

## РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ–ТЕЙЛОРА В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ МНОГОФАЗНЫХ И СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ СРЕД

С.Н. Яковенко

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН  
Новосибирск 630090, Россия*

Неустойчивость Рэля–Тейлора (НРТ), возникающая при возмущении поверхности раздела между слоями тяжелой (расположенной сверху) и легкой сред, исследована для двухфазной системы несмешивающихся сред и стратифицированной среды путем прямого численного моделирования уравнений Навье–Стокса и уравнения для объемной фракции в двухфазной среде или отклонения плотности в стратифицированной среде.

При расчете эволюции поверхности раздела несмешивающихся сред применена [1] континуальная модель поверхностного натяжения. Развитие НРТ показывает начальный экспоненциальный рост амплитуды поверхности раздела, соответствующий этапу линейной устойчивости с постоянной скоростью роста. Для реальных сред (вода–бензол, вода–воздух) получено согласие с данными теории [2] и опытов [3] на этапах как линейной, так и нелинейной устойчивости. Для случая «вода–бензол» поведение поверхности раздела может служить аналогом развития НРТ в стратифицированной среде. На начальном этапе эволюция возмущений не зависит от перепада плотности  $\rho_1/\rho_2$  на поверхности раздела. При  $\rho_1/\rho_2 < 2$  картина развития неустойчивости сохраняется симметричной до значительных моментов времени, а с ростом  $\rho_1/\rho_2$  усиливается асимметрия НРТ. Если перепад плотности не слишком велик ( $\rho_1/\rho_2 < 5$ ), на нелинейном этапе из-за усиления сдвига скорости между противоположно направленными потоками сред наблюдаются эффекты неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, приводящие к появлению характерных грибовидных конвективных структур со спиралевидной закруткой потока. При большом перепаде плотности (напр., в случае «вода–воздух») более плотная среда тонкими струями проникает глубоко вниз в менее плотную среду, приобретающую вид высоких и толстых колонн, поднимающихся вверх (рис. 1). То есть, дальнобойность взаимопроникающих струй тяжелой и легкой сред растет при увеличении перепада плотности (рис. 2), показывая насыщение (стремление к некоторой конечной скорости роста) при  $\rho_1/\rho_2 \rightarrow \infty$ .

Увеличение поверхностного натяжения приводит к уменьшению скорости роста (демпфированию развития) неустойчивости, препятствуя искажению и фрагментации поверхности раздела, и способствует утолщению кончика струи тяжелой среды и даже возврату к грибовидным структурам при  $\rho_1/\rho_2 \sim 10^4$  [1].

Новые результаты, полученные при моделировании НРТ на поверхности раздела двух сред, подтверждают и уточняют результаты предшествующих работ.

Неустойчивые слои с резкими перепадами плотности, содержащие «поверхности раздела», также возникают в некоторых областях при обрушении внутренних волн в устойчиво стратифицированном потоке с препятствием [4]. При больших числах Рейнольдса  $Re$  или Прандтля  $P_r$  в этих слоях зафиксированы грибовидные конвективные структуры, свидетельствующие о нелинейной стадии развития НРТ в зоне опрокидывания волн. Структуры аналогичны наблюдаемым в [1] для двухфазной среды и в итоге приводят к формированию квазистационарной области развитой турбулентности с малыми вертикальными градиентами осредненной плотности (рис. 3). Отметим, что изучение неустойчивости при обрушении подветренных волн проясняет один из механизмов генерации геофизической турбулентности вдали от подстилающей поверхности.

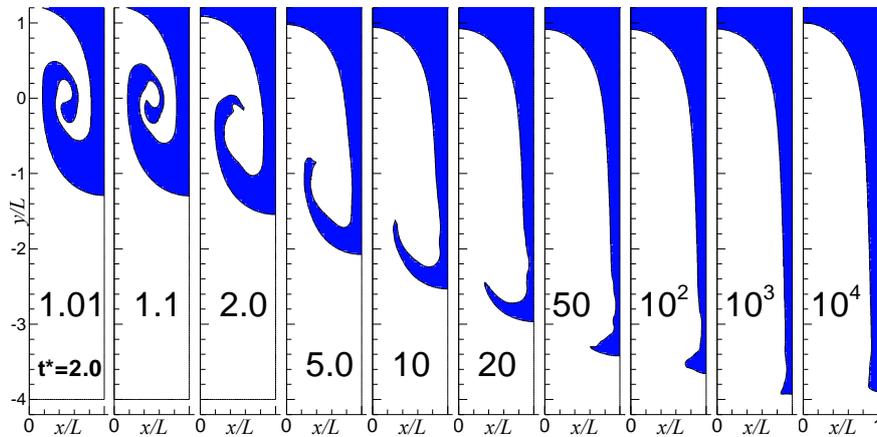


Рис. 1. Изолинии объемной фракции более плотной среды ( $f=0.5$ ) при  $t^*=2.0$  на поверхности раздела с перепадом плотности  $\rho_1/\rho_2 = 1.01, 1.1, 2, 5, 10, 20, 50, 10^2, 10^3, 10^4$ .

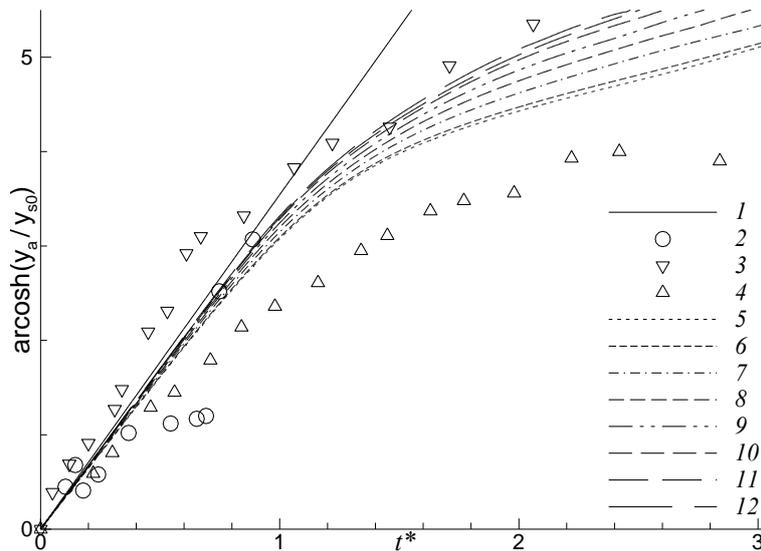


Рис. 2. Амплитуда поверхности раздела сред в зависимости от времени и перепада плотности сред: 1 – линейная теория [2], 2 – лабораторные эксперименты [3] в системе «вода-бензол», 3 и 4 – пределы разброса данных [3] в системе «вода-воздух», 5-12 – настоящие расчеты при  $\rho_1/\rho_2 = 1.1, 2, 5, 10, 20, 50, 10^2, 10^3$ .

В серии расчетов проведено сканирование в пространстве физических параметров ( $Re = UH/\nu$ ,  $Pr = \nu/\kappa$ ) для сценариев развития НРТ при опрокидывании подветренных волн, генерируемых двумерным препятствием высоты  $H$  в течении с постоянными входными значениями скорости  $U$  и градиента плотности. Это явление изучено путем визуализации полей скорости и плотности, с анализом спектров, полученных из данных DNS и LES при  $1 \leq Pr \leq 700$  (что относится к течениям в атмосфере и океане),  $10^2 \leq Re \leq 10^4$ . Некоторые интегральные данные показаны на рис. 4, где символами нанесена длина волны максимально нарастающего возмущения НРТ. Видно, что соблюдается аналитическое выражение  $\lambda = \lambda' = 4\pi H \{ (2\Delta\rho_H/\Delta\rho)(F_H)^2 Re^{-2} \}^{1/3}$ , сформулированное в [4] при  $Pr = 1$ , где характерный перепад плотности между порциями тяжелой и легкой сред,  $\Delta\rho \approx 10^{-3}\Delta\rho_H$ ,

относится к ранним этапам эволюции НРТ. Для произвольных чисел  $Pr$  это соотношение следует уточнить как  $\lambda = f(Pr)\lambda'$ , где  $f(Pr) = 1$  при  $Pr \rightarrow \infty$  и  $f(Pr_1) > f(Pr_2)$  при  $Pr_1 < Pr_2$ . Кроме того, из отношения наклонов асимптот при  $Pr = 1$  и  $7$  (рис. 4) можно полагать, что  $f(Pr) = Pr^{-1/2}$ , по крайней мере, для относительно низких чисел Прандтля ( $Pr < 10$ ).

Полученные результаты проясняют особенности развития неустойчивости Рэлея–Тейлора в различных задачах динамики многофазных и стратифицированных сред.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковенко С.Н.** Влияние перепада плотности и поверхностного натяжения на поверхности раздела текучих сред на развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 6. С. 54–69.
2. **Taylor G.I.** The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I // Proc. R. Soc. Lond. A. 1950. V. 201. P. 192–196.
3. **Lewis D.J.** The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. II // Proc. R. Soc. Lond. A. 1950. V. 202. P. 81–96.
4. **Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P.** Transition through Rayleigh–Taylor instabilities in a breaking internal lee wave // J. Fluid Mech. 2014. Vol. 760. P. 466–493.

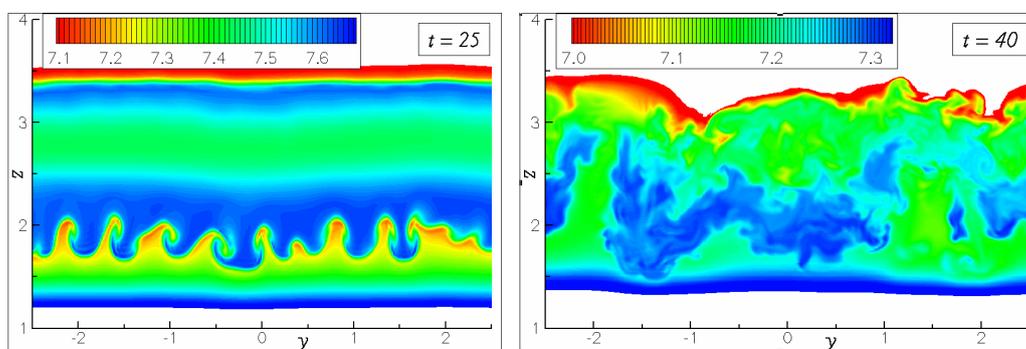


Рис. 3. Изолинии плотности (в поперечном сечении, вдоль размаха двумерного препятствия) в течении с обрушением внутренних волн [4]. Слева – конвективные структуры на нелинейной стадии НРТ. Справа – полностью перемешанная среда в области развитой турбулентности.

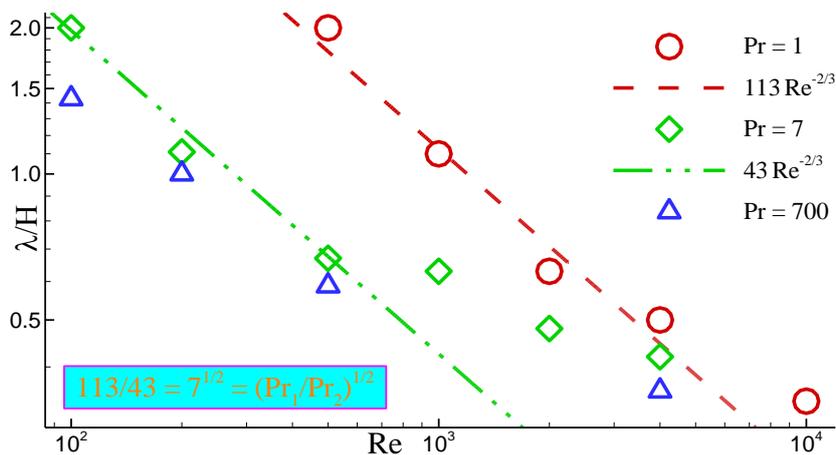


Рис. 4. Длина волны максимально нарастающего возмущения в зависимости от  $Re$  и  $Pr$ .