

О механизме самоподдержания локализованных турбулентных структур в круглых трубах

Пиманов Владимир Олегович

Аспирант

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Механико-математический факультет, Кафедра гидромеханики, Москва, Россия

E-mail: Pimanov-Vladimir@yandex.ru

Турбулентность в трубах круглого сечения при переходных числах Рейнольдса принимает форму локализованных структур [1], называемых турбулентными порывами (см. рис.). Порывы отделены друг от друга ламинарным потоком. Они сносятся вниз по потоку примерно со средней скоростью течения, сохраняя свою форму и пространственную протяженность практически неизменными. В некотором смысле порыв можно рассматривать как единицу турбулентности, которая в локальной форме включает механизм самоподдержания турбулентности. Исследованию порывов посвящено множество работ, но на настоящий момент существует лишь предположение [2] о механизме его самоподдержания. Исследование осложняется его турбулентная природа.

В работе [3] численно было найдено решение Уравнений Навье-Стокса, ухватывающее основные особенности турбулентного порыва (в частности, пространственную локализацию), но имеющее более простую динамику (см. рис.). Оно оказывается периодическим по времени в системе отсчета, связанной с порывом, что позволяет провести его детальное исследование, что может быть полезно при изучении турбулентного порыва.

Решая уравнения Навье-Стокса конечно-разностным методом [4] в цилиндрической расчетной области нами было воспроизведено локализованное решение [3] в диапазоне переходных значений числа Рейнольдса. Были установлены его основные характеристики и внутренняя структура. Выявлен цикл самоподдержания такого решения. Основной особенностью локализованного решения является наличие полос повышенной и пониженной скорости, вытянутых вдоль стенки трубы. Перегибный профиль, образованный полосами, оказывается неустойчив, и между полосами рождаются волны, бегущие вниз по потоку, нарастающие по амплитуде. Через нелинейное взаимодействие волны формируют движение в поперечной к оси трубы плоскости - вихревые структуры, чередующиеся по направлению вращения. Где вихри переносят жидкость от стенки трубы к оси, формируются полосы пониженной скорости. От оси к стенке - полосы повышенной скорости. Описанный цикл подтверждает и уточняет выводы, сделанные в [2]. Многие его детали обсуждались в литературе, но ни натурный, ни численный эксперимент не позволяли их наблюдать.

Анализ зависимости характеристик локализованного решения от числа Рейнольдса позволяет делать выводы о тенденциях, присущих реальному турбулентному движению с увеличением числа Рейнольдса.

Источники и литература

- 1) Wygnanski I.J., Champagne F.H. On transition in a pipe. Pt 1. The origin of puffs and slugs and the flow in a turbulent slug // J. Fluid Mech. 1973. V. 59. No 2. P. 281–335.
- 2) Shimizu M., Kida S. A driving mechanism of a turbulent puff in pipe flow // Fluid Dyn. Res. 2009. V. 41. P. 045501(27).
- 3) Avila M., Mellibovsky F., Roland N., Hof B. Streamwise Localized Solutions at the Onset of Turbulence in Pipe Flow // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 224502.

- 4) Nikitin N. Finite difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // J. Comput. Phys. 2006. V. 217. No 2. P. 759–781.

Слова благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 14-01-00295-а и № 16-31-00522-мол-а с привлечением ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ. Выражаю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Никитину Николаю Васильевичу.

Иллюстрации

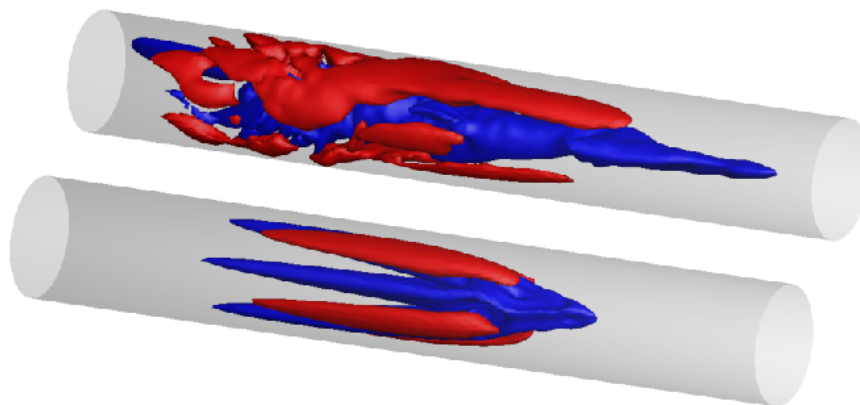


Рис. 1. Турбулентный порыв (вверху) и более простое локализованное решение уравнений Навье–Стокса [3] (ниже). Красным выделены области повышенной скорости (относительно ламинарного потока), синим – пониженной. Направление потока слева направо.