

Отчет о работе, выполненной на оборудовании Информационно-вычислительного центра НГУ

Название работы: Численное исследование задачи обтекания цилиндра при высоких числах Рейнольдса

Состав коллектива исполнителей: Мулляджанов Р.И. (Институт теплофизики СО РАН, Новосибирский государственный университет), Палкин Е.В. (Институт теплофизики СО РАН)

Должности в НГУ: Мулляджанов Р.И. – с.н.с., Палкин Е.В. – м.н.с.

Работа по гранту: РФФИ №14-29-00203 “Моделирование энергетических процессов на современном уровне сложности”, 2014-2016 (рук. К. Ханъялич)

Контактное лицо (ФИО, адрес электронной почты): Мулляджанов Рустам Илхамович, rustammul@gmail.com; Палкин Егор Владимирович, palkinev89@gmail.com

Научное содержание работы.

1. *Постановка задачи.* Рассматривается однородный поток несжимаемой жидкости скорости U , натекающий на длинный поперечный цилиндр диаметра D , см. **Рис. 1**. Число Рейнольдса $Re=UD/\nu$ равно 3900 и 140000. Для исследования динамики данного течения, а также особенностей моделирования отрывных турбулентных потоков, численно решаются уравнения Навье-Стокса, используя два метода. Первый подход – это метод крупных вихрей (Large-eddy simulations, LES). Соответствующие уравнения получаются путем низкочастотной фильтрации уравнений Навье-Стокса. Возникающий неизвестный тензор подсеточных напряжений моделируется при помощи динамической модели Смагоринского. Второй подход заключается в использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, где возникает аналогичный тензор напряжений Рейнольдса. В данной работе как раз и исследуются особенности моделирования напряжений Рейнольдса, используя данные LES и данные из литературы.

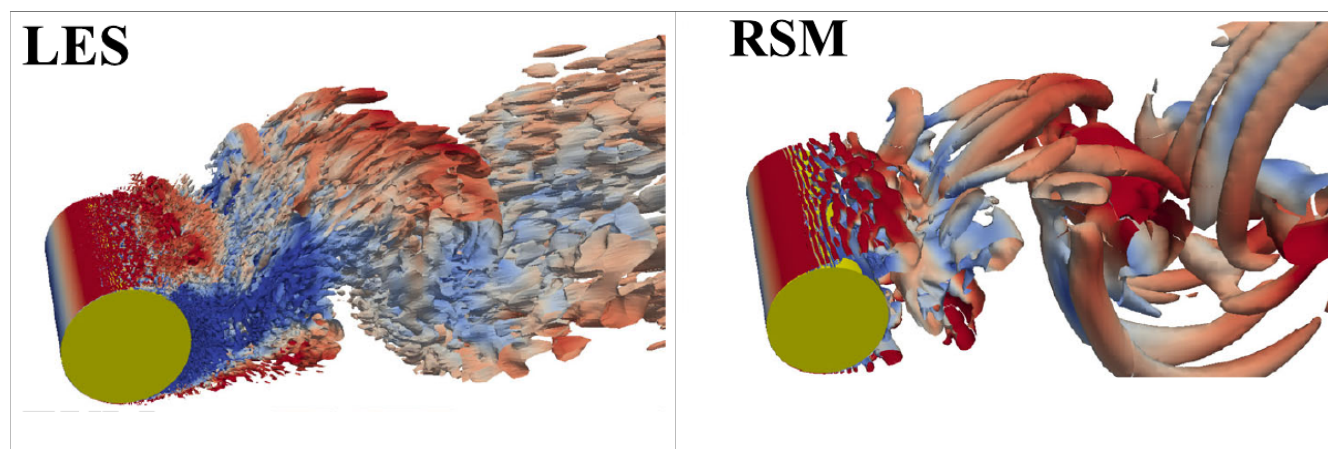


Рис. 1. Мгновенная реализация вихревой структуры потока, натекающего слева направо на длинный цилиндр (показан желтым цветом). Слева: расчет при помощи метода крупных вихрей (Large-eddy simulations, LES). Справа: расчет при помощи метода, основанного на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS). На рисунке показаны изоповерхности Q-критерия, окрашенного величиной мгновенной продольной скорости.

2. *Современное состояние проблемы.* Существует распространенное мнение, что RANS-модели неспособны аккуратно предсказывать характеристики турбулентных потоков с существенной областью отрыва. Это мнение, в основном, опирается на концептуальные недостатки, связанные с подходом осреднения по Рейнольдсу, а также на опыт использования линейных моделей, основанных на турбулентной вязкости. Однако, примеры использования моделей более высокого порядка замыкания указывают на то, что URANS может достаточно точно предсказывать результат даже для самых сложных случаев и представляет определенный интерес как минимум для промышленных приложений. Это было продемонстрировано для некоторых достаточно общих конфигураций, например, для пульсирующей струи (Carpy et al. 2006), течения за уступом (Fadai-Ghotbi et al. 2008), для задачи обтекания массива труб (сборки) (Benhamadouche et al. 2004) и некоторых других. Тем не менее, в литературе присутствует достаточно мало работ, анализирующих ограничения и причины неудач RANS-моделей, так же как и отвечающих почему некоторые модели хорошо воспроизводят экспериментальные данные в той или иной ситуации. Поскольку подход RANS скорее всего останется основным инструментом инженерных численных исследований (Slotnick et al. 2014) (в различных комбинациях с LES), требуется дальнейшее более глубокое изучение особенностей используемых RANS-моделей. Этот как раз тот случай, когда исследуются достаточно сложные отрывные течения при высоких числах Рейнольдса, для которых использование метода крупных вихрей оказывается непрактичным. В данном проекте показано, что вполне достаточно использовать модели турбулентности, основанные на замыкании уравнений Рейнольдса второго порядка, чтобы аккуратно предсказывать ламинарно-турбулентный переход и дальнейшее развитие гидродинамических неустойчивостей в слое смещения, что особенно критично для аккуратного предсказания динамики и характеристик отрывной зоны.

3. *Описание работы, включая используемые алгоритмы.* Для численного решения уравнений Навье-Стокса в рамках подхода LES и URANS используется метод конечных объемов, при котором расчетная область разбивается на подобъемы (контрольные объемы). Транспортные дифференциальные уравнения интегрируются по объему для каждого контрольного объема, при этом дивергентные слагаемые переписываются как интегралы по поверхности. Дискретизация по времени и пространству имеет второй порядок точности. Поле скорости и давление связываются процедурой SIMPLE.

4. *Результаты.* На рис. 2 показана эволюция во времени коэффициента сопротивления и подъемной силы, которая демонстрирует характерный периодический процесс сноса вихрей, а также наличие низкочастотных модуляций. Несмотря на то, что в данной задаче обтекания крупномасштабные пульсации происходят с явно выраженной частотой, период между отрывом вихрей и их амплитуда может немного зависеть от времени. Прямой расчет интервалов времени между максимальными/минимальными значениями C_L подтверждает необходимость применения процедуры условного осреднения, основанного на поведении во времени некоторой реперной величины.

С использованием тройной декомпозиции и условного осреднения в уравнениях Навье-Стокса появляются несколько дополнительных слагаемых, а именно, напряжения Леонарда, смешанные корреляции и напряжения Рейнольдса. Ненулевые значения напряжений Леонарда тем не менее малы по сравнению с остальными слагаемыми. Смешанные корреляции представляют собой корреляции между когерентной и стохастической частью пульсаций скорости. RANS-модель описывает только стохастическую часть, в то время как когерентные пульсации автоматически разрешаются при решении URANS-уравнений. Однако, смешанные корреляции не могут быть

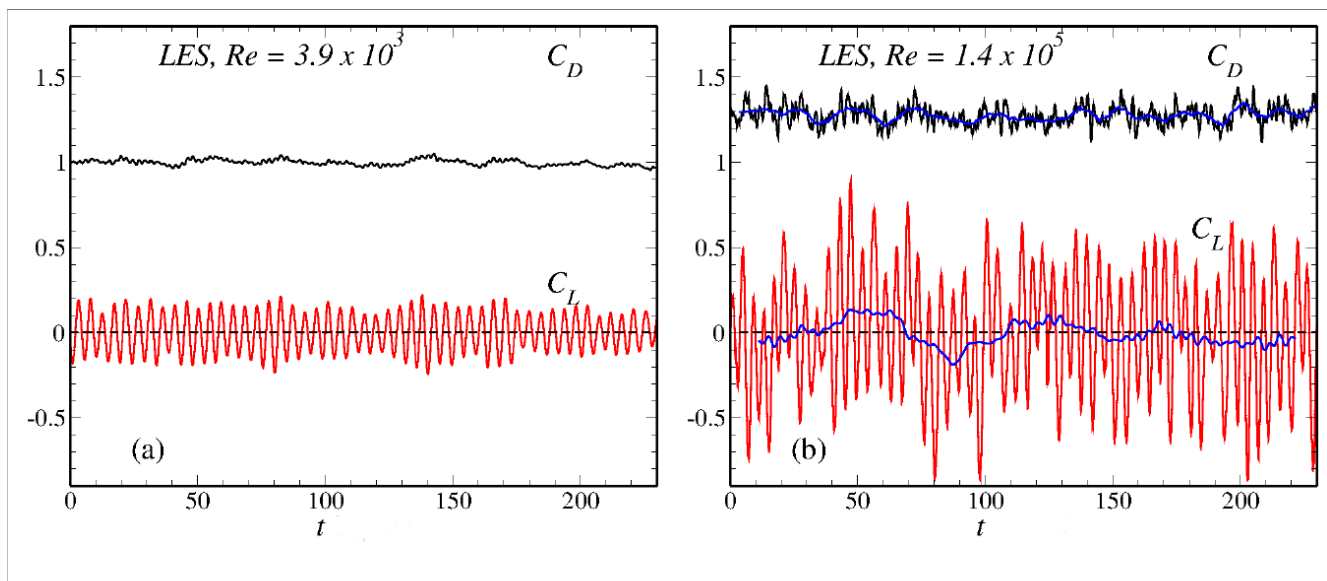


Рис. 2. Поведение коэффициента сопротивления (C_D) и подъемной силы (C_L) из LES-расчета для двух чисел Рейнольдса. Слева: $Re=3900$. Справа: $Re=140000$. Синие линии на правом графике соответствуют локально осредненным по некоторому интервалу времени значениям для выявления низкочастотных пульсаций C_D и C_L

получены из URANS, поскольку мгновенные данные о стохастических флуктуациях не восстанавливаются в этом методе. Для того, чтобы сделать оценку роли смешанных корреляций и справедливости подхода URANS сравниваются когерентные, стохастические и смешанные корреляции. Данные результаты получены в ходе обработки результатов LES-расчета и из экспериментов Кантвелла и Коулза (Cantwell & Coles, 1983). Когерентная и стохастическая части высчитываются при помощи процедуры условного осреднения и мгновенного сигнала C_L , после этого рассчитываются смешанные корреляции. Моделируемая часть спектра в LES не учитывается при расчете, поскольку является пренебрежимо малой для $Re=3900$ и используемого пространственного разрешения, а также несущественной для $Re=140000$. Неучет подсеточных напряжений только усиливает выводы по поводу малой величины отношения смешанных и стохастических корреляций.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Для расчета данной задачи необходимо использовать параллельные технологии (MPI). Соответствующие уравнения решаются на вычислительных машинах ИВЦ НГУ, используя одновременно 48 ядер. На персональном компьютере подобные вычисления невозможны также из-за достаточно высокого требования оперативной памяти.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы:

1. E. Palkin, R. Mullyadzhanov, M. Hadziabdic, K. Hanjalic. Scrutinizing URANS in shedding flows: The case of cylinder in cross-flow in the subcritical regime // *Flow, Turbulence and Combustion* 97 (4), 1017-1046, 2016.
2. E. Palkin, R. Mullyadzhanov, M. Hadziabdic, K. Hanjalic. Scrutinizing URANS models in shedding flows: The case of the cylinder in cross flow // *Proc. of 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia & Herzegovina, September 15-18, 2015*, 14 p.
3. E. Palkin, R. Mullyadzhanov, K. Hanjalic. URANS and LES of a flow over a cylinder at $Re = 3900$ // *Proc. of 17th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia, June 30-July 6, 2014*, 9 p.