

УДК 532.517.4:536.24

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ОБТЕКАНИИ  
КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА.  
ЧАСТЬ 1. МЕТОДИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ\***

С.А. ИСАЕВ<sup>1</sup>, П.А. БАРАНОВ<sup>1</sup>, Н.А. КУДРЯВЦЕВ<sup>1</sup>, Ю.В. ЖУКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Академия гражданской авиации, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Минск*

Вихревая динамика и конвективный теплообмен при турбулентном нестационарном обтекании нагретого цилиндра в неограниченном потоке и в плоскопараллельном канале при фиксированном числе Рейнольдса  $4,5 \cdot 10^4$  рассчитывается на основе решения двумерных уравнений Рейнольдса и энергии с помощью многоблочного факторизованного алгоритма с использованием пересекающихся прямоугольных и цилиндрических сеток, реализованного в пакете VP2/3. На основе сравнительного анализа численных прогнозов с данными измерений давления и тепловых потоков, а также с расчетными результатами, полученными на основе пакета FLUENT, верифицируется модель переноса сдвиговых напряжений Менгера. Дается оценка влияния нестационарности течения на увеличение интегральных силовых и тепловых нагрузок на цилиндр.

**ВВЕДЕНИЕ**

Численное моделирование нестационарного вихревого теплообмена представляет одно из актуальных научных направлений современной теплофизики. Растущий интерес к нему стимулируется, с одной стороны, стремительным прогрессом в области компьютеров и совершенствованием математических моделей и прежде всего моделей турбулентности, а с другой стороны, поиском эффективных способов интенсификации теплообменных процессов. На протяжении последних десятилетий традиционно преимущественное внимание уделялось расчетам вихревой динамики, в то время как численному анализу нестационарного теплообмена посвящены лишь единичные работы. В проведенном исследовании рассматривается турбулентный теплообмен при нестационарном обтекании кругового цилиндра несжимаемой вязкой жидкостью.

Предыстория моделирования нестационарного турбулентного обтекания кругового цилиндра связывается, прежде всего, с развитием полуэмпирических моделей турбулентности. Очевидно, что за расчетами ламинарного обтекания тел на основе нестационарных уравнений Навье — Стокса (см., например, [1]) должны последовать решения нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 02-02-17562, 05-02-16184, 04-02-81005, 05-01-00162 и 02-01-01160) и БФФИ (проект ТО2Р-015).

с помощью дифференциальных уравнений для турбулентных характеристик. Причем вполне естественно, что такие задачи первоначально были решены в двумерной постановке.

Нет необходимости делать подробный обзор работ, выполненных в рамках указанного подхода. Достаточно указать, что первые численные исследования турбулентного обтекания кругового цилиндра при докритических числах Рейнольдса были проведены в середине восьмидесятых годов (см., например, [2]), причем для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась двухпараметрическая диссипативная модель ( $k$ - $\epsilon$ -модель), предложенная в работе [3]. В начале девяностых годов были сделаны довольно подробные расчеты обтекания цилиндра в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса, нашедшие отражение в обзорной статье [4].

В 1993 г. предложенная в [5] модель переноса сдвиговых напряжений (MSST) обобщила нашедшую широкое применение модель  $k$ - $\epsilon$  и более корректную для описания пристеночных турбулентных течений модель  $k$ - $\omega$  Вилкокса. Обширная статья [6] стала одним из первых систематических методических исследований, связанных с расчетом двумерных нестационарных турбулентных течений около кругового цилиндра в рамках указанной модели.

Прогресс в области вычислительной техники, приведший к созданию мощных компьютеров, обладающих большими ресурсами и, в частности, процессорами с высокой тактовой частотой, а также параллельных компьютерных систем, позволил одновременно с совершенствованием полуэмпирических моделей турбулентности подойти к решению задач пространственной вихревой динамики. Как указывается в [4], начиная с  $Re = 190$ , ламинарное обтекание кругового цилиндра приобретает трехмерный нестационарный характер, сопровождающийся образованием в поле течения спиралевидных ориентированных по потоку вихрей. Поэтому все в большей степени для расчета ламинарного и турбулентного обтекания цилиндра используются подходы, базирующиеся на решении трехмерных нестационарных уравнений Навье — Стокса. Это прежде всего модель крупных вихрей — LES (см., например, [7]), а также более совершенная модель отсоединенных вихрей — DES, объединяющая LES с решением уравнений Рейнольдса [8].

Хотя последние подходы в целом представляются предпочтительными, особенно в тех случаях, когда априори информация о нестационарном турбулентном течении неизвестна, тем не менее поиск упрощенных методов решения конкретных инженерных задач остается вполне оправданным. Это связано не только с очень высокой трудоемкостью расчетов трехмерных течений в рамках указанных подходов. Так, например, решение нестационарной трехмерной задачи на персональных компьютерах с тактовой частотой порядка 800 МГц требует несколько месяцев непрерывных расчетов на сетках, содержащих всего лишь несколько сотен тысяч расчетных ячеек.

Более важным обстоятельством является незначительная интенсивность наблюдаемых на практике спиралевидных вихревых структур, что фактически позволяет рассматривать содержащие их течения как квазидвумерные турбулентные. Приемлемость такого упрощенного подхода к интерпретации вихревых стационарных потоков, включающих в том числе развитые отрывные зоны, показана в [1, 9]. Есть основания полагать, что при наличии управляющих воздействий в следе, таких как, например, струйный выдув, картина нестационарного вихреобразования в ближнем следе за телом также будет близкой к квазидвумерной [10].

Данная работа помимо методических целей ориентирована на корреляционный анализ вихревой динамики и теплообмена в следе за круговым цилиндром при фиксированном числе Рейнольдса  $Re = 4,5 \cdot 10^4$ . Разработанные в [11, 12] многоблочные вычислительные технологии, реализованные в пакете VP2/3 (скорость–давление, двумерная и трехмерная версия), тестируются на пересекающихся структурированных сетках различной топологии в круговых и прямоугольных расчетных областях, в том числе в канале с загромождением 1:7,3. Полученные результаты сравниваются с аналогичными расчетными данными для конвективного теплообмена при нестационарном обтекании цилиндра с учетом загромождения канала [13], а также с имеющимися экспериментальными данными.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### Объекты исследования

В данной работе рассматривается турбулентное нестационарное обтекание кругового цилиндра в поперечном потоке вязкой несжимаемой жидкости, как в неограниченном пространстве, так и в плоскопараллельном канале. Параметры потока и характеристики турбулентности приводятся в работе в безразмерном виде. Скорость движения жидкости в однородной части потока и диаметр цилиндра принимаются в качестве характерных масштабов скорости и длины. Заданное число Рейнольдса, равное  $4,5 \cdot 10^4$ , соответствует докритическому режиму обтекания цилиндра [14] и выбирается для сравнения численных прогнозов с экспериментальными данными [15]. При выходе течения в следе за телом на автоколебательный режим в изотермических условиях при комнатной температуре ( $T = 293$  К) скачкообразно увеличивается температура стенки цилиндра до  $T = 373$  К. В дальнейшем исследуется нестационарный процесс прогрева следа и развитие циклического температурного поля около цилиндра. В качестве рабочей среды выбирается воздух ( $Pr = 0,72$ ), а температура потока ( $T = 293$  К) принимается в качестве характерной. Ширина рассмотренного канала равняется 7,3.

### Модель

Для решения задачи двумерного нестационарного турбулентного обтекания несжимаемой вязкой жидкостью кругового цилиндра и конвективного теплообмена при его ступенчатом нагреве применяется математическая модель, основанная на системе записанных в обобщенных криволинейных координатах нестационарных уравнений Рейнольдса и энергии. Для замыкания уравнений используется модель переноса сдвиговых напряжений (MSST), которая хорошо зарекомендовала себя в приложении к типичным пристеночным течениям, в том числе с отрывом потока [12].

В двухслойной низкорейнольдсовой  $k-\omega$ -модели Ментера объединяются низкорейнольдсовая  $k-\omega$ -модель Саффмена — Вилкокса (вблизи стенки) [5] и стандартная  $k-\epsilon$ -модель Лаундера — Сполдинга (во внешней зоне). Таким образом, вместо пристеночных функций, обычно дополняющих высокорейнольдсовые  $k-\epsilon$ -модели и не вполне корректных прежде всего в окрестностях критических точек, в прилегающем к стенке тонком слое течение рассчитывается с помощью одной из лучших пристеночных моделей. Вдали от стенки происходит сращивание решения с  $k-\epsilon$ -моделью, бесспорно предпочтительной для отображения сдвиговых слоев. При этом не вводятся никаких дополнительных членов в систему управляющих уравнений для характеристик турбулентности.

Важная особенность  $k$ - $\omega$ -модели Ментера характеризуется использованием концепции переноса сдвиговых напряжений, удачно реализованной в модели Джонсона — Кинга [16]. Выражение для вихревой вязкости в исходном варианте модели Ментера включает модуль завихренности. В [17] вместо него предлагается использовать модуль тензора скоростей деформаций. В такой модификации модель Ментера используется в данной работе, хотя следует отметить, что разница в прогнозах по новому и исходному вариантам модели невелика.

Следует отметить, что задача нестационарного теплообмена около цилиндра решается после установления автоколебательного режима течения в изотермической среде.

### Граничные условия

На входной части внешней границы расчетной области задаются параметры невозмущенного потока. Характеристики турбулентности формулируются также, как в [5, 16], и соответствуют условиям проведения физических экспериментов в аэродинамических трубах. Так, энергия турбулентности на входной границе  $k_\infty$  задается соответствующей степени турбулентности набегающего потока ( $Tu_\infty = 1,5\%$ ), а масштаб турбулентности  $L_\infty$  выбирается порядка характерного линейного размера задачи. Толщина пограничного слоя на входе в расчетную область для течения в канале принимается равной 0,175. В этом случае в пристеночных зонах на входе в канал задается профиль скорости по закону 1/7 [14].

На выходной части внешней границы ставятся мягкие граничные условия (условия продолжения решения, которые выводятся в предположении о равенстве нулю второй производной от зависимой переменной по нормальной к границе координате), на поверхности тела и на стенках канала — условия прилипания. Омываемые стенки канала рассматриваются изотермическими при  $T = 293$  К, а поверхность нагретого цилиндра имеет  $T = 373$  К.

### Начальные условия

Динамическая задача взаимодействия изотермического потока несжимаемой вязкой жидкости с круговым цилиндром решается, начиная с внезапного торможения цилиндра относительно движущейся жидкости. В результате в начальный момент  $t = 0$  реализуется удар жидкости о тело, и все параметры потока и характеристики турбулентности принимают входные значения. Как уже отмечалось, тепловая задача решается в предположении о скачкообразном нагреве поверхности цилиндра на  $100$  °С. В этом случае в момент  $t = t^*$  течение в окружающем пространстве является изотермическим с единичной температурой, а на цилиндре  $T$  принимается равной  $373$  К.

### Метод расчета

Разработка в последние годы многоблочных вычислительных технологий (см., например, [12]) во многом обусловлена численными исследованиями обтекания тел с вихревыми ячейками, которые стимулировали моделирование разномасштабных течений на совокупности Н- и О-образных структурированных сеток с их частичным пересечением. Такой подход позволяет использовать сетки простой топологии для описания довольно сложных объектов с многосвязными областями и одновременно корректно отображать разнообразные структурные элементы течения.

Развитый многоблочный расчетный алгоритм базируется на процедуре глобальных итераций, сконструированной для решения конечно-объемным методом уравнений переноса на структурированных пересекающихся Н- и О-образных сетках. В общем случае косоугольные сетки подразделяются на расчетные и связанные ячейки. В ячейках первого типа решаются уравнения движения жидкости, замыкаемые дифференциальными уравнениями для характеристик турбулентности, и уравнение энергии. В связанных ячейках, расположенных в приграничных зонах расчетных подобластей, а также в зонах пересечения сеток, параметры определяются с помощью линейной интерполяции [12].

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, удельную скорость диссипации турбулентности и полную энтальпию. Линеаризованная система исходных уравнений решается с помощью конечно-объемной согласованной процедуры коррекции давления SIMPLEC [2, 12, 18], основанной на концепции расщепления по физическим процессам и записанной в  $E$ -факторной формулировке. С целью снижения влияния численной диффузии в расчетах отрывных течений, в особенности чувствительных к ошибкам аппроксимации конвективных членов уравнений переноса, в явной части уравнений движения применяется одномерный аналог противопоточной схемы с квадратичной интерполяцией [18]. Дискретизация конвективных членов уравнений переноса характеристик турбулентности и уравнения энергии проводится по схеме UMIST, представляющей разновидность TVD-схемы [12]. Одновременно, чтобы избежать ложных осцилляций при отображении течений с тонкими сдвиговыми слоями, в неявной части уравнений вводится механизм искусственной диффузии в сочетании с односторонними противопоточными разностями 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 Рхи — Чоу [18] с эмпирическим коэффициентом, определенным в ходе численных экспериментов на задаче обтекания цилиндра и шара и равным 0,1. Высокая эффективность расчетной процедуры для решения дискретных алгебраических уравнений обеспечивается применением метода неполной матричной факторизации [2, 12, 18].

Для более точного описания нестационарных процессов, следуя [2], при аппроксимации нестационарного члена, содержащегося в явной части уравнений переноса, целесообразно использовать трехточечную схему Пейре второго порядка аппроксимации по времени, тогда как при использовании малого временного шага (порядка 0,02) представляется оправданным применение неявной схемы Эйлера.

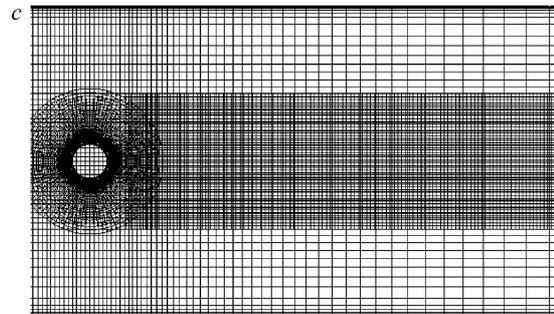
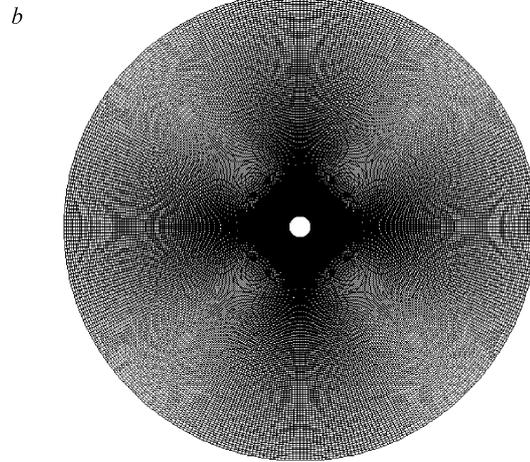
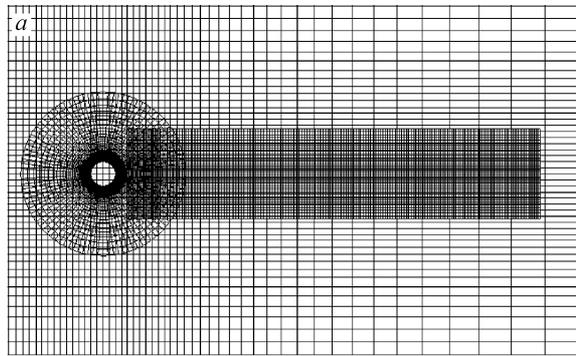
Расчетная процедура на каждом временном шаге базируется на концепции расщепления по физическим процессам, реализуемой в процедуре коррекции давления. Характерными особенностями рассматриваемого итерационного алгоритма являются: а) определение на шаге “предиктор” предварительных составляющих скорости для замороженных полей вихревой вязкости и давления с последующей коррекцией давления на базе решения уравнения неразрывности с поправками поля скорости; б) расчет полей характеристик турбулентности и вихревой вязкости для замороженных полей скорости; в) расчет поля температуры на основе скорректированных полей скорости и вихревой вязкости. Вычислительный процесс конструируется таким образом, что на один шаг “предиктор” приходится несколько локальных итерационных шагов в блоках коррекции давления и теплообмена.

Глобальные итерации на каждом временном шаге завершаются при условии достижения сходимости полей зависимых переменных с заданной приемлемой точностью [2, 12].

Развитая многоблочная стратегия тестируется при решении задачи о ламинарном нестационарном обтекании кругового цилиндра [19, 20] и используется для моделирования обтекания цилиндра с перфорированным кожухом [21].

### Расчетные сетки

Систематические расчеты турбулентного обтекания кругового цилиндра в неограниченном пространстве проводятся на многоблочной расчетной сетке (рис. 1, *a*), в которой две кольцевые сетки с различной концентрацией равномерно распределенных узлов по окружной координате включаются во внешнюю довольно грубую прямоугольную сетку, а в области следа за цилиндром располагается дополнительная очень подробная прямоугольная сетка. Первая кольцевая область толщиной 0,2 разбивается сеткой



25×160 ячеек с минимальным шагом у стенки 0,0005 (в пристеночном узле  $y^+$  оказывается меньше единицы). Вторая область тоже кольцевая толщиной 2 разбивается сеткой 40×100 ячеек (рис. 1, *a*). Внешняя прямоугольная область размером 49×34 содержит 170×120 ячеек с минимальным шагом в продольном и поперечном направлениях 0,1. При этом центр цилиндра одинаково удален от нижней и верхней границ, а также от входной, левой границы на расстояние 17 калибров. Для улучшения разрешения течения и теплообмена в следе вводится дополнительная сетка, отстоящая от цилиндра на расстоянии 0,3. Она покрывает подобласть с размерами 27,5×5,6 и содержит 275×80 ячеек с минимальным шагом по продольной и поперечной координатам, равным 0,05.

Рис. 1. Многоблочные расчетные сетки около кругового цилиндра в прямоугольной (*a*) и круговой (*b*) областях, а также в плоскопараллельном канале (*c*).

Для сравнительного анализа влияния типа сетки также находится решение нестационарной задачи турбулентного обтекания цилиндра неограниченным потоком на двухъярусной сетке (рис. 1, *b*) [12, 22]. Ближайшая к цилиндру кольцевая зона размером 0,1 разбивается равномерной по окружной координате и неравномерной со сгущением к стенке сеткой, содержащей 13×400 ячеек. Пристеночный шаг выбирается равным 0,001. Внешняя круговая область радиуса 10 имеет 200×400 ячеек.

Для оценки влияния нестационарности обтекания цилиндра выполняется расчет стационарного турбулентного течения и теплообмена в полуплоскости для половины цилиндра, соответствующий, как отмечалось ранее в [23], его обтеканию с установленной в следе разделительной пластиной. Многоблочная расчетная сетка содержит три кольцевых яруса и дополнительную прямоугольную сетку в следе. Первый ярус шириной 0,5, прилегающий к цилиндру, разбивается на 80×120 ячеек с пристеночным шагом  $10^{-4}$ . Второй ярус шириной 7 содержит 60×80 ячеек, а третий ярус шириной 35 — 20×80 ячеек. Сетка в следе с ячейками 140×40 покрывает прямоугольную зону размером 11×1, расположенную на расстоянии 0,05 за полуцилиндром.

Вихревая динамика и нестационарный теплообмен в плоскопараллельном канале с симметрично расположенным поперечным цилиндром рассматривается на многоблочной сетке, сочетающей круговые и прямоугольные элементы (рис. 1, *c*). Выбранная конфигурация давно является объектом исследования ламинарных и турбулентных течений, в том числе при учете транспортировки жидкости внутри цилиндра из зоны высокого давления в область низкого давления [12, 24–26]. Выбранная величина загромождения цилиндром поперечного сечения канала 1:7,3 соответствует эксперименту в [27]. Канал с параллельными стенками длиной 22 и шириной 7,3 покрывается неравномерной со сгущением к стенкам прямоугольной сеткой, содержащей 90×130 ячеек. Пристеночный шаг задается равным  $5 \times 10^{-5}$ , а в центральной части канала в месте расположения цилиндра и в его ближнем следе минимальный шаг по обеим продольной и поперечной координатам равен 0,1. Центр тела удален от входной границы на расстояние 6.

Двухъярусная цилиндрическая сетка, окружающая круговой цилиндр, содержит кольцевую (толщиной 0,1), прилегающую к поверхности зону, разбитую на 35×200 ячеек, и внешнюю кольцевую область размером 1 с количеством ячеек 40×200. Пристеночный шаг задается равным  $10^{-5}$ .

Дополнительная прямоугольная сетка с количеством ячеек 175×50, служащая для тщательного разрешения характеристик в следе, вводится в подобласти с размерами 14,5×3,2, удаленной от цилиндра на расстояние 0,3. Минимальный шаг по обеим координатам 0,05.

### Тестирование

Апробация и верификация использованной зональной модели переноса сдвиговых напряжений Ментера выполнена в ряде работ последних лет [12, 22, 23, 28], связанных с расчетом стационарных двумерных турбулентных течений в областях различной геометрии с пассивными и активными вихревыми ячейками. Прежде всего следует отметить анализ результатов численных расчетов и специально проведенных физических экспериментов по определению характеристик низкоскоростного, воздушного потока в плоскопараллельном канале с круговой каверной на одной из стенок [28], а также в расширяющемся канале при размещении на стенке круговой каверны с вращающимся внутри нее цилиндром [23]. Хорошее согласование полученных распределений коэффициента давления, как в указанных случаях,

так и при сопоставлении расчетов и экспериментов для докритического турбулентного обтекания кругового цилиндра, с расположенной в следе разделяющей пластиной [24], указывают на приемлемость разработанного многоблочного алгоритма, основанного на использовании зональной модели переноса сдвиговых напряжений Ментера. Сделанное заключение также подтверждается в ходе расчетов нестационарного двумерного обтекания кругового цилиндра [10, 25, 26, 29].

Развиваемые на протяжении последних лет многоблочные вычислительные технологии, основанные на совокупности пересекающихся структурированных сеток простой топологии (в том числе подвижных, скользящих относительно друг друга), реализуются в специализированном пакете прикладных программ VP2/3 (скорость — давление, двумерная и трехмерная версии). По своим функциональным возможностям разработанный пакет аналогичен универсальным программным продуктам типа FLUENT и StarCD, хотя и уступает им по наполнению встроженных каталогов математических моделей.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВИХРЕВОЙ ДИНАМИКИ

Результаты методических расчетов суммируются на рис. 2. Они касаются, в основном, вихревой динамики при турбулентном обтекании кругового цилиндра в докритическом режиме. Помимо представленных интегральных и локальных характеристик, определенных на совокупности пересекающихся декартовых и цилиндрических сеток с помощью пакета VP2/3, для сравнения выполняются расчеты двумерного обтекания поперечного цилиндра неограниченным потоком на неструктурированной сетке в рамках пакета FLUENT. Кроме того, для оценки влияния фактора нестационарности на течение и теплообмен около цилиндра проводится численное моделирование стационарного обтекания тела, соответствующего установке разделительной пластинки в следе. Следует отметить, что при расчетах в [13] нестационарной динамики за круговым цилиндром с учетом загромождения с помощью пакета FLUENT не приводится описание модели турбулентности, что несколько затрудняет сравнение результатов.

Представленные результаты прежде всего иллюстрируют временной процесс формирования вихревого обтекания цилиндра (рис. 2, *a, b*), начиная с момента удара потока о тело, и поведение коэффициентов лобового сопротивления и поперечной силы в автоколебательном режиме обтекания (рис. 2, *c, d*) для приведенного времени  $t_0$ , которое отсчитывается от момента времени, соответствующего  $C_y = C_{ymin}$ . Последние показатели дополняются профилями локальных коэффициентов давления по контуру цилиндра, осредненными по периоду колебаний  $C_y$  (рис. 2, *e*), экспериментальными данными из [27] и расчетными профилями из работы [13].

В целом, анализ приведенных на рис. 2 результатов расчетов нестационарного турбулентного обтекания кругового цилиндра, выполненных с помощью различных многоблочных структурированных и неструктурированных сеток на основе специализированного и универсального пакетов прикладных программ, показывает их вполне приемлемое согласование между собой и с имеющимися экспериментальными данными в работах [27, 15]. Умеренное загромождение (заданное 1:7,3 и выбранное из [13] 1:10) не оказывает существенного влияния на амплитуды интегральных и локальных силовых характеристик течения, хотя заметно различие в числах Струхала для ограниченного и безграничного потоков. Представленные на рис. 2 материалы свидетельствуют о приемлемости выбранной модели переноса сдвиговых напряжений Ментера для прогнозирования характеристик нестационарных отрывных течений и, в определенной степени, служат обоснованием использованного упрощенного двумерного подхода к расчету пространственных нестационарных вихревых течений в следе за телом.

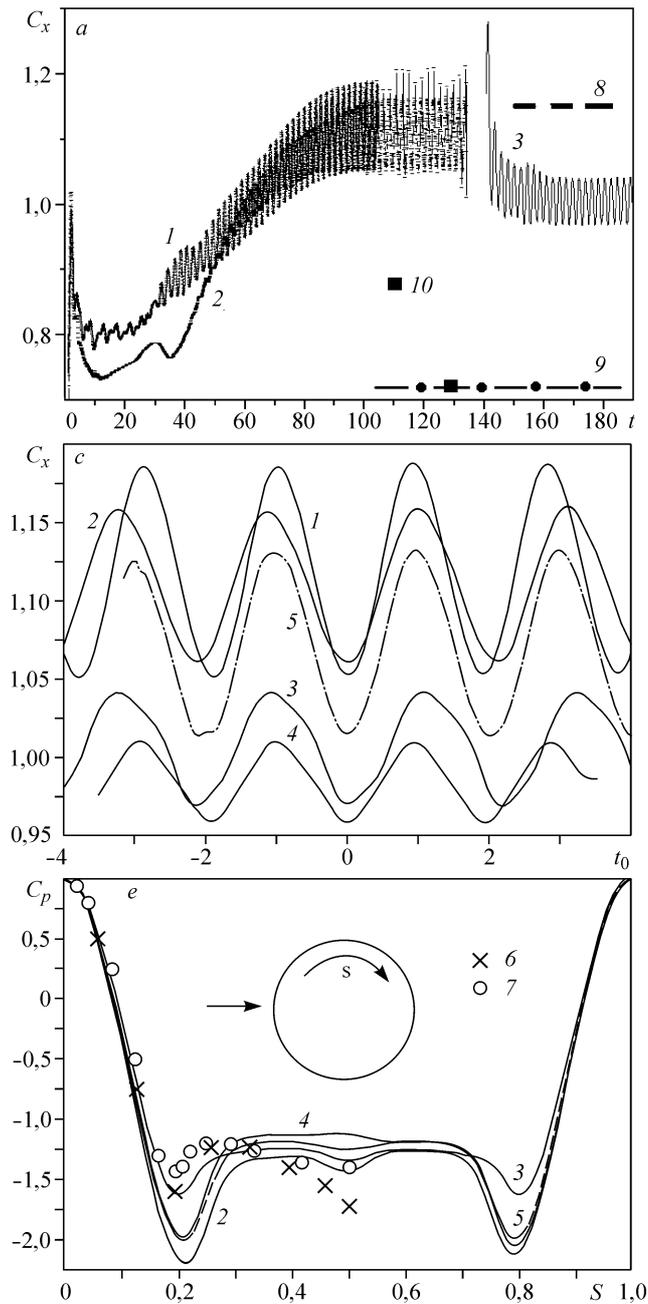


Рис. 2. Сравнительный анализ полученных на различных сетках и пакетах зависимостей  $C_x$  (a, c) и  $C_y$  (b, d) от текущего  $t$  (a, b) и приведенного к минимуму  $C_x, C_y$  (c, d)  $t_0$  времени, а также осредненных по периоду изменения  $C_y$  коэффициентов статического давления (e) на автоколебательном режиме. Эволюция во времени безразмерного коэффициента теплоотдачи от цилиндра (f).

Кривые 1–4 — расчет по VP2/3 на структурированных блочных сетках в прямоугольной области (1), в канале (2 — подробные сетки, 4 — менее подробные сетки) и в круговой области (3). Данные 5 и 6 получены в рамках пакета FLUENT на неструктурированных сетках, в том числе при загромождении (1:10) [13]; 7 — экспериментальные данные [15], 8, 10 — [27]. Оцифрованные результаты 9 (расчетные) и 10 (экспериментальные) соответствуют стационарному обтеканию цилиндра с разделяющей пластиной.

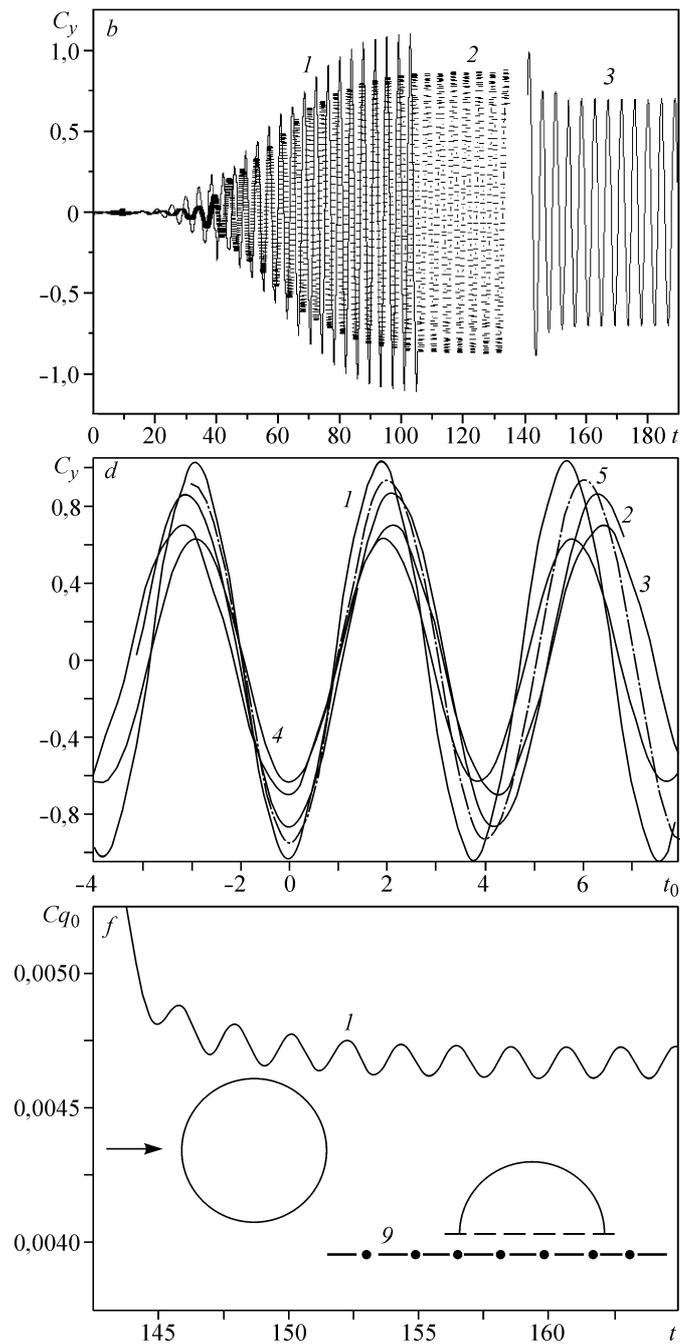


Рис. 2. Окончание

Эволюция нестационарного обтекания кругового цилиндра в турбулентном докритическом режиме имеет много общих черт с формированием ламинарного вихревого течения вязкой несжимаемой жидкости около рассматриваемого тела. Аналогия в характерных особенностях процесса обусловливается тем обстоятельством, что переменная вихревая вязкость по своим максимальным величинам соответствует локальным числам Рейнольдса для ламинарного режима течения (порядка  $10^2$ ).

Как уже отмечалось в [12], начальная фаза развития процесса турбулентного обтекания тела отличается ударным характером и быстрым изменением всех параметров потока и интегральных характеристик. Сопротивление цилиндра резко падает, при этом режим его обтекания незначительно отличается от потенциального.

Следующая фаза процесса сопровождается формированием и постепенным развитием симметричной отрывной зоны в следе за цилиндром. Длина зоны возрастает от нуля до нескольких его диаметров (примерно при  $t$  порядка 20). При этом лобовое сопротивление тела продолжает монотонно падать, постепенно приближаясь к величине  $C_x$  для стационарного обтекания цилиндра, рассчитанного для полуцилиндра с граничными условиями симметрии. Следует отметить, что численный прогноз указанной характеристики хорошо согласуется с экспериментальными данными в [27], полученными для цилиндра с разделительной пластиной в следе (см. рис. 2, *a*).

Асимметризация отрывной зоны в ближнем следе за телом является следствием развития неустойчивости в дальнем следе. Как и при ламинарном режиме течения (см., например, [12]), можно подразделить эту фазу, названную переходной, на три части. В первой из них, простирающейся до  $t$  порядка 40, неустойчивость в следе не приводит к заметному изменению аэродинамических коэффициентов кругового цилиндра. Во второй части переходной фазы лобовое сопротивление стремительно нарастает одновременно с колебаниями поперечной силы, но остается монотонным. Этой части соответствуют растущие пульсации в следе за телом, причем отрывная зона существенно сокращается. Третья часть переходной фазы характеризуется развитием колебаний лобового сопротивления, причем амплитуда их постепенно увеличивается наряду с возрастанием среднего  $C_x$ . Амплитуда колебаний поперечной силы становится одного порядка с лобовой силой, действующей на цилиндр (см. рис. 2, *b*). Завершающей части переходной фазы соответствует развитие колебаний не только в следе, но и перед телом; в итоге все характеристики течения выходят на автоколебания, т. е. характеризуются их периодическим изменением.

Осцилляции  $C_x$  и  $C_y$  на режиме автоколебаний, приведенные на рис. 2, *c*, *d*, отличаются некоторым разбросом, но их уровень представляется вполне приемлемым и легко объясняется разницей в выбранных сетках и влиянием загромождения потока.

Также отмечаются различия в численных прогнозах профилей локальных коэффициентов давления, распределенных по контуру цилиндра (см. рис. 2, *e*). Несколько более высокий по сравнению с экспериментами в работе [15] уровень разрежения в зонах отрыва потока на боковой поверхности одинаково воспроизводится пакетами VP2/3 и FLUENT на различных сетках. Следует отметить расхождение численных прогнозов донного давления, оцененных по пакету FLUENT в данной работе и в [13]. В то же время результаты расчетов донного давления на основе VP2/3 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Расчет нестационарного теплообмена около внезапно нагретого цилиндра на автоколебательном режиме его обтекания неограниченным потоком иллюстрируется на рис. 2, *f* поведением во времени безразмерного коэффициента теплоотдачи  $C_{q0}$ . Как видно, ударный процесс теплообмена, характерный для начальной фазы ступенчатого нагрева тела, довольно плавно трансформируется в циклический нагрев следа с периодическим изменением падающей во времени теплоотдачи от тела. В результате формируется автоколебательный тепловой режим около кругового цилиндра, который является, в основном, объектом исследования центральной части работы.

Анализ влияния фактора нестационарности при оценке течения и теплообмена около цилиндра заслуживает самого пристального внимания. Как уже отмечалось при исследовании вихревой динамики в следе за телом, формирование автоколебательного режима его обтекания сопровождается значительным ростом (почти в полтора раза) лобового сопротивления по сравнению со случаем стационарного течения около такого же тела с разделительной пластиной. Аналогичная ситуация имеет место в отношении теплоотдачи, однако степень ее увеличения за счет нестационарной вихревой генерации несколько меньше, чем возрастания силовой нагрузки, и составляет порядка 20 % по сравнению со стационарным режимом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов П.А., Исаев С.А., Судаков А.Г. Численное моделирование влияния сгенерированной завихренности на дорожку Кармана за круговым цилиндром // Изв. РАН. Сер. МЖГ. — 2000. — № 2. — С. 68–74.
2. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. — Л.: Судостроение, 1989. — 256 с.
3. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flow // Comp. Meth. Appl. Mech. Engng. — 1974. — Vol. 3, No. 2. — P. 269–289.
4. Гуцин В.А., Коньшин В.Н. Нестационарные отрывные и переходные течения жидкости около тел конечных размеров. Этюды о турбулентности. — М.: Наука, 1994. — С. 259–274.
5. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. — 1994. — Vol. 32, No. 8. — P. 1598–1605.
6. Травин А. К. Численное моделирование турбулентного обтекания цилиндра при докритических числах Рейнольдса // Вестн. молодых ученых. Сер. прикл. матем. и механ. — 1997. — № 1. — С. 62–71.
7. Nomura T., Jiravacharadet M. Finite element analysis of turbulent flows around a circular cylinder using the Smagorinsky model // Wind Eng. Retrospect and Prospect. — 1994. — Vol. 2. — P. 572–580.
8. Strelec M. Detached eddy simulation of massively separated flows. — AIAA Paper. 2001, No. 2001-0879. — 18 p.
9. Баранов П.А., Гувернюк С.В., Зубин М.А., Исаев С.А. Численное и физическое моделирование циркуляционного течения в вихревой ячейке на стенке плоскопараллельного канала // Изв. РАН. Сер. МЖГ. — 2000. — № 5. — С. 44–56.
10. Жданов В.Л., Исаев С.А., Нимани Х.Ю. Управление ближним следом за круговым цилиндром при выдуве низконапорных струй // Инж.-физ. журн. — 2001. — Т. 74, № 5. — С. 36–38.
11. Isaev S.A. Numerical simulation of organized and self-organised separated flows in the framework of multiblock computational technologies // Intern. Conf. on Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt. 1. Novosibirsk: Publ. House “Nonparel”. — 2002. — P. 102–107.
12. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. — 360 с.
13. Jalaiah N., Raghavan V.R. Effects of blockage on flow and heat transfer over a tube in cross flow // Heat Transfer 2002: Proc. of the Twelfth Intern. Heat Transfer Conf. Vol. 2. — Grenoble, 2002. — P. 711–716.
14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974. — 711 с.
15. Igarashi T. Flow characteristics around a circular cylinder with slit // Bull. JSME. — 1978. — Vol. 21, No. 154. — P. 654–664.
16. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во БГТУ, 2001. — 107 с.
17. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence: Heat and Mass Transfer 4: Proc. Intern. Conf. Begell House, Inc. — 2003. — 8 p.
18. 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. журн. — 1998. — Т. 71, № 4. — С. 618–631.
19. Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А. Верификация многоблочного алгоритма расчета нестационарных ламинарных отрывных течений // Там же. — 2002. — Т. 75, № 2. — С. 28–35.
20. Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Расчет нестационарного обтекания кругового цилиндра в рамках многоблочных вычислительных технологий // Там же. — 2002. — Т. 75, № 5. — С. 115–121.

21. Баранов П.А., Жданов В.Л., Исаев С.А. и др. Численное моделирование нестационарного ламинарного обтекания кругового цилиндра с перфорированным кожухом // Изв. РАН. Сер. МЖГ. — 2003. — № 2. — С. 44–55.
22. 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. журн. — 2002. — Т. 75, № 2. — С. 3–8.
23. 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. Сер. МЖГ. — 2000. — № 4. — С. 88–96.
24. 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. журн. — 2000. — Т. 73, № 2. — С. 220–227.
25. Isaev S.A., Zhdanov V.L., Niemann H.-J. Numerical study of the bleeding effect on the aerodynamic characteristics of a circular cylinder // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. — 2002. — Vol. 90, Iss. 11. — P. 1217–1226.
26. Isaev S.A., Zhdanov V.L. Control of cylinder drag and lift force amplitude in turbulent crossflow // Integrated Modeling of Fully Coupled Fluid Structure Interactions Using Analysis, Computations and Experiments: Proc. IUTAM Symp. / Eds. H. Benaroya, T. Wei. — Dordrecht: Kluwer Academ. Publ. — 2003. — P. 425–437.
27. Roshko A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number // J. Fluid Mech. — 1961. — Vol. 10. — P. 345–356.
28. 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. журн. — 2000. — Т. 73, № 2. — С. 220–227.
29. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Пышный И.А., Харченко В.Б. Численное моделирование нестационарного турбулентного обтекания толстого профиля с вихревыми ячейками при включении отсоса с поверхности центральных тел // Аэромеханика и газовая динамика. — 2002. — № 3. — С. 3–15. *Статья поступила в редакцию 26 апреля 2004 г.*