

УДК 532.517.2

© 2003 г. П. А. БАРАНОВ, В. Л. ЖДАНОВ, С. А. ИСАЕВ, В. Б. ХАРЧЕНКО, А. Е. УСАЧОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЛАМИНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА С ПЕРФОРИРОВАННЫМ КОЖУХОМ

На основе численного моделирования нестационарного двумерного ламинарного обтекания кругового цилиндра с перфорированным кожухом проанализирован способ управления течением в следе за счет переброски части потока из передней точки торможения по внутренним каналам к окнам в кожухе в зоне отрыва.

Ключевые слова: ламинарное обтекание, вязкая жидкость, перфорированный цилиндр, уравнения Навье–Стокса, многоблочный алгоритм.

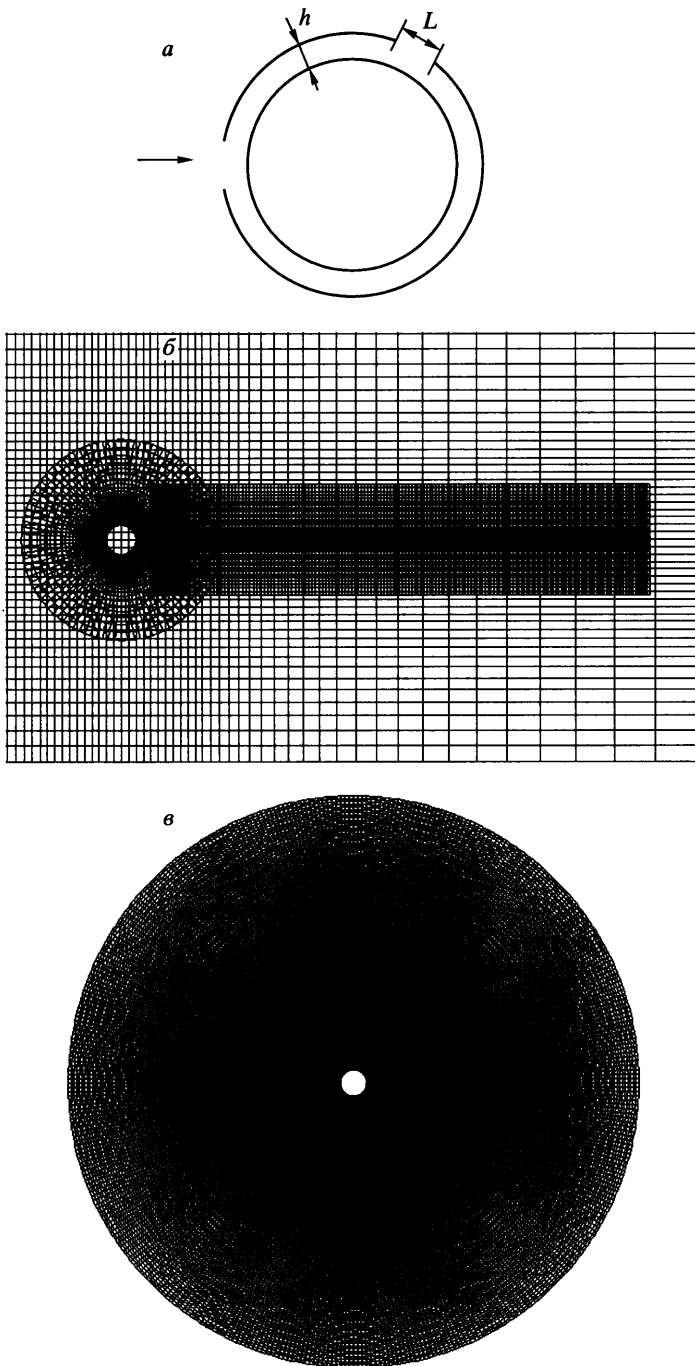
Применение развитого многоблочного алгоритма решения нестационарных уравнений Навье–Стокса на пересекающихся структурированных сетках (см., например, [1]) позволяет продолжить исследование способов воздействия на ближний след за плохообтекаемым телом, начатых в [2–5], акцентируя внимание на способах управления потоком [6], обеспечивающих энергосберегающий режим их реализации.

Рассмотренный в [2–4] способ управления обтеканием тел на основе использования встроенных вихревых ячеек принадлежит к числу энергозатратных, причем при ламинарном режиме обтекания тела не удастся обеспечить снижение сопротивления приемлемым уровнем энергетических затрат. Поэтому значительный интерес в исследованиях по данной проблематике проявляется к пассивным способам управления, в число которых входит, например, переброска жидкости из передней критической точки торможения в заднюю по прямолинейному каналу постоянного сечения с последующим истечением ее в ближний след [7]. Представляется перспективной организация перетока жидкости по каналам непосредственно под контуром обтекаемого тела с последующим выдувом ее через окна, располагаемые в зоне отрыва потока (зоне пониженного давления).

В качестве модели рассматривается тело простой конфигурации – круговой цилиндр с кольцевым потоковообразующим каналом постоянной высоты h , у которого одно входное и несколько выходных щелевых окон одинакового размера L (фиг. 1,а). Входное окно располагается в районе передней критической точки цилиндра. Анализируются два варианта размещения выходных окон: 1) единственное окно находится в районе задней критической точки; 2) выполнены два симметричных окна, центры которых располагаются под углом 60° к направлению невозмущенного потока.

Задача обтекания рассматриваемого тела равномерным потоком несжимаемой вязкой жидкости решается в двумерной постановке при числе Рейнольдса невозмущенного потока $Re = 150$. Выбор указанного числа Рейнольдса гарантирует полное соответствие применяемой расчетной модели двумерному характеру течения. Как показано в исследованиях пространственного обтекания кругового цилиндра, двумерное нестационарное течение существует до $Re = 190$ (см., например, [8, 9]).

1. Постановка задачи. Для решения задачи о двумерном нестационарном обтекании потоком несжимаемой вязкой жидкости кругового цилиндра, закрытого тонкостен-



Фиг. 1. Схема цилиндра в тонком кожухе с впускным и выпускными окнами (а); фрагмент многоблочной расчетной сетки (б) и двухъярусная цилиндрическая сетка (в) для расчета нестационарного ламинарного обтекания кругового цилиндра

ным цилиндрическим кожухом с окнами, применяется математическая модель, основанная на системе нестационарных уравнений Навье–Стокса [1].

Постановка данной задачи аналогична изложенной в [3]. Фиксированные параметры набегающего потока (принимаются в качестве характерных параметров нормировки) задаются на входной границе, мягкие граничные условия – на выходных границах, удаленных от тела на достаточно большое расстояние. На омываемых внутренних и внешних поверхностях рассматриваемого тела ставятся условия прилипания, а толщина кожуха принимается пренебрежимо малой по отношению к характерному размеру.

Величина скорости набегающего потока U_∞ и диаметр цилиндрического кожуха d приняты в качестве масштабов обезразмеривания.

2. Метод расчета. Примененный расчетный алгоритм основан на обобщенной процедуре глобальных итераций, предназначенной для решения конечно-объемным факторизованным методом уравнений переноса на многоблочных пересекающихся сетках O- и H-типа. Система исходных уравнений записывается в дельта-форме в криволинейных, согласованных с границами расчетной области координатах относительно приращений зависимых переменных, включающих декартовы составляющие скорости. После линеаризации система исходных уравнений решается с помощью согласованной неявной конечно-объемной процедуры коррекции давления [1], основанной на концепции расщепления по физическим процессам и записанной в E-факторной формулировке. При этом для дискретизации временных производных используется схема второго порядка аппроксимации [10]. Для уменьшения влияния численной диффузии в расчетах течений с организованным отрывом потока, весьма чувствительных к ошибкам аппроксимации конвективных членов, в явной части уравнений переноса используется одномерный аналог противопоточной схемы с квадратичной интерполяцией [11]. Одновременно, чтобы избежать ложных осцилляций 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 немонотонностей в распределении давления при дискретизации градиента давления по схеме с центральными разностями на согласованном (с совмещенными узлами для скалярных переменных и декартовых составляющих скорости) шаблоне в блок коррекции давления введен монотонизатор с эмпирическим множителем. Его величина 0.1 определена в ходе численных экспериментов на задаче обтекания цилиндра и шара потоком вязкой несжимаемой жидкости. Высокая эффективность вычислительной процедуры для решения дискретных алгебраических уравнений обеспечена применением метода неполной матричной факторизации. Более подробно детали описанной процедуры расчета течения на многоблочных сетках изложены в [11].

Центральное место в развитой многоблочной технологии [1] занимает автоматизированный анализ подобластей с выделением в каждой из рассматриваемых сеток расчетных и связанных ячеек. В расчетных ячейках решаются исходные уравнения, записанные в приращениях зависимых переменных, с применением процедуры коррекции давления. В связанных ячейках параметры определяются методом линейной интерполяции по значениям в расчетных узлах покрывающей сетки [12], при этом приращение зависимых переменных в этих узлах принимаются равными нулю.

Такой подход позволяет не только описать многосвязные области со сложной геометрией в рамках сеток простой топологии, но и существенно уточнить решение в выделенных подобластях с резкими изменениями характеристик течения: пограничных слоев, областях ближнего и дальнего следа, локальных вихревых и отрывных зонах.

Два варианта расчетных многоблочных сеток выбраны для анализа обтекания кругового цилиндра: сочетание прямоугольных и цилиндрических сеток различного масштаба (фиг. 1,б) и многоярусная цилиндрическая сетка (фиг. 1,в). Обтекание цилиндра

с потокообразующими каналами и окнами в кожухе рассчитывалось на композитной сетке первого типа.

На фиг. 1,б внешняя прямоугольная область размером 27×20 содержит 70×60 ячеек, неравномерно распределенных в пространстве. Минимальный шаг сетки в окрестности тела 0.2. Центр кругового цилиндра располагается на расстоянии 10 от передней границы симметрично относительно верхней и нижней границ. Две многоярусные цилиндрические сетки окружают круговой цилиндр. Ближайшая к внешнему контуру цилиндра кольцевая сетка имеет толщину 0.2 и пристеночный шаг 0.002. Она содержит 15×100 ячеек. Внешняя кольцевая область толщиной 2 разбивается на 20×100 ячеек. На расстоянии 0.8 от цилиндра располагается дополнительная прямоугольная область с размерами 13.5×3 и числом ячеек 175×40 . Последняя сетка предназначена для улавливания особенностей течения в ближнем и дальнем следе за круговым цилиндром.

Потокообразующий внутренний канал (его размер h варьируется от 0.1 до 0.15) в случае трех окон с размером каждого $L = 0.24$ вдоль контура цилиндра разбивается сеткой 20×150 . Пристеночный шаг, как и минимальный окружной кромочный, равен 0.005. Прилегающая к контуру сетка содержит 150 ячеек по окружной координате вместо 100 в случае отсутствия окон.

Методическое исследование ламинарного обтекания кругового цилиндра включает также расчеты двумерного течения на двухъярусной цилиндрической стеке (фиг. 1,в). Ближайшая к стенке цилиндра кольцевая сетка с шириной кольца 0.1 имеет пристеночный шаг 0.002, количество ячеек 13×400 ; внешняя круговая сетка радиуса $R_\infty = 10$ содержит 200×400 ячеек.

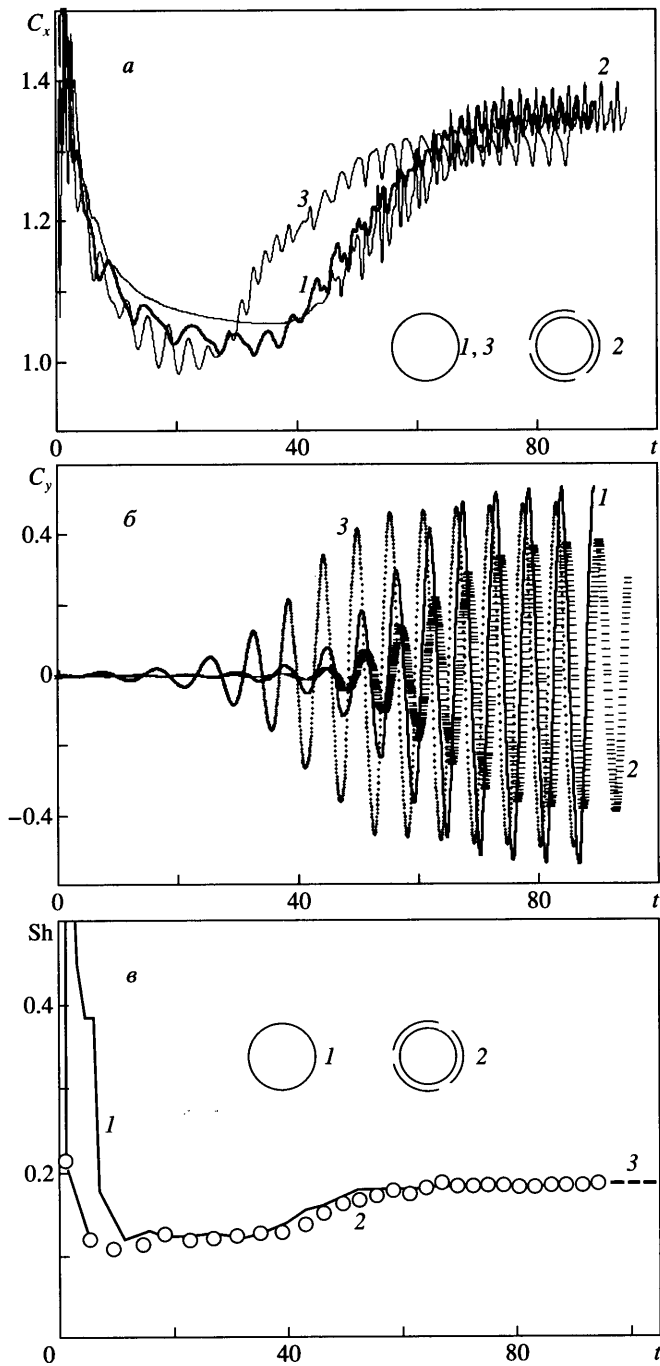
Величина безразмерного временного шага, определяемая в долях отношения диаметра кожуха к характерной скорости набегающего потока, установлена в ранее проведенных тестовых расчетах [1] и равна 0.02.

3. Методическое исследование. Влияние топологии сетки на процесс формирования нестационарного обтекания кругового цилиндра показывается на фиг. 2. Ранее проведено [3] методическое исследование ламинарного обтекания цилиндра на многоярусной цилиндрической стеке. Эволюция интегральных характеристик кругового цилиндра во времени, начиная с момента начала движения (или с момента удара), свидетельствует о явной зависимости $C_x(t)$ и $C_y(t)$ от топологии сетки. Выход на автоколебательный режим на цилиндрической сетке реализуется несколько быстрее. Это, по-видимому, связано с масштабным эффектом, т.е. меньшими размерами круговой области по сравнению с рассмотренной прямоугольной. В первом случае возмущения от задней границы быстрее вызывают дестабилизирующее воздействие на картину обтекания цилиндра.

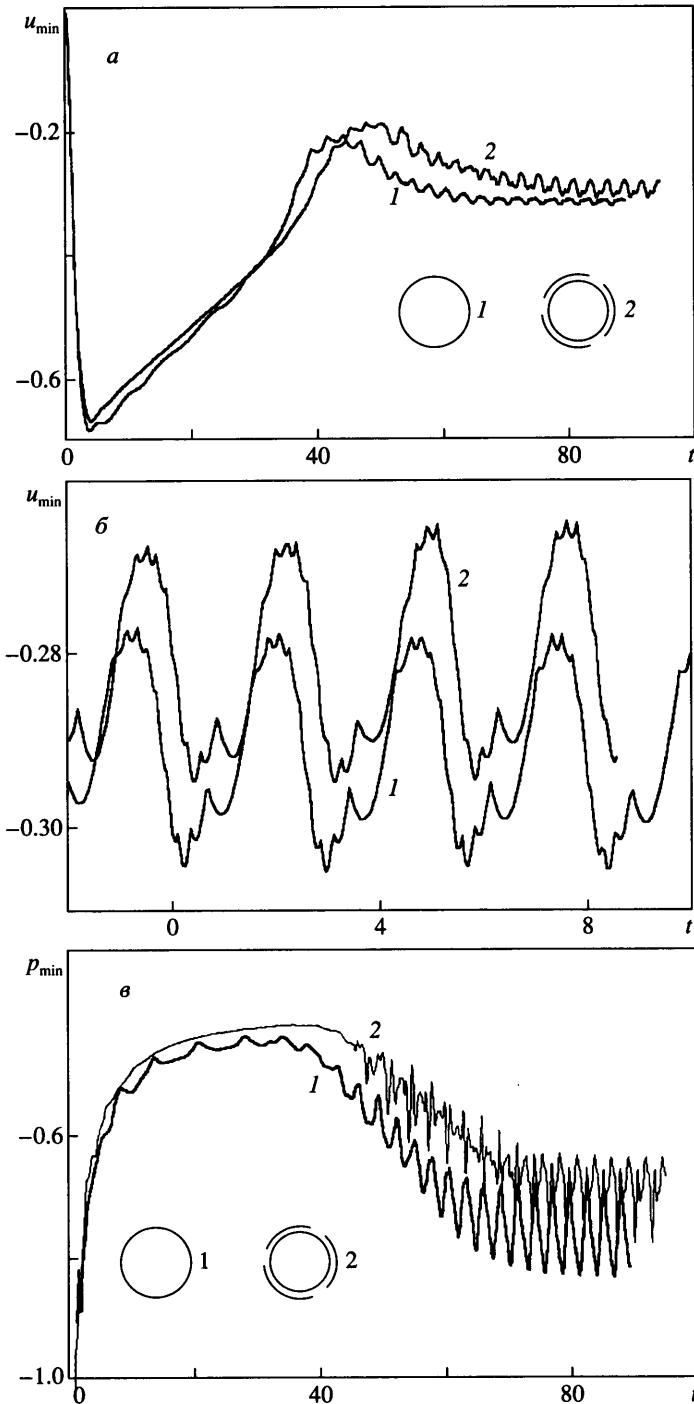
Анализ зависимостей экстремальных локальных параметров потока от времени – минимальной скорости возвратного течения в следе u_{\min} (фиг. 3,а), минимального давления p_{\min} (фиг. 3,в), а также эволюции коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы (фиг. 2), определил несколько характерных участков их поведения, существование которых указано ранее в [3].

Прежде всего следует отметить фазу начала нестационарного процесса обтекания кругового цилиндра. "Ударный" характер обуславливает большие начальные градиенты всех рассматриваемых параметров и высокий темп развития процесса. Интересно оценить длительность фазы по отношению к продолжительности выхода на режим автоколебательного обтекания цилиндра. Оказывается, что она составляет примерно 3% от указанного промежутка.

В дальнейшем происходит снижение темпов развития процесса. Примерно до $t = 45$ предполагается участок почти линейного изменения минимальной величины скорости в ближнем следе за цилиндром при практически постоянном статическом давлении. Для этого участка продолжительностью примерно 45% от времени выхода на автоколеба-



Фиг. 2. Зависимости коэффициентов лобового сопротивления C_x (*a*) и подъемной силы C_y (*б*) кругового цилиндра (гладкого – 1, 3 и с окнами в контуре – 2) от времени t : 1, 2 – расчеты на композитной сетке, 3 – на цилиндрической сетке при $R_{\infty} = 10$; *в* – $Sh(t)$ при обтекании кругового цилиндра: 1 – расчет для гладкого цилиндра; 2 – расчет для цилиндра с двумя окнами в контуре; 3 – экспериментальные данные [3, 13–16]



Фиг. 3. Зависимости от времени t минимальных величин продольной составляющей скорости u_{\min} (*a*, *б*) и статического давления p_{\min} (*в*) в следе за круговым цилиндром без окон в контуре (1) и с окнами (2) на переходном (*a*, *в*) и автоколебательном (*б*) режимах его ламинарного обтекания

тельный режим обтекания характерно отсутствие подъемной силы и постепенный выход на минимальное значение коэффициента лобового сопротивления.

Следующий этап, завершающий переходной процесс формирования автоколебательного режима обтекания цилиндра, составляет примерно 50% от времени его установления. Этап характеризуется постепенным понижением минимального давления в следе и увеличением по абсолютной величине минимальной скорости возвратного течения. Колебания указанных выше характеристик, вызванные поперечной раскачкой течения, становятся весьма заметными. Также постепенно нарастает амплитуда колебаний коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы, приводящих к увеличению осредненного лобового сопротивления цилиндра.

Отметим, что начальная фаза обтекания цилиндра трактуется расширенно – до момента $t = 20$, т.е. до границы существования симметричной вихревой структуры в следе. Естественно, что этот период включает в себя часть линейного участка зависимости $u_{\min}(t)$ и, что более важно, нелинейную часть зависимости $p_{\min}(t)$. Рассматриваемая фаза обтекания отличается преобладанием быстропотекающих процессов формирования ближнего следа, сопровождающихся генерацией высокого разрежения и большими скоростями возвратного потока. По мере увеличения длины отрывной зоны скорость циркуляционного течения и величина дефицита давления в ней падают. Важно отметить, что протяженность зоны в конце начальной фазы значительно превосходит диаметр цилиндра.

В первой фазе переходного процесса (она продолжается до $t = 45$) проявляются элементы асимметрии течения в результате потери устойчивости и перестройки вихревой структуры в ближнем следе за цилиндром. Особенно четко потеря симметрии течения в следе отражается на эволюции картин изолиний поперечной составляющей скорости. Трансформация в следе происходит постепенно, о чем свидетельствует монотонный характер зависимостей $u_{\min}(t)$ и $p_{\min}(t)$. В то время как $u_{\min}(t)$ следует линейному закону, $p_{\min}(t)$ изменяется весьма незначительно. Такое поведение локальных характеристик потока обуславливается тем обстоятельством, что на рассматриваемом временном отрезке все изменения происходят только на небольшом расстоянии за цилиндром. Интересно то, что в конце периода вихревая структура в дальнем следе топологически уже аналогична структурам автоколебательного режима. К этому моменту также значительно сокращается длина отрывной зоны в ближнем следе за цилиндром. Следует подчеркнуть, что движение жидкости перед цилиндром все еще симметричное. Как следствие, коэффициент подъемной силы цилиндра очень мал, т.е. распределения давления и трения по поверхности цилиндра мало отличаются от симметричных.

Вторая стадия переходного процесса характеризуется развитием нестационарного обтекания и переднего, и заднего контуров цилиндра. Ее продолжительность колеблется от 50 до 80. На этом этапе цилиндр как бы находится в потоке с переменным углом атаки. Как следствие, существенно возрастают интегральные нагрузки на тело, а в ближнем следе увеличиваются разрежение и скорость возрастного течения.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений числа Струхала, полученных при использовании различных расчетных сеток и в экспериментах на разных установках [13–16] на автоколебательном режиме обтекания кругового цилиндра при $Re = 150$, показало их хорошее согласование.

Зависимость числа Струхала от времени, начиная с момента внезапного движения потока, коррелирует с уже описанными фазами обтекания цилиндра (фиг. 2, *в*). Начальный участок характеризуется резким падением Sh , а начальная фаза симметричного обтекания и участок переходного процесса с элементами асимметрии течения – практически постоянным уровнем Sh . Со второй фазы переходного процесса начинается постепенное нарастание Sh до значений, полученных в экспериментах (см. таблицу).

Ссылка	Данная работа	[3]	[16]	[15]	[14]	[13]
Sh	0.182	0.18	0.182	0.182	0.183	0.185

4. Расчетные результаты. Влияние количества окон в контуре цилиндра и размера потокообразующего канала на обтекание цилиндра иллюстрируется на фиг. 2–6.

В качестве базовой компоновки выбрана конфигурация цилиндра с тремя окнами, длина которых по контуру $L = 0.12$, а центры составляют равносторонний треугольник. Высота проходного сечения кольцевого канала равна 0.1. Через окна в кормовой части цилиндра организован выдув жидкости в область отрыва сдвигового слоя. Как следствие, фиксируются координаты отрыва потока при нестационарном обтекании цилиндра.

Лобовые сопротивления базовой компоновки и цилиндра без протоков практически мало различаются, в то время как коэффициент подъемной силы C_y базовой компоновки уменьшается в 1.4 раза на автоколебательном режиме обтекания (фиг. 2,а). Как и в случае конфигурации цилиндра с вихревыми ячейками [3], обнаружена задержка потери устойчивости течения в ближнем следе за цилиндром, т.е. симметричная вихревая структура сохраняется дольше, чем при обтекании стандартного цилиндра.

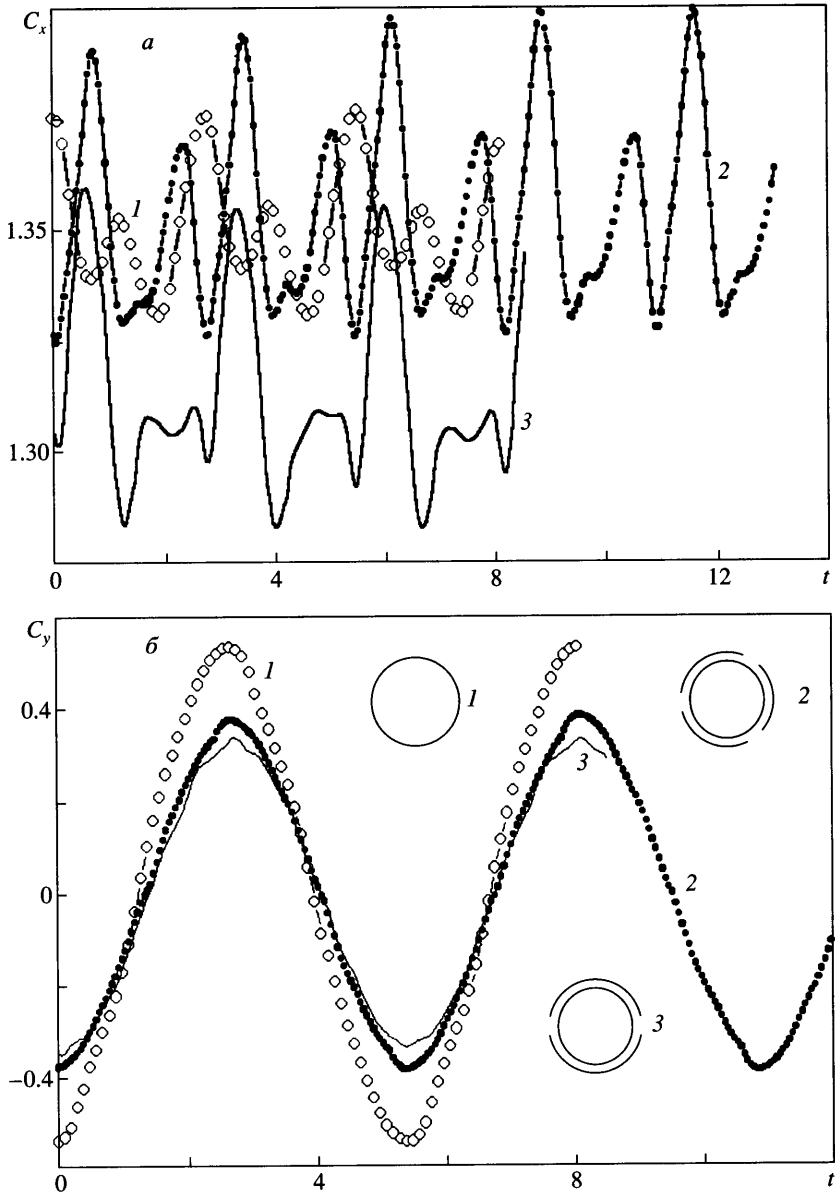
Истечение жидкости через окна в ближнюю область следа приводит к уменьшению абсолютной скорости возвратного течения и дефицита давления за цилиндром (фиг. 3). Физика явления состоит в том, что выдуваемая среда снижает эжекционную способность отрывных слоев вовлекать в себя среду из области, примыкающей к цилиндру. Отметим наблюдаемое при этом сокращение размера отрывной зоны. Малая величина регистрируемого эффекта для скорости и давления (число Рейнольдса $Re = 150$) определяется тем, что максимальная скорость истекающих струй в сечениях выходных окон не превышает 20% от скорости невозмущенного потока. Незначительная трансформация структуры ближнего следа под воздействием выдуваемой среды подтверждается поведением числа Струхала от времени (фиг. 2,б), которое практически не отличается от зависимости $Sh(t)$ для гладкого кругового цилиндра.

Изменения интегральных силовых характеристик цилиндра при различном расположении на его контуре выходных окон (проходное сечение потокообразующего канала сохраняется) представлены на фиг. 4. Минимальное лобовое сопротивление реализуется, когда выходное окно располагается на цилиндре в задней точке торможения потока, т.е. единственная струя истекает вдоль оси следа навстречу возвратному течению. Данная компоновка не имеет преимуществ перед базовой по коэффициенту подъемной силы.

Расширение сечения потокообразующего канала при низком числе Рейнольдса способствует увеличению расхода пропускаемой жидкости и скорости истекающих щелевых струй. В результате уменьшаются амплитуды колебаний коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления для базовой конфигурации (фиг. 5).

Картины нестационарного обтекания цилиндра с разным количеством окон и с различающимися поперечными сечениями потокообразующего канала сравниваются на фиг. 6. Отметим, что приведенные картины не синхронизированы по времени, т.е. соответствуют различным моментам обтекания. В характерных сечениях нанесены профили скорости и линии тока, проходящие через края окон (пунктиром указан единичный уровень).

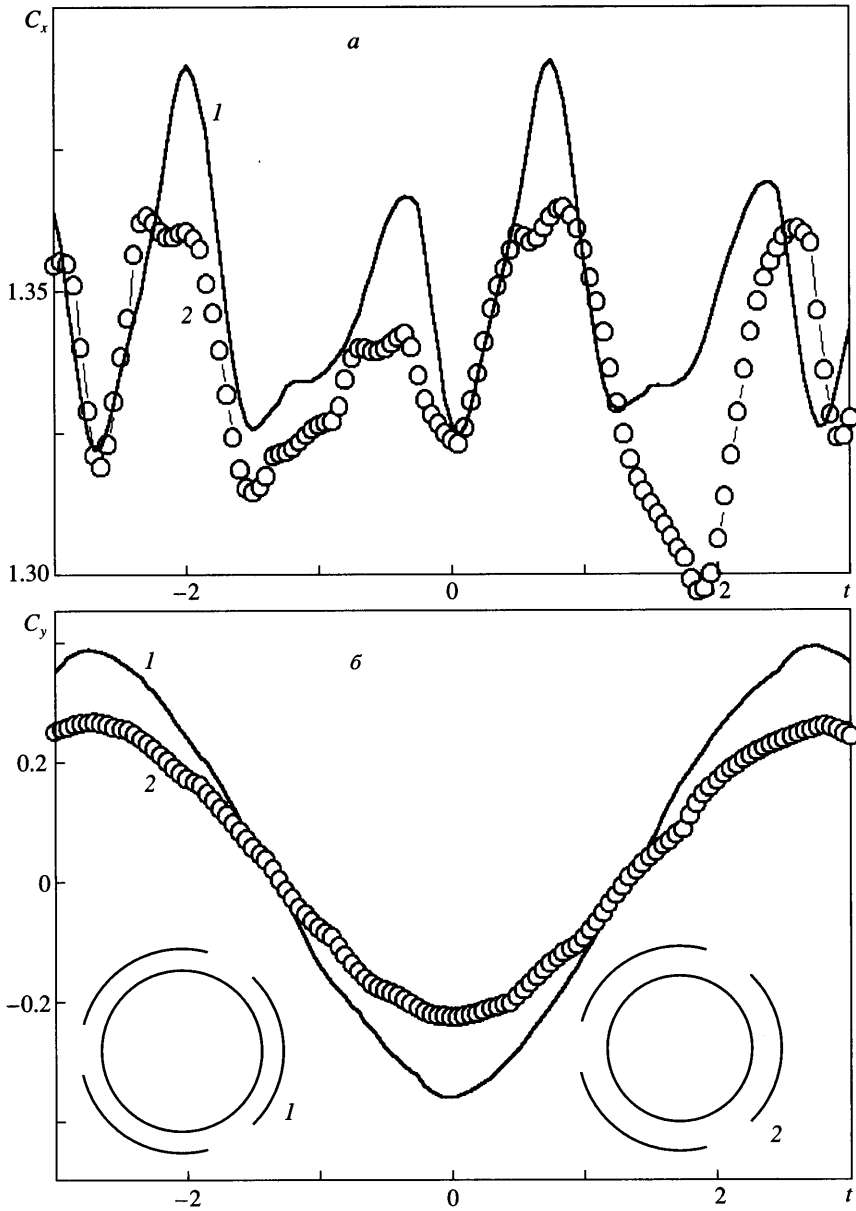
Течение в узком потокообразующем канале носит одномерный характер. Тонкая струйка тока набегающего потока в окрестности плоскости симметрии попадает во



Фиг. 4. Зависимости коэффициентов лобового сопротивления C_x (а) и подъемной силы C_y (б) кругового цилиндра при его ламинарном обтекании от времени: 1 – гладкий цилиндр; 2 – цилиндр с тремя окнами (базовая конфигурация); 3 – цилиндр с двумя окнами в кожухе

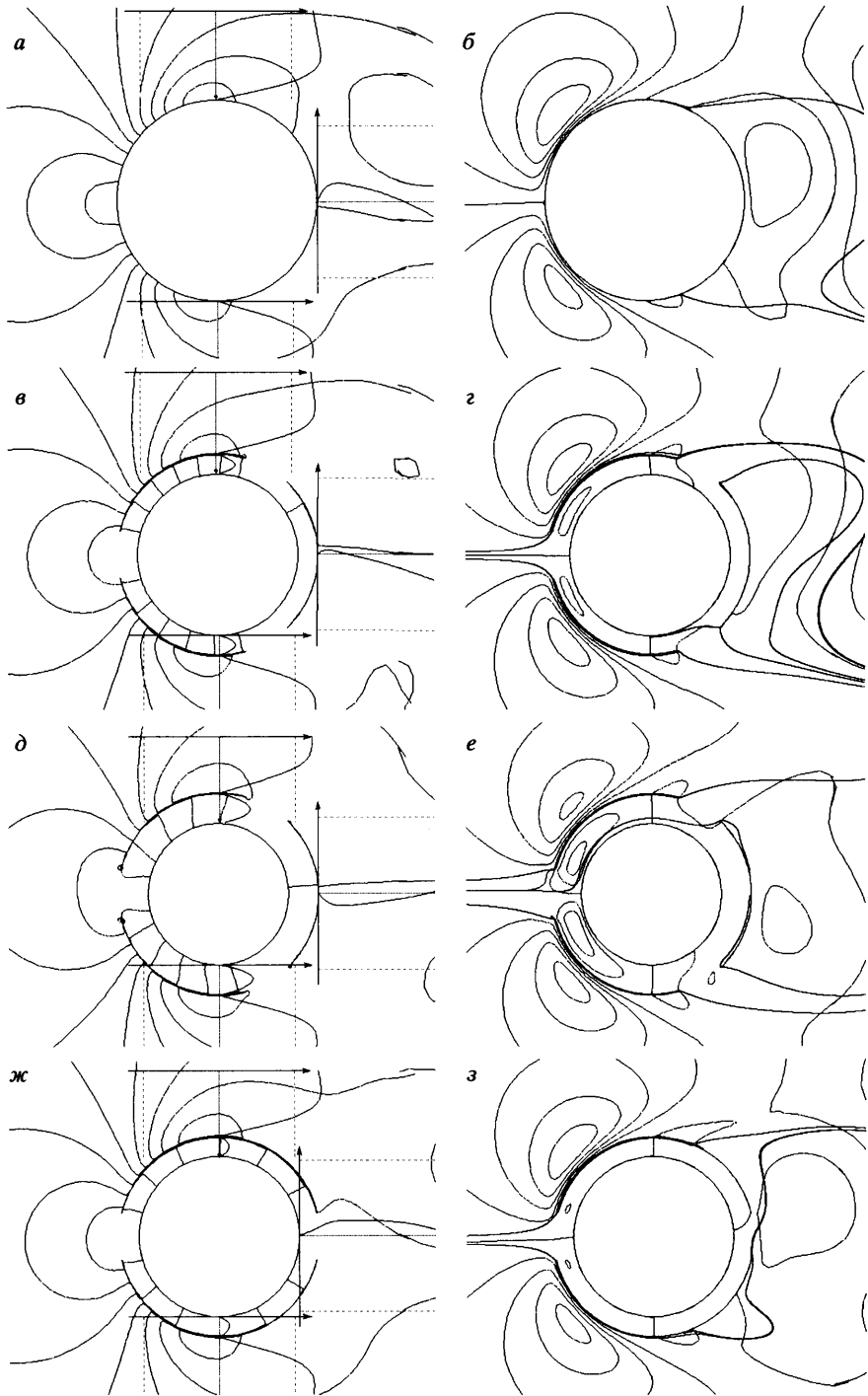
входное окно цилиндра, формируя сначала течение в канале, а потом и истекающие щелевые струи.

Расширение потокообразующего канала в полтора раза приводит к заметной неравномерности течения в нем и, как следствие, неоднородности поля давления поперек канала. Растет расход через входное окно и (в результате) увеличивается скорость истекающего струйного потока.



Фиг. 5. Зависимости коэффициентов лобового сопротивления C_x (а) и подъемной силы C_y (б) кругового цилиндра с тремя окнами при его ламинарном обтекании от времени при различных сечениях внутреннего канала: 1, 2 – $h = 0.1; 0.15$

Результаты исследования (фиг. 6) показывают, что низкоинтенсивные струи не в состоянии в значительной мере повлиять на нестационарную вихревую структуру следа, которая при низких числах Рейнольдса является доминирующей и игнорирующей слабые воздействия. Это проявляется прежде всего в формировании поперечного знакопеременного потока, примыкающего к донной части цилиндра, даже при истечении струи в окрестности задней точки торможения (фиг. 6,з).



Фиг. 6. Картины изобар (а, в, д, ж) и изотех вертикальной составляющей скорости (б, г, е, з) с шагом 0.15; а, б – цилиндр с гладким контуром; в–е – с тремя окнами; ж, з – с двумя окнами в кожухе

Заключение. Численно обоснован пассивный, не требующий дополнительных энергетических затрат способ управления нестационарным ламинарным обтеканием кругового цилиндра, закрытого кожухом с входным и выходными окнами. Способ реализуется за счет переброса жидкости, отобранной из окрестности передней точки торможения, через внутренние кольцевые каналы и выходные окна на боковой поверхности кожуха в область пониженного давления. Показано, что слабое воздействие на картину отрывного течения сопровождается существенным (в 1.5–2 раза при $Re = 150$) уменьшением поперечной знакопеременной нагрузки на тело.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А.* Тестирование многоблочного алгоритма расчета нестационарных ламинарных отрывных течений // Инж.-физ. ж. 2002. Т. 75. № 2. С. 28–35.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *Жданов В.Л., Исаев С.А., Ниман Х.Ю.* Управление ближним следом за круговым цилиндром при выдуве низконапорных струй // Инж.-физ. ж. 2001. Т. 74. № 5. С. 36–38.
6. *Чжен П.* Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979. 552 с.
7. *Igarashi T.* Flow characteristics around a circular cylinder with a slit // Bull. JSME. 1978. V. 21. № 154. P. 656–664.
8. *Barkley D., Henderson R.* Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder // J. Fluid Mech. 1996. V. 322. P. 215–241.
9. *Williamson C.H.K.* Three-dimensional wake transition // J. Fluid Mech. 1996. V. 328. P. 345–407.
10. *Пейре Р., Тейлор Т.Д.* Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 352 с.
11. *Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А.* Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 253 с.
12. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Метов Х.Т., Усачов А.Е.* 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.
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. *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.
15. *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.
16. *Williamson C.H.K., Roshko A.* Measurements of base pressure in the wake of a cylinder at low Reynolds numbers // Z. Flugwissund. Weltraumforsch. 1990. Bd. 14. H. 1–2. P. 38–46.