numerical simulation of a separate local disturbance in the turbulent mixing area generated due to the Rayleigh—Taylor instability with a permanently accelerating interface between two gases of different densities. The direct 3D numerical simulation using the EGAK code (without models of turbulence and viscosity) was performed to study the behavior of a semispherical disturbance on an interface of two media, with one of them being significantly heavier than the other. The turbulent mixing area in this problem is generated due to the background disturbances of the interface specified at initial time. Regularities in separate disturbances of the interface growing against the background of developing turbulent mixing have been found. The calculated results are in a good agreement with results of experiments by Nevmerzhitkiy et al.

Keywords: Rayleigh—Taylor instability, turbulent mixing area, local perturbation, direct numerical simulation, the EGAK code.
