

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 MBT 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 Н- и О- 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

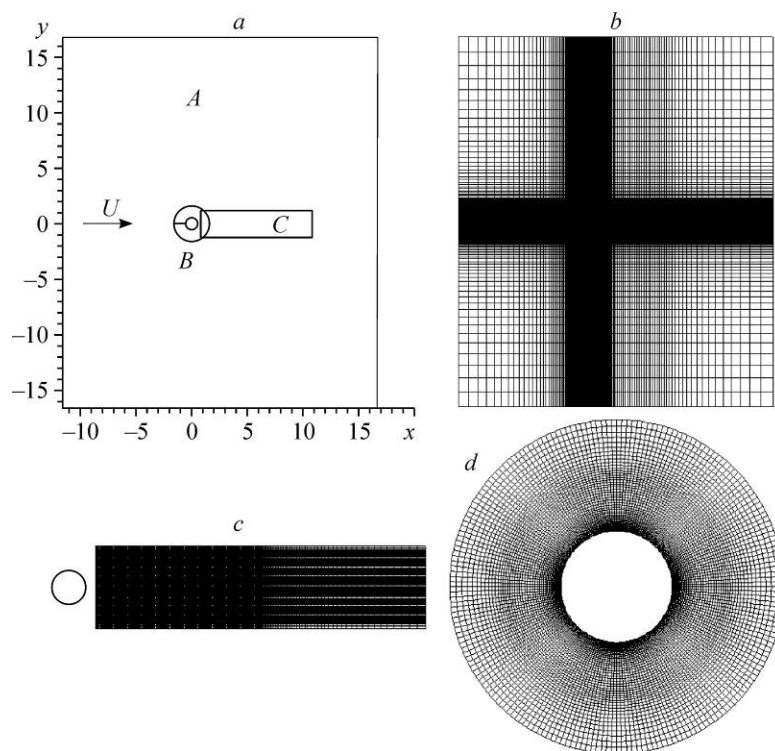


Рис. 1. Схема расчетной области с разделением на подобласти (а) и элементы многоблочной сетки: общей, прямоугольной (b); дополнительной прямоугольной (c); цилиндрической, согласованной с поверхностью цилиндра (d).

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 $E_{\text{г}}_p$ и $E_{\text{г}}_u$ 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 $E_{\text{г}}_u$ 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 $E_{\text{г}}_p(t)$, а также проходя точку перегиба для $E_{\text{г}}_u(t)$.