

01;03

Численное моделирование эффекта снижения сопротивления цилиндра с вихревыми ячейками при наличии системы управления турбулентным пограничным слоем

© П.А. Баранов, С.А. Исаев, Ю.С. Пригородов, А.Г. Судаков

Академия гражданской авиации, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 25 февраля 1998 г.

При решении факторизованным конечно-объемным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью двухпараметрической диссипативной модели турбулентности, анализируется эффект снижения лобового сопротивления цилиндра с вихревыми ячейками при управлении пограничным слоем за счет организации отсоса жидкости на центральном теле ячейки.

В аэродинамике хорошо известны способы уменьшения сопротивления профилей за счет управления турбулентным пограничным слоем на основе вдува-отсоса в пристеночных слоях жидкости. Однако для практических целей указанные способы существенного развития не получили. Возрастающий интерес к вихревым ловушкам на криволинейных поверхностях тел стимулирует использование отсоса потока в качестве инструмента интенсификации течения в них.

С помощью методов численного моделирования в данной работе впервые ставится и решается сопряженная задача о влиянии уловленных вихревых крупномасштабных структур на турбулентное обтекание потоком несжимаемой вязкой жидкости и на аэродинамическое сопротивление тела классической геометрии — кругового цилиндра — при различном расположении ячейки круговой формы относительно центра цилиндра (рис. 1, *a*). Рассматриваемые вихревые ячейки имеют центральное тело такой же геометрии с организацией отсоса потока по всему контуру тела (рис. 1, *b, c*).

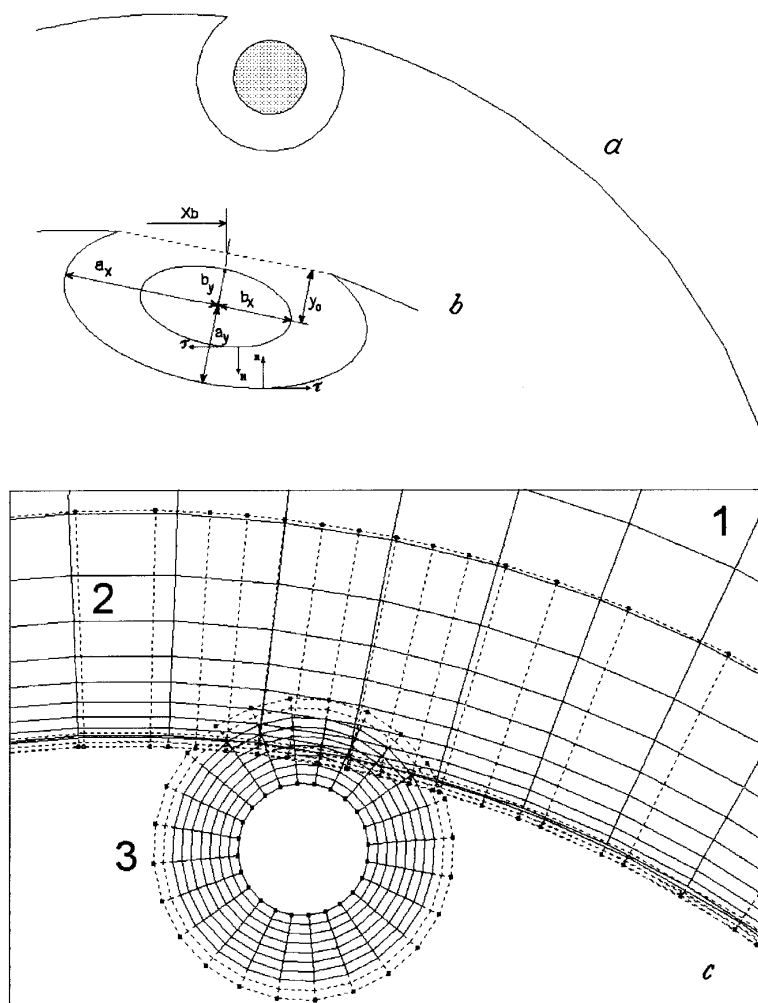


Рис. 1. Фрагмент контура цилиндра с вихревой ячейкой (а), эскиз ячейки с нанесенными обозначениями и фрагмент композитной сетки (b), состоящей (c) из двухъярусной (1, 2) сетки около цилиндра и сетки в вихревой ячейке (3).

Сконструированный алгоритм основывается на конечно-объемном методе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых с помощью высокорейнольдсовой двухпараметрической диссипативной модели турбулентности, в рамках концепции декомпозиции расчетной области и генерации в выделенных существенно разномасштабных подобластях многоярусных с перекрытием косоугольных сеток одинакового типа (*O*-типа). Система исходных уравнений записывается в дивергентной форме для приращений зависимых переменных: ковариантных составляющих скорости и давления. Такой подход характеризуется более точным представлением потоков через грани расчетных ячеек.

При аппроксимации источникового члена, представляющего собой в случае стационарной задачи правую часть уравнений количества движения, конвективные потоки рассчитывались с помощью одномерной противопоточной схемы квадратичной интерполяции, предложенной Леонардом [1]. Необходимо отметить, что схема Леонарда должна применяться не к ковариантным, а к декартовым составляющим скорости, иначе возможно нарушение теста "однородного потока". В силу этого, а также исходя из удобства программной реализации, предлагается определять декартовы проекции вектора источникового члена и затем проектировать его на оси криволинейной системы координат. При дискретизации конвективных членов уравнений переноса характеристик турбулентности используются как уже указанная схема Леонарда, так и схема UMIST, представляющая разновидность TVD-схемы [2].

Предложенная расчетная модель базируется на концепции расщепления по физическим процессам, реализуемой в процедуре коррекции давления SIMPLEC. Характерными особенностями такого итерационного алгоритма являются определение на шаге "предиктор" предварительных составляющих скорости для "замороженных" полей давления и турбулентной вязкости с последующей коррекцией давления на базе решения уравнения неразрывности с поправками поля скорости. Вычислительный процесс конструируется таким образом, что на один шаг "предиктор" приходится несколько локальных итерационных шагов в блоке коррекции давления. Далее при решении уравнений переноса характеристик турбулентности переопределяется поле турбулентной вихревой вязкости. В расчетной процедуре применяется метод глобальных итераций по подобластям с последующей интерполяцией зависимых переменных в зонах перекрытия подобластей.

Выбор централизованного шаблона с привязкой зависимых переменных к центру расчетной ячейки обусловлен стремлением упростить расчетный алгоритм и уменьшить количество вычислительных операций. Осцилляции давления в рамках данного подхода устраняются на основе подхода Рхи–Чоу. Высокая устойчивость вычислительной процедуры обеспечивается применением для дискретизации конвективных членов в неявной части уравнений для приращений искомых переменных односторонних противопоточных разностей, демпфированием нефизических осцилляций за счет введения искусственной диффузии в неявной части уравнений и использованием псевдовременных стабилизирующих членов. Также повышает вычислительную эффективность расчетного алгоритма метод неполной матричной факторизации в версии Стоуна (SIP) для решения систем нелинейных алгебраических уравнений. В расчетах применен стандартный метод пристеночных функций [1].

Для решения задачи турбулентного обтекания поперечно ориентированного цилиндра для более точного разрешения разномасштабных структурных элементов представляется целесообразным выделить отдельно пристеночную область толщиной примерно 0.1 диаметра цилиндра (выбирается в качестве характерного размера), промежуточную круговую область, охватывающую отрывную зону в ближнем следе за цилиндром, и периферийную кольцевую зону, внешняя граница которой располагается на достаточном удалении (порядка 50–100) от тела. Введение нескольких кольцевых зон (рис. 1, *c*) или эквивалентно построение многоярусных сеток связано не только с ускорением сходимости решения задачи за счет уменьшения потребного количества расчетных ячеек, но и, что более важно, с настройкой местной сетки на характеристики отображаемого структурного элемента течения: пограничного слоя на поверхности цилиндра, возвратного течения в следе и обтекания тела на достаточном от него удалении. Следует отметить, что в работе приведены результаты, полученные в предположении о реализации симметричного режима обтекания цилиндра. Это позволяет несколько упростить решение задачи, рассматривая течение в одной полуплоскости. Численные эксперименты, выполненные при отказе от сделанного предположения, подтвердили справедливость примененного подхода.

Можно сформулировать требование к взаимному расположению зон: область наложения соседних зон должна включать порядка 3–4 ячеек каждой зоны, так что суммарно область перекрытия содержит порядка

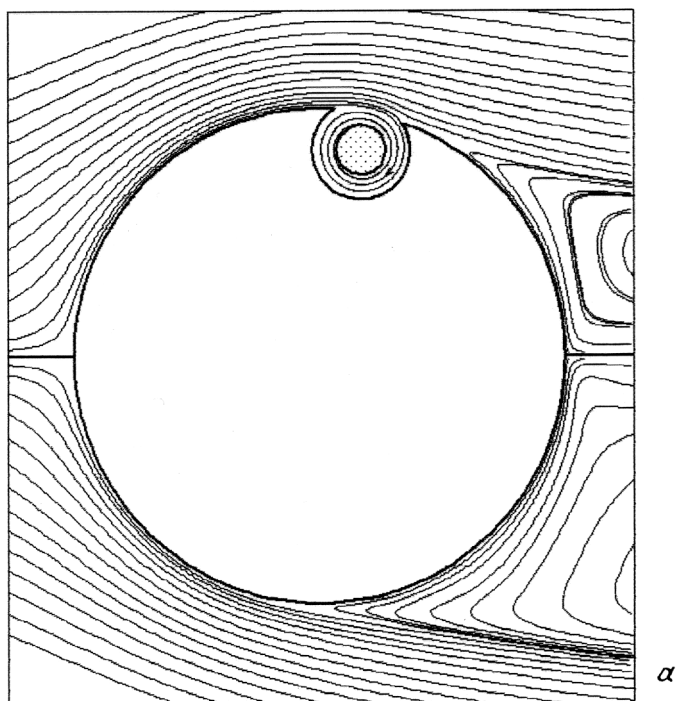


Рис. 2. Сопоставление картин турбулентного обтекания цилиндра с вихревой ячейкой (при $U_n = 0.05$ и $X_b = 0.1$) и гладкого цилиндра (а), зависимости коэффициента лобового сопротивления C_x цилиндра от расположения вихревых ячеек (б): 1 — $U_n = 0$; 2 — 0.0125; 3 — 0.025; 4 — 0.0375; 5 — 0.05 и от скорости отсоса (с): 1 — $X_b = -0.2$; 2 — 0; 3 — 0.2.

6–8 расчетных ячеек. Если это требование не выполняется и количество ячеек меньше указанного, то нарушается процесс передачи информации между зонами. В противном случае, когда количество ячеек в области перекрытия завышено, возникает неоправданный перерасход вычислительных ресурсов. В данном исследовании количество узлов во внешней зоне — 15×40 , в промежуточной зоне — 60×80 и в пристеночной зоне — 21×80 . Шаг у стенки — 0.0005.

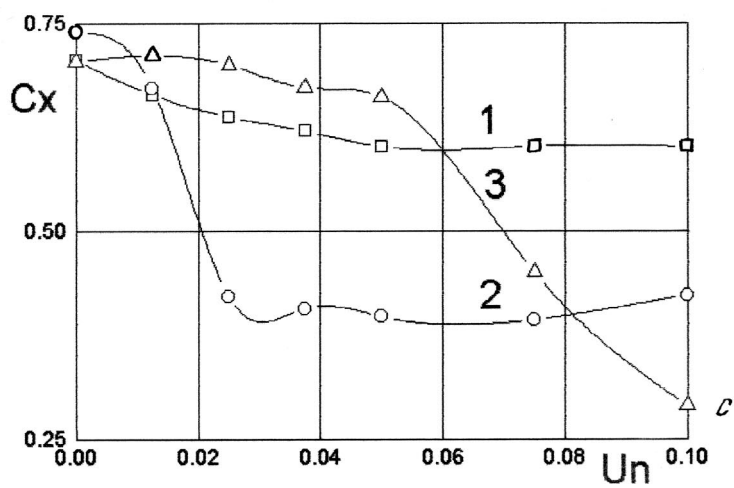
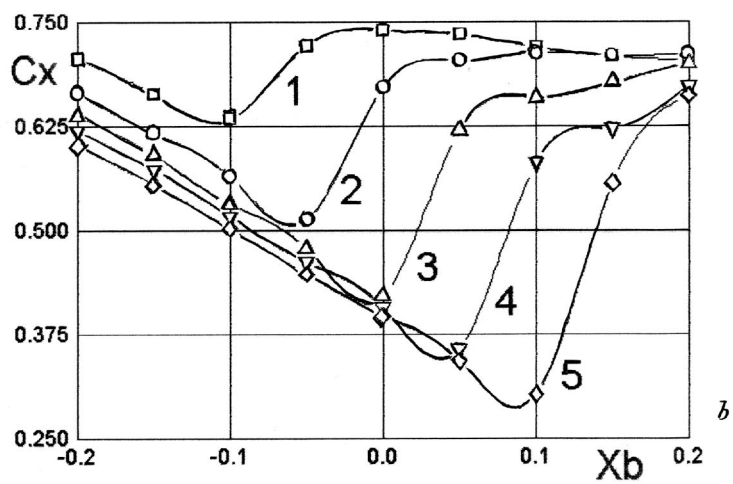


Рис. 2 (продолжение).

Результаты численных и экспериментальных исследований интегральных характеристик турбулентного обтекания кругового цилиндра поперечным потоком

Re	Сетка	C_x	C_{xf}	X_s	Ссылка на работу
10 000	Многоярусная	0.686	0.024	3.96	Данная работа [3] [4]
10 000	100 × 62	0.743	0.011	5.00	
14 500	–	0.72	–	–	

Внутри вихревых ячеек сетка строится равномерно в окружном направлении к радиусу (выбран 21 узел). Задается количество точек на срезе каверны (15 узлов). Общее количество точек в окружном направлении рассчитывается затем из условия одинаковости углового шага. Диаметр вихревой ячейки принимается равным 0.2. Диаметр центрального тела — 0.1. Во всех случаях ячейки размещаются внутри цилиндра с заглублением 15% от поперечного размера ячейки ($y_0 = 0.7a_x$). Рассматриваются различные (до точки отрыва и после точки отрыва потока при обтекании гладкого цилиндра) расположения ячеек, характеризующиеся расстоянием X_b от передней критической точки цилиндра до передней кромки ячейки (рис. 1, *b*). Также варьируется нормальная составляющая скорости отсоса U_n на центральном теле ячейки. Число Рейнольдса задается равным 10^4 . Приведенный в таблице анализ результатов расчета коэффициентов лобового сопротивления C_x , сопротивления трения C_{xf} и длины отрывной зоны X_s в ближнем следе за цилиндром с имеющимися расчетными [3] и экспериментальными [4] данными при близких Re показывает приемлемость сконструированного расчетного алгоритма.

Размещение на контуре обтекаемого цилиндра вихревой ячейки при отсутствии отсоса способно снизить лобовое сопротивление примерно на 10% при переднем расположении ячейки. В этом случае наблюдаемый эффект аналогичен эффекту снижения сопротивления тел с передней срывной зоной (типа двух дисков или композиции диска и цилиндра) [1]. Однако отмеченный эффект является слабо выраженным из-за неразвитости циркуляционного течения в ячейке. Отсос жидкости на центральном теле ячейки обуславливает растущую интенсификацию течения в лунке, при этом с увеличением скорости отсоса локальный минимум лобового сопротивления цилиндра с ячейками (рис. 2, *b*)

смещается в сторону заднего расположения ячейки на контуре цилиндра (при постоянной скорости отсоса). Причина состоит не только в перераспределении локальных нагрузок внутри вихревых ячеек, но и в изменении картины обтекания цилиндра. Как следует из рис. 2, *a*, усиление импульса турбулентного потока в пристеночной зоне цилиндра, вызванное интенсивным возвратным течением в ячейке, существенно деформирует область отрывного течения в ближнем следе за цилиндром. Следует подчеркнуть, что сопротивление цилиндра падает практически вдвое, причем при центральном расположении вихревой ячейки на контуре цилиндра в значительном диапазоне изменения скорости отсоса уровень падения сопротивления цилиндра почти неизменен (рис. 2, *c*).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 96-01-01290 и 96-01-00298.

Список литературы

- [1] Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
- [2] Lien F.S., Chen W.L., Leschziner M.A. / Int. J. Numer. Meth. In Fluids. 1996. V. 23. P. 567-588.
- [3] Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплопередача и сопротивление пакетов труб. Л., 1987. 213 с.
- [4] Roshko A. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies // NACA Tech. Note. 1954. N 3169.