

Развитие гидродинамической неустойчивости при обтекании круглого цилиндра стационарным потоком

Научный руководитель – Нуриев Артем Наилевич

Кокорина Елена Александровна

Студент (бакалавр)

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского, Казань, Россия

E-mail: kokorinae206@gmail.com

Задача обтекания круглого цилиндра является классической в механике жидкости и газов. Режим течения при числе Рейнольдса $Re = 3900$ относится к переходному турбулентному типу, характеризующемуся ламинарным пограничным слоем на теле и турбулентным следом за ним. Этот режим представляет собой сложный для моделирования объект из-за наличия трехмерных вихревых структур и стохастических колебаний. Высокоточное воспроизведение таких течений необходимо для верификации численных методов, проектирования в аэро- и гидродинамике, а также для понимания фундаментальных механизмов турбулентности. Применение методов прямого численного моделирования (DNS) позволяет получить наиболее детальную картину течения без использования дополнительных моделей турбулентности. В данной работе проводится прямое численное моделирование обтекания бесконечно длинного круглого цилиндра вязким несжимаемым потоком при числе Рейнольдса $Re = 3900$ с использованием пакета OpenFOAM. В задачи исследования входит: Построение блочно-структурированных расчетных сеток различной детализации. Определение оптимальных интервалов осреднения для сбора статистически значимых данных. Исследование сеточной сходимости и верификация полученных результатов путем сравнения с экспериментальными и расчетными данными других авторов. Анализ интегральных характеристик (коэффициент сопротивления C_d , среднеквадратичное значение коэффициента подъемной силы C_l -RMS, число Струхалия St) и спектральных характеристик пульсаций скорости. Исследование базируется на решении нестационарных уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Расчёты выполнены в трёхмерной постановке на базе открытого пакета OpenFOAM. Для аппроксимации конвективных потоков применялась схема высокого разрешения GammaV 0.5 Для расчетов применялись четыре блочно-структурированные сетки с O-образными блоками вокруг цилиндра, обеспечивающими повышенное разрешение в пограничном слое и ближнем следе. В ходе работы были определены моменты времени выхода течения на статистически установившийся режим для каждой сетки. Показана необходимость тщательного выбора интервала осреднения для интегральных характеристик из-за ярко выраженных периодических и стохастических колебаний. Проведен анализ сходимости по четырем сеткам. Наиболее чувствительным параметром к измельчению сетки оказался коэффициент подъемной силы (C_l), однако при корректном подборе интервала осреднения он демонстрирует тенденцию к стабилизации. Анализ профилей осредненной скорости показал, что для сбора достаточной статистики по стохастическим движениям требуется осреднение на интервале порядка 180 периодов схода вихрей. Расчет энергетического спектра пульсаций (E) и спектральной плотности мощности (PSD) выявил четкий пик на частоте схода вихрей ($f \approx 0.105$, соответствующей частоте дорожки Кармана). В спектре отчетливо выделяются вихрегениерирующий интервал, инерционный интервал с характерным законом «-5/3» и диссипативный интервал. Сравнение с режимом $Re = 600$ подтверждает развитие трехмерной

турбулентности при $Re = 3900$, выражающееся в расширении и зашумлении спектра. В ходе работы успешно выполнено прямое численное моделирование обтекания цилиндра при $Re = 3900$. Показано, что DNS является надежным инструментом для исследования данного типа течений. Ключевыми факторами получения достоверных результатов являются: использование трехмерных расчетных сеток высокого разрешения и выбор адекватного, достаточно протяженного интервала осреднения для сбора статистики по турбулентным пульсациям. Достигнута хорошая сходимость результатов на подробных сетках и их согласие с эталонными результатами, что подтверждает возможность использования данной методологии для изучения турбулентного режима $Re=3900$.