

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ HYDRODYNAMIC INSTABILITIES

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ УСКОРЕННОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ЗОНЫ РТ-ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Е.Е.Мешков

СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

Локальное превращение турбулентного потока в трубе в ламинарный под действием его ускорения впервые было описано Тейлором в 1929 году [1]. В 1973 году Нарисима и Сринивассан опубликовали обзор исследований явления ламинаризации турбулентного пограничного слоя под действием ускорения течения [2]. Вопрос о возможном влиянии эффекта реламинаризации на характер развития неустойчивости Рэлея –Тейлора (РТ) [3,4] обсуждался в статьях Абаржи и Сринивассана [5,6]. Наряду с этим существует ряд экспериментальных исследований, указывающих на возможность подавления РТ неустойчивости ускоренным сдвиговым течением:

- на куполе крупного воздушного пузыря, всплывающего в воде [7-9] (число Атвуда $A \approx 1$);
- на куполе водяного пузыря, всплывающего в растворе соли [10] ($A \ll 1$);
- на торце цилиндрического жидкого снаряда, тонущего в менее плотной жидкости [11] ($A \ll 1$).

С учетом этих результатов представляет интерес рассмотреть возможность влияния ускоренного сдвигового течения на структуру зоны РТ перемешивания.

Имея в виду, что:

- зона РТ перемешивания растет ускоренно, как $\sim gt^2$;
- в зоне РТ перемешивания существуют потоки сред разной плотности, движущиеся в противоположных направлениях;

можно предположить, что в зоне РТ перемешивания в турбулентном течении могут возникать области с ускоренным сдвиговым течением на границе сред разной плотности (и как следствие) с локальной ламинаризацией. В зоне РТ перемешивания менее плотная среда проникает в более плотную в виде ансамбля пузырей, растущих со временем, и эти пузыри являются наиболее вероятным местом, где проявляется эффект реламинаризации.

На рис.1 приведены кадры фотохронограммы процесса развития зоны РТ-перемешивания на неустойчивой границе слоя студня водного раствора желатина, ускоряемого давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом [12]. Характерный масштаб давления продуктов детонации в данном случае порядка $1 \div 2$ МПа; при таких давлениях студень ведет себя как жидкость, и в данном случае наблюдается, по существу, развитие зоны перемешивания на границе газ-жидкость со всеми ее характерными признаками.

Слой студня движется со слабо меняющимся ускорением и, соответственно, растет зона перемешивания на неустойчивой границе. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что зона состоит из двух частей, существенно различающихся по внешнему виду. Нижняя часть зоны, темная и непрозрачная, с мелкими, едва различимыми струями на краю зоны, и верхняя часть в виде ансамбля укрупняющихся со временем пузырей с гладкой, невозмущенной поверхностью и приблизительно одинакового размера. Светлая окраска пузырей объясняется тем, что они

заполняются светящимися продуктами детонации смеси ацетилена с кислородом, имеющими очень высокую температуру [7].

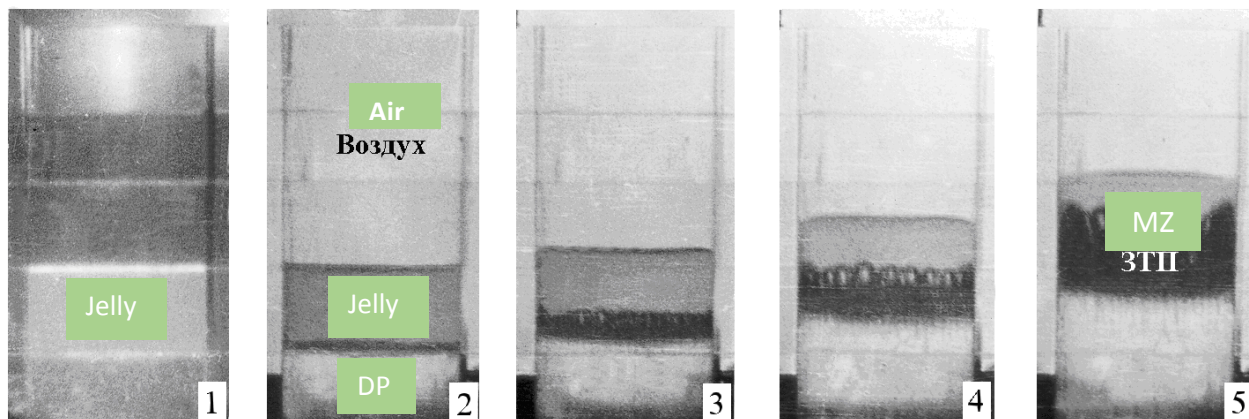


Рисунок 1. Развитие зоны перемешивания (MZ) на границе слоя студня (Jelli), ускоряемого продуктами детонации (DP) смеси ацетилена с кислородом в канале квадратного сечения (4x4 см²) из оргстекла. Инициирование детонации осуществлялось электроискровым способом синхронно в 64-х точках, равномерно размещенных на дне канала

Надо заметить, что подобный характер развития зоны RT перемешивания не зависит от вида начального возмущения неустойчивой границы и формы самой границы.

Рис.2 демонстрирует развитие зоны RT перемешивания в цилиндрической геометрии в режиме эксплозии. В этом эксперименте кольцо из студня высотой 1 см помещалось между двух пластин из оргстекла. Внутренний объем кольца заполнялся смесью ацетилена с кислородом. Детонация смеси инициировалась на оси объема электрической искрой. Разлет кольца из студня и развитие зоны RT перемешивания на внутренней границе кольца регистрировались фотоаппаратом с открытым затвором в затемненном помещении при освещении экспериментального устройства кратковременной вспышкой света. В данном случае начальным возмущением неустойчивой границы кольца была шероховатость поверхности кольца.

Здесь также присутствует ансамбль пузырей, заполненных продуктами детонации смеси ацетилена с кислородом и проникающих в студень.

Естественно предположить то, что в обоих случаях пузыри растут за счёт перетекания в их объемы продуктов детонации из области чистого газа. Однако, каналы, по которым продукты детонации перетекают в пузырь проходят через непрозрачные области зоны перемешивания и мы не видим эти каналы. Хотя необходимость существования этих каналов не вызывает сомнения.

Каким образом растут пузыри?

Представим себе гипотетический случай автомодельного развития зоны RT перемешивания на границе несжимаемых жидкостей. В этом случае пузыри растут вместе с зоной как $R \sim L \sim g t^2$ (где R –характерный размер пузыря, а L характерная ширина зоны перемешивания) и, соответственно, объем пузырей растёт, как $R^3 \sim t^6$. В то же время характерная площадь поперечного сечения каналов растет со временем как $\sim R^2 \sim t^4$. Отсюда следует, что течение легкой жидкости по каналу должно быть ускоренным для того, чтобы обеспечить рост пузырей, и, следовательно, неизбежна реламинаризация течения.

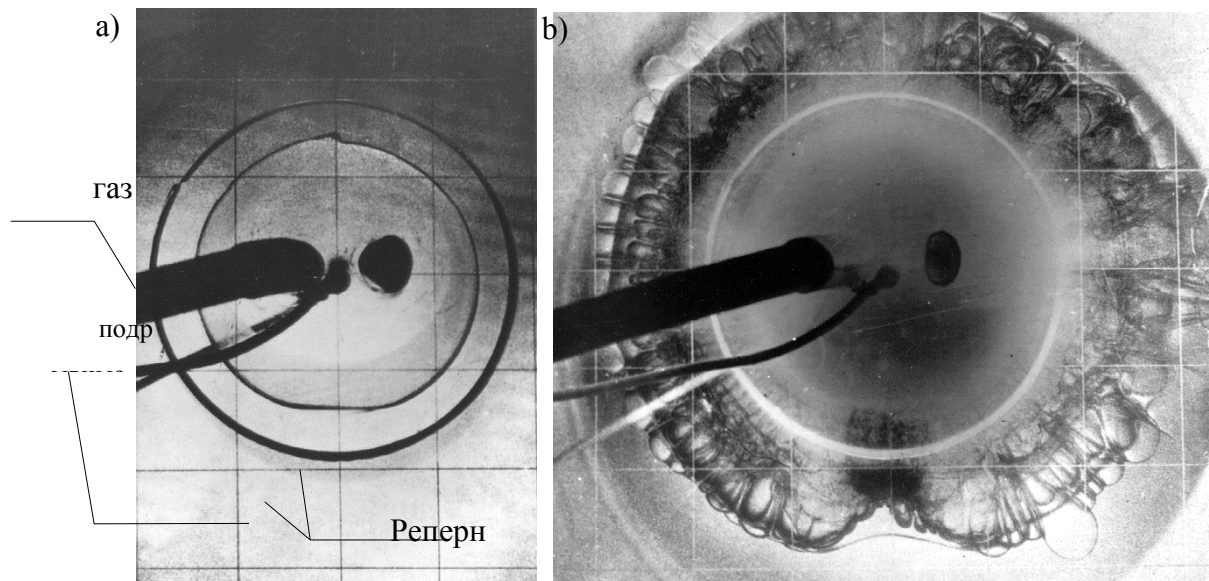


Рисунок 2. Развитие зоны РТ-перемешивания на внутренней границе кольца из студня, разлетающегося под давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом. а) Предварительный кадр. Кольцо из студня помещено между двух пластин из оргстекла; внутренний объем кольца заполняется смесью ацетилена с кислородом. Детонация смеси инициируется в центре объема искрой. б) Мгновенная фотография разлетающегося кольца приблизительно на момент выхода фронта зоны РТ перемешивания на внешнюю границу кольца [12]

И здесь возникает вопрос: может ли подобный сценарий зоны РТ перемешивания развиваться неограниченно, или со временем он может преобразоваться в сценарий струй более плотной среды, тонущих в зоне перемешивания, как в случае экспериментов с развитием зоны перемешивания на границе газ-газ [13].

Необходимо заметить, что наши наблюдения и выводы соответствуют случаю границы с большим отношением плотностей и числом Атвуда $A \approx 1$. Как эта ситуация будет выглядеть в случае малого отношения плотностей и числе Атвуда, приближающегося к 0? Это еще предстоит выяснить.

Следует еще раз подчеркнуть, что сказанное выше относится к случаю зоны РТ перемешивания, которая развивается ускоренно. При других режимах развития зоны перемешивания, например, в случае RM неустойчивости структура зоны перемешивания будет иметь иной вид.

Таким образом, сочетание ускоренного развития и взаимопроникновения сред разной плотности в зоне РТ перемешивания может приводить к образованию в зоне областей ускоренного сдвигового течения и, соответственно, локальной ламинаризации течения. Наиболее вероятными такими областями являются пузыри легкой среды, проникающей в тяжёлую.

Список литературы

1. Taylor GI. (1929). Proc. Roy. Soc. A, 124, 243.
2. R. Narasimha & KR.Sreenivasan (1973) J. Fluid Mech, 61, 417.
3. Lord Rayleigh. (1883). Proc.London Math.// Soc. V.14, 70.
4. Taylor G.I. 1950. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes.I // Proc.Roy.Soc. V.A201, 192.
5. S.I. Abarzhi. (2010) Europhysics Letters 91, 12867.
6. K.R. Sreenivasan, S.I. Abarzhi. (2013) Phil. Trans. Roy. Soc. A 371, , 20130167.

7. Е.Е.Мешков. (2018) ЖЭТФ, том 153, вып.1, стр. 150–156.
8. E.E.Meshkov et al, (2006) Proc. of 10th IWPCTM, Paris, France, p.p. 238-243.
9. E.E.Meshkov, (2013) Phil. Trans. R. Soc. A2013 371, 20120288.
10. R.I. Kanygin et al. (2018), Phys.Scr. , v.93, #2.
11. Е.Е.Мешков, Р.В.Мокрецов, И.Р.Смагин. (2019) Сб.тез.докладов Межд.Конф. ХНЧ 2019, с.224.
12. Е.Е.Мешков. (2006) Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах. Саров, 138 с.
13. Е.Е.Мешков, В.В.Никифоров, А.И.Толшмяков. (1990) ФГВ, N 3, 71.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ СЛОЙКИ ВОЗДУХ-КСЕНОН-ВОЗДУХ ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Е.В. Бодров, В.В. Змушко, Н.В. Невмержицкий
А.Н. Разин, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Существует ряд подходов и более десятка физических моделей для расчета турбулентных течений. Однако, используемые в них алгоритмы и математические модели далеки от совершенства. Каждый подход имеет свои достоинства и недостатки, а область их эффективного применения изучена недостаточно хорошо.

Значительную трудность для моделирования представляют задачи, в которых турбулентное перемешивание (ТП) возникает на контактных границах (КГ) слоев разноплотных газов под действием ударных волн (УВ) [1-6]. Из проблем математического моделирования подобных течений, прежде всего, отметим отсутствие сходимости решения на фронте конечно-разностной УВ [7, 8]. Не изученной остается задача взаимодействия УВ с турбулентным потоком [9].

Таким образом, сложность решаемых практических задач и нерешенные математические проблемы, присущие современным численным методикам, выдвигают на первый план задачи повышения точности вычислений и обоснования результатов математического моделирования. В [5, 10] на основе аналитического решения задачи о взаимодействии УВ с наклонной КГ и анализа результатов вычислительного эксперимента сформулирована математическая постановка опытов с трехслойными системами и приведены некоторые результаты моделирования. Результаты выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ экспериментов [11-13] продемонстрировали, что полученная в опытах информация является чрезвычайно полезной для тестирования численных методик.

Цель работы состоит в сравнении экспериментальных данных и результатов прямого численного моделирования опыта, в котором на первой контактной границе трехслойной газовой системы ТП развивается при доминирующей роли неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, на второй контактной границе – под влиянием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Моделирование задачи выполнено по методике МИД, являющейся дальнейшим развитием методики МИМОЗА [14].