УДК 532.526.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ОВАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Жукова Ю.В.[1], Терех А.М.[2], Семеняко А.В.[2]

[1]*Институт тепло- и массообмена им.А.В.Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*
[2]*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина*

АННОТАЦИЯ

В представленной работе приведены результаты экспериментального и численного исследование аэродинамики одиночного овального цилиндра с отношением полуосей 1:1.425 в диапазоне чисел Рейнольдса от 4000 до 17000 в сравнении с одиночным круговым цилиндром.

ВВЕДЕНИЕ

Для экономии и рационального использования энергии важно применение эффективного теплообменного оборудования. В теплообменных аппаратах различных типов в качестве теплообменной поверхности наиболее широкое распространение получили трубы круглого сечения вследствие развитых технологий их изготовления, накопленных экспериментальных данных по локальным и интегральным аэрогидродинамическим характеристикам и теплообмену, а также вследствие полученных надежных расчетных зависимостей. Тенденции последнего времени по усовершенствованию поверхностей теплообмена связаны с интенсификацией теплообменных процессов, в том числе с установкой различных видов интенсификаторов (пластины, шероховатость и т.п.) и изменением геометрии теплообменной поверхности (например, трубы эллиптического сечения). Цилиндры овального сечения привлекают внимание исследователей низким аэродинамическим сопротивлением при достаточно большой поверхности теплообмена. Кроме того, развитие компьютерной техники и компьютерных технологий в последние десятилетия существенно расширились возможности моделирования и анализа прикладных задач отрывных течений.

ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуемые трубы (рис.1, *а*) были изготовлены из стали-20. Диаметр трубы круглого сечения – d = 0.02 м, для овальной трубы – d_1 = 0.02м и отношение диаметров составляло d_1/d_2= 1/1.425. Овальная труба была изготовлена из соответствующей круглой трубы на прессе путем протягивания трубы через специальные валки.

Исследование аэродинамического сопротивления овальной трубы и трубы круглого профиля при их поперечном обтекании воздушным потоком осуществлялись на экспериментальной установке (рис.1, *б*), которая представляла собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа прямоугольного сечения с размерами 0.07 м х 0.191 м с длиной прямого канала – 3.450 м. Для обеспечения в рабочем участке аэродинамической трубы скорости набегающего потока до 14-15 м/с устанавливались две боковые плавно спрофилированные вставки шириной 0.05 м каждая. Загромождение поперечного сечения рабочего участка аэродинамической трубы исследуемыми трубами составляло k_q = 0.22. В стенки прямого канала на расстоянии 0.5 м от заднего фланца, а перед трубой на расстоянии 0.2 м от переднего фланца рабочего участка впаяны по три штуцеры по ширине канала для отбора статического давления диаметром 1.5 мм. Через тройники к ним подсоединялся микроманометр, который использовался для отбора статического давления.

Для численного моделирования была осуществлена трехмерная постановка задачи. Геометрические размеры труб выбирались из условия согласования с экспериментом. Размеры расчетной области составляли 0.07 м х 0.071 м х 0.3 м. Расчет осуществлялся на неструктурированной пространственной сетке общей мощностью порядка 4.3 миллиона ячеек, состоящей из треугольных элементов на поверхности труб и тетрагексогональных и гибридных элементов для описания расчетной области. Расчетная сетка имела сгущения вблизи поверхности цилиндра, и размер расчетной ячейки увеличивался по направлению от объекта исследования к границам расчетной области. Подобный способ построения расчетной сетки позволил не только сгладить разброс по размерам элементов сетки, но и существенно уменьшить время ее создания.

© Жукова Ю.В., Терех А.М., Семеняко А.В.

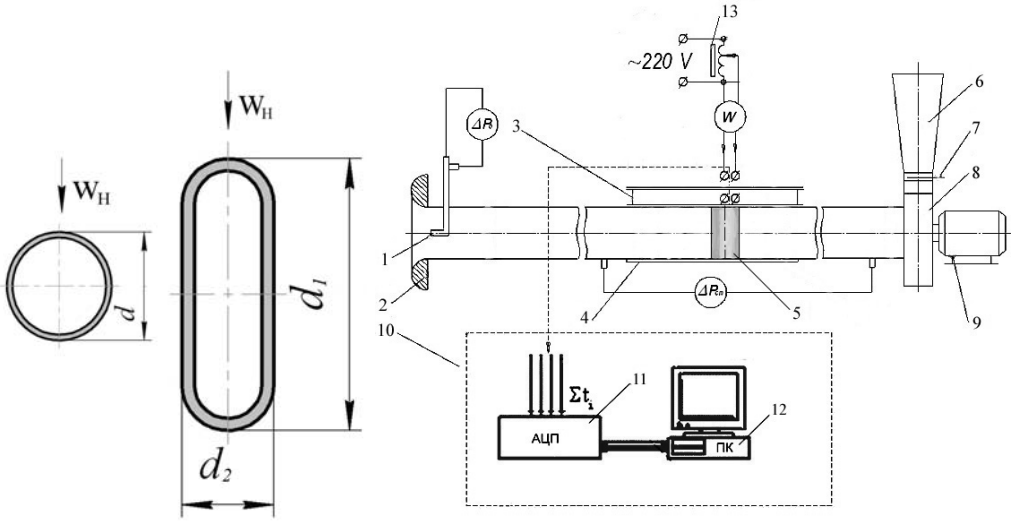

Рис.1. Объект исследования и схема экспериментальной установки: 1 – трубка Пито-Прандтля; 2 – входное сопло; прижимная рама; 4 – рабочий участок; 5 – трубка; 6 – выхлопной диффузор; 7 – шибер; 8 – вентилятор; 9 – электродвигатель; 10 – информационно-измерительная система; 11 – аналого-цифровой преобразователь; 12 – компьютер; 13 – автотрансформатор

Решались уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (уравнения Рейнольдса) и уравнение неразрывности [1-2]. Замыкание уравнений Рейнольдса осуществлялось на основе к-ω – модели сдвиговых напряжений Ментера в стандартной формулировке [1-2].

На входе в расчетную область задавались значения скорости набегающего потока U_0, а также уровень турбулентности Tu=5.5% и гидродинамический диаметр для согласования с результатами эксперимента. На выходе из расчетной области задавались мягкие граничные условия, то есть равенство нулю градиентов давления и скоростей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.2 представлены результаты численного моделирования аэродинамики, а также сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для числа Эйлера Eu. Как видно из представленных результатов для одиночного цилиндра, и численное моделирование, и эксперимент находятся в хорошем соответствии за исключением диапазона чисел Рейнольдса 4000–6000. Сравнения численного моделирования с результатами экспериментов Жукаускаса [3] показал несколько завышенные (до 10%) значения коэффициента полного сопротивления в диапазоне чисел Рейнольдса Re=4000–6000; в остальном исследуемом диапазоне расхождение с экспериментом [3] не превышало 7%. При сравнении результатов данного эксперимента и численного моделирования для овального цилиндра (рис.2 б), можно отметить, что характер изменения гидравлического сопротивления подобен, однако расхождение результатов составляет порядка 20%. Подобное расхождение (как в случае овального, так и в случае кругового цилиндра) может быть объяснено тем, что во-первых, при обработке результатов эксперимента оценки потерь на трение и местные сопротивления в проточной части стенда проведенные по расчетным зависимостям [4] имели тот же порядок что и измеряемые (довольно малые) величины потерь давления; во-вторых, измерение перепада статического давления в эксперименте (в отличие от численного моделирования) осуществлялось до и после боковых вставок рабочего участка аэродинамической трубы.

На рис.3 представлены зависимости коэффициент полного сопротивления C_x и коэффициента сопротивления трения C_f кругового и овального цилиндров в диапазоне чисел Рейнольдса от 4000 до 17000 (переходный режим в следе за цилиндром). Как показано в [3], коэффициент сопротивления трения C_f для круговых и эллиптических цилиндров составляет от 1 до 3% от величины коэффициента полного сопротивления C_x в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса. Таким образом, определяющим для полного сопротивления является коэффициент сопротивления давления (формы), который незначительно отличается по величине от коэффициента полного сопротивления. В связи с этим за-

висимость коэффициента сопротивления давления не приводилась. Как показано на рис.3, коэффициент полного сопротивления C_x падает с увеличением числа Рейнольдса и для овального, и для кругового цилиндров. Это, вероятнее всего, связано с уменьшением в размерах вихрей в следе за цилиндрами и сдвигом центра вихря вниз по потоку. Коэффициент сопротивления трения C_f овального цилиндра выше, чем кругового, что связано с тем фактом, что омываемый периметр овального цилиндра больше, чем у кругового.

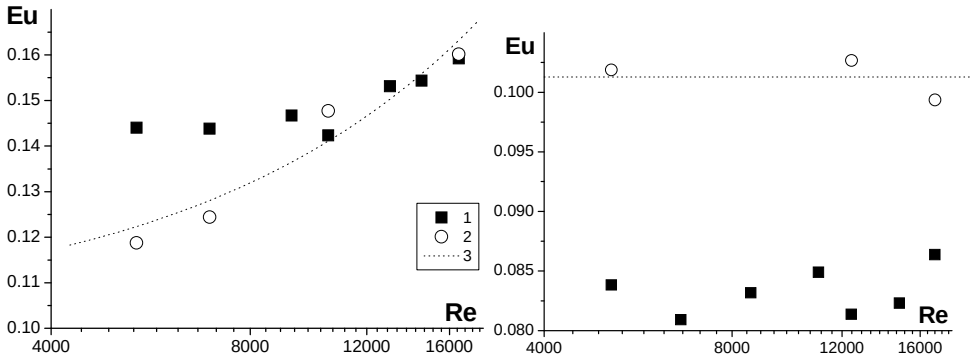

Рис.2. Гидравлическое сопротивление кругового и овального цилиндров в зависимости от числа Рейнольдса: 1 – эксперимент, 2 – численное моделирование, 3 – аппроксимация результатов численного моделирования

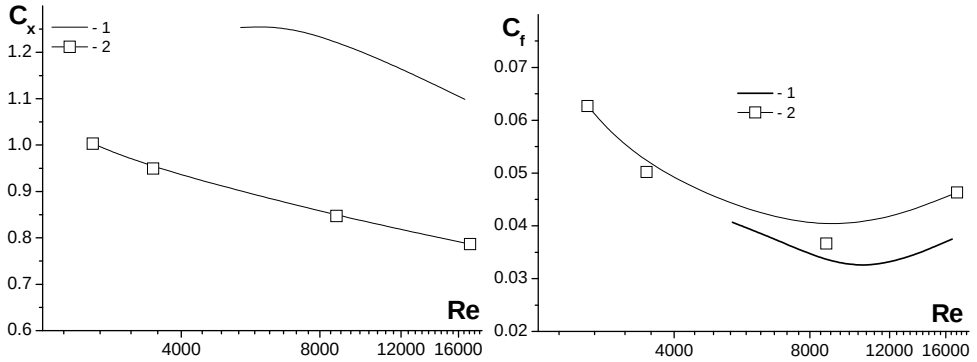

Рис.3. Зависимость коэффициентов полного сопротивления C_x и сопротивления трения C_f от числа Рейнольдса Re: 1 – круговой цилиндр, 2 – овальный цилиндр

Многие авторы, например [5-7], указывают на влияние следа за плохообтекаемым следом, и в частности за круговым цилиндром, на его полное сопротивление. Как представлено на рис.2 а, б, гидравлическое сопротивление овального цилиндра ниже, чем кругового цилиндра, что позволяет выдвинуть предположение о формировании на большем расстоянии от кормовой критической точки менее интенсивной вихревой системы за овальным цилиндром по сравнению с круговым цилиндром. Практически постоянное значение Eu для овального цилиндра может быть объяснено незначительной деформацией и незначительным смещением следа за овальным цилиндром с ростом числа Рейнольдса. Как показано на рис.4, вихри в следе за овальным цилиндром формируются ближе к кормовой критической точке и изменение безразмерной координаты центра вихря x/d с ростом числа Рейнольдса носит нелинейный характер. Необходимо отметить, что расстояние, соответствующее центру

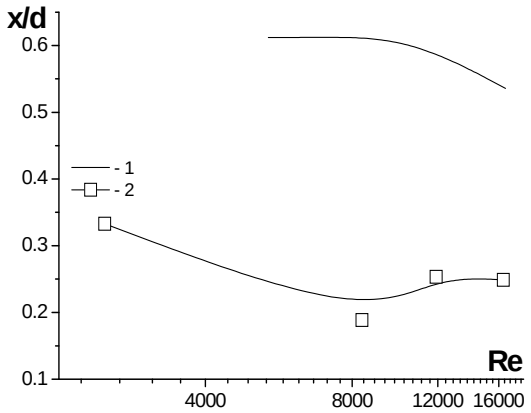

Рис.4. Зависимость координаты центра вихря от числа Рейнольдса: 1 – круговой цилиндр, 2 – овальный цилиндр

вихря, было обезразмерено на величину диаметра d для кругового цилиндра и на величину большой оси d_1 для овального цилиндра.

До Re=10^4 расстояние между центром вихря и кормовой критической точкой овального цилиндра уменьшается, то есть поперечный размер формирующегося вихря уменьшается. Далее центр вихря смещается вниз по потоку, вихрь увеличивается в размерах, а при Re>$1.2\cdot10^4$ поперечный размер вихря становится практически постоянным.

Как показано в [8], для одиночного кругового цилиндра для чисел Рейнольдса, соответствующих переходному режиму в следе за цилиндром, разрежение в кормовой части увеличивается, уровень рейнольдсовых напряжений увеличивается, число Струхаля постепенно уменьшается [6], длина формирования средней рециркуляционной зоны уменьшается (рис.4). Эти тенденции вызваны развитием нестабильности в пограничных слоях, отрывающихся поочередно с обеих сторон тела. В следе за круговым цилиндром образуются как трехмерные структуры с масштабом, равным размеру вихря оторвавшегося пограничного слоя, так и трехмерные структуры с масштабом, равным размеру вихрей Кармана.

На рис.5 представлены распределения коэффициентов давления $C_p = (p_i - p_0)/\rho U_0^2$ и коэффициента поверхностного трения $C_f = 2\tau/\rho U_0^2$ по периметру s/d кругового и овального цилиндров при различных числах Рейнольдса. Здесь ρ – плотность, τ – касательное напряжение, p_i – давление в точке на поверхности цилиндра, p_0 – статическое давление. Как и в случае представления безразмерной координаты центра вихря, согласно рекомендациям [3, 9] расстояние s от точки на поверхности до лобовой критической точки было обезразмерено на величину диаметра d для кругового цилиндра и на величину большой оси d_1 для овального цилиндра.

Как показано на рис.5, с ростом числа Рейнольдса распределение коэффициента давления кругового цилиндра изменяется незначительно. По сравнению с круговым цилиндром, распределение давления по периметру овального цилиндра имеет более выраженный минимум и точку перегиба, соответствующие отрыву пограничного слоя. Из распределения поверхностного трения по периметру кругового и овального цилиндра следует отметить, что, несмотря на то, что отрыв потока происходит на угловой координате ~90°, рециркуляционная зона за овальным цилиндром, соответствующая отрицательной части кривой коэффициента поверхностного трения, большая по размерам и имеет ярко выраженный минимум.

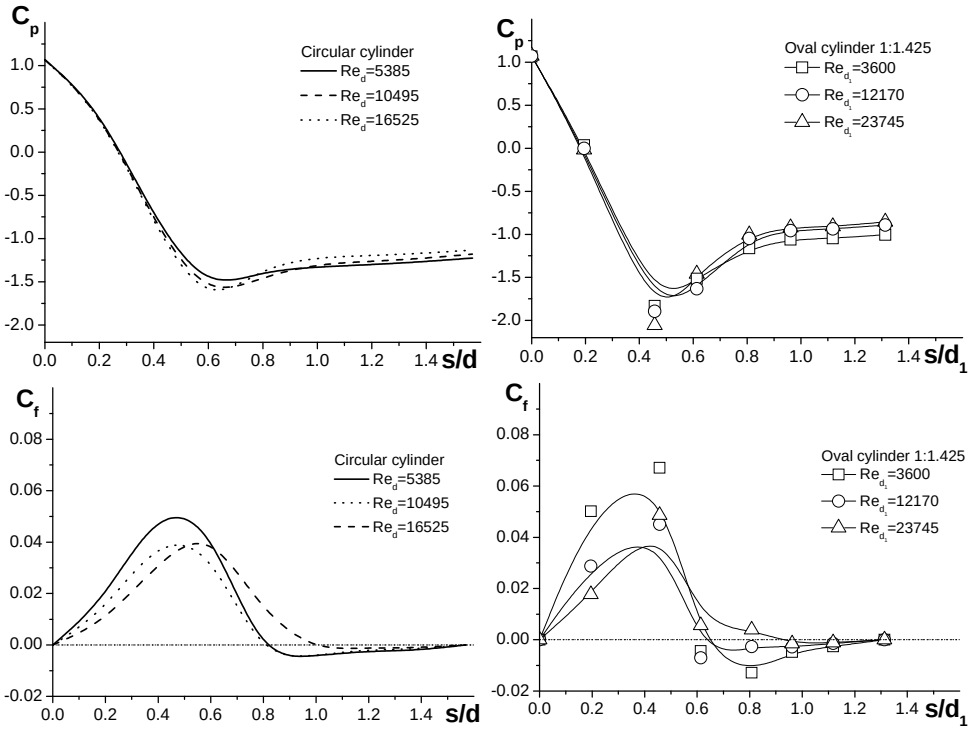

Рис.5. Распределение коэффициента давления и коэффициента поверхностного трения по периметру кругового и овального цилиндров при различных числах Рейнольдса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик овального цилиндра в диапазоне чисел Рейнольдса 4000 – 17000 в сравнении с круговым цилиндром. Сделаны предположения о характере влиянии следа за овальным цилиндром на его гидравлическое сопротивление. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением местной и средней теплоотдачи, а также с исследованием овальных цилиндров иной геометрии (с другим соотношением полуосей).

ЛИТЕРАТУРА

1. И.А.Белов, С.А.Исаев. Моделирование турбулентных течений // СПб. Судостроение. 2001.
2. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками // Под ред. А.В.Ермишина, С.А.Исаева. М. С.-Петербург. 2001.
3. А.А.Жукаускас. Конвективный перенос в теплообменниках // М. Наука. 1982.
4. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) // Под ред. С.И. Мочана. Л. Энергия. 1977.
5. C.H.K.Williamson. Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of circular cylinder at low Reynolds number // J. Fluid Mech., 1989, Vol. 206, P. 477–579.
6. C.Norberg. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements // JFS, 2003, Vol. 17, P. 57–96.
7. A.Roshko. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number // J. Fluid Mech., 1961, Vol. 10, P. 345–356.
8. C.H.K.Williamson. Vortex dynamics in the wake // Annu. Rev. Fluid Mech., 1996, No 28, P. 477-539.
9. T.Ota, H.Nishiyama, Y.Taoka. Heat transfer and flow around an elliptic cylinder // Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, Vol. 27, No. 10, P. 1771-1779.