

УДК 532.517.4

© 2003 г. П. А. БАРАНОВ, С. А. ИСАЕВ, Ю. С. ПРИГОРОДОВ, А. Г. СУДАКОВ

УПРАВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫМ ОБТЕКАНИЕМ ТОЛСТОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОТОКА В ВИХРЕВЫХ ЯЧЕЙКАХ ЗА СЧЕТ ОТСОСА С ПОВЕРХНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ТЕЛ

На основе численного моделирования турбулентного стационарного обтекания толстого профиля с встроенными вихревыми ячейками дан анализ нетрадиционного способа управления отрывом потока за счет распределенного отсоса на центральных телах в пределах ячеек в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса и скорости отсоса.

Ключевые слова: стационарное течение, отрыв потока, несжимаемая жидкость, турбулентность, толстый профиль, вихревые ячейки, отсос.

Одно из актуальных направлений современной аэрогидромеханики связано с разработкой систем управления обтеканием тел с помощью встроенных вихревых ячеек при интенсификации циркулирующего в них потока за счет того или иного энергозатратного способа генерации импульса. Примером конструкторской реализации такой концепции может служить перспективный летательный аппарат интегральной компоновки “ЭКИП” (экология и прогресс), имеющий форму толстого крыла и использующий двигательную установку для функционирования системы отсоса из вихревых ячеек [1]. В качестве последних рассматривается ряд профилированных вырезов на подветренной стороне корпуса с соосно расположенными в них центральными телами.

Научное обоснование этого оригинального метода управления потоком связано с комплексными исследованиями в рамках численного и физического моделирования обтекания тел различной геометрии с вихревыми ячейками. В [2] на примере решения задачи ламинарного обтекания кругового цилиндра с встроенными в контур эллиптическими ячейками продемонстрировано изменение структуры течения в ближнем следе при генерации импульса вдоль образующих ячеек, обусловившее снижение его лобового сопротивления. Аналогичный способ интенсификации циркулирующего в мелкомасштабных вихревых ячейках потока использован в [3] при ламинарном стационарном обтекании толстого профиля с вмонтированными ячейками. Обнаружена кардинальная перестройка картины обтекания, связанная с переходом от отрывного к безотрывному режиму течения вокруг профиля. Как следствие, обеспечено снижение лобового сопротивления и достижение высокого аэродинамического качества.

Другой способ интенсификации потока в круговых вихревых ячейках с помощью вращения центрального тела и влияние таких ячеек на ламинарное и турбулентное стационарное обтекание поперечного цилиндра даны в [4, 5]. Установлена связь между скоростью вращения центрального тела и уменьшением лобового сопротивления цилиндра при одновременном сокращении длины циркуляционной зоны в следе за ним. Такой же способ воздействия на ламинарное нестационарное течение в следе при моделировании обтекания цилиндра с круговыми вихревыми ячейками апробирован в [6]. Продемонстрирован эффект ослабления вихревой дорожки Кармана по мере увеличения скорости вращения центральных тел, сопровождающийся существенным уменьшением лобового сопротивления цилиндра. Аналогично ламинарное

нестационарное обтекание притупленной пластины со скругленными задними кромками, в которых размещаются круговые вихревые ячейки, численно исследовано в [7]. Вращение центральных тел, расположенных в ячейках, привело к устранению развивающейся в следе вихревой дорожки Кармана и, как следствие, к снижению лобового сопротивления компоновки.

Применение отсоса на центральном теле как традиционного в гидромеханике способа воздействия на течение (см., например, [8]) позволяет интенсифицировать вихревое движение в ячейке и реализовать управление в малом масштабе, оказывая влияние на крупномасштабный характер обтекания объекта с ячейками. Распределения спектра турбулентного течения около цилиндра с круговыми ячейками и его лобового сопротивления от скорости отсоса на центральном теле проанализированы в [9, 10]. В зависимости от местоположения ячеек на контуре и интенсивности воздействия на циркулирующий в их пределах поток показано существование различных режимов обтекания цилиндра, связанных с перестройкой картины течения в следе и уменьшением лобового сопротивления. Скачкообразное падение лобового сопротивления объяснено в [10] эффектом “взрывной” турбулизации, сопровождающей резкую интенсификацию течения в вихревой ячейке. Скорость циркуляционного движения в ячейке в этом случае сравнима со скоростью невозмущенного потока.

Толстый профиль (с толщиной порядка 35–45% в долях хорды) представляет собой плохо обтекаемое тело, которое не создает подъемной силы [11, 12]. Численный анализ турбулентного обтекания такого профиля с вихревыми ячейками ([10]) показал принципиальную возможность перестройки крупномасштабной вихревой структуры в ближнем следе, обеспечения безотрывного режима обтекания, уменьшения лобового сопротивления и значительного увеличения аэродинамического качества профиля. В [13] обоснован эффект суперциркуляции профилей с вихревыми ячейками, согласно которому в ячейках создается значительная по величине циркуляция. Таким образом, рассматриваемый тип управления обтеканием тел относится к способам управления циркуляцией, а не турбулентным пограничным слоем, как полагалось в [1].

Данная работа посвящена оценке эффективности управления обтеканием толстых профилей с встроенными вихревыми ячейками с учетом энергетических затрат при изменении в широких пределах числа Рейнольдса и величин скорости распределенного отсоса с поверхности центральных тел в ячейках.

1. Постановка задачи. Уточненное по сравнению с [10–13] численное исследование турбулентного обтекания толстого профиля с четырьмя вихревыми ячейками – модели аппарата “Экип” – выполнено для конфигурации со слегка скругленными острыми кромками (фиг. 1). Длина хорды профиля l принята за характерный размер так, что остальные линейные размеры выражены в долях от ее длины. Угол атаки равен нулю.

Контур обтекаемого тела составлен из верхней дуги окружности, радиус которой равен 0.577, и двух нижних дуг радиуса 0.175, соединенных отрезком прямой линии с координатой $y = -0.0866$. Радиус скругления передней и задней кромок – 0.05.

Дуговая координата центра окна первой ячейки – 0.685. Длина окна – 0.0834. Ячейка эллиптической формы (фиг. 1,а) с продольной и поперечной полуосями $a_x = 0.0584$ и $a_y = 0.5a_x$ заглублена в контур толстого профиля на расстояние $y_0 = 0.7a_y$. Радиус скругления кромки ячейки – 0.001. В центрах ячеек располагаются центральные тела эллиптической формы с полуосями $0.5a_x$ и $0.25a_x$.

Остальные три ячейки топологически идентичны первой с дуговыми координатами – 0.861; 0.992; 1.107, размерами окон – 0.0696; 0.0556; 0.0417. Продольные полуоси эллиптических ячеек – 0.0487; 0.0389; 0.0292, радиусы скругления кромок – 0.00084; 0.00067; 0.00051.

Для решения задачи о двухмерном стационарном турбулентном обтекании потоком несжимаемой вязкой жидкости толстого профиля с вихревыми ячейками применяется математическая модель, основанная на системе записанных в обобщенных

криволинейных координатах уравнений Рейнольдса. Для их замыкания использована модель переноса сдвиговых напряжений, которая хорошо зарекомендовала себя в приложении к типичным пристеночным течениям, в том числе с отрывом потока [14]. Предложенная Ментером $k-\omega$ -модель представляет обобщение двух моделей турбулентности: $k-\epsilon$ -модели Лаундера–Сполдинга для зон сдвига вдали от стенки и $k-\omega$ -модели Саффмена–Уилкокса для пристеночной области. Кроме того, при конструировании зональной модели переноса сдвиговых напряжений использованы идеи, реализованные в модели турбулентности Джонсона–Кинга [15].

На входной части внешней границы расчетной области заданы параметры невозмущенного потока. Характеристики турбулентности определены так же, как в [5, 9–13, 16] для условий проведения физических экспериментов в аэродинамических трубах. Так, энергия турбулентности на входной границе k_∞ задана по степени турбулентности набегающего потока $Tu_\infty = 1.5\%$, а масштаб турбулентности L_∞ выбран порядка длины хорды профиля.

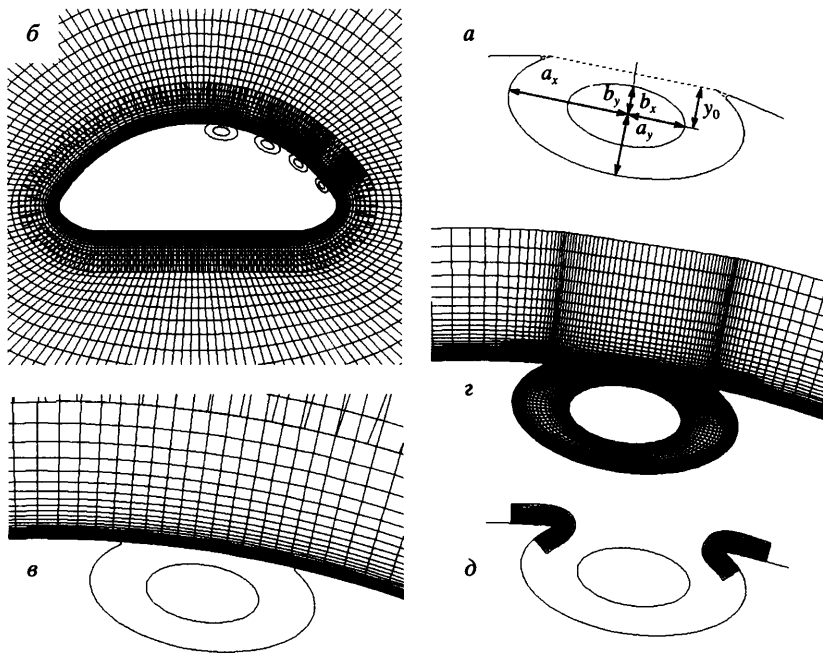
На выходной части внешней границы ставятся мягкие граничные условия (условия продолжения решения), на поверхности тела, включая контуры вихревых ячеек, – условия прилипания.

На поверхностях центральных тел задается V_{ni} – скорость распределенного равномерного отсоса в долях скорости набегающего потока U_∞ (i – номер вихревой ячейки; при условии равенства скоростей отсоса в вихревых ячейках индекс i опускается). Определяется суммарный коэффициент расхода c_q , отсасываемого через ячейки. Рассматриваемая модель интенсификации вихревого потока в ячейке, в известной степени, отображает процесс забора воздуха через пористую вставку на основе его эжекции с помощью двигательной установки.

2. Метод расчета. Численные исследования обтекания тел с вихревыми ячейками, потребовавшие проведения моделирования разномасштабных течений на совокупности H - и O -образных сеток с их частичным наложением, стимулировали развитие многоблочных вычислительных технологий (см., например, [2–7, 9–13, 17–20]). Предложенный подход использует сетки простой топологии для описания довольно сложных объектов с многосвязанными областями и позволяет корректно отображать разнообразные структурные элементы течения.

Примененный многоблочный расчетный алгоритм основан на процедуре глобальных итераций, сконструированной для решения конечно-объемным методом уравнений переноса на структурированных пересекающихся O -образных сетках. Существенно неоднородные, косоугольные сетки состоят из расчетных и связанных ячеек. В ячейках первого типа решаются уравнения движения жидкости, замыкаемые дифференциальными уравнениями для характеристик турбулентности. В связанных ячейках, расположенных в окрестности границ расчетной области, а также в зонах пересечения сеток, параметры определяются с помощью линейной интерполяции [18].

Для каждой расчетной ячейки система исходных уравнений записывается в дельта-форме в криволинейных, согласованных с границами расчетной области координатах относительно приращений зависимых переменных, включающих декартовы составляющие скорости, давление, энергию турбулентности и удельную скорость диссипации турбулентности. Линеаризованная система исходных уравнений решается с помощью конечно-объемной согласованной процедуры коррекции давления [16], основанной на концепции расщепления по физическим процессам и записанной в E -факторной формулировке. С целью уменьшения влияния численной диффузии в расчетах течений с отрывом потока, чувствительных к ошибкам аппроксимации конвективных членов, в явной части уравнений движения используется одномерный аналог противопоточной схемы с квадратичной интерполяцией [16]. Дискретизация конвективных членов уравнений переноса характеристик турбулентности проведена по схеме, представляющей разновидность TVD-схемы [17]. Одновременно, чтобы избежать ложных осцилляций



Фиг. 1. Схема вихревой ячейки (а), фрагменты многоярусной расчетной сетки около толстого профиля с вихревыми ячейками (б) и в окрестности первой ячейки (в), а также композитная сетка внутри и около ячейки (г) и ее внутренние фрагменты вблизи скругленной кромки (д)

при воспроизводстве течений с тонкими сдвиговыми слоями, в неявной части уравнений использован механизм искусственной диффузии в сочетании с применением односторонних противопоточных схем для представления конвективных членов. В свою очередь, для устранения немонотонности поля давления при дискретизации градиента давления по центрально-разностной схеме на центрированном шаблоне в блок коррекции давления введен монотонизатор [16] с эмпирическим сомножителем, определенным в ходе численных экспериментов на задачах обтекания цилиндра и шара и равным 0.1. Высокая эффективность расчетной процедуры для решения дискретных алгебраических уравнений обеспечена применением метода неполной матричной факторизации [16].

Трехъярусная расчетная сетка окружает профиль (фиг. 1, б, в). Прилегающий к контуру кольцевой слой толщиной 0.1 содержит 31 узел в поперечном направлении. От носка профиля до первой вихревой ячейки располагается 41 узел, на самих ячейках – 11 узлов, между ними – 11 узлов, от последней ячейки до передней кромки профиля – 121 узел. Размер шага сетки у поверхности – 0.0001. Второй и третий кольцевые слои толщиной 3 и 35 содержат 31 и 21 узел в радиальном направлении и 161 узел по окружной координате.

Каждая вихревая ячейка (фиг. 1, г) покрывается индивидуальной внешней сеткой, прилегающей к ее окну. Вертикальные размеры всех подобластей – 0.05, число узлов по нормали к стенке – 31, а величина пристеночного шага – 0.0001. Размеры участков в направлении течения до и после вихревых ячеек – 0.0607; 0.0506; 0.0404; 0.0304, а количество узлов сетки в этих промежутках – 21 и 16. Расчетные ячейки располагаются со сгущением в окрестности кромок. Прикромочный шаг принимается равным 0.001.

Внутри каждой вихревой ячейки выстраивается цилиндрическая сетка со сгущением узлов к ее стенкам и центральному телу (пристеночный шаг – 0.0001), а также в областях ячейки, примыкающих к острым кромкам (минимальный шаг – 0.001). В радиальном направлении располагается 41 узел. По окружной координате область ячейки разделяется на две подобласти, опирающиеся на нижнюю и верхнюю полулучи, которые разбиваются на 41 и 21 узел соответственно.

Окрестности передней и задней кромок (фиг. 1,д) вихревых ячеек покрываются криволинейными сетками мелкого масштаба. Сетки в продольном направлении разбиваются на три участка: от кромки наружу (16 узлов), на скруглениях (9 узлов), от кромки внутрь ячейки (16 узлов). По нормали к поверхности располагаются 16 узлов с шагом у стенки 0.0001.

Дополнительное сопротивление в случае отсоса с поверхности центральных тел вихревых ячеек определяется через мощность, потребную для поддержания расхода жидкости через центральные тела, аналогично подходу, который применен в [5] для оценки дополнительного сопротивления цилиндра с вмонтированными к контур вращающимися цилиндрами малого диаметра. Учитывая, что на профиле размещаются четыре ячейки, получаем

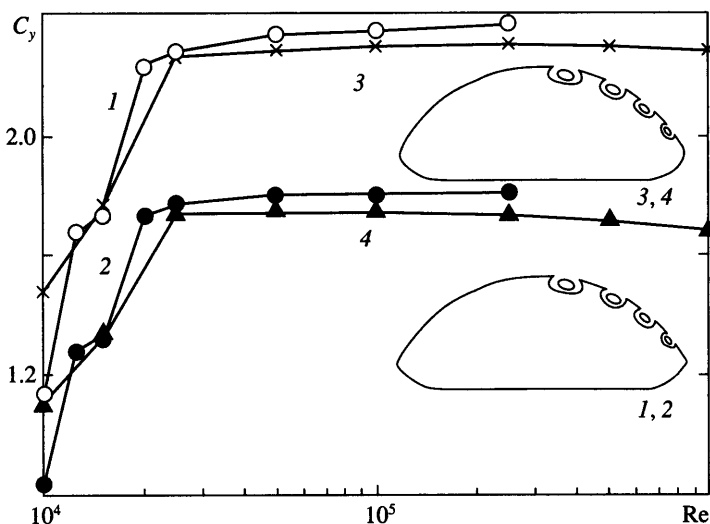
$$C_{x\text{ад}} = 4N_q(1/2\rho U_\infty^3 l)^{-1} = 2\Sigma p_{\text{ср}i} c_{qi}$$

где ρ – плотность жидкости; N_q – мощность, потребная для поддержания расхода жидкости через центральное тело в вихревой ячейке; $p_{\text{ср}i}$ – средняя величина статического давления (отнесенного к удвоенному скоростному напору) на поверхности центрального тела в ячейке; c_{qi} – расход через поверхность центрального тела в ячейке; i – номер ячейки, $1 \leq i \leq 4$. В результате определяется зависимость $C_{x\text{инт}}(V_n)$, где $C_{x\text{инт}} = C_x + C_{x\text{ад}}$ – скорректированный с учетом энергетических затрат коэффициент лобового сопротивления цилиндра с вихревыми ячейками.

3. Тестирование. Апробация использованной зональной модели сдвиговых турбулентных напряжений осуществлена в исследованиях [5, 19, 20], ориентированных на моделирование стационарных двумерных течений в областях различной геометрии с пассивными и активными вихревыми ячейками. Среди них следует отметить сравнительный анализ результатов численных расчетов и специально проведенных физических экспериментов по исследованию движения низкоскоростного, воздушного потока в плоскопараллельном канале с круговой каверной на одной из стенок [19], а также в расширяющемся канале с размещенной на стенке круговой каверной с вращающимся внутри нее цилиндром [20].

Многоблочный алгоритм в сочетании с зональной моделью турбулентности применен в [13] для расчета обтекания толстого профиля, верхняя часть которого представляет дугу окружности радиуса, а нижняя часть образуется отрезками дуг правой и левой окружностей малого радиуса и плоскостью. В рассматриваемый профиль монтируется серия из четырех вихревых ячеек эллиптической формы с центральными телами такой же геометрии. Схема профиля и расположения вихревых ячеек на нем показаны на фиг. 2.

Вокруг профиля строится алгебраическая неортогональная сетка О-типа, причем первый, прилегающий к контуру ярус содержит 41×520 узлов, располагающихся со сгущением к стенке в полосе толщиной 0.1. Пристеночный шаг выбирается равным 0.0005. Второй ярус из 81×251 узлов покрывает пространство вокруг профиля на расстоянии 40 хорд. Вихревые ячейки разбиваются сеткой О-типа, в радиальном направлении которой размещается от 51 до 41 узла со сгущением к центральным телам. В окружном направлении сетка задается равномерной, причем в области разреза профиля размещается от 23 до 17 узлов (убывание по мере уменьшения размера ячейки).



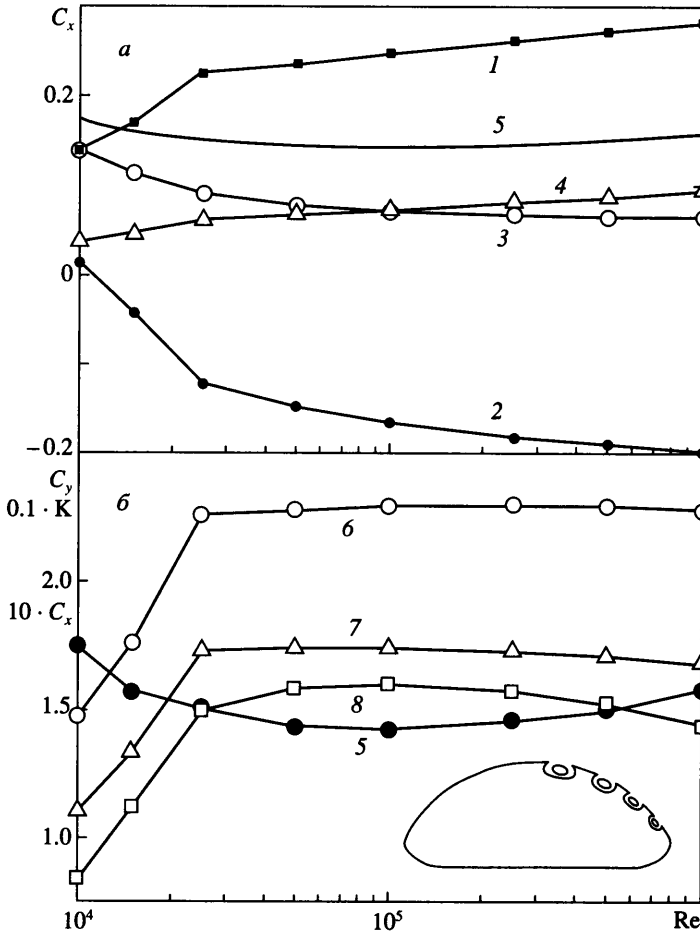
Фиг. 2. Зависимости коэффициента подъемной силы C_y близких по конфигурации профилей с вихревыми ячейками (1, 3) и собственно профилей, не включая вклад ячеек (2, 4), от числа Re

Расчетные зависимости от числа Рейнольдса коэффициентов подъемной силы C_y близких по конфигурации толстых профилей с вихревыми ячейками при интенсификации потока в них за счет отсоса (во всех ячейках $V_n = 0.05$) сравниваются на фиг. 2. Хорошее согласие результатов, полученных на различных сетках, в широком диапазоне изменения Re указывает на приемлемость расчетной модели.

4. Расчетные результаты. Интегральные силовые характеристики толстого профиля с вихревыми ячейками интенсивно изменяются в диапазоне $10^4 < Re < 2 \cdot 10^4$ (фиг. 3). Это обусловлено перестройкой режима обтекания профиля от отрывного к практически безотрывному. При $Re > 2.5 \cdot 10^4$ эволюция характеристик выражена слабо, и большинство из них почти не меняется. Лобовое сопротивление толстого профиля с ячейками, дополненное растущим с увеличением Re сопротивлением за счет энергетических затрат, практически не зависит от Re . В результате предельное аэродинамическое качество профиля K ($K = C_y/C_{xint}$), оцененное с учетом энергозатрат, оказывается порядка 15–16.

Проблема конструирования ансамбля вихревых ячеек связана с выбором их количества, геометрии, расположения в корпусе объекта, режима интенсификации циркулирующего в ячейке потока. Перечисленные факторы, как правило, взаимосвязаны. Конечно, конструктивные требования в процессе проектирования могут оказывать преобладающими, а оптимизация формы и размеров ячеек возможна только в рамках установленных ограничений. Трудно задать универсальные правила, которым надо следовать при составлении ансамблей. Весьма полезны представления о тенденциях изменения аэродинамических характеристик при вариации режимных параметров и формы вихревых ячеек, на основании которых могут быть получены рациональные решения.

Рассматриваемая проблема многогранна, особенно в области вариации форм объектов, поэтому ее первичный анализ здесь выполнен на примере толстого профиля с четырьмя вихревыми ячейками, положение которых остается неизменным в проведенном исследовании при фиксированном числе $Re = 10^5$. Выбранное число Re соот-



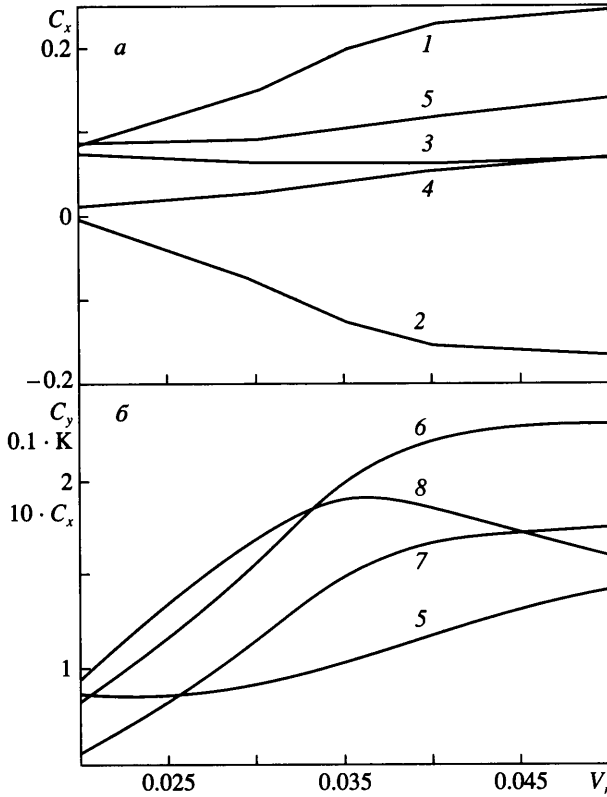
Фиг. 3. Зависимости от числа Re коэффициента C_x профиля с вихревыми ячейками (при $V_n = 0.05$) и его составляющих (а): 1 – C_x вихревых ячеек; 2 – C_x профиля без ячеек; 3 – C_x профиля с ячейками; 4 – $C_{xад}$; 5 – $C_{xинт}$, а также C_y толстого профиля с ячейками (б) и без ячеек (7), K (8) и $C_{xинт}$ (5) профиля с вихревыми ячейками (б)

ветствует участку автомодельности аэродинамических характеристик профиля по числу Рейнольдса.

Первая серия численных экспериментов касается оценки рациональных по энергетическим затратам скоростей отсоса в вихревых ячейках. Этот вопрос уже затрагивался ранее в [10], однако представленный там анализ был поверхностным и относился к нехарактерному для обтекания профилей числу Рейнольдса ($Re = 10^4$).

Так же, как и в [12], в качестве базового варианта выбран вариант с равными скоростями отсоса во всех ячейках $V_n = 0.05$. Однако вместо увеличения скорости отсоса в последних вихревых ячейках, чтобы ликвидировать развитый отрыв потока в кормовой части тела, последовательно уменьшалась скорость отсоса во всех ячейках. При этом принималось во внимание, что энергетические затраты связаны с дополнительным сопротивлением профиля квадратичной зависимостью.

На фиг. 4 представлены результаты влияния на интегральные аэродинамические характеристики профиля и его составляющие скорости отсоса V_n в диапазоне от 0.02

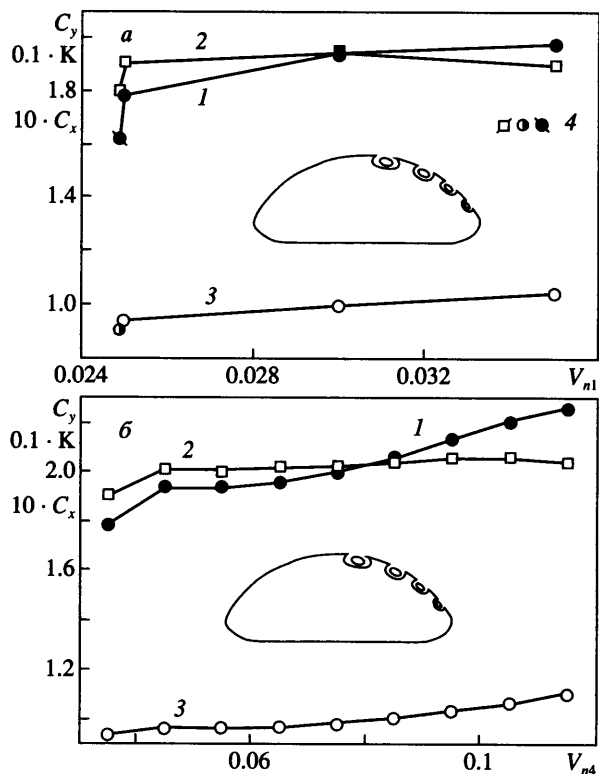


Фиг. 4. Зависимости от скорости V_n коэффициента C_x толстого профиля и его составляющих (а): 1 – C_x собственно вихревых ячеек; 2 – C_x профиля без ячеек; 3 – C_x профиля с ячейками; 4 – C_{xad} ; 5 – C_{xint} , а также коэффициентов C_y толстого профиля с ячейками (б) и без ячеек (7), K (8) и C_{xint} (5) профиля с вихревыми ячейками (б)

до 0.05. Лобовое сопротивление профиля с учетом энергозатрат (кривая 5) монотонно убывает при изменении V_n от 0.05 до ~ 0.03 , а затем остается практически неизменным до 0.02. По мере уменьшения V_n от 0.05 до 0.02 C_y сначала довольно плавно снижается (примерно до 2 при $V_n = 0.04$), а затем резко падает до величин порядка 0.7. Это связано, естественно, с перестройкой картины течения около профиля, т.е. с переходом от безотрывного к отрывному режиму его обтекания. При этом из-за уменьшения C_{xint} аэродинамическое качество сначала растет до величин порядка 19 при $V_n = 0.035$, а затем быстро падает до 9 при $V_n = 0.02$. Отметим, что $C_y \approx 2$ при оптимальной величине скорости отсоса в вихревых ячейках.

В дальнейшем осуществляется более тонкая настройка режима отсоса, ориентируясь на достижение наибольшего аэродинамического качества профиля. В целях уточнения рациональных режимов функционирования ячеек сначала варьируется скорость в первой из них при фиксировании в остальных найденной оптимальной скорости отсоса $V_{n1} = 0.035$. Уменьшение скорости отсоса в первой ячейке сопровождается почти линейным снижением C_{xint} и C_y (фиг. 5,а). Аэродинамическое качество K при этом несколько увеличивается до 19.5 для $V_{n1} = 0.03$, а затем убывает до 18 при $V_{n1} = 0.025$.

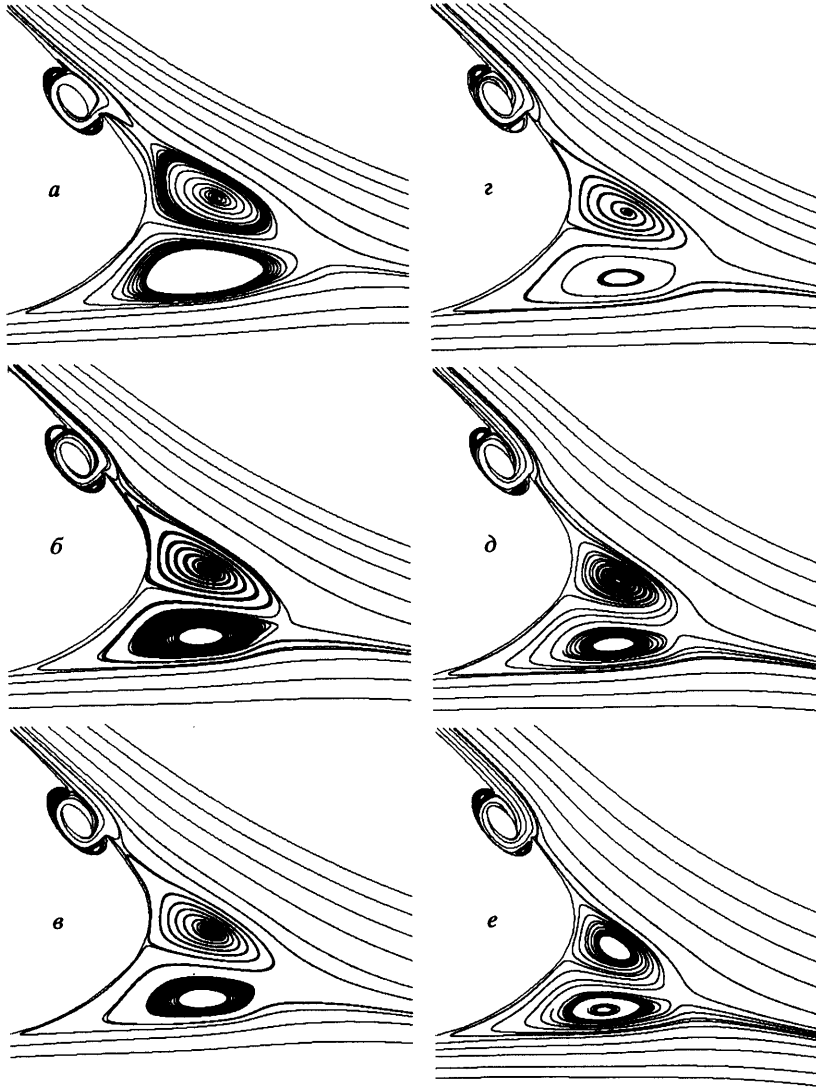
На последнем этапе варьируется скорость отсоса в последней четвертой ячейке. Проблема повышения аэродинамического качества связана с обеспечением безот-



Фиг. 5. Влияние скорости V_n в передней (а) и задней (б) ячейках на: 1 – C_y , 2 – K , 3 – C_{xint} ; а – скорости V_n в остальных ячейках – 0.035; 4 – $V_{n2} = 0.03$; б – $V_{n1} = 0.02$; $V_{n2} = 0.035$; $V_{n3} = 0.035$

рывного режима обтекания профиля. Уменьшение скорости отсоса в ячейках приводит к снижению работоспособности системы управления и, прежде всего, к отключению последней из них, близкой к корме. Поэтому целесообразно оценить вклад этой вихревой ячейки в обеспечение безотрывного течения вокруг профиля. В численных экспериментах скорость отсоса в передних ячейках фиксировалась: $V_{n1} = 0.025$; $V_n = 0.035$ – в двух последующих.

Монотонное увеличение скорости отсоса в задней ячейке оказывает слабое влияние на рост лобового сопротивления профиля из-за малых геометрических размеров ячейки (фиг. 5,б). Можно выделить две фазы трансформации интегральных аэродинамических характеристик профиля в процессе роста V_{n4} : а) начальная фаза, связанная с интенсификацией циркуляционного течения в ячейке; б) фаза влияния ячейки – изменение обтекания кормовой части профиля (фиг. 6). Для первой фазы характерен переход от отрицательных к положительным значениям коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы выбранной ячейки, который сопровождается заметным изменением интегральных характеристик профиля. Вторая фаза более длительная и связана с постепенным усиливающимся воздействием отсоса в последней ячейке на поле течения в кормовой части профиля. В результате роста V_{n4} точка отрыва смещается в окрестность кромки профиля, и область отрывного течения резко сокращается (фиг. 6,д,е). Подъемная сила монотонно растет, но несколько повыша-



Фиг. 6. Картины линий тока при обтекании кормовой части толстого профиля при возрастании скорости отсоса в задней ячейке при $V_{n1} = 0.02$; $V_{n2} = 0.035$; $V_{n3} = 0.035$:
 а - $V_{n4} = 0.035$; б - 0.045; в - 0.055; г - 0.075; д - 0.095; е - 0.115

ется и сопротивление. В результате аэродинамическое качество постепенно возрастает до 20.6 при $V_{n4} = 0.105$, а далее начинает снижаться.

Таким образом, варьируя скоростью отсоса и добиваясь требуемого почти безотрывного спектра обтекания профиля, можно подобрать рациональный режим работы системы управления его циркуляцией с минимальными энергетическими затратами и с наибольшим аэродинамическим качеством.

Заключение. Численно обоснован способ управления турбулентным обтеканием толстого профиля с вмонтированными в контур вихревыми ячейками с помощью интенсификации циркулирующих внутри них потоков за счет распределенного отсоса с

поверхности размещенных в пределах ячеек центральных тел. Показано, что воздействие на движение жидкости в малогабаритных ячейках способно обеспечить плавный, практически безотрывный режим течения вокруг профиля. Оценка дополнительного вклада в лобовое сопротивление, обусловленного энергетическими затратами, позволила установить существование оптимальной величины скорости отсоса в вихревых ячейках V_n (равное 0.035), при которой аэродинамическое качество профиля максимально и близко к 19 при нулевом угле атаки. При тонкой настройке системы управления обтеканием профиля по скоростям отсоса в четырех вихревых ячейках (0.025; 0.035; 0.035; 0.105) удается повысить его аэродинамическое качество до 20.6.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№№ 02-01-00670, 02-02-81035 и 02-01-01160).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шукин Л.Н.* Летательные аппараты "ЭКИП" // Гражданская авиация. 1993. № 6. С. 11–15.
2. *Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г.* Численное моделирование ламинарного обтекания цилиндра с пассивными и активными вихревыми ячейками в рамках концепции декомпозиции расчетной области и при использовании многоярусных сеток // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 8. С. 33–41.
3. *Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г.* Расчет ламинарного обтекания профиля с пассивными и активными вихревыми ячейками на многоблочных пересекающихся сетках // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 3. С. 30–35.
4. *Усачов А.Е., Исаев С.А., Четверушкин Б.Н., Леонтьев А.И.* Численный анализ влияния крупномасштабных вихревых структур на характеристики ламинарных и турбулентных течений // Актуальные проблемы акустики, гидродинамики и промышленной аэродинамики: Тр. ЦАГИ. 1999. Вып. № 2634. С. 375–382.
5. *Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г.* Численный анализ эффективности вихревых ячеек при ламинарном и турбулентном обтекании кругового цилиндра со встроенными вращающимися телами // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 4. С. 88–96.
6. *Баранов П.А., Исаев С.А., Судаков А.Г.* Численное моделирование влияния сгенерированной завихренности на дорожку Кармана за круговым цилиндром // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 2. С. 68–74.
7. *Баранов П.А., Исаев С.А., Усачов А.Е.* Численный анализ влияния вращающихся кормовых цилиндров на нестационарный след за удлиненным телом // Инж.-физ. ж. 2000. Т. 73. № 3. С. 606–613.
8. *Чжен П.* Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979. 552 с.
9. *Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г.* Численное моделирование эффекта снижения сопротивления цилиндра с вихревыми ячейками при наличии системы управления турбулентным пограничным слоем // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 17. С. 16–23.
10. *Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Н.* Численный анализ влияния угла атаки на турбулентное обтекание толстого профиля с вихревыми ячейками потоком несжимаемой жидкости // Инж.-физ. ж. 2000. Т. 73. № 4. С. 719–727.
11. *Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г.* Расчет отрывного обтекания низкоскоростным воздушным потоком профиля с вихревыми ячейками // Инж.-физ. ж. 1998. Т. 71. № 6. С. 1116–1120.
12. *Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г.* Численное моделирование эффекта увеличения аэродинамического качества профилей за счет отсоса в вихревых ячейках // Инж.-физ. ж. 1999. Т. 72. № 3. С. 572–575.
13. *Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Пригородов Ю.С.* Эффект суперциркуляции при обтекании толстого профиля с вихревыми ячейками // Докл. РАН. 2001. Т. 377. № 2. С. 198–200.
14. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. V. 32. № 8. P. 1598–1605.
15. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. СПб.: БГТУ, 2001. 107 с.

16. *Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Судаков А.Г.* Численное моделирование турбулентного обтекания потоком несжимаемой вязкой жидкости тел криволинейной формы при наличии подвижного экрана // Инж.-физ. ж. 1998. Т. 71. № 4. С. 618–631.
17. *Lien F.S., Chen W.L., Leschziner M.A.* A multiblock implementation of a nonorthogonal, collocated finite volume algorithm for complex turbulent flows // Intern. J. Numer. Meth. in Fluids. 1996. V. 23. № 6. P. 567–588.
18. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А. и др.* Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учетом ее асимметрии // Инж.-физ. ж. 2001. Т. 74. № 2. С. 62–67.
19. *Исаев С.А., Гувернюк С.В., Зубин М.А., Пригородов Ю.С.* Численное и физическое моделирование низкоскоростного воздушного потока в канале с круговой вихревой ячейкой // Инж.-физ. ж. 2000. Т. 73. № 2. С. 220–227.
20. *Исаев С.А., Баранов П.А., Гувернюк С.В., Зубин М.А.* Численное и физическое моделирование турбулентного течения в расширяющемся канале с вихревой ячейкой // Инж.-физ. ж. 2002. Т. 75. № 2. С. 3–8.

Санкт-Петербург
E-mail: isaev@SI3612.spb.edu

Поступила в редакцию
24.IV.2002