

3. Г. Гельмгольц Два исследования по гидродинамике. I О вихревом движении. II О прерывном движении жидкости//Berlin Akad. 1868, 215-228с. (русский перевод под редакцией Е.А. Чаплыгина).
4. Г. Биркгоф //Гидродинамика. Методы, факты, подобие// Москва, Издательство иностранной литературы, 1963, 244с.
5. А.А. Дерibas Физика упрочнения и сварки взрывом// Новосибирск, Наука, СО, 1980, 221.с
6. J.Hunt Wave Formation in Explosive Welding// The Philosophical Magazine, Series 8, 1968, v.17, № 148, 669-680pp.
7. J. Robinson The mechanics of wave formation in impact welding// The Philosophical Magazine, 1975, v.31, № 3, 587-597pp.
8. Ю.А.Конон, Л.Б.Первухин, А.Д.Чудновский Сварка взрывом// Москва, Машиностроение, 1987.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УСКОРЕННОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА

Е.Е. Мешков, Р.В. Мокрецов, И.Р. Смагин

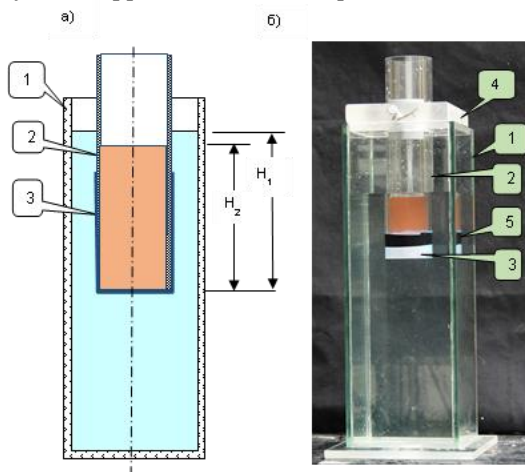
СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

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 Рэля –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] ($A \ll 1$).

Ниже описан метод исследования подавления РТ неустойчивости ускоренным сдвиговым течением на торце жидкого цилиндрического снаряда, тонущего в менее плотной жидкости.

На рис. 1 приведены: а) схема и б) общий вид экспериментального устройства, состоящего из вертикального стеклянного канала (1) (с поперечным сечением $11 \times 11 \text{ см}^2$), заполненного водой и помещённой в канале стеклянной цилиндрической трубки (2) диаметром 51 мм, на нижнем торце которой натянута диафрагма из тонкой резины (3).



- 1 – стеклянный канал, заполненный водой;
- 2 – стеклянная цилиндрическая трубка, заполненная раствором соли;
- 3 – натянута диафрагма из тонкой резины;
- 4 – крепление трубки в канале;
- 5 – изолента, крепящая диафрагму к трубке

Рисунок 1. а) Схема и б) общий вид постановки эксперимента с жидким снарядом

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 ~ 1 мс) сжатия диафрагмы картина течения, возникающего на границе двух жидкостей в плоскости, совпадающей с осью симметрии трубки, визуализировалась при помощи метода PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) [11]. При этом 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.

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 $\rho_2 \cdot H_2 = \rho_1 \cdot H_1$, на исследуемой границе (нижний срез трубки) устанавливается равновесие и жидкий снаряд (цилиндрический объем жидкости в трубке) после разрушения диафрагмы в целом покоится. Но РТ 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 $g_0 = 10$ м/с². Если граница движется вниз (в случае, когда $\rho_2 \cdot H_2 > \rho_1 \cdot H_1$) 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 развитие РТ неустойчивости.

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

На рис. 2 приведены в сравнении результаты двух опытов: (а) $\rho_2 \cdot H_2 = \rho_1 \cdot H_1$; $\rho_2 = 1.029$ г/см³ (раствор соли); $H_1 = 8$ см (развитие РТ неустойчивости без сдвигового течения) число Атвуда $A = 0.015$ и (б) $\rho_2 \cdot H_2 > \rho_1 \cdot H_1$, $H_1 = 8$ см; $H_2 = 12$ см; $\rho_2 = 1.029$ г/см³ (стабилизация РТ неустойчивости сдвиговым течением, обтекающим фронт тонущего жидкого снаряда).

В случае (а) можно наблюдать "срез" зоны РТ перемешивания; здесь наибольший интерес представляет наблюдение образование и развитие пузыря, помеченного стрелкой на кадре на момент времени $t = 0.353$ 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.

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 РТ неустойчивости. В месте пересечения исследуемой границы с осью снаряда, где сдвиговое течение отсутствует, постоянно наблюдается небольшой выступ, но это возмущение не развивается.

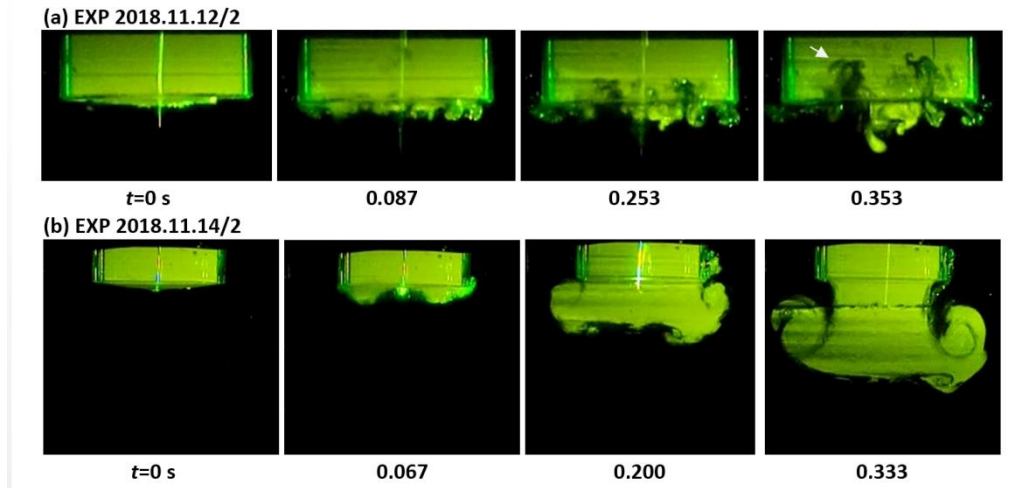


Рисунок 2. Результаты двух опытов: (а) $Q_2 \cdot H_2 = Q_1 \cdot H_1$; $Q_2 = 1.029 \text{ г/см}^3$, $H_1 = 8 \text{ см}$ (развитие РТ неустойчивости без сдвигового течения) и (б) $Q_2 \cdot H_2 > Q_1 \cdot H_1$; $H_1 = 8 \text{ см}$, $H_2 = 12 \text{ см}$, $Q_2 = 1.029 \text{ г/см}^3$ (на исследуемой границе возникает ускоренное сдвиговое течение, подавляющее развитие РТ неустойчивости)

Заключение. Разработана методика исследования влияния ускоренного сдвигового течения на развитие РТ неустойчивости на границе двух жидкостей. Получены подтверждения стабилизации РТ неустойчивости под действием ускоренного сдвигового течения.

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

Список литературы

1. Taylor G.I. (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. Е.Е.Meshkov etal, (2006) Proc. of 10th IWPCTM, Paris, France, p.p. 238-243
9. Е.Е.Meshkov, (2013) Phil. Trans. R. Soc. A2013 371, 20120288
10. R.I. Kanygin etal. (2018), Phys.Scr. , v.93, #2,
11. J.P.Crimaldi, Exp Fluids (2008) 44: 851