

УДК 532 : 519.6

Г.Г. ЕНИКЕЕВ, М.А. ФАТХЛИСЛАМОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия

ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ПРОСТОЙ ФОРМЫ ВЯЗКИМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Рассмотрена задача обтекания кругового цилиндра бесконечной длины потоком вязкой жидкости. Решение выполнено численным методом конечных объемов с помощью программного продукта «Flow vision». Получены линии тока, поля скоростей, распределение температуры и давления в расчетной области. Решения получены для различных чисел Рейнольдса. Получено удовлетворительное совпадение картины обтекания с результатами экспериментальных исследований.

цилиндр, вязкий поток, дорожка Кармана, верификация

Введение

В механике жидкости и газа многие исследователи обращались к задаче обтекания цилиндра. Цилиндр – плохо обтекаемое тело, обладающее осевой симметрией и очень часто встречающееся в различных областях техники. Найдено множество решений движения жидкости при обтекании цилиндра. Решения получены различными методами: экспериментальными, аналитическими, вычислительными. Тем не менее, остались нерешенными ряд проблем связанных с нестационарными процессами, различным масштабом турбулентности в основном потоке и в следе. Поэтому авторы обратились именно к задаче обтекания цилиндра, для верификации программного продукта «Flow vision». Кроме того, решение задачи отрывного обтекания цилиндра потоком вязкой, жидкости представляет самостоятельный интерес для решения задач гидромеханики и для приложений в гидравлике, гидромеханике, механике многофазных сред, теплотехнике. Высокопроизводительная вычислительная техника сделала возможным моделирование весьма сложных явлений и процессов в гидромеханике. Имеющиеся программные продукты, позволяют решать множество прикладных задач гидромеханики численными метода-

ми. Например, StarCD, FlowVision, Flower и др. Функциональные возможности каждого пакета индивидуальные, что в первую очередь связано с математическими моделями, используемыми в каждом из пакетов, различной конфигурацией сеток (прямоугольная, треугольная, сетки сложной формы), различными возможностями генерации сеток и связанные с этим точность решения и использование ресурсов машинного времени. Поэтому является актуальным верификация пакетов прикладных программ на задачах, которые можно назвать классическими и для которых существует множество решений для широкого диапазона изменения параметров.

1. Формулирование проблемы

При поперечном обтекании цилиндра реальным потоком жидкости при определенных условиях возникают отрывные течения с образованием следа со сложной вихревой структурой. Решение задачи без вихревого, без циркуляционного обтекания круглого цилиндра идеальной несжимаемой жидкостью [1] не дает представления о реальной картине течения. Благодаря наличию в реальных жидкостях внутреннего трения указанное решение не совпадает с результатами экспериментальных исследований.

Множество работ посвящено решению задач обтекания цилиндра реальным потоком. Решение указанных задач нашли отражение в работах [2 – 5 и др.]. Подходы и методы решения отличаются друг от друга. Например, для решения задач отрывного обтекания кругового цилиндра и исследованию турбулентного следа за ним использовались модели на основе нестационарных уравнений идеальной среды [2, 5, 9]. Другой подход реализован в работах [4, 6 – 8 и др.], где численными методами решаются полные уравнения Навье-Стокса.

Возросшие возможности вычислительной техники позволяют использовать новые подходы к решению задач гидромеханики. Использование программных продуктов для решения задач сопряжено с вопросами адекватности математических моделей реальным течениям, наблюдаемым в практике. Поэтому пользователю программного продукта при решении конкретной задачи требуется проявление большого искусства и интуиции для достижения поставленной цели. Авторы ставили перед собой задачу воспроизведения характерных картин обтекания цилиндра при различных условиях. Кроме того, сделана попытка количественной оценки характерных для обтекания кругового цилиндра величин, таких как коэффициент сопротивления и коэффициент давления. Проблема численного решения задачи обтекания цилиндра заключается в том, что в следе вниз по потоку наблюдается крупномасштабная турбулентность, в то время как в ядре потока может наблюдаться ламинарный поток или турбулентный, но с масштабом турбулентности, отличающимся от масштаба турбулентности в следе. Вычислительный алгоритм должен быть построен таким образом, чтобы учесть это обстоятельство. Кроме того, обычно визуализацию картины течения представляют в двумерных координатах, в то время

как при отрывных явлениях возникает пространственный вихрь, и постановка осесимметричной задачи может быть не корректной.

Общие соотношения для ламинарного и турбулентного режимов обтекания цилиндра. В математическую модель обтекания цилиндра вязкой жидкостью для ламинарного режима входят уравнения Навье-Стокса, расхода, энергии. Для турбулентного режима обтекания добавляются уравнения модели турбулентности [10]. Кроме того, при решении конкретной задачи вводятся исходные данные и граничные условия [10].

2. Решение проблемы

Расчетная область сформирована в среде «Solid Works 2007». Диаметр цилиндра принят 0,025 м. Цилиндр расположен в параллелепипеде с размерами 0,3 м × 0,05 м × 0,01 м. Трехмерная область экспортирована в препроцессор «Flow Vision».

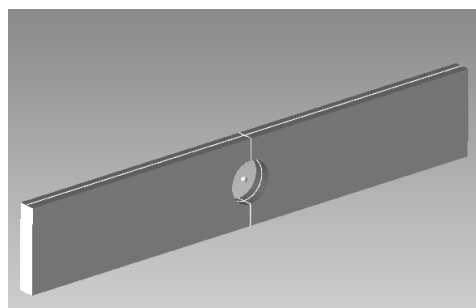


Рис. 1. Область расчета с цилиндром – обтекаемое тело

Решение задачи осуществлялось с использованием версии 2.3.3. Предельное число ячеек составляло 50000. Расчет производился в диапазоне чисел Рейнольдса $300 \div 1 \times 10^6$. Решение задачи для числа $Re = 300$ было выполнено с использованием ламинарной модели. На входной границе расчетной области скорости потока были заданы с равномерной эпюрой. На боковых поверхностях параллелепипеда было задано граничное условие – стенка с проскаль-

зыванием. На выходе из расчетной области было задано условие с проскальзыванием. В ядре потока было принято стационарное течение.

Была принята начальная сетка $150 \times 50 \times 1$ с адаптацией второго уровня по поверхности цилиндра

Число расчетных ячеек составило 10356. Явный шаг по времени 0,5. Неявный шаг по времени задан равным 100. Максимальный шаг по времени 10.

Решение задачи показано на рис. 2 – 5. Линии тока (рис. 2) показывают отрыв потока на поверхности цилиндра и образование вихревого следа. Картина наглядная и хорошо согласуется с представлением об образовании вихревого следа – дорожки Кармана (рис. 3) [7].

На рис. 4 показаны результаты расчета полного давления в расчетной области. В результате срыва потока с поверхности цилиндра и образования вих-

ревой структуры в следе происходит перераспределение энергии и как следствие нарушение равномерного поля полного давления.

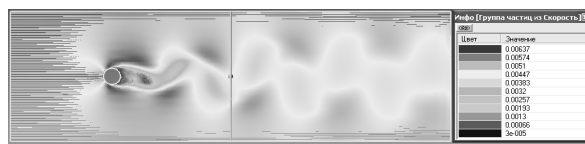


Рис. 2. Линии тока, $Re = 300$

Следует отметить, что в вихревой дорожке параметры потока нестационарные. Об этом свидетельствует серия снимков выполненных в разное время расчета. Эти снимки изображены на рис. 5.

Снимки не претендуют на точное совпадение картины срывного обтекания цилиндра вязким потоком, но в тоже время отражают нестационарный характер течения в следе.



Рис. 3. Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром [8]

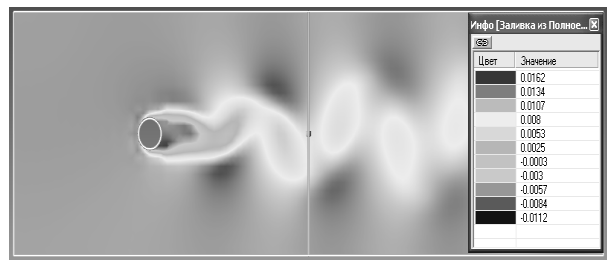


Рис. 4. Распределение полного давления в следе за цилиндром, $Re = 300$

Следующим шагом в выполненной работе явилась количественная оценка интегральных величин. В частности коэффициента сопротивления C_x . Коэффициент сопротивления вычисляется через вели-

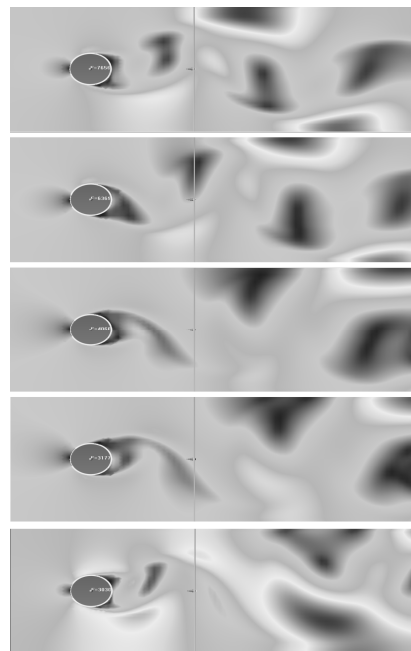


Рис. 5. Заливка из модуля скорости в зависимости от итераций

чину силы сопротивления по известной площади миделевого сечения цилиндра [10].

Результаты расчетов показали неудовлетворительную сходимость значений коэффициента со-

противления с экспериментом. Меньшее расхождение наблюдается в области малых чисел Рейнольдса и большее в области турбулентного режимов течения. Объясняется это, прежде всего, ограничением числа ячеек. Решение получается грубым и наблюдается сильная периодическая осцилляция сходимости, что затягивает время счета и не приводит к желаемым результатам. Второй не менее важной причиной является образование вихревой нестационарной структуры потока в следе при обтекании цилиндра вязким потоком со срывом, которая существенно отличается от структуры потока в ядре.

Заключение

Тела простой формы позволяют достаточно глубоко продемонстрировать с помощью программного продукта FlowVision все особенности обтекания на различных режимах.

Наглядно продемонстрировать отрывные явления при обтекании вязким потоком.

Но в тоже время существуют проблемы связанные с ограничением количества ячеек и разницей в структуре потока в ядре и в следе. Указанные проблемы позволяют не всегда получить количественный результат, удовлетворяющий по точности поставленным задачам.

Кроме того, отсутствует уверенность в правильном количественном решении поставленной задачи, если отсутствуют экспериментальные данные.

Литература

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

3. Бетчерол Дж. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 758 с.

4. Асимптотическая теория отрывных течений / Под ред. В.В. Сычева. – М.: Наука, 1987. – 255 с.

5. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К., Ништ М.И. Исследование на ЭВМ аэродинамики автомобилей, поездов и других транспортных средств // Промышленная аэродинамика. Аэродинамика лопаточных машин, каналов, струйных и отрывных течений: Сб. статей. – М.: Машиностроение, 1991. – Вып. 4 (36). – С. 5-42.

6. Чжен П. Отрывные течения. – М.: Мир, 1972. – Т. 1. – 293 с; – Т. 2. – 280 с.

7. Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Четкин В.М. Турбулентность. Новые подходы. – М.: Наука. – 2002. – 286 с.

8. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 181 с.

9. Белоцерковский О.М. Численные модели срыва // Проблемы турбулентных течений: Сб. статей. – М.: Наука, 1987. – С. 32-56.

10. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.3.3. Руководство пользователя. – М.: ООО «ТЕСИС», 2007. – 298 с.

Поступила в редакцию 30.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.М. Цирельман, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.