

12, декабрь 2015

УДК 004.942

**Экспериментальное исследование и моделирование вихревых дорожек,
возникающих при обтекании тел различных форм**

*Мельникова В.Г., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Аэрокосмические системы»*

*Коцур О.С., аспирант
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Аэрокосмические системы»*

*Научный руководитель: Щеглов Г.А., д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Аэрокосмические системы»
kafsm2@sm.bmstu.ru*

Введение

При обтекании крупногабаритных конструкций потоком воздуха или жидкости при определенных условиях в следе сечения возможно формирование вихревых структур. Они известны под названием дорожки Кармана. Природа таких дорожек заключается в периодическом сходе вихрей с поверхности тела, что проявляется в возникновении нестационарной периодической силы, действующей на конструкцию, и зависящей от параметров течения, числа Рейнольдса, и геометрии тела. Крупномасштабные срывы вихрей могут представлять серьезную техническую проблему из-за опасности разрушения конструкций, подверженных ветровой нагрузке. Примером катастрофических последствий данного явления служит разрушение в 1965 г. трех из восьми градирен электростанции в Англии из-за срыва вихрей, вызванного ветром со скоростью 130 км/час. Еще одним известным примером эффекта автоколебаний, произошедших вследствие захвата частоты, является разрушение Такоумского моста в США в 1940 г.

Актуальной задачей является умение достоверно моделировать аэродинамическую нагрузку, возникающую в процессе функционирования сооружения. Однако тяжело оценить правильность и эффективность выбранной методики расчета при анализе таких сложных конструкций, как мосты, башни и другие инженерные сооружения. Простым и эффективным критерием достоверности при этом может служить сравнение

результатов расчета некоторой тестовой задачи с результатами эксперимента. Выбор такой задачи должен отвечать требованиям универсальности и простоты для проведения численного моделирования и натурального эксперимента.

В качестве подобной тестовой задачи предлагается исследование режимов вихреобразования при обтекании моделей самых простых форм в малом диапазоне чисел Рейнольдса. Исследование проведено в формате натурального эксперимента и численного моделирования в пакете SolidWorksFlowSimulation, обладающим наглядностью и простотой использования. Целью работы является сравнение размеров, расположения и интенсивности отошедших вихревых структур, частоты их схода с поверхности, а также определение интенсивности силовой нагрузки на исследуемые тела со стороны жидкости. По результатам сравнения делается вывод об эффективности пакетаFlowSimulation для решения описанных задач.

В качестве модельных тел в данной работе выбраны круговой цилиндр с диаметром сечения 10 мм и прямоугольный параллелепипед с сечением 30x50 мм (рис. 1). Тела обтекаются потоком воздуха при различных малых числах Рейнольдса в ламинарном режиме.

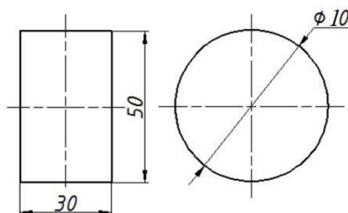


Рис. 1. Сечения исследуемых тел

Численное моделирование

Течение воздуха считается ламинарным, плоскопараллельным нестационарным. Обтекание производится в диапазоне малых дозвуковых скоростей, поэтому сжимаемость воздуха не учитывается, плотность воздуха принимается постоянной, учитывается вязкость. Движение воздуха, с учетом сделанных допущений, описывается системой уравнений Навье-Стокса, состоящих из уравнения неразрывности (1) и уравнения движения (2):

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} * \operatorname{grad}(p) + \nu * \Delta \vec{v}, \quad (2)$$

где \vec{v} – поле скоростей течения среды, ρ – плотность, p – давление, ν – кинематическая вязкость среды, \vec{f} – объемные силы.

Вязкость среды принималась равной $1.51 \cdot 10^{-5}$ м²/с (для 20 °С), плотность – 1.204 кг/м³. В качестве начальных условий варьировалась скорость набегающего потока в соответствии с числом Re , при котором проводился расчет. Влияние сил тяжести в расчете не учитывалось.

Моделирование обтекания производилось в программе SolidWorksFlowSimulation, которая для решения уравнений (1) и (2) использует сеточный метод контрольного объема. Положение точек, в которых будут рассчитаны параметры потока, определяется расчетной сеткой, разбивающей область течения на конечное число контрольных объемов [1]. Для каждого контрольного объема составляются законы сохранения массы (1) и количества движения (2) в интегральной форме. Дискретизация этих уравнений для каждого контрольного объема приводит к системе линейных алгебраических уравнений, далее решаемых программой.

В исследуемой модели используется расчетная область прямоугольной формы (для цилиндра 300x200 мм, для параллелепипеда 900x600 мм), что составляет 10 характерных диаметров перед телом, сверху и снизу тела и 20 диаметров за ним (рис. 2). Размеры расчетной области были взяты таким образом, чтобы конечные размеры сетки и граничные условия не оказывали влияние на результаты расчета. Очень важное значение имеет определение течения в пограничном слое на поверхности тела. От этого зависит обтекание тела в целом и распределение по нему давления. А так как установлено, что над поверхностью скорость потока имеет значительный поперечный градиент от 0 до скорости во внешнем не вязком потоке, то необходимо значительно уточнять сетку, мельчить ее в зоне пограничного слоя, для того чтобы уменьшить погрешность аппроксимации уравнений Навье-Стокса на сетке. Также сетка разрешена более точно в области следа за телом. В результате, по степени разрешения сетка разделена на 4 домена. Ячейки, принадлежащие каждому последующему уровню, имеют размер в два раза меньше, чем ячейки в предыдущем уровне. Общее количество ячеек для цилиндра – 579710, для параллелепипеда – 177640.

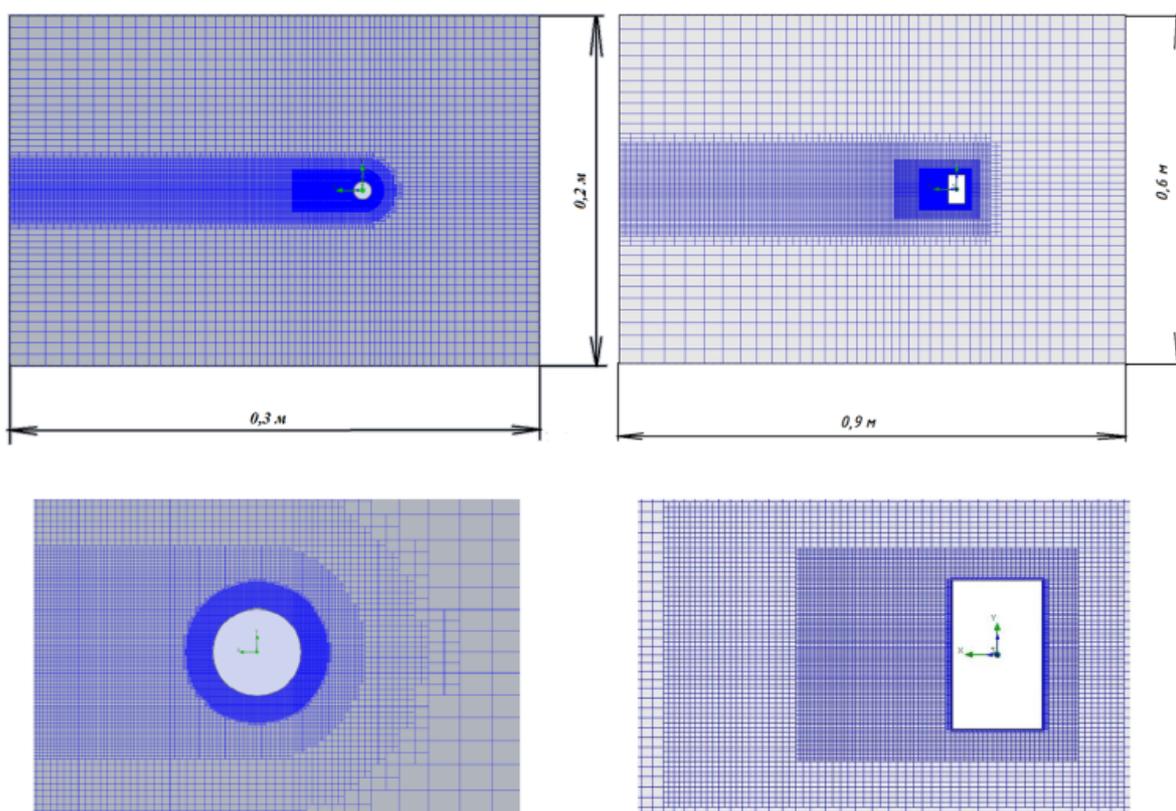


Рис. 2. Общий вид расчетных доменов для цилиндра (слева) и для параллелепипеда (справа)

Анализ полученных результатов

Численное моделирование обтекания цилиндра проводилось для четырех чисел Рейнольдса (159, 259, 332 и 544). Известно, что при таких числах Рейнольдса за цилиндром развивается устойчивая вихревая дорожка [2]. Моменты времени, для которых проводились расчеты, подбирались таким образом, чтобы полностью охватить несколько установившихся циклов схода вихрей. Графики изменения по времени коэффициента лобового сопротивления C_x для цилиндра приведены на рис. 3, коэффициента подъемной силы C_y – на рис. 4. Для всех проведенных численных экспериментов установлено, что процесс с течением времени приобретает четкий периодический характер, причем чем больше число Рейнольдса, тем больше частота колебаний аэродинамической силы, соответственно и частота схода вихря. При этом частота колебаний силы лобового сопротивления в два раза больше чем подъемной силы.

Схожие результаты наблюдались и для параллелепипеда. Его острые кромки - углы являются фиксированным местом отрыва потока и генерации завихренности. На рисунке 5 показаны графики изменения коэффициентов C_x и C_y для течений с $Re = 1660$ и $Re = 3320$. Из-за неправильной формы дорожка вихрей и вообще картина течения

оказываются нерегулярными (рис. 6, 7), что сказывается на ломаном характере графиков зависимости аэродинамических коэффициентов сил от времени.

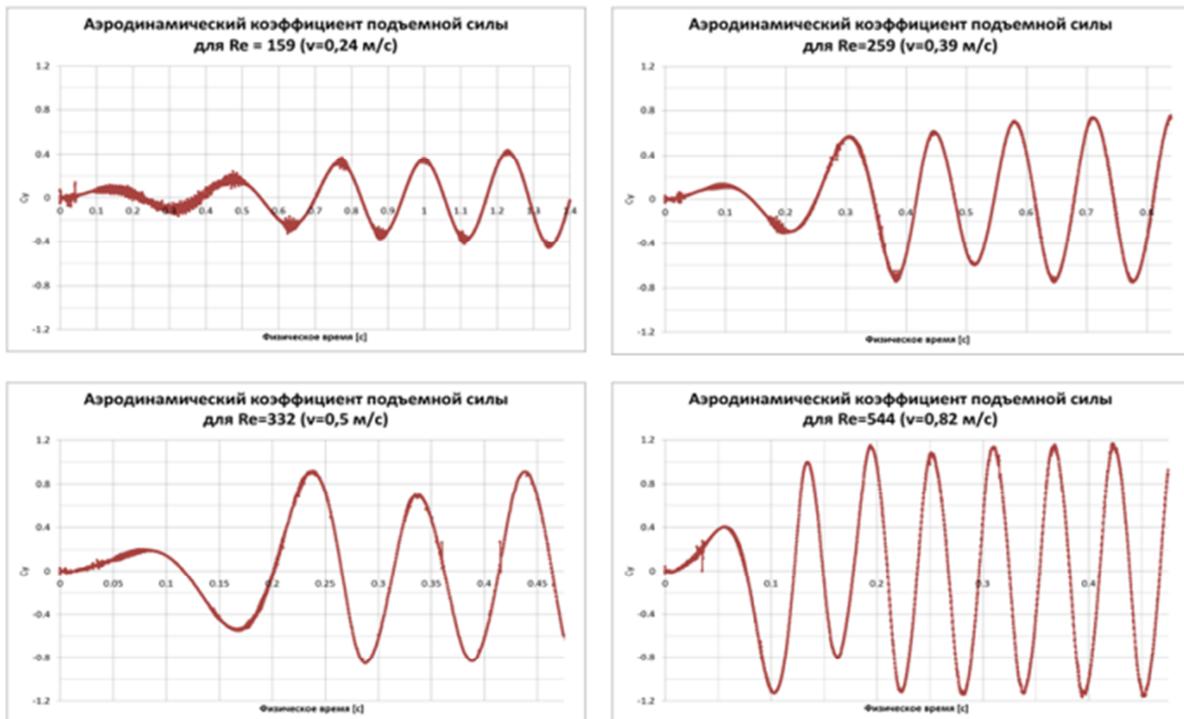


Рис. 3. Зависимость коэффициента C_y для цилиндра от времени для различных Re

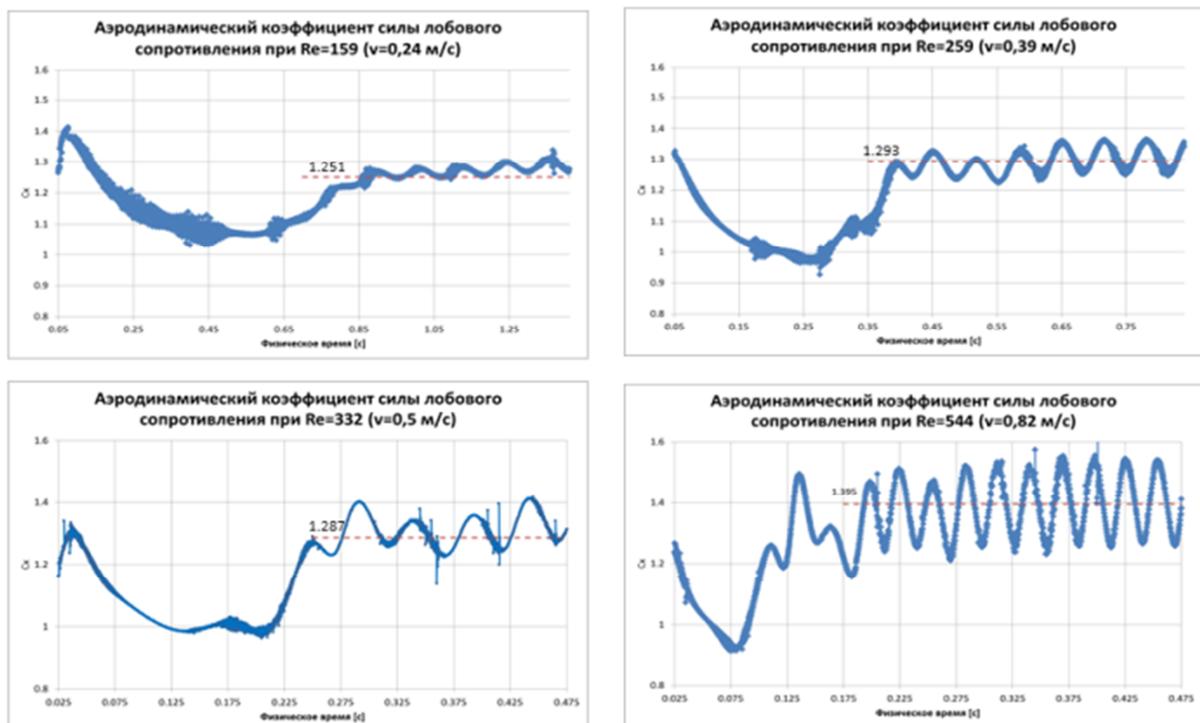


Рис. 4. Зависимость коэффициента C_x для цилиндра от времени для различных Re

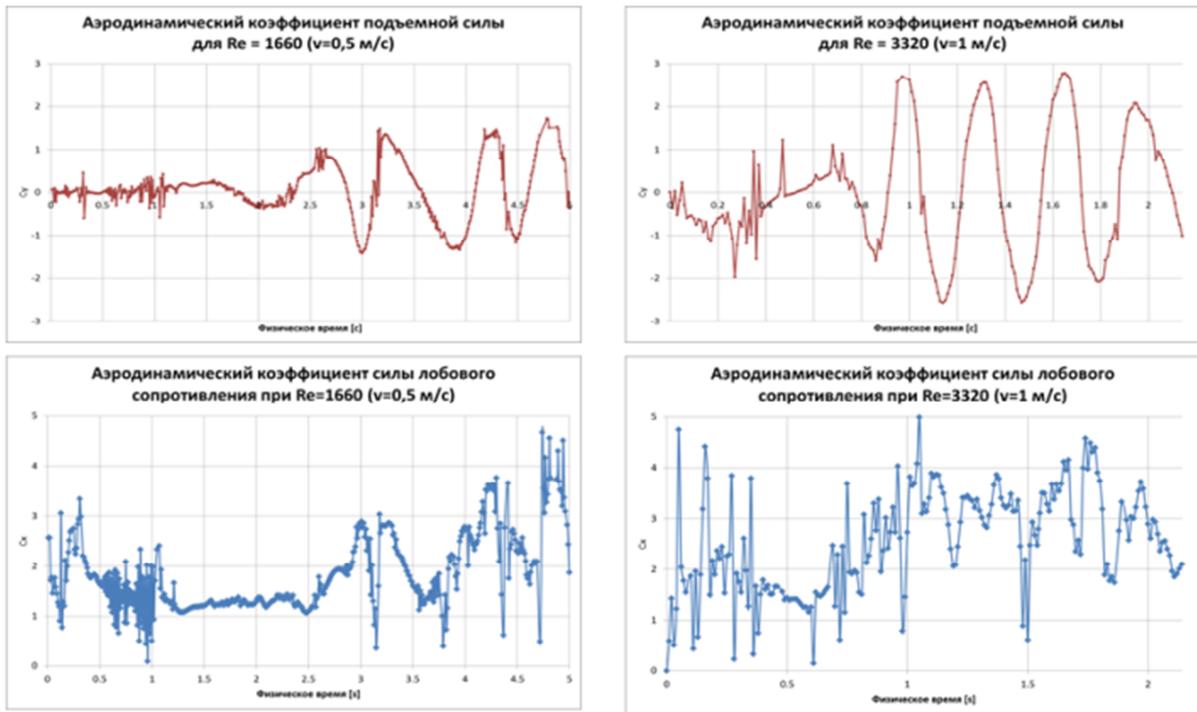


Рис. 5. Зависимость C_x и C_y для параллелепипеда от времени для различных Re

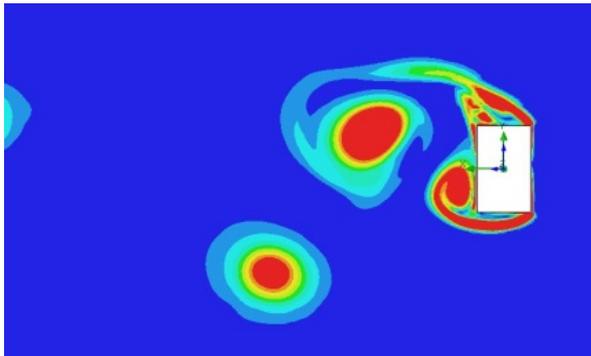


Рис. 6. Картина течения вокруг параллелепипеда ($Re = 1660$)

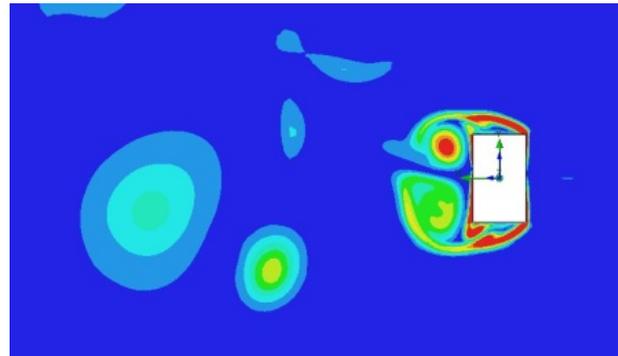


Рис. 7. Картина течения вокруг параллелепипеда ($Re = 3320$)

Проверка правильности модели

Для проверки правильности созданной модели проводилось сравнение результатов, полученных для цилиндра, с проведенным экспериментом и с имеющимися в литературесправочными данными. Сопоставление происходило по следующим параметрам: средние значения аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления и подъемной силы C_{x_a}, C_{y_a} ¹, число Струхала, частота схода вихрей и

¹Индекс «a» обозначает скоростную систему координат. В данном случае скоростная и связанная системы координат совпадают, поэтому в дальнейшем индекс «a» для коэффициентов C_x, C_y опущен.

визуальная оценка наличия, расположения и размеров возникающих структур, а также их эволюция.

Описание эксперимента

Эксперимент проводился с использованием технологии трассерной визуализации потока (PIV). В исследуемый поток жидкой среды (воздуха) добавляется взвесь мелких частиц-трассеров аэрозоля диаметром порядка 10 мкм, которые увлекаются воздухом и движутся вместе с ним. Импульсный лазер создает тонкий световой нож, который освещает частицы. Положения трассеров в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Таким образом, полученные два последовательных снимка содержат информацию о перемещениях освещенных частиц вместе с жидкостью. Поле перемещений в исследуемой зоне можно восстановить с помощью последующей статистической обработки данных снимков. Подробное описание данной технологии можно найти в [3]. Поле скоростей потока легко вычисляется по полю перемещения, при известном интервале между двумя последовательными лазерными импульсами.

На рисунке 8 приведена схема экспериментальной установки. Основными компонентами системы PIV являются двухимпульсный лазер, оптическая система для формирования лазерного ножа, камера с двойным затвором, система подачи аэрозоля. Для направления луча в нужную сторону используется зеркало.

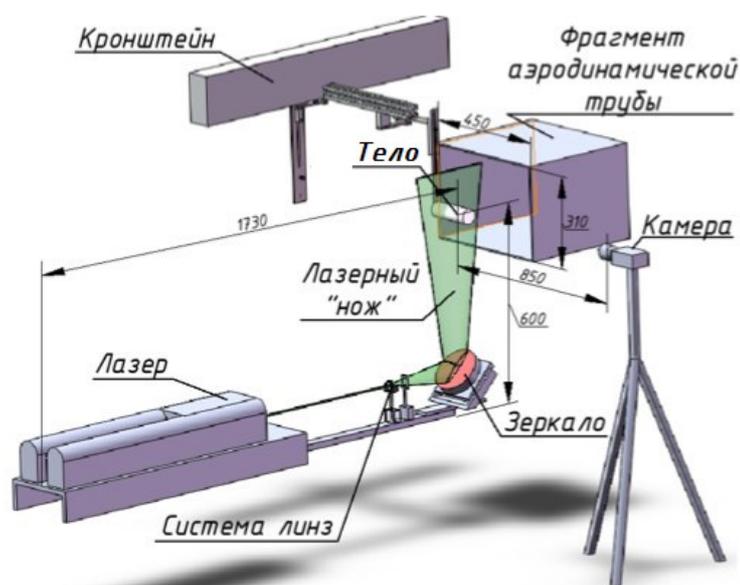


Рис. 8. Схема экспериментальной установки PIV

Обработка полученных кадров происходила в свободной программе с открытым кодом PIVlab. Препроцессорная обработка снимка заключалась в нанесении маски на ту область снимка, где нет частиц. Такой зоной является само тело и область тени за телом. Затем программа, используя статистические алгоритмы кросс-корреляции[3], вычисляет векторное поле скоростей. В процессе обработки очень часто можно получить ошибочные вектора (например, в плохо освещённых зонах), которые нужно убрать с помощью постпроцессорной обработки. Полученное скорректированное поле скоростей далее обрабатывается для получения нужных результатов, в частности, поля завихренности.

Эксперимент проводился с обтеканием длинного цилиндра диаметром 10 мм в аэродинамической трубе потоком воздуха с взвесью частиц при нормальных условиях (20 °C). Течение вокруг длинного цилиндра при малых Re можно считать плоскопараллельным.

Сравнение результатов

В литературе хорошо исследован и описан процесс обтекания неподвижного кругового цилиндра [2]. Известно, что при очень малых числах Рейнольдса ($Re < 5$) за цилиндром не возникает вихревого движения, отрывных и застойных зон. Коэффициент сопротивления определяется в этом случае лишь трением жидкости о стенки. Далее при повышении критического числа Рейнольдса ($Re = 4-5$) возникает отрыв потока, и за цилиндром появляются два симметричных присоединенных вихря, что выражается в дополнительном сопротивлении течению. Течение при этом остается стационарным. При дальнейшем повышении числа Рейнольдса, течение становится нестационарным, а вихри, набрав некоторую критическую энергию, начинают попеременно отделяться от цилиндра и дальше двигаться по течению, образуя так называемую дорожку Кармана.

В расчете был смоделирован переходный процесс образования вихревой дорожки, а сравнение картин обтекания проводилось, когда дорожка Кармана была уже полностью развита. На рисунке 9 представлено сопоставление мгновенных полей завихренности полученных с помощью численного моделирования с результатом обработки эксперимента для разных скоростей набегающего потока. Из представленных картин обтекания видно, что несимметричные вихри, срывающиеся с задней поверхности цилиндра и распространяющиеся по потоку, имеют схожие размеры и расположения. Точное измерение координат центров вихрей показывает наибольшее несоответствие для случая $Re=544$: ошибка расстояния между ядрами вихрей двух смежных периодов составила 11% (при сравнении расчета с экспериментом).

Следует отметить, что погрешность при сравнении объясняется тем, что сложно подобрать точное совпадение фазы расположения несимметричных вихрей в следе цилиндра в расчете и эксперименте. Сопоставление картин обтекания в данном случае является лишь качественным критерием сходства.

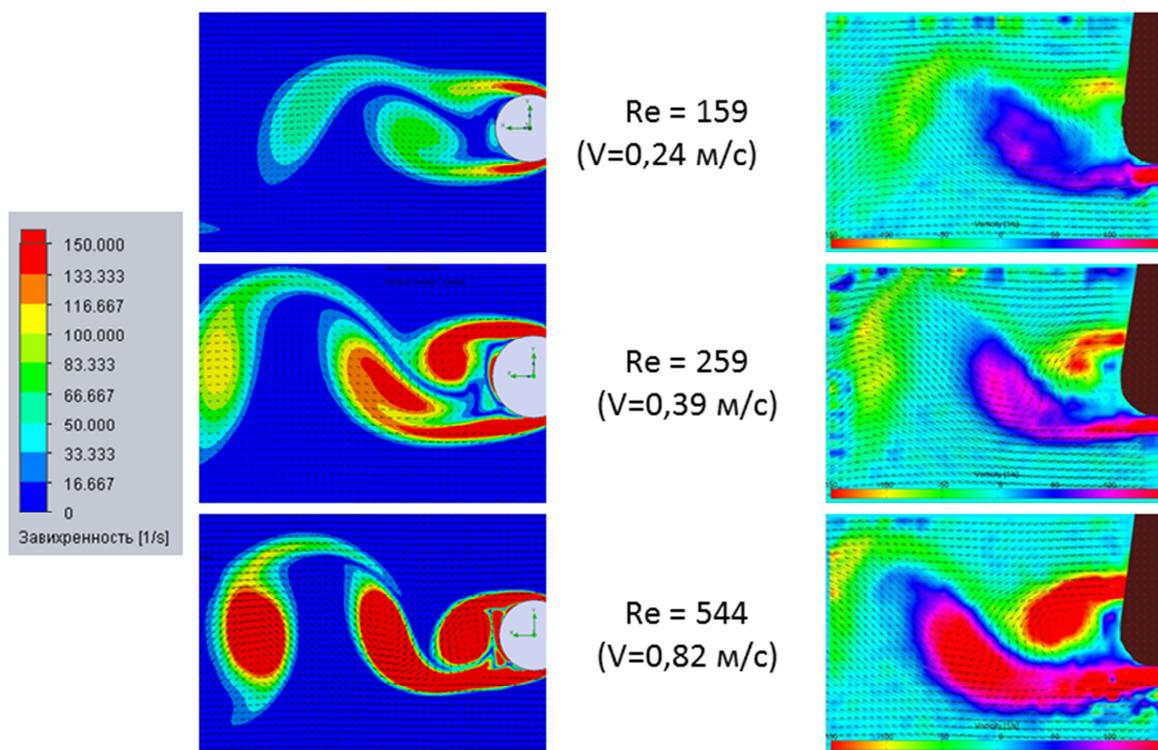


Рис. 9. Сравнение полей завихренности в следе цилиндра: левые слева – расчет в пакете FlowSimulation; справа – эксперимент

Более полезным критерием является частота схода вихрей, или число Струхалия (Sh), как безразмерный критерий частоты, а также среднее значение коэффициента лобового сопротивления (C_x).

Число Струхалия вычисляется из соотношения:

$$Sh = \frac{f * L_{\text{хар}}}{v_{\infty}},$$

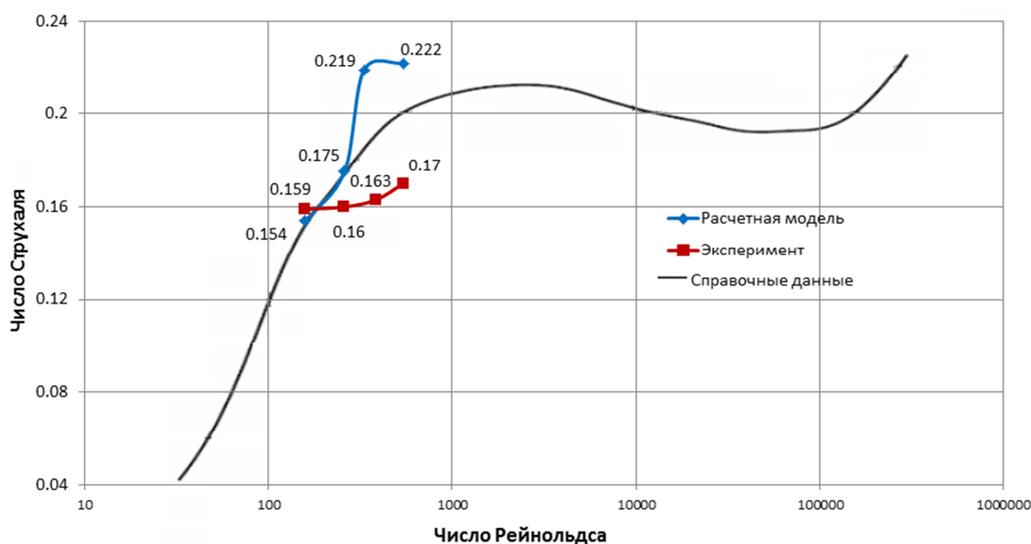
где f - частота схода вихрей, $L_{\text{хар}}$ - характерный размер (диаметр цилиндра, наибольший размер сечения параллелепипеда), v_{∞} - скорость набегающего потока. Для определения частоты схода вихрей использовалось исследование зависимости подъемной силы от времени. Анализ частот осуществлялся с помощью дискретного преобразования Фурье.

На рисунках 10, 11 приведены графики зависимости числа Sh и среднего значения аэродинамического коэффициента C_x от числа Рейнольдса.

Сравнение числа Sh проведено не только с экспериментом, но и со справочными данными, доступными в литературе [4, 5]. Отличие результатов эксперимента от справочных данных можно объяснить неточностями калибровки PIV-оборудования, а также пространственными особенностями течения - наличием конвективных потоков, которые оказывают влияние на течение при малых числах Рейнольдса (эксперимент проводился на открытом пространстве).

Наибольшая ошибка при сравнении расчетов со справочными данными для числа Струхала составила 22% (для $Re=332$); при сравнении эксперимента со справочными данными – 17%, притом, что в расчете вихри сходят с большей частотой, а в эксперименте с меньшей частотой по сравнению с табличными данными. Следует отметить также точное совпадение чисел Струхала для $Re = 159, 259$ (см. рис. 10).

Полученные результаты для коэффициента C_x оказались очень близкими при сравнении с известными данными о сопротивлении цилиндра [4] (наибольшая ошибка – 3%). Среднее значение числа C_x на исследуемом интервале чисел Рейнольдса составляет ~ 1.3 , что в точности ложится на кривую на рис. 11.



Справочные данные из: Фершинг Г. Основы аэроупругости. Москва: Машиностроение, 1984

Рис. 10. Сравнение числа Sh для цилиндра (эксперимент, расчет и справочные данные)

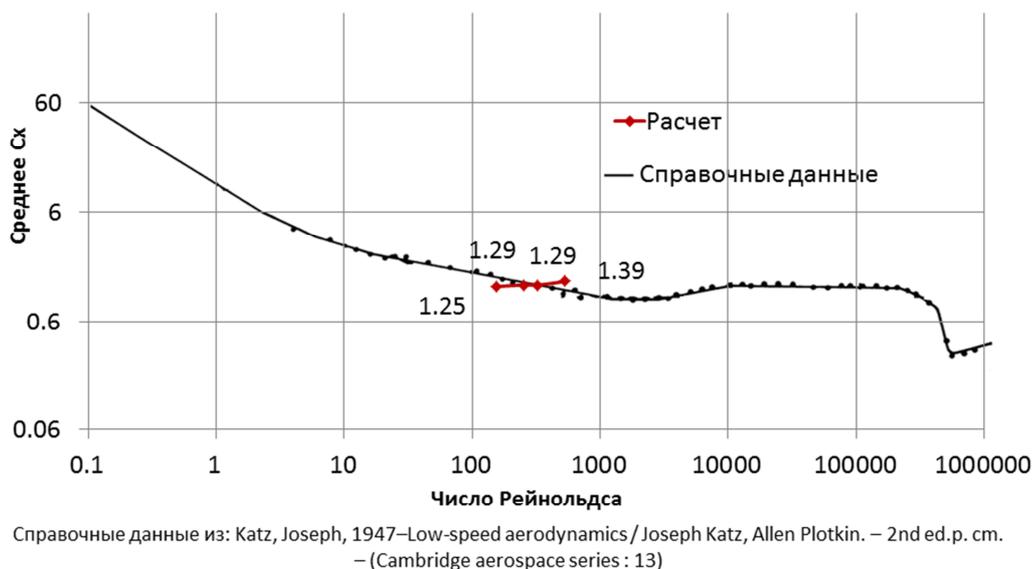


Рис. 11. Сравнение коэффициента C_x для цилиндра (расчет и справочные данные)

Заключение

Проведенные расчеты и анализ сравнения с экспериментом и справочными данными позволяют говорить о хорошем соответствии результатов моделирования с помощью выбранной расчетной модели в пакете SolidWorks Flow Simulation, представляющего простое инженерное средство для решения подобных задач. Выявлен характер внешней силы, возникающей при обтекании неподвижной конструкции двух характерных сечений (круг и прямоугольник). Используемая методика расчета включает в себя выбор расчетной модели и параметров расчетной схемы, таких как размеры и топология сеточного домена, места измельчения сетки, а также выбора метода контрольного объема как численного метода решения задачи гидродинамики. Верификацией для данной методики расчета служило сравнение с экспериментом таких параметров, как коэффициент C_x и безразмерная частота вихреобразования Sh .

Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения данной методики расчета и пакета Flow Simulation для исследования несжимаемых течений в окрестности плохообтекаемых тел, а также силовой нагрузки, которую создает течение на плохообтекаемое тело.

В качестве недостатка пакета следует отметить очень большое время счета, которое характерно для расчетных доменов с большим числом ячеек при использовании сеточных методов. В среднем, один расчет течения с заданным числом Рейнольдса занимал 3-4 дня на 8 ядрах Intel Core i7 3.3 ГГц в режиме «HyperThreading» до достижения установившегося режима.

Список литературы

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ./ под ред. В.Д. Виленского. М.: Энергоатомидат, 1984. 152 с. [S. Patankar Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.].
2. Альбом течений жидкости и газа: пер. с англ. / сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986. 184 с. [M. Van Dyke An album of fluid motion. Stanford, California: The parabolic press, 1982]
3. Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. 2nd ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007. 460 p.
4. ФершинГ. Основыаэроупругости/ подред. Г. М. Фомина. М.: Машиностроение, 1984.599 с.
5. Katz J., Plotkin A. Low-speedaerodynamics. Cambridgeaerospace series (No 13). 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2001. 613 p.