

УДК 532.516.5:517.2

© 2000 г. П.А. БАРАНОВ, С.А. ИСАЕВ, А.Г. СУДАКОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СГЕНЕРИРОВАННОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ НА ДОРОЖКУ КАРМАНА ЗА КРУГОВЫМ ЦИЛИНДРОМ

На основе решения нестационарных уравнений Навье – Стокса на многоблочных расчетных сетках численно проанализирован эффект существенного ослабления вихревой дорожки Кармана за круговым цилиндром при генерации завихренности в пассивных и активных вихревых ячейках, встроенных в его контур.

Актуальной проблемой аэрогидромеханики является разработка эффективных способов управления обтеканием тел различной геометрии для улучшения их аэродинамических характеристик путем организации пристенной структуры потока. Некоторые нетрадиционные способы воздействия на течение, связанные с преднамеренным формированием около поверхности тел стационарных крупномасштабных вихревых структур, рассмотрены в [1], где предложено использовать экраны в виде дисков или пластин, располагаемых в окрестности тел или непосредственно на их поверхности.

Иной способ вихревой организации (см., например, [2]) связан с так называемыми уловленными вихрями, генерируемыми в размещенных внутри контуров тел ячейках или кавернах. Однако существенно изменить характер обтекания тел при использовании только пассивных вихревых ячеек не удастся, что продемонстрировано, в частности, для толстого профиля [3].

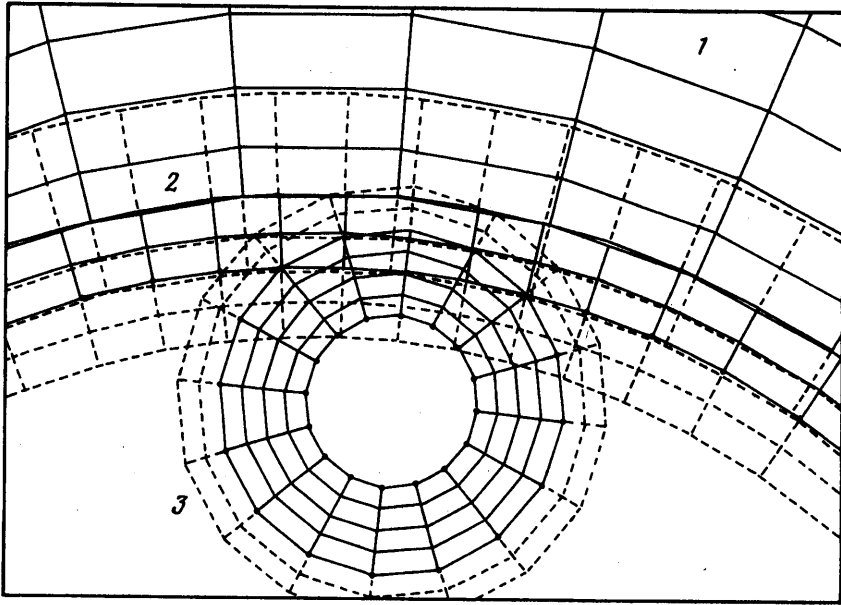
Интенсификация циркуляционного течения в ячейках позволяет успешно управлять обтеканием тела и даже реализовать режим безотрывного течения. На примере численного моделирования ламинарного обтекания поперечного цилиндра апробирована концепция снижения его сопротивления за счет генерации импульса в вихревых ячейках [4].

Экспериментальное исследование [5] влияния вращающихся цилиндров, смонтированных в контур тел различной геометрии, стимулировало интерес к такому способу управления нестационарными режимами их обтекания с перестройкой картин течения и достижением стационарного режима течения при достаточно высокой угловой скорости.

1. Постановка задачи. Настоящая работа посвящена численному анализу механизма влияния на вихревую дорожку Кармана за круговым цилиндром завихренности, сгенерированной пассивными и активными вихревыми ячейками. Причем в активных ячейках интенсификация течения вызывается вращением в них центральных тел.

Для решения уравнений Навье – Стокса на внешней границе расчетной области (внешнем контуре сетки 1), расположенной на достаточном удалении от цилиндра, ставятся традиционные граничные условия, соответствующие однородному потоку на входной части границы, и мягкие граничные условия на выходной ее части (фиг. 1). На поверхности цилиндра задаются условия прилипания.

Также условия прилипания ставятся на части границы вихревой ячейки (внешней части контура сетки 3), расположенной внутри цилиндра. Если интенсификация пото-



Фиг. 1. Фрагмент композитной сетки, состоящей из двухъярусной (1, 2) около цилиндра и в вихревой ячейке (3) сеток

ка в пределах вихревой ячейки производится за счет вращения цилиндрического центрального тела, то на его контуре задается ненулевая тангенциальная составляющая скорости.

2. Метод расчета. Расчетный алгоритм основан на обобщенной процедуре глобальных итераций, предназначенной для решения конечно-объемным методом нестационарных уравнений Навье – Стокса на многоблочных пересекающихся сетках O-типа [1]. Система исходных уравнений записывается относительно криволинейных неортогональных координат в дивергентной форме для приращений зависимых переменных – ковариантных составляющих скорости и давления. Такой подход характеризуется более точным представлением потоков через грани расчетных ячеек [4]. При аппроксимации источников члена, включающего в случае нестационарной задачи временную производную от зависимой переменной, конвективные потоки рассчитываются с помощью одномерной противопоточной схемы квадратичной интерполяции [1]. Необходимо отметить, что эта схема должна применяться не к ковариантным, а к декартовым составляющим скорости, иначе возможно нарушение теста "однородного потока".

Расчетная процедура на каждом временном шаге базируется на концепции расщепления по физическим процессам, реализуемой в процедуре коррекции давления [1]. Характерной особенностью рассматриваемого итерационного алгоритма является определение на шаге предиктор предварительных составляющих скорости для замороженных полей давления с последующей коррекцией давления на базе решения уравнения неразрывности с поправками поля скорости. Вычислительный процесс сконструирован так, что на один шаг предиктор приходится несколько локальных итерационных шагов в блоке коррекции давления. В расчетную процедуру также включен интерполяционный блок определения зависимых переменных в зонах перекрытия подобластей. В остальных деталях расчетная процедура аналогична [6].

Концепция многоблочных сеток представляется наиболее рациональной для корректной интерпретации разномасштабных элементов течений, имеющих сложную структуру. Сочетание сеток позволяет также отобразить течения в многосвязных областях, к которым относится, в частности, обтекание поперечного цилиндра с смонтированными в его контур вихревыми ячейками (фиг. 1). Подчеркнем, что в этом случае друг на друга накладываются сетки простой топологии, что существенно упрощает задачу их построения.

Внутренняя сетка 2 строится у поверхности цилиндра таким образом, чтобы обеспечить пространственное разрешение, необходимое для корректного расчета пограничного слоя. При удалении от поверхности тела требуемая степень разрешения достигается введением сетки 1, имеющей меньшее количество узлов в окружном направлении. Для решения задачи обтекания тела достаточно двух многоярусных сеток. Однако при наличии развитой отрывной зоны в ближнем следе целесообразно введение дополнительного блока ячеек в указанной окрестности.

3. Результаты. Тестирование предложенного подхода к численному моделированию отрывных течений в областях криволинейной геометрии проведено на основе сравнительного анализа полученных на различных сетках решений задачи стационарного режима обтекания поперечного цилиндра потоком вязкой несжимаемой жидкости с имеющимися расчетными и экспериментальными данными при $Re = 40$ [7–9]. В качестве характерного размера выбран диаметр цилиндра D , а за масштаб скорости – величина скорости набегающего потока V_∞ . Отметим, что по окружной координате ячейки распределены равномерно.

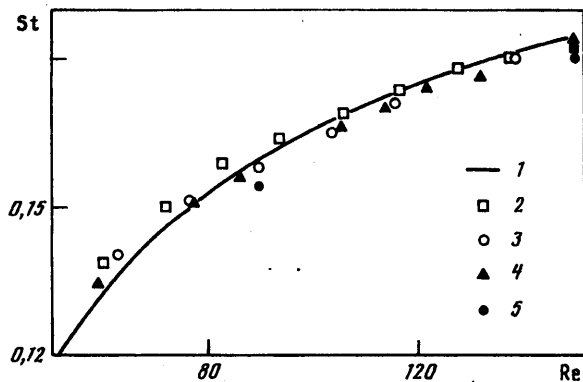
Ниже сведены данные для интегральных характеристик обтекания цилиндра, рассчитанные с использованием различных алгоритмов и сеток.

Сетка	О-типа (1/2)	О-типа	О-типа	О-типа (1/2)	О-типа (1/2)
Количество ячеек	7800	81×220	60×220	62×100	3000–4000
C_{xp}	–	–	0,398	–	–
C_{xd}	–	–	0,583	–	–
$C_{xp} + C_{xd}$	0,9942	0,9950	0,981	0,981	0,976
C_{xf}	0,5434	0,5254	0,517	0,5163	0,549
C_x	1,5376	1,5267	1,498	1,497	1,5025
C_{pf}	1,160	1,144	1,146	1,13	–
C_{pd}	–	–0,505	–0,473	–0,484	–
X_s	2,10	2,216	2,23	2,33	–

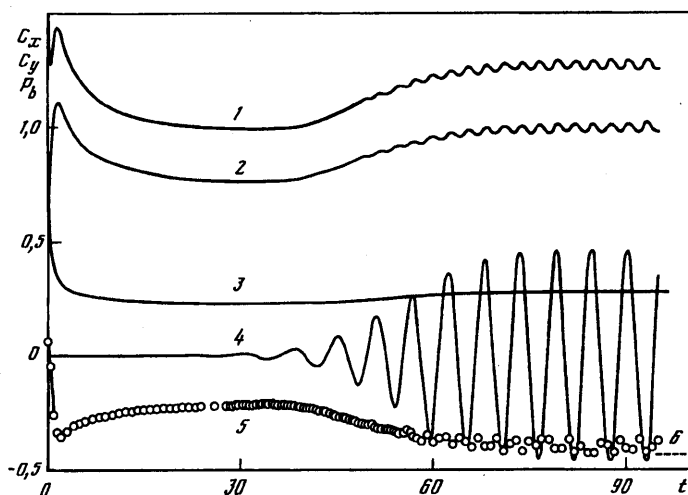
В первом столбце представлены результаты расчета течения в полуплоскости (О-типа (1/2)) на трехъярусной сетке: 1-й ярус – 15×120 ячеек на расстоянии 0,1 от цилиндра при минимальном шаге у стенки $\Delta_m = 0,0005$; 2-й ярус – 60×80 на расстоянии 10 и 3-й ярус – 30×40 на расстоянии 50. Второй столбец содержит данные расчетов на моноблочной сетке О-типа при $\Delta_m = 0,002$ и расстоянии до внешней границы области 40. В третьем столбце размещаются результаты решения уравнений Навье – Стокса, записанных в наиболее употребительном виде – в декартовых составляющих скорости ($\Delta_m = 0,005$). Для сравнения приводятся данные, полученные на основе решения записанных в преобразованных переменных (завихренность – функция тока) уравнений Навье – Стокса. В [7] конечно-разностный алгоритм был сконструирован с использованием схем Аракавы второго и четвертого порядков аппроксимации (4-й столбец). Центрально-разностная схема применена в сочетании с довольно большим числом расчетных узлов сетки (3000–4000) [8]. В дополнение к приведенным результатам следует отметить, что по экспериментальным данным Апелъта из монографии Бэтчелора [9] при $Re = 40$ $C_x = 1,513$, а длина циркуляционной зоны за цилиндром $X_s = 2,2$.

Обращает на себя внимание близость представленных численных результатов и экспериментальных данных. Некоторый разброс в составляющих коэффициента лобового сопротивления объясняется тем, что процедуры решения уравнений Навье – Стокса в переменных завихренность – функция тока лучше отображают трение на стенке и соответственно дают более точную оценку сопротивления трения цилиндра C_{xf} в то время как подход в естественных переменных более корректно предсказывает сопротивление давления $C_{xp} + C_{xd}$.

4. Обтекание цилиндра. Для решения задачи ламинарного нестационарного обтекания равномерным потоком несжимаемой вязкой жидкости поперечно ориентированного цилиндра для более точного разрешения разномасштабных структурных



Фиг. 2. Сравнение экспериментальных данных (1-3) и расчетных результатов (4, 5) для числа Струхала в зависимости от Re

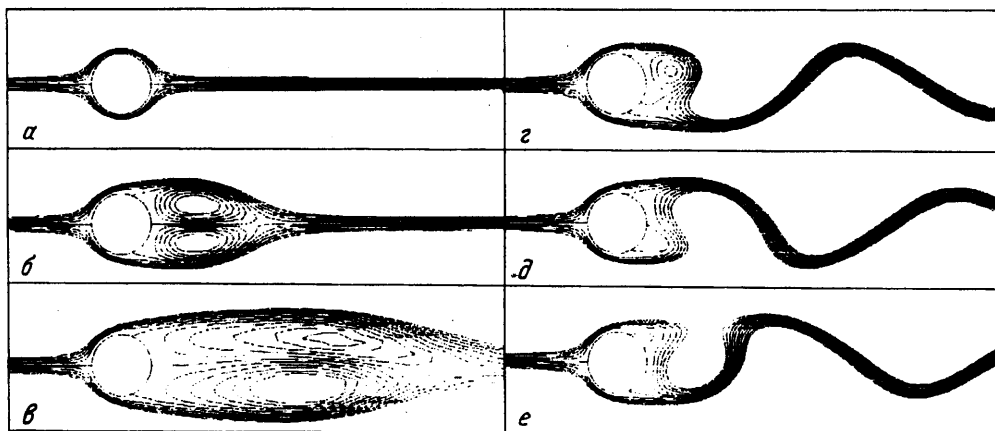


Фиг. 3. Эволюция во времени коэффициента C_x (кривая 1) и его составляющих – сопротивления давления (2) и трения (3), коэффициента C_y (4) и донного давления (5); б – экспериментальные данные [10]

элементов выделены отдельно пристеночная область толщиной $0,1D$ и периферийная кольцевая зона с внешней границей на удалении $40D$ от тела. Количество узлов во внешней зоне равно 80×120 , в пристеночной зоне – 13×200 , шаг у стенки – $0,002$. Шаг по времени принят $0,02$, число Рейнольдса $Re = 90$ и 150 .

Сопоставление полученных результатов (кривая 5) для зависимости числа Струхала от Re с экспериментальными данными [10–12] и расчетными прогнозами [13] на фиг. 2 показывает применимость предложенного подхода для моделирования нестационарных отрывных течений.

Анализ приведенных на фиг. 3 и 4 результатов тестового расчета нестационарного обтекания кругового цилиндра, начиная с момента внезапного старта, позволяет оценить степень адекватности полученных результатов данным физического эксперимента. Интересными представляются данные о развитии нестационарного процесса, корреляции структурных изменений в вихревой картине и эволюции интегральных, а также локальных нагрузок на тело.



Фиг. 4. Фазы развития нестационарного следа при $Re = 150$: период развития симметричной структуры: $a, b - t = 0,1, 5$; потеря устойчивости: $c - t = 30$; срыв вихрей на периоде колебаний $C_y(t)$: $d-e - t = 90, 92, 94$

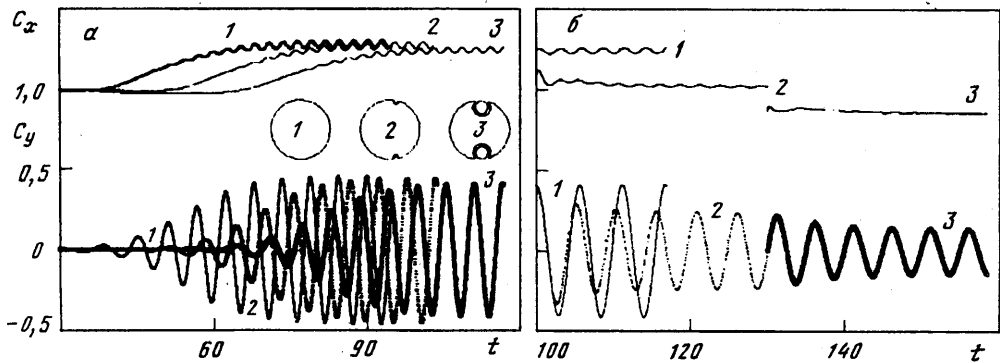
Четко выделяются три фазы процесса. В начальной фазе вихревая картина симметрична (фиг. 4, a, b) и наблюдается постепенное развитие вихрей, причем интенсивность возвратного течения в ближнем следе резко возрастает, а затем монотонно снижается до некоторого значения. Лобовое сопротивление цилиндра монотонно падает, приближаясь к некоторому асимптотическому уровню. Однако уже при $t = 15$ отмечается легкая асимметричность вихревой структуры, которая к моменту $t = 30$ (фиг. 4, c) становится весьма заметной.

Далее во второй фазе процесса имеют место деформация и распад пары вихрей в следе за цилиндром. Отрывающиеся от цилиндра вихри на этом этапе еще имеют довольно значительную протяженность. По мере развития временного процесса все большее пространство в дальнем следе за телом заполняется вихревыми образованиями. Постепенно начинает увеличиваться лобовое сопротивление цилиндра и развиваются поперечные колебания потока, вызывающие в свою очередь колебания донного давления P_b , донного и полного сопротивления C_x тела, а также коэффициента подъемной силы C_y .

В третьей фазе (примерно с $t = 80$) процесс принимает периодический характер, при этом лобовое сопротивление в среднем стабилизируется, оставаясь на одном уровне. Расчетная величина донного давления P_b хорошо согласуется с измеренной [10] средней величиной. Отметим, что аналогичное развитие процесса обтекания цилиндра при $Re = 110$ приводится в [14], однако там потеря устойчивости вихревой картины происходит с большей задержкой, чем при $Re = 150$.

Рассматриваемые компоновки цилиндров с встроеными в контуры вихревыми ячейками различного размера представлены на фиг. 5. Внутри вихревых ячеек сетка строится равномерно в окружном и радиальном направлениях. По радиусу выбрано 15 узлов. На срезе каверны заданы 8 узлов для малогабаритной ячейки и 21 для крупной ячейки. Общее количество точек в окружном направлении рассчитано из условия постоянства углового шага. Диаметры малогабаритной вихревой ячейки и центрального тела равны 0,08 и 0,016, для крупной ячейки – 0,3 и 0,216. Для тела последней геометрии тангенциальная составляющая скорости U , на центральном теле ячейки варьировалась в пределах от 0 до 2.

Как следует из результатов на фиг. 5, a , размещение в контуре кругового цилиндра пассивных вихревых ячеек приводит к временной задержке в развитии дорожки Кармана. Причем чем больше размеры ячейки, тем дольше задержка. Кроме того, для крупных ячеек наблюдается некоторое снижение лобового сопротивления.



Фиг. 5. Зависимости C_x и C_y от t для конфигураций с пассивными (а) и активными (б) вихревыми ячейками; а – 1 – без ячеек; 2 и 3 – с мелкомасштабной и крупномасштабной ячейками; б – крупномасштабная ячейка с вращением центрального тела: 1–3 – $\omega = 0, 1, 2$

Вращение центрального тела в ячейке, внося импульс в пристеночные слои вблизи цилиндра, оказывает существенное воздействие на формирование вихревой картины обтекания и интегральные характеристики тела (фиг. 5, б). Лобовое сопротивление цилиндра падает, как при стационарном обтекании для низких чисел Рейнольдса, когда в результате вращения уменьшается длина отрывной зоны в ближнем следе за телом. При нестационарном режиме обтекания кругового цилиндра по мере увеличения скорости вращения обнаруживается тенденция к затуханию вихревой дорожки Кармана.

Заключение. Численное исследование позволило проанализировать нестационарное совместное обтекание цилиндра и утопленного в него вращающегося в пределах вихревой ячейки цилиндра малого диаметра. Учет тонких эффектов воздействия сгенерированной пассивными и активными ячейками завихренности на нестационарный характер обтекания кругового цилиндра показал, что она уменьшает интенсивность вихрей в дорожке Кармана и снижает лобовое сопротивление тела.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 99-01-01115 и 99-01-00772).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 253 с.
2. Bunyakina A.V., Chernyshenko S.I., Stepanov G.Yu. High-Reynolds-number Batchelor-model asymptotics of a flow past an aerofoil with a vortex trapped in a cavity // J. Fluid Mech. 1998. V. 358. P. 283–297.
3. Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г. Расчет отрывного обтекания низкоскоростным воздушным потоком профиля с вихревыми ячейками // Инж.-физ. журн. 1998. Т. 71. № 6. С. 1116–1120.
4. Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г. Численное моделирование ламинарного обтекания цилиндра с пассивными и активными вихревыми ячейками // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 8. С. 33–41.
5. Modi V.J., Fernando M.S.U.K., Yokomizo T. Moving surface boundary-layer control: studies with bluff bodies and application // AIAA Journal. 1991. V. 29. № 9. P. 1400–1406.
6. Баранов П.А., Жданов В.Л., Судаков А.Г. Численный анализ нестационарного обтекания цилиндра с внесением в ближний след наведенной завихренности: Препринт № 5. Минск: АНК ИТМО им. А.В. Лыкова, 1998. 31 с.
7. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 223 с.

8. *Hamielec A.E., Raal J.D.* Numerical studies of viscous flow around circular cylinders // *Phys. Fluids*. 1969. V. 12. № 1. P. 11–17.
9. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 758 с.
10. *Williamson C.H.K., Roshko A.* Measurements of base pressure in the wake of a cylinder at low Reynolds numbers // *Z. Flugwissund. Weltraumforsch.* 1990. V. 14. № 1–2. P. 38–46.
11. *Williamson C.H.K.* Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at a low Reynolds numbers // *J. Fluid Mech.* 1989. V. 206. P. 579–627.
12. *Norberg C.* An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio // *J. Fluid Mech.* 1994. V. 258. P. 287–316.
13. *Min B.-K., Chang K.-S.* A momentum coupling method for the unsteady incompressible Navier – Stokes equations on the staggered grid // *Intern. J. Numer. Meth. Fluids*. 1998. V. 28. № 3. P. 443–460.
14. *Lu X., Dalton C., Zhang J.* Application of large eddy simulation to flow past a circular cylinder // *Trans. ASME. J. Offshore Mech. and Arctic Engng.* 1997. V. 119. № 4. P. 219–225.

Феодосия,
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
7.XII.1998