

УДК 532.517.2:536.24

Интенсификация теплообмена при нестационарном ламинарном обтекании маслом нагретого цилиндра при $Re = 150$ *

С.А. Исаев¹, П.А. Баранов¹, Ю.В. Жукова², А.Г. Судаков¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ,
Минск, Беларусь

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Нестационарный конвективный теплообмен при обтекании нагретого кругового цилиндра воздухом и маслом моделируется численно на основе решения нестационарных уравнений Навье–Стокса и энергии с помощью многоблочных вычислительных технологий, реализованных в пакете VP2/3 с использованием композитных пересекающихся структурированных сеток различной топологии. Интенсификация процессов переноса тепла и импульса связывается со значительным уменьшением толщины температурного пограничного слоя. Особое внимание уделяется автоколебательному режиму течения и теплообмена, анализу осредненных и пульсационных характеристик, сравнению сред с постоянными физическими свойствами и неоднородных сред.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, воздушные и масляные среды, круговой цилиндр, ламинарное обтекание, периодический режим, многоблочные вычислительные технологии, пакет VP2/3.

Введение

Рассматриваемая задача о моделировании ламинарного теплообмена в неоднородных средах при нестационарном поперечном обтекании маслом кругового цилиндра имеет прямое отношение к сохраняющей актуальность проблематике, связанной с теплообменниками. До недавнего времени в этом вопросе преобладали экспериментальные методы исследования. Так, например, обширные базы данных по конвективному теплообмену собраны в работах литовской научной школы А. Жукаускаса [1–3].

В последние десятилетия наряду с прогрессом в области вычислительной техники интенсивно развиваются методы численного моделирования и пакетные технологии. В настоящей статье используются многоблочные вычислительные технологии для решения уравнений Навье–Стокса и энергии, реализованные в оригинальном специализированном пакете прикладных программ VP2/3 применительно к многопроцессорным кластерным системам, анализируется теплообмен в неоднородных средах типа масел, физические

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 14-08-90001, 14-01-00043) и при государственной поддержке ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. Казань) Правительством России (грант № 14.Z50.31.0003).

свойства которых задаются табличным образом [4]. Статья продолжает исследования [5] по влиянию генерируемых периодических вихревых структур на теплоотдачу для масляных теплоносителей, обладающих кардинально улучшенными характеристиками по теплоотдаче.

Краткий генезис проблемы

Численное моделирование конвективного теплообмена при обтекании пучка труб воздушным или водяным теплоносителем рассмотрено в монографиях [6, 7] в рамках разработанного подхода к решению уравнений Навье–Стокса и энергии на пересекающихся структурированных сетках О-типа. Параметры потока в узлах пересечения расчетных подобластей определялись с помощью линейной интерполяции, а для реализации условия сохранения расхода использовалась развитая процедура коррекции градиента давления. Сначала для экономии памяти вычислительных машин уравнения Навье–Стокса записывались в преобразованных переменных — завихренность–функция тока [6], а затем, по мере возрастания расчетных ресурсов уравнения в естественных переменных, — декартовы составляющие скорости–давление — решались методом коррекции давления SIMPLE [7]. В восьмидесятых годах прошлого века методология численного моделирования эволюционировала в направлении повышения точности и устойчивости расчетного алгоритма [8] за счет записи линеаризованных исходных уравнений в приращениях зависимых переменных, использования для аппроксимации конвективных членов противоточной схемы первого порядка в неявной части и схемы квадратичной интерполяции Леонарда [9] в явной части, а также за счет решения систем алгебраических уравнений методом неполной матричной факторизации Булеева в форме SIP (строго неявной процедуры), предложенной Стоуном [10]. В работе [11] эта методология для моноблочных сеток распространена на нестационарные вихревые течения применительно к расчету обтекания автомобильных компоновок в присутствии подвижного экрана.

Предложенная в работах [6, 7] и соединенная с разработками [8] расчетная методология получила развитие в многоблочных вычислительных технологиях (МВТ), представленных в монографиях [4, 11, 12]. Суть ее состоит во введении совокупности разномасштабных, вложенных и пересекающихся сеток, согласованных с разрешаемыми структурными элементами физической задачи соответствующих масштабов. Структурированные сетки О- и Н- типов обрабатываются в пакетном режиме с помощью объектно-ориентированной системы программирования.

Применительно к теплообменникам в форме пакетов круглых труб для теплоносителей с постоянными физическими свойствами МВТ получили развитие, прежде всего, в статьях [13, 14, 15]. Интенсификация конвективного теплообмена при воздушном обтекании круговых цилиндров с вихревыми и струйными генераторами анализируется в работах [16–18]. В работе [19] был впервые рассчитан конвективный теплообмен при обтекании маслом нагретой трубы с дугообразными вихревыми генераторами.

Цикл расчетных работ [20–23] по интенсификации теплообмена в масляных средах был выполнен применительно к движению теплоносителя в мини- и микроканалах с однорядными сферическими и овальными лунками, нанесенными на нагреваемую стенку. Подчеркивалось, что важнейшей особенностью полученных эффектов увеличения теплоотдачи для рассматриваемых неоднородных жидких сред является большое число Прандтля, обуславливающее утончение температурных пристеночных слоев и высокие значения чисел Нуссельта в сравнении с газовыми теплоносителями. Поэтому вызывает интерес детальный анализ конвективного теплообмена при обтекании маслом кругового цилиндра, в особенности в нестационарном режиме.

Следует подчеркнуть, что расчеты нестационарного обтекания воздухом цилиндра при умеренных числах Рейнольдса [11, 12, 24, 25] являются тестовыми для анализа применимости МВТ. К сожалению, работ, посвященных моделированию нестационарного

теплообмена в отрывных течениях, гораздо меньше, чем расчетов вихревой динамики. Кроме исследований, приведенных в статье [5], следует отметить прогнозирование эволюции структуры крупномасштабных вихрей и температурного поля в квадратной каверне с подвижной крышкой [26] и расчет теплоотдачи колеблющегося цилиндра [27]. Поэтому представляется весьма актуальным численное изучение нестационарного ламинарного теплообмена в неоднородных средах при поперечном обтекании маслом кругового цилиндра с использованием МВТ в пакете VP2/3 [28].

Расчетная методология

Как уже отмечалось ранее, методология расчета характеристик течения и теплообмена на базовой и вспомогательных структурированных сетках базируется на неявной факторизованной конечно-объемной процедуре решения уравнений Рейнольдса и энергии, в основных чертах разработанной в конце восьмидесятих годов [8]. Ее характерными особенностями являются: 1 — запись исходных уравнений относительно приращений зависимых переменных, в том числе, декартовых составляющих скорости; 2 — основанная на концепции расщепления по физическим процессам процедура коррекции давления SIMPLEC [29] с монотонизацией по Рхи-Чоу для заданного централизованного расчетного шаблона (с выбранным из численных экспериментов коэффициентом релаксации, равным 0,1) [8, 30]; 3 — аппроксимация конвективных членов уравнений в явной части уравнений по одномерному аналогу квадратичной противоточной схемы Леонарда [9] для снижения влияния численной диффузии, характерной для рассматриваемого типа отрывных течений; 4 — представление конвективных членов уравнений переноса в неявной части по противоточной схеме с односторонними разностями, позволяющее повысить устойчивость вычислительной процедуры; 5 — применение метода неполной матричной факторизации (упрощенная версия SIP) для решения разностных уравнений [10]. По перечисленным оригинальным элементам развитая методология отличается от аналогов [7, 30].

Расчеты разномасштабных течений около цилиндра проводились на многоблочных структурированных сетках с их взаимным пересечением [4, 11, 12, 28]. Построена оригинальная процедура интерполяции параметров в области стыковки узлов с различной сеточной структурой, обеспечивающая надлежащую консервативность при решении задач. Разработанный факторизованный алгоритм обобщается на случай многоблочных расчетных сеток в рамках концепции декомпозиции расчетной области и генерации в выделенных существенно разномасштабных подобластях косоугольных сеток H- и O- типа с перекрытием. Перенос значений между пересекающимися сетками в рамках многоблочной сеточной стратегии осуществляется с помощью неконсервативной линейной интерполяции. Численно обоснована эквивалентность предложенного метода и известного метода консервативной интерполяции [31]. Для конструирования согласованных с границами криволинейных сеток используются апробированные расчетные алгоритмы алгебраического и эллиптического типа [32].

В развитой многоблочной методологии [11, 12] разделяются расчетные и связанные ячейки. Расчетными называются те ячейки, в которых решаются исходные уравнения. Связанные ячейки — это те ячейки, значения параметров в которых определяются интерполяцией данных из других областей. Многочисленными тестовыми расчетами показано, что вполне приемлемой по точности является неконсервативная, линейная интерполяция.

Во всех связанных ячейках источники члены полагаются нулевыми, коэффициенты при неизвестных в алгебраических уравнениях, кроме диагонального, равного 1, тоже нулевые [12]. Поэтому расчет ведется сквозным образом по всей области. Для граничных расчетных ячеек, совпадающих либо с внешней границей области, либо с границей тела, выделяется дополнительная память для хранения метрики и переменных. На всех

остальных гранях значения, как обычно, определяются интерполяцией. Со стороны этих граней расчетная ячейка должна иметь минимум двух соседей для обеспечения второго порядка аппроксимации конвективных членов.

Связанные ячейки условно можно разделить на две группы: те, которые задаются принудительно (это, как правило, периферийные слои внутренних сеток) и те, которые назначаются связанными в процессе генерации сеток. Деление чисто условное, определяемое только способом задания. В остальном же они идентичны.

Перед началом решения каждого уравнения производится определение значений переменных в связанных ячейках. Поскольку интерполяционные коэффициенты просчитаны заранее, то это не занимает много времени. Затем делается один итерационный шаг в каждой области. Последовательность просмотра областей значения не имеет. При переходе к следующей итерации (не глобальной, а для выбранного уравнения) определяются значения поправок для данной переменной. Для уравнений количества движения это несущественно, поскольку делается, как правило, только одна итерация, для большинства остальных переменных отсутствие этого шага немного замедляет сходимость, но почти незаметно. И только для давления учет поправок, взятых из других областей, является принципиальным, поскольку это единственный механизм, позволяющий автоматически вычислять ту константу, с точностью до которой определяется давление.

Постановка задачи. Расчетные сетки

Моделирование нестационарного обтекания воздухом и маслом нагретого до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ кругового цилиндра диаметра D проводится в прямоугольной расчетной области A длиной $28,2D$ и шириной $33,2D$ с расположением тела симметрично относительно ее верхней и нижней границ и удалением его центра на расстояние $11,6D$ от левой входной границы (рис. 1а). Изотермический (с характерной температурой 293 K) равномерный поток

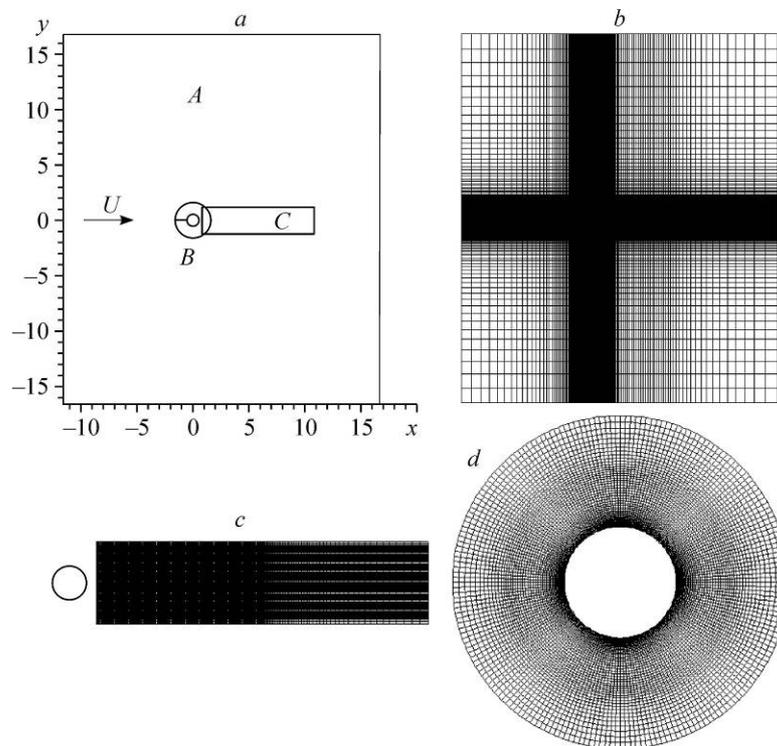


Рис. 1. Схема расчетной области с разделением на подобласти (а) и элементы многооблочной сетки: общей, прямоугольной (b); дополнительной прямоугольной (c); цилиндрической, согласованной с поверхностью цилиндра (d).

со скоростью U задается на входе в расчетную область A , на выходной границе которой ставятся условия продолжения решения или мягкие граничные условия. На верхней и нижней границах формулируются условия симметрии. Число Рейнольдса определяется по характерным параметрам U и D , а также плотности и вязкости теплоносителя на входе и равняется 150. Все линейные размеры отнесены к диаметру цилиндра D .

Рассматриваются два типа масел: трансформаторное и М20.

В базовой расчетной области A выделяются зоны, прилегающие к круговому цилиндру B и в следе за ним — C (рис. 1а). Круговая зона имеет диаметр 3,2. Прямоугольная подобласть в следе отстоит от центра цилиндра на расстояние 0,8 и имеет протяженность по продольной координате x — 10,5 и по поперечной y — 2,6. В указанных подобластях генерируются несогласованные друг с другом расчетные сетки О- и Н- типа, различающиеся плотностью расположения узлов.

Прямоугольная сетка в области A содержит 255×99 ячеек. В окрестности тела сетка мелкая с шагами 0,05 в продольном и поперечном направлениях. Продольный шаг сетки возрастает при приближении к входной и выходной проточным границам (рис. 1б).

Дополнительная прямоугольная сетка в подобласти вводится для уточнения расчета нестационарного следа — вихревой дорожки за цилиндром (рис. 1с). Продольный и поперечный шаги сетки составляют 0,025, а количество ячеек — 152×140 . Гладкий цилиндр окружается О-образной равномерной по окружной координате сеткой, содержащей 200 ячеек по контуру и 65 ячеек по радиусу (рис. 1д). В радиальном направлении сетка неравномерная, со сгущением к телу. Пристеночный шаг равен 10^{-3} .

Шаг по времени выбирается равным 0,02, а продолжительность процесса (t порядка 120) определяется выходом решения на автоколебательный режим обтекания, характеризующийся периодическим изменением интегральных и локальных характеристик течения и теплообмена. В качестве начальных условий выбирается состояние удара потока о тело при его внезапном торможении. Решение на каждом временном шаге проводится глобальными итерациями, когда на одну итерацию по составляющим скорости и температуре приходится 20 итераций в блоке поправки давления.

Анализ расчетных результатов

Некоторые из полученных результатов будут представлены на рисунках и в таблицах. Акцент в исследовании делается на сравнении интегральных и локальных характеристик течения и теплообмена для кругового цилиндра в воздушной и масляной средах при умеренном числе Рейнольдса $Re = 150$ и температурном факторе $T = 1,137$. При этом следует отметить, что детальный анализ нестационарного конвективного теплообмена при обтекании воздухом цилиндра для близкого числа Рейнольдса (140) был выполнен в работе [5].

Моделирование нестационарного обтекания цилиндра в равномерном потоке вязкой жидкости, как правило, начинается от состояния внезапного торможения тела, которое сопровождается ударными нагрузками и которому соответствует резкое падение погрешности зависимых переменных в глобальных итерациях. Как видно на рис. 2, поведение во времени погрешностей E_{gr_p} и E_{gr_u} практически не зависит от типа теплоносителя. На начальном этапе погрешности резко (на один–два порядка) падают, что коррелирует с таким же по характеру поведением коэффициента лобового сопротивления (рис. 3а). Падение погрешности E_{gr_u} продолжается до значения t порядка 15 единиц времени для воздуха и 20 — для масла М20. Затем погрешности возрастают, достигая при t порядка 30–40 единиц максимума для $E_{gr_p}(t)$, а также проходя точку перегиба для $E_{gr_u}(t)$

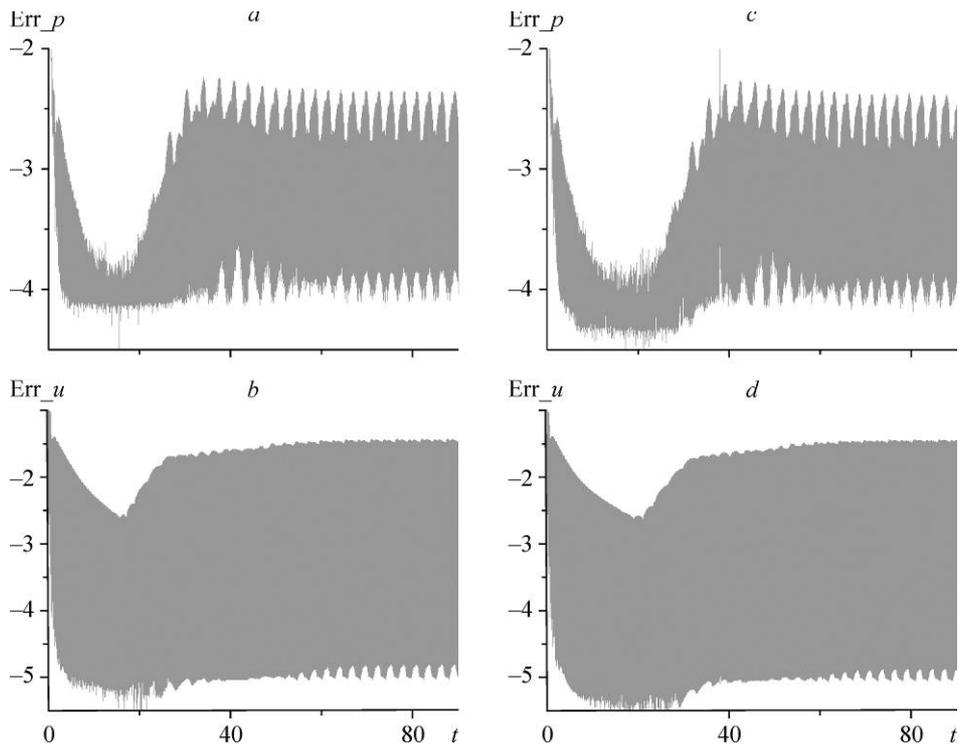


Рис. 2. Изменение во времени t погрешностей по давлению (a, c) и скорости (b, d) для воздушной (a, b) и масляной (масло М20) (c, d) сред.

при t порядка 25–30. Отмечается возникновение низкочастотных колебаний в зависимостях погрешностей от времени. При этом C_x продолжает убывать, а C_y незначительно отличается от нуля до t порядка 40 (рис. 3а, 3б), хотя колебания C_y заметны, начиная с t порядка 20. Таким образом, как уже отмечалось в работах [11, 12], обтекание цилиндра до $t = 20$ является симметричным, а формирование нестационарного несимметричного течения в дальнем следе начинается несколько раньше (с момента возрастания погрешностей в расчетной области).

Переход к автоколебательному режиму обтекания, судя по поведению погрешностей (рис. 2), занимает около 30–40 единиц времени, причем максимумы Err_p постепенно снижаются, а максимумы Err_u монотонно увеличиваются, при этом стабилизация первых происходит несколько быстрее, чем вторых. Переход сопровождается увеличением C_x , он носит сначала устойчивый плавный характер и затем осциллирующий (рис. 3а). Также усиливаются гармонические колебания C_y (рис. 3б). На рис. 3а видно, что переходной режим для воздуха начинается несколько позже, чем для масла. Автоколебательный режим характеризуется периодическим изменением погрешностей, интегральных и локальных параметров потока и теплоотдачи. Судя по поведению лобового сопротивления и поперечной силы, а также осредненного по периметру цилиндра числа Нуссельта (рис. 3), выход на него происходит при t порядка 90–100.

Сравнение на рис. 4 приведенных к началу периода колебаний C_y , т.е. к моменту $C_y = C_{y_{\min}}$, зависимостей от времени t^* коэффициентов лобового сопротивления и поперечной силы, а также отмасштабированного осредненного по периметру цилиндра числа Нуссельта показывают их хорошее согласование как по поведению, так по периодам колебаний. Однако осредненные величины лобового сопротивления цилиндра в масляной

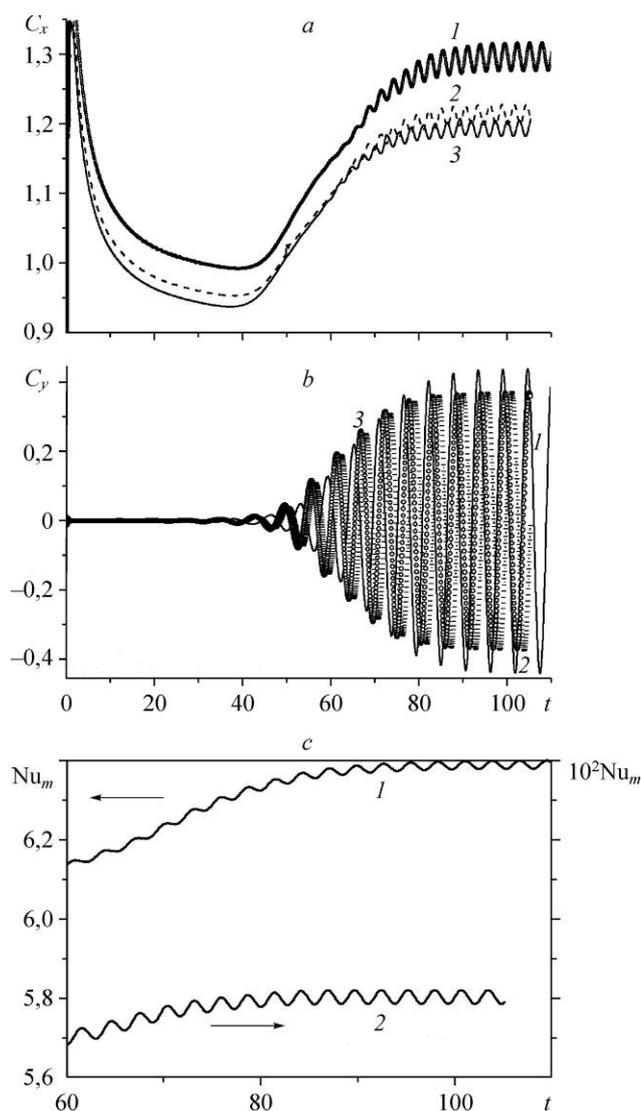


Рис. 3. Зависимости от времени t коэффициентов лобового сопротивления (а), подъемной силы (б) и осредненного по периметру числа Нуссельта (с).

Рабочие среды: 1 — воздух, 2 — масло М20, 3 — ТМ.

среде заметно (на 7 %) уступают C_x в воздухе. Максимальные амплитуды колебаний C_y в автоколебательном режиме для воздуха превосходят аналогичные нагрузки в масле еще больше (на 25 %). Тем не менее, по теплоотдаче различие между теплоносителями является кардинальным (на порядки величин). Как отмечается в табл. 1, для трансформаторного масла (ТМ) оно десятикратное, а для масла М20 — стократное по сравнению с воздухом. Также интересно подчеркнуть, что вклад и профильного сопротивления и сопротивления трения в лобовое сопротивление цилиндра в масле менее значителен, чем в воздухе, а длина циркуляционной зоны осредненного течения несколько больше для масла по сравнению с воздухом (в пределах 1 %).

Сравнение объединенных на одном рис. 5 поверхностных распределений локального трения, давления и числа Нуссельта на периоде колебаний C_y показывает, что зоны наибольших колебаний f сосредоточены в районе задней критической точки (а, д),

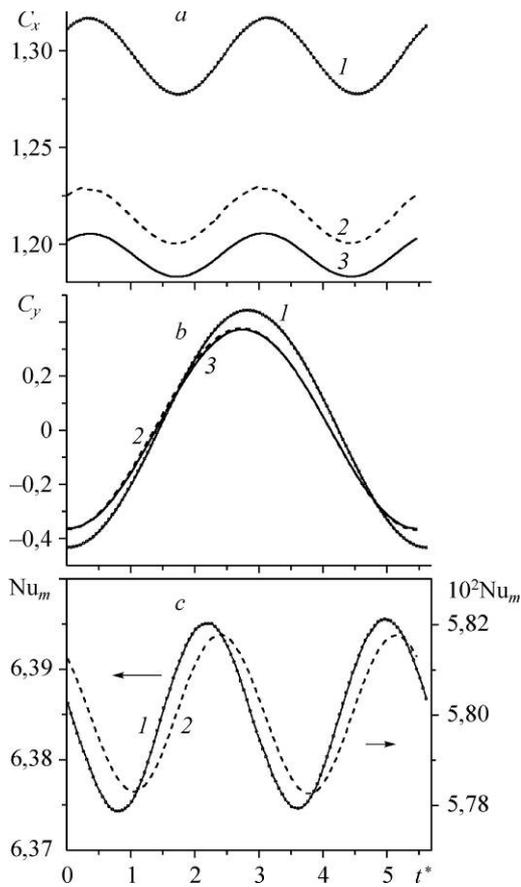


Рис. 4. Сравнение поведения коэффициентов лобового сопротивления C_x (a), подъемной силы C_y (b) и осредненного по периметру числа Нуссельта Nu_m (c) за период изменения C_y для воздушной (1) и масляных (2, 3) сред; 2 — масло М20, 3 — ТМ.

области колебаний p охватывают всю тыльную часть цилиндра (b, e), а колебания Nu незначительны, хотя и наблюдаются, как и для f , в окрестности задней критической точки (c, f). Следует отметить резкий провал Nu в области точки отрыва при обтекании цилиндра маслом.

Эволюция нестационарного течения и теплообмена в следе за цилиндром анализируется на рис. 6, 7 индикаторными характеристиками в контрольных точках в плоскости симметрии. Изменение продольной составляющей скорости рассматривается для всех сред, а температуры и числа Прандтля — только для воздуха и масла соответственно. Прежде всего, интересно соотнести поведение локальных параметров потока во времени с погрешностями и интегральными характеристиками (рис. 2, 3). Как следует из рис. 6, начальная фаза процесса

обтекания после торможения тела отличается резким изменением местной скорости как в зонах, примыкающих к цилиндру, так и в удаленных от него, хотя максимальные величины скорости возвратного течения вблизи тела выше, чем в следе. Также отмечается, что все контрольные точки на этапе симметричного обтекания цилиндра попадают в область отрывного течения в ближнем следе, причем в точках 1–6 (до 1,5 диаметров) наблюдаются достаточно протяженные по времени участки стабилизации продольной скорости, свидетельствующие о долговременном существовании в следе высокоинтенсивного крупномасштабного симметричного вихря. Переходной режим, связанный с деформацией и последующей ликвидацией этого вихря и заменой его вихревой дорожкой, начинается при $t > 40$, причем колебания потока приближаются к телу. Параметры потока в точках постепенно выходят на автоколебательный режим, т.е. осредненные скорости постоянны, а колебания имеют гармонический характер. Точки 7 и 8 ($x = 2,5$ и 5) оказываются вне зоны отрыва, а в остальных точках $u < 0$. Интересно отметить, что амплитуды установившихся колебаний в точке 7 (2,5) оказываются выше, чем в точке 6 (1,5), но примерно такими же, как в точке 5 (1,0). Как следует из табл. 1, продольная координата

Таблица 1
Влияние теплоносителя на осредненные интегральные характеристики кругового цилиндра

Рабочая среда	$\overline{C_x}$	$\overline{C_{xp}}$	$\overline{C_{xf}}$	x_L	$\overline{Nu_m}$
Воздух	1,312	1,028	0,282	1,740	6,39
Трансформаторное масло (ТМ)	1,208	0,958	0,250	1,754	60,0
Масло М20	1,204	0,946	0,260	1,767	578,6

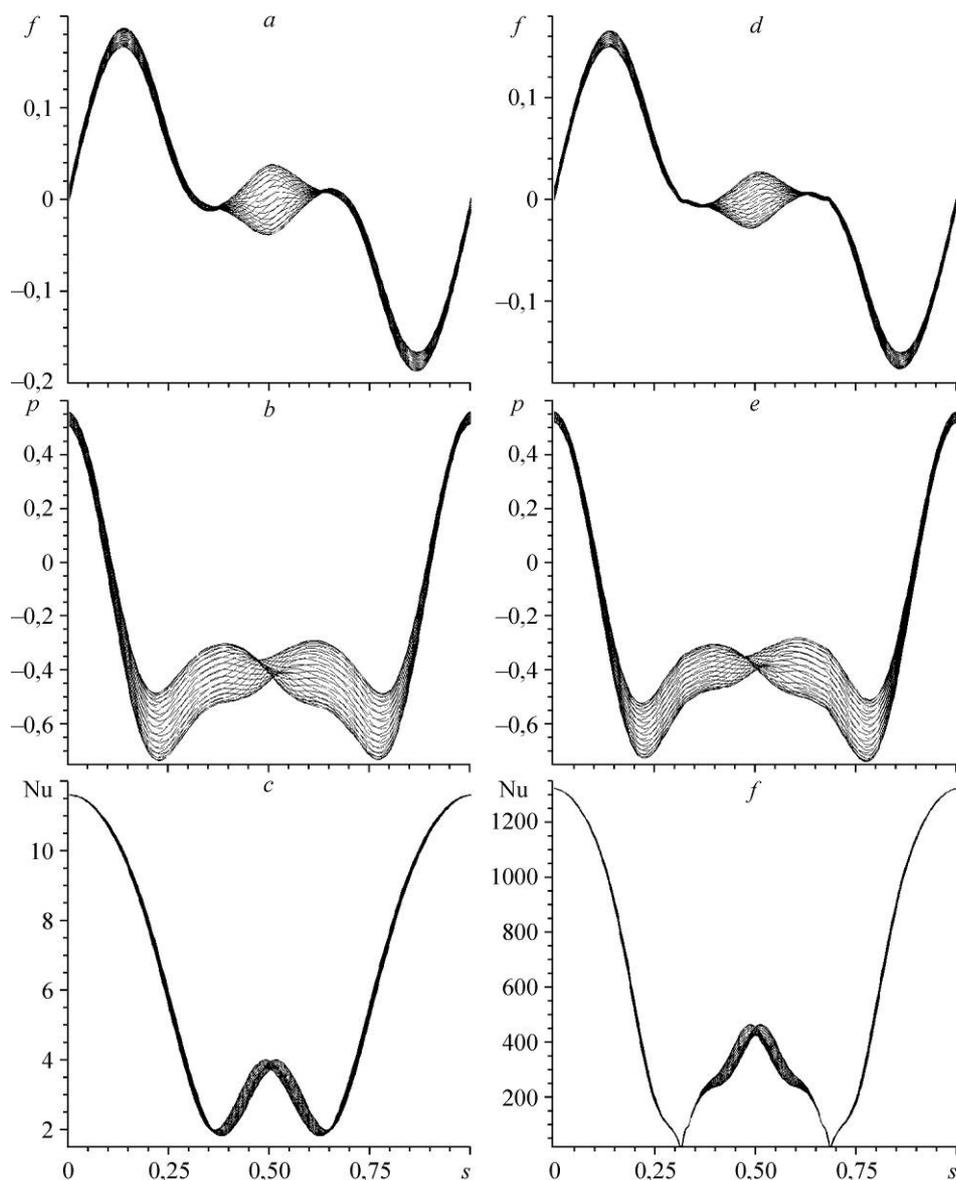


Рис. 5. Сравнение поверхностных распределений трения f (a, d), давления p (b, e) и числа Нуссельта (c, f) для воздушной (a–c) и масляной (d–f) (M20) сред за период изменения C_y .

конца циркуляционной зоны в осредненном течении составляет примерно 1,75 и локальная скорость в этой точке равна нулю. Таким образом, снижение амплитуды колебаний u связано с уменьшением среднего значения и при приближении к указанной точке. В сравнении с локальными скоростями в симметричном крупномасштабном вихре осредненные скорости в нестационарной отрывной зоне на автоколебательном режиме оказываются выше, т.е. происходит интенсификация конвективного переноса. Пульсации скорости уменьшаются по мере приближения к цилиндру (точки 1–4).

Сравнение эволюций локальной скорости в точках следа за цилиндром в воздушной и масляной средах (рис. 6), а также экстремальных величин параметров потока (табл. 2) показывает, что вид теплоносителя не оказывает на них существенного влияния.

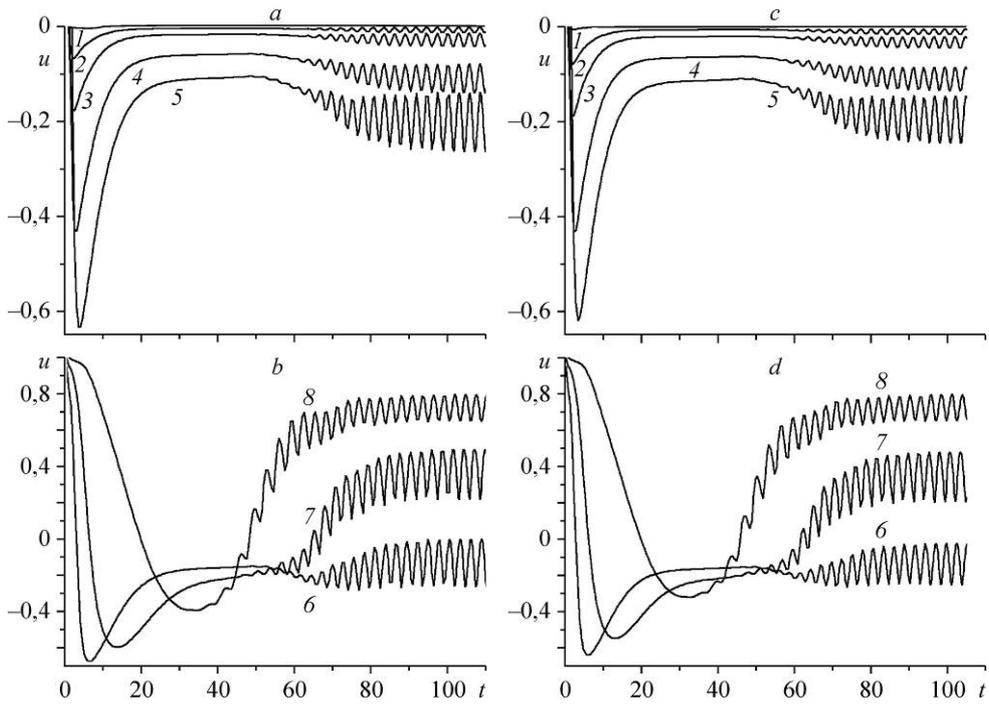


Рис. 6. Изменение во времени t локальной составляющей продольной скорости u в заданных точках на оси цилиндра ($y = 0$) для воздушной (a, b) и масляной (c, d) сред.
 $x = 0,51$ (1), $0,55$ (2), $0,6$ (3), $0,75$ (4), 1 (5), $1,5$ (6), $2,5$ (7), 5 (8).

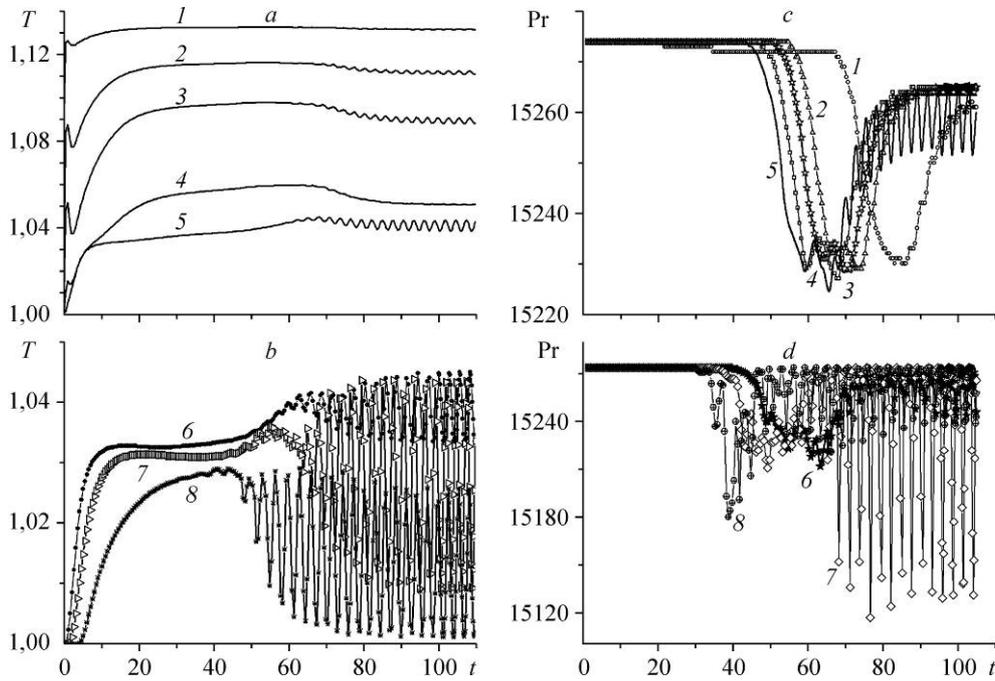


Рис. 7. Изменение во времени t температуры T (a, b) и числа Прандтля Pr (c, d) в заданных точках на оси цилиндра ($y = 0$) для воздушной (a, b) и масляной (c, d) сред.
 $x = 0,51$ (1), $0,55$ (2), $0,6$ (3), $0,75$ (4), 1 (5), $1,5$ (6), $2,5$ (7), 5 (8).

Таблица 2

Влияние теплоносителя на экстремальные осредненные локальные характеристики течения и теплообмена

Среда	\overline{u}_{\min}	\overline{u}_{\max}	\overline{v}_{\min}	\overline{p}_{\min}	\overline{u}_{\max}	$10^2 \overline{\mu}_{\min}$	\overline{Pr}_{\min}	\overline{Pr}_{\max}
Воздух	-0,213	1,305	-0,682	-0,613	0,536	0,667	0,72	0,72
ТМ	-0,213	1,305	-0,685	-0,635	0,540	0,153	87	327
M20	-0,210	1,300	-0,683	-0,627	0,537	0,052	1309	15274

Эволюция температурного поля в воздухе по мере формирования автоколебательного режима охватывает пространство значительной протяженности (рис. 7а, 7б). Напротив, в масляной среде изменения температуры в пространстве практически не наблюдаются. Однако поле чисел Прандтля изменяется во времени (рис. 7с, 7д). Аналогично [5], в период торможения наблюдается прыжок температуры вблизи тела (до $x < 0,75$) с последующей по времени стратификацией T в области отрыва по продольной координате. Переход к автоколебательному режиму сопровождается пульсациями температуры и некоторым охлаждением температурного поля в следе. Уровни осцилляций температуры в области, расположенной ниже нестационарной отрывной зоны, составляют порядка 2 % от характерной температуры в 293 К (рис. 7б). Пульсации числа Прандтля наблюдаются в пятой и последующих точках, хотя в точке 8 они заметно затухают (рис. 7с, 7д). Величины пульсаций невелики, причем максимальные из них имеют порядок сотни при средней величине в 15000.

Выводы о консервативности осредненной вихревой картины обтекания цилиндра по отношению к смене теплоносителя подтверждаются сравнением полей изолиний продольной составляющей скорости u на рис. 8а, 8с, 8е. В то же время поля температур отличаются кардинально (рис. 8б, 8д, 8ф). Сравнительно толстый температурный слой воздуха трансформируется в тончайший слой масла М20. Разрежение изотерм в воздушном следе сменяется небольшим температурным протуберанцем в окрестности точки отрыва, причем для трансформаторного масла его размеры больше, чем для масла М20. Практически, как уже отмечалось, поле масляного отрывного течения остается изотермическим. Перепады локального числа Прандтля, указанные в табл. 2, наблюдаются как раз в указанной зоне температурного протуберанца.

Наконец, на рис. 9 сравниваются результаты по поверхностным распределениям осредненных и пульсационных

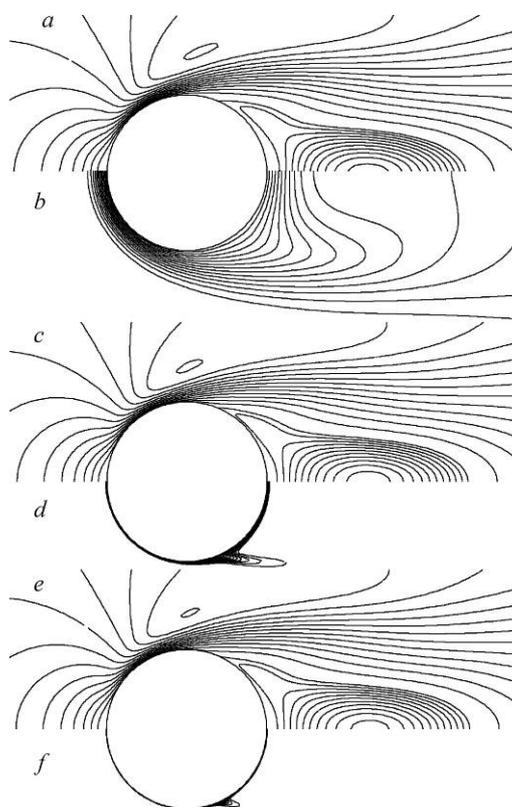


Рис. 8. Сравнение осредненных по периоду колебаний C_y картин изолиний продольной составляющей скорости u (а, с, е) и температуры T (б, д, ф) при обтекании кругового цилиндра воздухом (а, б), трансформаторным маслом (с, д) и маслом марки М20 (е, ф). Линии $u = \text{const}$ проведены с шагом 0,1 при $u > 0$ и с шагом 0,02 при $u < 0$. Изотермы проведены с шагом 0,01 от 1,01 до 1,13.

характеристик течения и теплообмена на автоколебательном режиме для воздушной и масляной (M20) сред.

Как уже отмечалось, осредненные параметры течения (трение и давление) на стенке цилиндра мало различаются для рассматриваемых сред, хотя в максимальном трении и наблюдаются некоторые отличия (рис. 9а, 9б). Пульсации различаются существенно, причем превышение пульсаций трения для воздуха составляет порядка 25 %, а пульсации давления выше на 30 % для воздуха по сравнению с маслом M20 (рис. 9д, 9е). Осредненные относительные числа Нуссельта на контуре цилиндра, напротив, для масла оказываются выше, чем для воздуха в окрестностях передней (примерно на 40 %) и задней (на 30 %) критических точек (рис. 9с). Как уже отмечалось, в районе точки отрыва в масле возникает небольшой провал в теплоотдаче, которого для воздуха нет. Осцилляции относительного поверхностного числа Нуссельта в масле заметно выше, чем для воздуха, за исключением узкой зоны отрыва потока (рис. 9ф). Наибольшие осцилляции наблюдаются в области задней критической точки (на 25 % выше для масла по сравнению с воздухом).

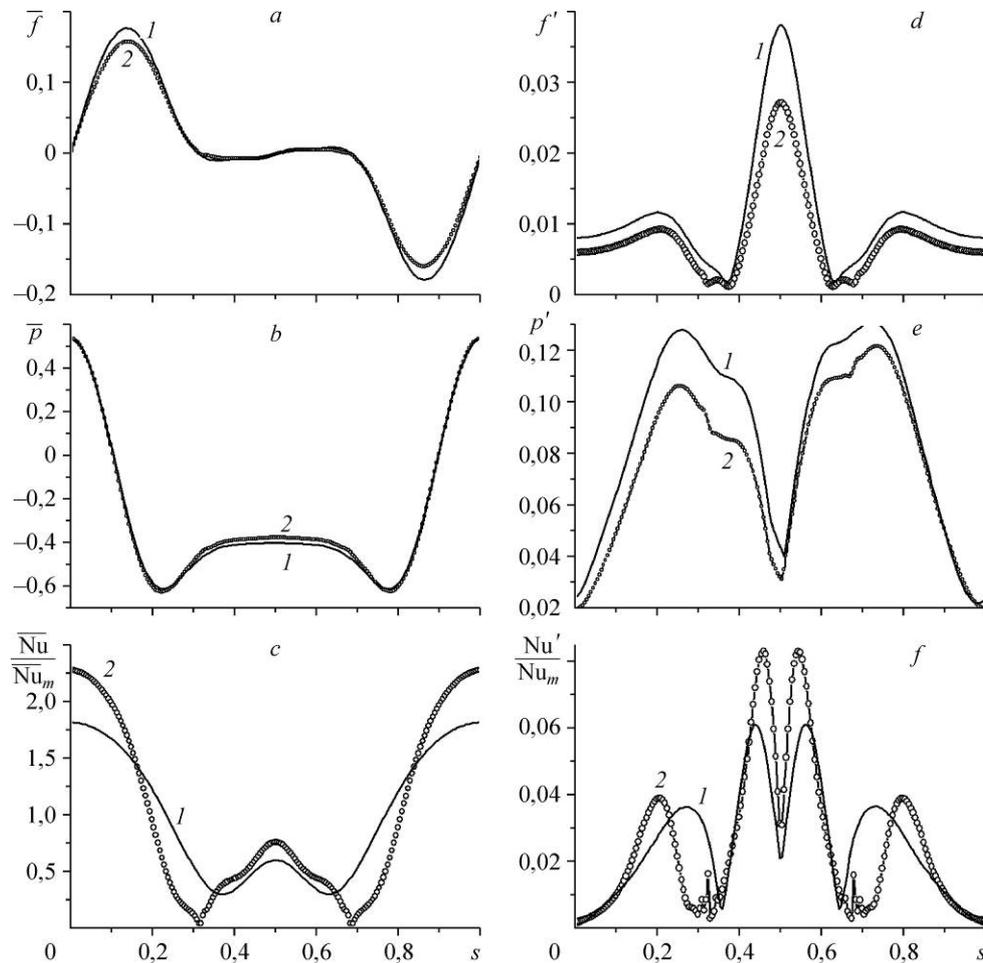


Рис. 9. Сравнение полученных за период колебаний C_y распределений по контуру цилиндра осредненных (а–с) и пульсационных (д–ф) величин трения (а, д), давления (б, е) и числа Нуссельта, отнесенного к Nu_m (с, ф), для воздушной (1) и масляной (M20) (2) сред.

Заключение

По результатам исследования следует сделать следующие основные выводы.

1. Характер нестационарного двумерного ламинарного обтекания маслом нагретого до 60 °С кругового цилиндра для умеренного числа Рейнольдса, равного 150, аналогичен воздушному. Различия в числах Струхала незначительные, как невелики количественные расхождения между характеристиками течения для масла М20 и трансформаторного масла.
2. Осредненная величина лобового сопротивления цилиндра в масляной среде заметно (на 7 %) уступает C_x в воздухе. Максимальные амплитуды колебаний C_y в автоколебательном режиме для воздуха превосходят аналогичные нагрузки в масле еще больше (на 25 %).
3. Различие по теплоотдаче между теплоносителями кардинальное (на порядки величины). Для трансформаторного масла оно десятикратное, а для масла М20 — стократное по сравнению с воздухом.
4. Сравнительно толстый температурный слой воздуха около цилиндра трансформируется в тончайший слой масла М20. Разрежение изотерм в воздушном следе сменяется небольшим температурным протуберанцем в окрестности точки отрыва, причем для трансформаторного масла его размеры больше, чем для масла М20. Практически, все поле отрывного течения масла остается изотермическим.
5. Осредненные параметры течения (трение и давление) на стенке цилиндра мало различаются для рассматриваемых сред, хотя и наблюдаются некоторые отличия в максимальном трении. Пульсации параметров существенно различаются, причем превышение пульсаций трения для воздуха составляет порядка 25 %, а пульсации давления выше на 30 % для воздуха по сравнению с маслом М20.
6. Осредненные относительные числа Нуссельта на контуре цилиндра для масла оказываются выше, чем для воздуха в окрестностях передней (примерно на 40 %) и задней (на 30 %) критических точек. В районе точки отрыва в масле возникает небольшой провал в теплоотдаче, отсутствующий в случае с воздухом.
7. Осцилляции относительного поверхностного числа Нуссельта в масле заметно выше, чем для воздуха, за исключением узкой зоны отрыва потока. Наибольшие осцилляции наблюдаются в области задней критической точки (на 25 % выше для масла по сравнению с воздухом).

Обозначения

Re, Pr — числа Рейнольдса и Прандтля,
 U — скорость равномерного потока, м/с,
 D — диаметр кругового цилиндра, м,
 T — безразмерная температура, в долях 293 К,
 ρ — плотность, кг/м³,
 μ — вязкость, кг/(м с),
 λ — коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)),
 t — время, в долях D/U ,
 x, y — декартовы координаты, в долях D ,
 s — отложенная по контуру цилиндра от передней критической точки координата, в долях периметра,

u, v — декартовы составляющие скорости, в долях U ,
 $\text{Erg}_u, \text{Erg}_p$ — погрешности по продольной составляющей скорости и по давлению, в долях U и ρU^2 соответственно,
 C_x, C_{xp}, C_{yf} — коэффициент лобового, профильного сопротивления и сопротивления трения,
 C_y — коэффициент поперечной силы,
 Nu — число Нуссельта, определенное как dT/dn ,
 p, f — статическое давление и трение на стенке (в долях ρU^2),
 μ — локальная вязкость среды.

Индексы

min, max — минимальная и максимальная величины,
 m — осредненные по периметру цилиндра величины,
 $*$ — приведенное время на автоколебательном режиме, начиная с $C_y = C_{y\min}$,

$\bar{}, '$ — осредненные на периоде колебаний C_y и пульсационные величины,
 L — координата длины ближнего следа на автоколебательном режиме при осреднении по C_y , в долях D .

Список литературы

1. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
2. Жукаускас А.А., Жюжда И.И. Теплоотдача в ламинарном потоке жидкости. Вильнюс: Минтис, 1969. 266 с.
3. Жукаускас А.А., Макарявичюс В.И., Шланчяускас А.А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. Вильнюс: Минтис, 1968. 192 с.
4. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике // LAP LAMBERT Academic Publishing. Саарбрюкен, 2013. 316 с.
5. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Кудрявцев Н.А., Баранова Т.А., Лысенко Д.А. Численное моделирование нестационарного теплообмена при ламинарном поперечном обтекании кругового цилиндра // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43, № 5. С. 745–758.
6. Белов И.А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами. Л.: Машиностроение, 1983. 144 с.
7. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплопередача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 223 с.
8. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
9. Leonard В.Р. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation // Comp. Meth. Appl. Mech. Engng. 1979. Vol. 19, No. 1. P. 59–98.
10. Исаев С.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки на стенке узкого канала // Теплофизика высоких температур. 2003. Т. 41, № 5. С. 755–770.
11. Баранов П.А., Гувернюк С.В., Ермишин А.В. и др. 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 МГУ, 2003. 360 с.
12. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 398 с.
13. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Баранова Т.А. Численное моделирование влияния чисел Рейнольдса и Прандтля на ламинарный теплообмен в коридорном пакете круглых различной плотности // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 1. С. 87–106.
14. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А. Численное моделирование ламинарного отрывного течения и теплообмена в трубных пучках с помощью многоблочных вычислительных технологий // Инженерно-физический журнал. 2004. Т. 77, № 1. С. 122–128.
15. Isaev S.A., Baranov P.A., Baranova T.V., Kudryavtsev N.A. Numerical simulation of vortical heat transfer in tube banks // Heat Transfer Research. 2006. Iss. 7. P. 593–605.
16. Жданов В.Л., Исаев С.А., Баранова Т.А. Ламинарное обтекание круглого цилиндра при воздействии нестационарного истечения струй в область ближнего следа // Инженерно-физический журнал. 2004. Т. 77, № 5. С. 125–133.
17. Жданов В.Л., Жукова Ю.В., Исаев С.А. Влияние геометрии внешнего кожуха на аэродинамические характеристики кругового цилиндра. Ламинарное обтекание для $Pr \sim 1$ // Докл. НАН Беларуси. Технические науки. 2005. Т. 49, № 5. С. 104–108.
18. Baranova T.A., Zhdanov V.L., Zhukova Yu.V., Isaev S.A. Reduction of resistance and heat transfer enhancement in flow past a cylinder with jet and vortex generators // Heat Transfer Research. 2010. Vol. 41, No. 4. P. 401–411.
19. Жукова Ю.В., Исаев С.А. Численное моделирование ламинарного течения масла и теплообмена вблизи кругового цилиндра с дугообразными направляющими пластинами // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 4. С. 705–711.
20. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Готовский М.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном движении неоднородных сред в узких каналах со сферическими лунками // Тепловые процессы в технике. 2009. № 3. С. 82–88.
21. Gotovsky M., Isaev S. Heat transfer enhancement by artificial roughness at Reynolds numbers related with laminar and transitional regimes for high-viscous liquids // Proc. of the 14 Int. Heat Transfer Conf. IHTC 14, IHTC 14-22303. 2010. 8 p.
22. Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhukova Yu.V., Baranov P.A., Gotovskii M.A., Usachov A.E. Numerical simulation of vortex heat transfer enhancement in transformer oil flow in a channel with one-row spherical dimples // Heat Transfer Research. 2011. Vol. 42. Iss. 7. P. 613–628.
23. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Готовский М.А., Усачов А.Е., Жукова Ю.В. Анализ повышения теплогидравлической эффективности при движении трансформаторного масла в микканале с однорядным пакетом сферических и овальных лунок на нагретой стенке // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 5. С. 884–890.
24. Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Расчет нестационарного обтекания кругового цилиндра в рамках многоблочных вычислительных технологий // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, № 5. С. 115–121.

25. **Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А.** Тестирование многооблочного алгоритма расчета нестационарных ламинарных отрывных течений // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, № 2. С. 28–35.
26. **Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г. Мордынский Н.А.** Численный анализ вихревой динамики и нестационарного турбулентного теплообмена в квадратной каверне с подвижной крышкой // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 491–504.
27. **Малахова Т.В.** Теплоотдача колеблющегося цилиндра в потоке вязкой несжимаемой жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 1. С. 75–82.
28. **Усачов А.Е.** Разработка и верификация многооблочных вычислительных технологий в пакете VP2/3 с приложениями к фундаментальным и прикладным задачам аэромеханики и теплофизики: автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 05.13.18: защищена 12.04.2013: утв. 10.02.2014. М.: ИПМ им.М.В. Келдыша РАН, 2013. 35 с.
29. **Van Doormaal J.P., Raithby G.D.** Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow // Numerical Heat Transfer. 1984. Vol. 7, No. 2. P. 147–163.
30. **Ferziger J.H., Peric M.** Computational methods for fluid dynamics. Berlin, Heidelberg, 1999. 389 p.
31. **Аганин А.А., Кузнецов В.Б.** Метод консервативной интерполяции интегральных параметров ячеек произвольных сеток // Динамика оболочек в потоке. Тр. семинара, Казань: Казанск. физ.-техн. инс-т КФ АН СССР, 1985. № 18. С. 144–160.
32. **Thompson J.F.** Numerical solution of flow problems using body-fitted coordinate systems // Comput. Fluid Dynamics / Ed. W. Kollmann. 1980. Vol. 1. P. 1–98.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2013 г.