

УДК 532.61;532.517;532.529

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ–ТЕЙЛОРА
В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ МНОГОФАЗНЫХ И СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ СРЕД**

© 2011 г.

С.Н. ЯковенкоИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
Новосибирский госуниверситет

yakovenk@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора (НРТ) на поверхности раздела двух несмешивающихся текучих сред исследовано при численном моделировании уравнений Навье–Стокса и объемной фракции. Сравнение результатов расчета с данными измерений для поверхности раздела вода–воздух показывает, что применение модифицированной континуальной модели силы поверхностного натяжения дает правильное поведение как для линейно-устойчивого, так и для нелинейного этапов эволюции НРТ. Кроме того, НРТ в однофазном устойчиво стратифицированном течении над препятствием (где происходит обрушение внутренних волн) сопоставляется со случаем двух текучих сред.

Ключевые слова: неустойчивость Рэлея–Тейлора, прямое численное моделирование, объемная фракция, континуальная модель силы поверхностного натяжения, течение двух жидкостей, устойчивая стратификация, обрушение внутренних волн.

**Основные результаты эволюции
неустойчивости Рэлея–Тейлора**

При разрешении поверхности раздела (ПР) несмешивающихся сред использована «неразрывная» модель силы поверхностного натяжения (CSF), в которой плавное изменение сглаженной функции объемной фракции поперек ПР происходит за счет свертки исходной функции со сглаживающей функцией ядра. Развитый алгоритм тестируется для задачи НРТ [1]. Результаты показывают (рис. 1), что среднее значение y_f амплитуд ПР на правой и левой сторонах расчетной области сначала растет по экспоненте, что соответствует линейной устойчивости с постоянной скоростью роста $n = d(\ln y_f)/dt$. Значение n увеличивается с ростом числа Рейнольдса, тогда как безразмерная скорость $n^* = n/(v/g^2)^{1/3}$ имеет немонотонное поведение в полном согласии с теоретическими оценками [3] (лучше, чем получено в расчетах [4] с той же схемой адвекции, $s4mm$, в основных уравнениях). Как и вязкость, поверхностное натяжение оказывает демпфирующий эффект [1] в соответствии с данными теории и экспериментов. Применение развитых методов для реальных сред (вода–воздух) приводит к хорошему воспроизведению не только в области линейной устойчивости, но и в нелинейной области с насыщением скорости роста НРТ (рис. 2). Если

перепад плотности сред невелик, на вертикальных участках ПР в нелинейной стадии наблюдается неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, приводящая к появлению характерных грибообразных структур (см. рис. 1, $t/t_r > 5$). При большом перепаде плотностей такие эффекты отсутствуют и более тяжелая среда глубоко проникает в более легкую, образуя высокие колонны (см. рис. 2, $t/t_r > 3$), как и в [6, 7]. Неучет эффекта поверхностного натяжения приводит к завышению скорости роста и ложному искажению ПР, затем к ее фрагментации; метод вихревой пелены [7] – к занижению скорости, а развитая версия CSF-модели корректно описывает рост НРТ в пределах разброса данных опыта (рис. 2, справа).

При моделировании обрушения внутренних волн в устойчиво стратифицированном потоке [2], набегающем с постоянной скоростью на двумерное препятствие (холм), в некоторых локализованных областях также возникают неустойчивые слои с резкими перепадами (положительными градиентами) плотности. При больших числах Рейнольдса или Шмидта в этих слоях отчетливо видны грибоподобные структуры, свидетельствующие о нелинейной стадии развития НРТ в зоне опрокидывания внутренних волн (рис. 3). Эти конвективные структуры аналогичны наблюдаемым для двухфазной среды (см. рис. 1) и приводят к формированию хорошо перемешанной квазистационарной области

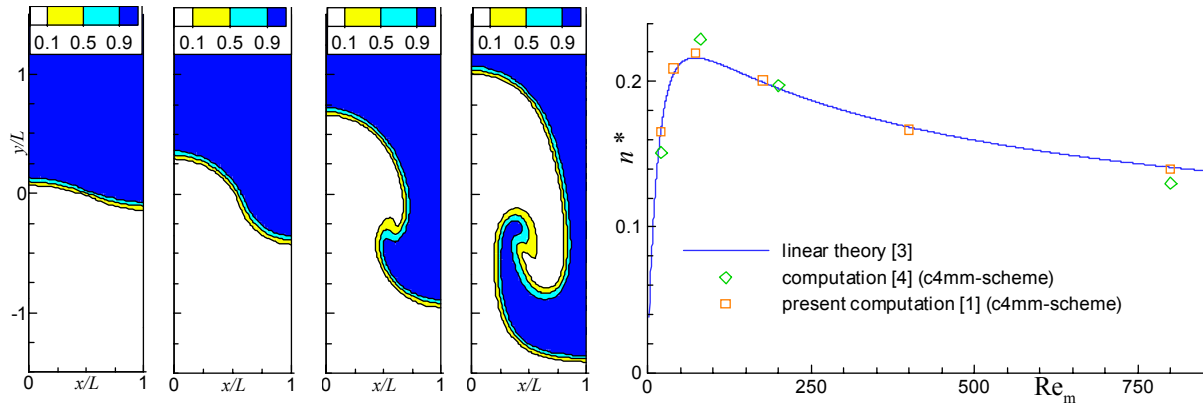


Рис. 1. Эволюция НРТ в двухслойной системе несмешивающихся сред (без учета поверхностного натяжения) при $Re_m = (8g)^{1/2}L^{3/2}/\nu = 400$, $\eta_1 = \rho_1\nu$, $\eta_2 = \rho_2\nu$, $\rho_1 = 2$, $\rho_2 = 1$, $a = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2) = 0.333$, $L = 0.02$, $g = 1$ [1]. Слева – изолинии объемной фракции более тяжелой среды с $\rho_1 = 2$ при $t/t_r = 3.2; 4.8; 6.4; 8.0$; $t_r = (L/g)^{1/2}$. Справа – безразмерная скорость роста в зависимости от числа Рейнольдса в сравнении с данными теории и других расчетов

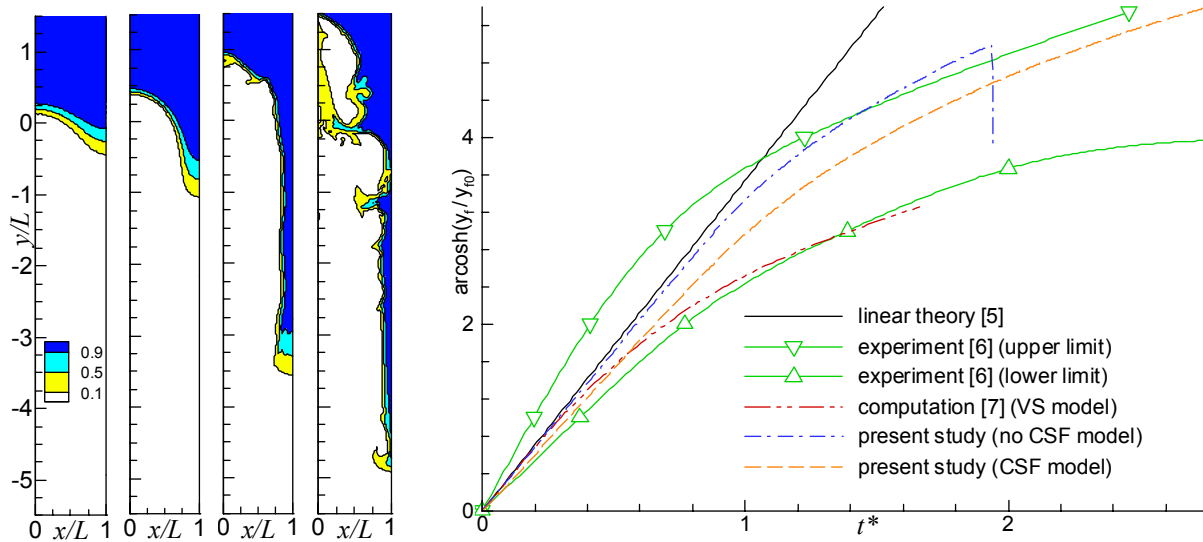


Рис. 2. НРТ в системе вода-воздух в условиях опытов [6] при $a = 0.998$. Слева направо: изолинии объемной фракции воды, вычисленные с учетом поверхностного натяжения при $t/t_r = 1.6; 2.4; 3.2; 4.0$; без учета, при $t/t_r = 4.0$. Справа – относительная величина средних амплитуд ПР в линейной теории, эксперименте и расчетах. Неучет поверхностного натяжения приводит к искажению ПР и ее фрагментации при $t^* = t(0.25ga/L)^{1/2} > 1.94$ ($t/t_r > 3.88$)

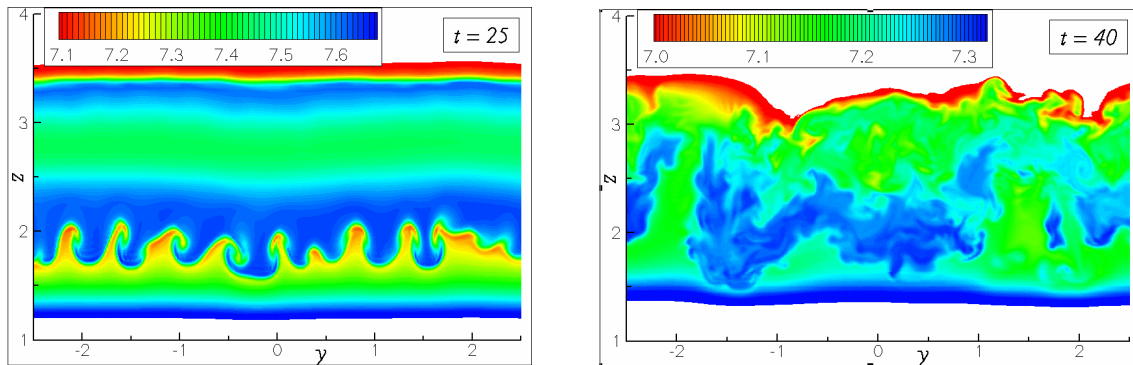


Рис. 3. Изолинии плотности (в поперечном сечении, вдоль размаха двумерного препятствия) в стратифицированном течении с обрушением внутренних волн [2]. Слева – грибоподобные конвективные структуры при нелинейной стадии НРТ. Справа – полностью перемешанная среда в квазистационарной области развитой турбулентности

развитой турбулентности, в которой вертикальные градиенты плотности (осредненной по координате y) становятся малыми.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00004-а) и Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН (№ 23 за 2009 г.).

Список литературы

1. Яковенко С.Н., Чан К.С. // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. (принято к печати)
2. Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P. //

Advances in Turbulence XII. Berlin: Springer, 2009. P. 457–460.

3. Chandrasekar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford: Clarendon Press, 1961.

4. Kelecy F.J., Pletcher R.H. // J. Comp. Phys. 1997. Vol. 138. P. 939–980.

5. Taylor G.I. // Proc. R. Soc. Lond. A. 1950. Vol. 201. P. 192–196.

6. Lewis D.J. // Proc. R. Soc. Lond. A. 1950. Vol. 202. P. 81–96.

7. Pullin D.I. // J. Fluid Mech. 1982. Vol. 119. P. 507–532.

STUDIES OF RAYLEIGH–TAYLOR INSTABILITY IN PROBLEMS OF MULTI-PHASE AND STRATIFIED FLUID MECHANICS

S.N. Yakovenko

Development of Rayleigh–Taylor instability (RTI) on the interface between two immiscible fluids is studied by numerical simulations of Navier–Stokes and volume-fraction equations. Comparisons of the computation results with the measurement data for the water–air interface show that implementation of the modified continuous surface force model yields correct behavior for both linear-stability and non-linear RTI evolution stages. Moreover, RTI in the single-phase stably stratified flow above an obstacle (where the internal wave breaking occurs) is compared with the two-fluid case.

Keywords: Rayleigh–Taylor instability, direct numerical simulation, volume fraction, continuum surface force model, two-fluid flow, stable stratification, internal wave breaking.