

**Моделирование течений жидкости и газа с поверхностью раздела сред,
турбулентностью и стратификацией**

С.Н.Яковенко

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. С.А.Христиановича
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск 630090, Россия (e-mail: s.yakovenko@mail.ru)*

В докладе представлены результаты численного исследования современными методами (RANS, DNS, LES) несжимаемых течений: (а) с поверхностью раздела (ПР) несмешивающихся сред, (б) при обрушении внутренних волн в устойчиво стратифицированной среде.

Под ПР подразумевается граница как между текучей средой и твердым телом (напр., в потоке с выступом в пограничном слое и канале), так и между двумя текучими средами (напр., в системе вода-воздух). При разрешении ПР несмешивающихся текучих сред использована «континуальная» модель поверхностного натяжения, тестируемая для задачи неустойчивости Рэлея-Тейлора (НРТ) [1]. Результаты показывают, 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 $n = d(\ln y_f)/dt$, увеличивающейся с ростом числа Рейнольдса. Величина $n^* = n(v/g^2)^{1/3}$ имеет немонотонное поведение в согласии с данными теории [2]. Как и вязкость, поверхностное натяжение оказывает демпфирующий эффект [1] в соответствии с экспериментом. Применение развитых методов для реальных сред (вода-воздух) приводит к хорошему воспроизведению как в области линейной устойчивости, так и в нелинейной области с насыщением скорости роста НРТ. Если перепад плотности сред невелик, на вертикальных участках ПР в нелинейной стадии возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, приводящая к появлению характерных грибо-образных структур. При большом перепаде плотностей таких эффектов нет и более тяжелая среда глубоко проникает в более легкую, образуя высокие колонны, как и в [3]. Неучет поверхностного натяжения приводит к завышению скорости роста и ложному искажению и фрагментации ПР. Развитый алгоритм корректно описывает рост НРТ в пределах разброса данных опыта [3].

При моделировании обрушения внутренних волн в стратифицированном потоке [4], набегающем с постоянной скоростью на препятствие (холм), в некоторых локализованных областях также возникают неустойчивые слои с резкими положительными градиентами плотности. При больших числах Рейнольдса или Шмидта в этих слоях отчетливо видны грибоподобные структуры, свидетельствующие о нелинейной стадии развития НРТ. Эти конвективные структуры аналогичны наблюдаемым для двухфазной среды и приводят к формированию хорошо перемешанной квазистационарной области развитой турбулентности, в которой вертикальные градиенты плотности становятся малыми. Проведен анализ структуры и эволюции возникающей зоны турбулентности, в частности, получены результаты по балансу уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k . Порождение плавучести G , осредненное по области турбулентности, относительно мало, как и скорость роста k , а также члены молекулярной и турбулентной диффузии, так что имеет место глобальный баланс между порождением средним сдвигом скорости, диссипацией ε и адвекцией. Глобальное значение эффективности смешения ($\Gamma = G/\varepsilon = 0,2$) соответствует данным наблюдений в океанологических приложениях. Обсуждаются результаты применения подсеточной модели при высоком числе Шмидта для описания турбулентности, возникающей в устойчиво стратифицированном потоке над холмом. В градиентной модели типа Смагоринского, турбулентное число Шмидта должно быть около 0,3 (как в [5] при LES-расчете плавучих струй) для рассматриваемой турбулентной области со слабо-неустойчивой стратификацией в зоне обрушения внутренних волн.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 12-01-00050-а).

1. Яковенко С.Н., Чан К.С. // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. Т. 18. С. 449-461.
2. Chandrasekar S. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. Oxford: Clarendon Press, 1961.
3. Lewis D.J. // *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1950. Vol. 202. P. 81-96.
4. Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P. // *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 677. P. 103-133.
5. Zhou X., Luo K.H., Williams J.J.R. // *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*. 2001. Vol. 15. P. 95-120.