

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЯЧЕЙКЕ С ТВЕРДЫМИ СТЕНКАМИ

А.Н. Долуденко¹, С.В. Фортова²

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва,*

sfortova@mail.ru

Турбулентность – это хаотическое состояние, возникающее в жидкости под воздействием внешнего воздействия при больших числах Рейнольдса Re . В трехмерной турбулентности образуется широкий диапазон масштабов, где наблюдаются хаотические пульсации скорости. Наличие такого широкого диапазона связано с каскадом энергии, которая передается благодаря нелинейному взаимодействию от интегрального масштаба турбулентности (где она создается за счет накачки) ко все более мелким масштабам вплоть до диссипативного масштаба, где включается вязкость, которая преобразует кинетическую энергию в тепло.

В тонких слоях жидкости турбулентность эффективно является двумерной на масштабах, превышающих толщину слоя жидкости. При этом основной особенностью двумерного турбулентного течения, постоянно возбуждаемого внешней силой, является возникновение обратного энергетического каскада [1, 2]. За счет нелинейных эффектов пространственный масштаб вихрей, создаваемых внешней силой, увеличивается до тех пор, пока рост не будет остановлен размером ячейки. В последнем случае энергия накапливается на этих масштабах. При определенных условиях накопление приводит к возникновению системы когерентных вихрей. Наблюдаемые вихри имеют размер сравнимый с размером ячейки [3].

Физический эксперимент, используемый в данной работе для сравнения с численным экспериментом, проводится в ограниченном замкнутом объеме – экспериментальной ячейке, ограниченной стенками (рис. 1) [4].

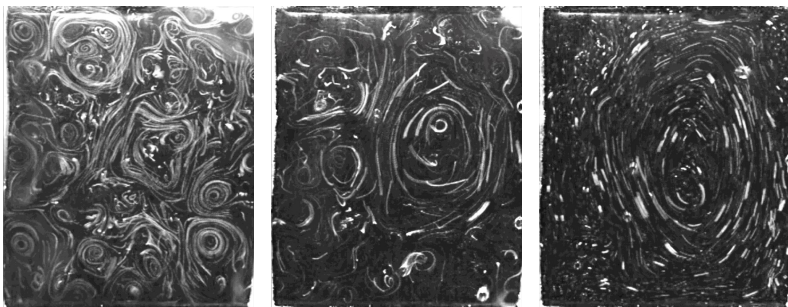


Рис. 1. Физический эксперимент по двумерной турбулентности в квадратной ячейке; показано формирование когерентного вихря

Для качественного сравнения расчетов с этим экспериментом при численном моделировании учитывались условия прилипания к стенкам и наличие трения о дно. В численном эксперименте, представленном в данной работе, наличие трения о дно учтено путем добавления дополнительного члена в систему гидродинамических уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho G \sin ky + \mu \Delta u - \zeta u,$$

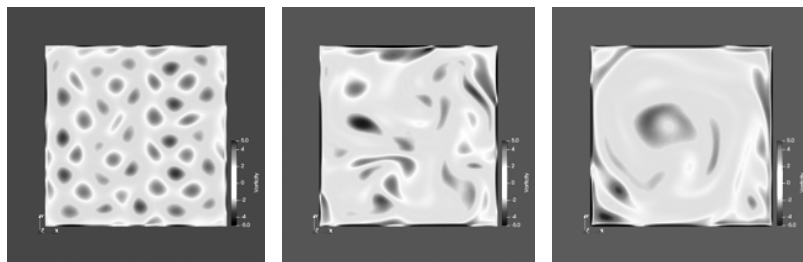
$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho G \sin kx + \mu \Delta v - \zeta v.$$

Здесь $\mathbf{V} = (u, v)^T$ – вектор скорости, ρ – плотность жидкости, k – пространственная частота внешней силы, μ – динамическая вязкость жидкости, ζ – коэффициент трения о дно. В качестве граничных условий используются условия прилипания.

В данной работе исследование проводилось путем прямого численного моделирования системы уравнений Навье-Стокса численным методом Мак-Кормака с использованием модели слабосжимаемой жидкости. Течение рассматривалось в двумерной квадратной ячейке с граничными условиями прилипания. Развитие течения происходило благодаря наличию постоянно действующей силы, периодической по направлениям Ox и Oy .

В работе проведен анализ влияния величины внешней силы и коэффициента трения о дно на картину течения и ее

характеристики. Показано, что увеличение значения внешней силы турбулизует поток. Тогда как увеличение трения о дно приводит к стабилизации течения и формированию ламинарного режима. Таким образом, наблюдаются различные виды течения в зависимости от величины внешней силы и коэффициентов трения о дно.



(а)

(б)

(в)

Рис. 2. Завихренность в различного типа течениях: ламинарное (а), хаотическое (б), когерентный вихрь (в)

Литература

1. Kraichnan R.H. Inertial Ranges in Two-Dimensional Turbulence // *Phys. Fluids*. 1967. Vol. 10. P. 1417.
2. Batchelor G.K. Computation of the Energy Spectrum in Homogeneous Two-Dimensional Turbulence // *Phys. Fluids*. 1969. Vol. 12, № Suppl. II. P. 233.
3. Doludenko A.N., Fortova S.V., Kolokolov I.V., Lebedev V.V. Coherent vortex in a spatially restricted two-dimensional turbulent flow in absence of bottom friction // *Physics of Fluids*. V. 33(1), 2021. P. 011704.
4. J. Sommeria. Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box // *Journal of Fluid Mechanics* – 1986. V. 170. P. 139–168.