

УДК 532.5

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕЛАМИНАРИЗАЦИИ В ЗОНЕ РТ-ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УСКОРЕННОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ

© 2019 г. Е. Е. Мешков^{а,*}, Р. В. Мокрецов^а, И. Р. Смагин^а

^а Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

*E-mail: eemeshkov@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2019 г.

После доработки 06.03.2019 г.

Принята к публикации 06.03.2019 г.

Разработана методика экспериментального исследования влияния ускоренного сдвигового течения на развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора (РТ) на границе двух жидкостей с малым числом Атвуда. С применением аналога метода лазерного ножа (флюоресценция под действием лазерного излучения) получены данные о структуре зоны РТ перемешивания и подтверждение стабилизации неустойчивости под действием ускоренного сдвигового течения.

Ключевые слова: реламинизация, гидродинамические неустойчивости, зона перемешивания, ускоренное сдвиговое течение

DOI: 10.1134/S0568528119050074

Явление превращения турбулентного потока в трубе в ламинарный под действием ускорения [1] получило название реламинизации (ламинаризации). Исследования этого явления в аэродинамике (например, [2]) приобрели широкий размах, поскольку сопротивление трения в турбулентном пограничном слое является одним из основных источников сопротивления летящему самолету и повышенного расхода топлива.

В то же время существует связь турбулентности и ускорения в зоне перемешивания при развитии неустойчивости Рэлея-Тейлора (РТ) [3, 4], что стало предметом обсуждения в [5, 6]. Стабилизация неустойчивости на куполе всплывающего пузыря под действием ускоренного сдвигового течения рассматривается в статьях [7–9] (при числе Атвуда $A \approx 1$ [7, 8] и $A = 0.007$ [9]). На основе анализа косвенных данных результатов экспериментов по ускорению слоя студня продуктами детонации смеси ацетилена с кислородом в [8] было сделано предположение о том, что скачок плотности, изначально существующий на неустойчивой границе газ-жидкость ($A \approx 1$), сохраняется в процессе развития зоны РТ перемешивания; также возможно ускоренное протекание через нее как более плотной, так и менее плотной среды в виде ламинарных потоков.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

В описанных ниже экспериментах проводилось исследование стабилизация РТ-неустойчивости на границе двух взаимно растворимых жидкостей ($A = 0.015$) под действием ускоренного сдвигового течения.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Здесь в вертикально расположенном стеклянном канале (1) с поперечным сечением $10.7 \times 11.0 \text{ см}^2$, заполненном водой, установлена вертикально по оси канала цилиндрическая стеклянная трубка (2) с наружным диаметром 51 мм и внутренним 46.5 мм, на нижний торец которой натянута диафрагма (3) из очень тонкой резины. В трубке налит раствор соли с плотностью ρ_2 ; высота столба раствора в трубке H_2 . Высота столба воды с плотностью ρ_1 в канале относительно торца трубки равна H_1 . При проведении эксперимента течение инициируется пробоем диафрагмы иглой (по вертикали вниз, на схеме не показана).

После прорыва и быстрого (за время около 1 мс) сжатия диафрагмы картина течения, возникающего на границе двух жидкостей в плоскости, совпадающей с осью симметрии трубки, визуализировалась при помощи метода PLIF [10]. В этом методе через трубку пропусклся луч лазера с длиной волны 532 нм, трансформированный при помощи цилиндрической оптики в световой тонкий “лист”; раствор соли в трубке содержит вещество Родамин 6G, флюоресцирующее под действием лазерного излучения.

Регистрация картины течения осуществлялась цифровым фотоаппаратом Casio Exilim EX-F1 в режиме скоростной видеосъемки со скоростью 300 кадров в секунду.

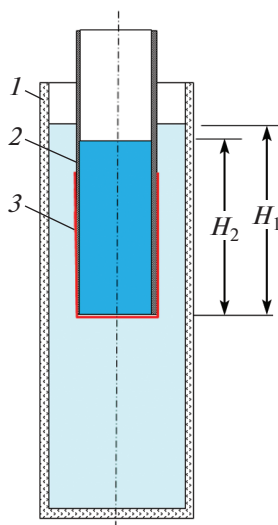


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – стеклянный канал с поперечным сечением $10.7 \times 11.0 \text{ см}^2$; 2 – стеклянная цилиндрическая трубка диаметром 51 мм; 3 – сильно натянутая диафрагма из очень тонкой резины

В описанной постановке экспериментов можно исследовать режимы развития РТ-неустойчивости как при отсутствии сдвигового течения, так и при его различных значениях. В случае, когда выполняется условие $\rho_2 \times H_2 = \rho_1 \times H_1$, на исследуемой границе (нижний срез трубки) устанавливается равновесие и жидкий снаряд (цилиндрический объем жидкости в трубке) после разрушения диафрагмы в целом покоится. Но неустойчивость развивается беспрепятственно, а ускоренное сдвиговое течение практически отсутствует.

В системе координат, связанной с исследуемой границей раздела жидкостей, в начальный момент времени ускорение свободного падения $g_0 = 10 \text{ м/с}^2$. Если граница движется вниз (в случае, когда $\rho_2 \times H_2 > \rho_1 \times H_1$) с ускорением $g(t)$, то ускорение свободного падения в выбранной системе координат будет: $g^*(t) = g_0 - g(t)$ (положительное направление – вниз). Поскольку $g(t)$ заведомо всегда меньше g_0 , $g^*(t) > 0$ и все время на исследуемой границе должна развиваться РТ-неустойчивость. Но при этом возникающее ускоренное сдвиговое течение может подавлять ее развитие.

Варьируя H_2 при фиксированных ρ_2 , ρ_1 и H_1 , можно будет исследовать различные варианты влияния ускоренного сдвигового течения на неустойчивость.

На рис. 2 приведены результаты двух опытов: (а) $\rho_2 \times H_2 = \rho_1 \times H_1$; $\rho_2 = 1.029 \text{ г/см}^3$ (раствор соли); $H_1 = 8 \text{ см}$ (развитие неустойчивости без сдвигового течения) число Атвуда $A = 0.015$ и (б) $\rho_2 \times H_2 > \rho_1 \times H_1$, $H_1 = 8 \text{ см}$; $H_2 = 12 \text{ см}$; $\rho_2 = 1.029 \text{ г/см}^3$ (стабилизация неустойчивости сдвиговым течением, обтекающим фронт тонущего жидкого снаряда).

В случае (а) можно наблюдать “срез” зоны РТ-перемешивания; здесь наибольший интерес представляет наблюдение образования и развитие пузыря, помеченного стрелкой на кадре на момент времени $t = 0.353 \text{ с}$, на фоне растущей зоны перемешивания, течение в которой в основном имеет турбулентный характер. Здесь в пузырь проходит чистая вода без примеси раствора соли и это течение имеет если не ламинарный, то упорядоченный характер. Этот результат в отличие от наблюдений, описанных в [8] и имеющих косвенный характер, является прямым доказательством того, что в развивающейся зоне перемешивания наряду с турбулентным течением могут присутствовать упорядоченные потоки менее плотной среды, проходящие через зону перемешивания и подпитывающие пузыри, формирующие фронт зоны перемешивания. Существенно, что этот результат получен для случая развития зоны перемешивания на границе двух взаимно растворимых жидкостей для малого числа Атвуда.

В случае (б) РТ-неустойчивость начинает развиваться, однако движение жидкого снаряда вниз под действием силы тяжести приводит к обтеканию снаряда водой и образованию ускоренного сдвигового течения на исследуемой границе и в свою очередь к стабилизации неустойчивости. В месте пересечения исследуемой границы с осью снаряда, где сдвиговое течение отсутствует, постоянно наблюдается небольшой выступ, но это возмущение не развивается.

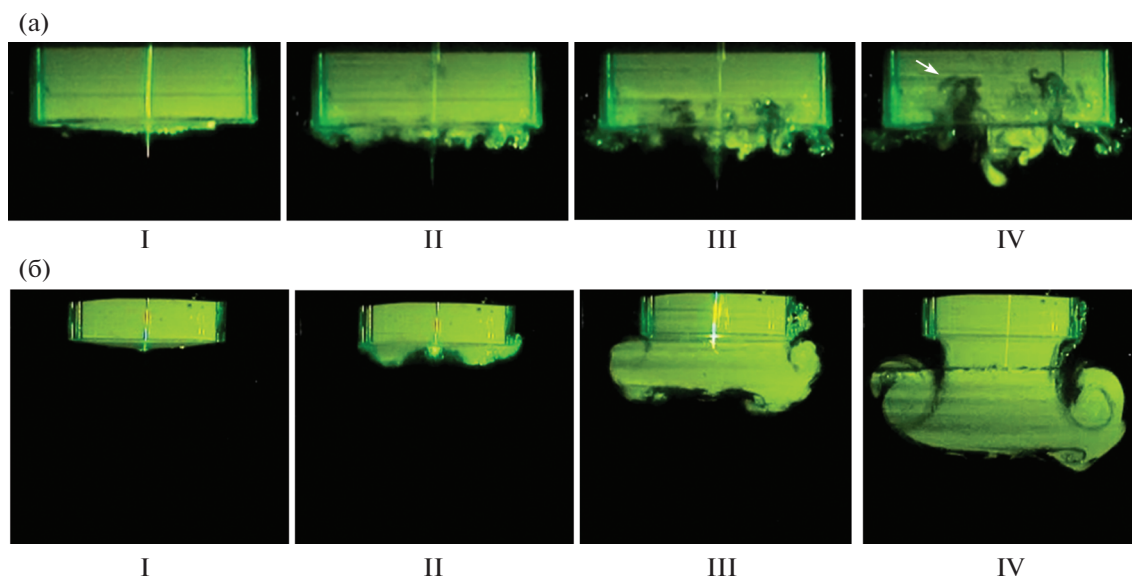


Рис. 2. Результаты двух опытов: *a* – $\rho_2 \times H_2 = \rho_1 \times H_1$; $\rho_2 = 1.029 \text{ г/см}^3$, $H_1 = 8 \text{ см}$ (развитие РТ-неустойчивости без сдвигового течения); I–IV – $t = 0, 0.087, 0.253, 0.353 \text{ с}$; *б* – $\rho_2 \times H_2 > \rho_1 \times H_1$; $H_1 = 8 \text{ см}$, $H_2 = 12 \text{ см}$, $\rho_2 = 1.029 \text{ г/см}^3$, (подавление неустойчивости сдвиговым течением); I–IV – $t = 0, 0.067, 0.200, 0.333 \text{ с}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика исследования влияния ускоренного сдвигового течения на развитие РТ-неустойчивости на границе двух жидкостей. Получены новые подтверждения стабилизации неустойчивости под действием ускоренного сдвигового течения. Установлены прямые доказательства того, что в развивающейся зоне перемешивания на неустойчивой границе наряду с турбулентным течением могут присутствовать упорядоченные потоки менее плотной среды, проходящие через зону перемешивания и подпитывающие пузыри, формирующие фронт зоны перемешивания.

Существенно, что эти результаты получены для случая развития зоны перемешивания на границе двух взаимно растворимых жидкостей с малым числом Атвуда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor G.I.* The Criterion for Turbulence in Curved Pipes // *Proc. Roy. Soc. A.* 1929. V. 124. P. 243–249.
2. *Narasimha R., Sreenivasan K.R.* Relaminarization in highly accelerated turbulent boundary layers // *J. Fluid Mechanics.* 1973. V. 61. № 3. P. 417–447.
3. Lord Rayleigh. Investigation of the Character of the Equilibrium of an Incompressible Heavy Fluid of Variable Density // *Proc. London Math. Soc.* 1883. V. 14. P. 70–77.
4. *Taylor G.I.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // *Proc. Roy. Soc. A.* 1950. V. 201. P. 192–196.
5. *Abarzhi S.I.* On fundamentals of Rayleigh-Taylor turbulent mixing // *Europhysics Letters.* 2010. V. 91. № 3. 35001.
6. *Abarzhi S.I., Gauthier S., Sreenivasan K.R.* Turbulent mixing and beyond: non-equilibrium processes from atomistic to astrophysical scales II // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2013. V. 371. 20130167.
7. *Meshkov E.E.* Some peculiar features of hydrodynamic instability development // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2013. V. 371. 20120288.
8. *Мешков Е.Е.* К вопросу о структуре зоны перемешивания на неустойчивой контактной границе // *ЖЭТФ.* 2018. Т. 153. № 1. С. 150–156.
9. *Kanygin R.I., Kashcheev A.D., Kudryavtsev A.Yu., Meshkov E.E., Novikova I.A.* The stability of the dome of a liquid bubble rising in a dense liquid // *Phys. Scr.* 2018. V. 93. 025701.
10. *Crimaldi J.P.* Planar laser induced fluorescence in aqueous flows // *Exp Fluids.* 2008. V. 44. P. 851–863.