

УДК 532.517.2:621.1.016.4

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ЛАМИНАРНОМ ОБТЕКАНИИ МАСЛОМ М20 КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

© 2015 г. С. А. Исаев^{1,3}, Ю. В. Жукова², П. А. Баранов¹, А. Г. Судаков^{1,3}¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, г. Минск³Казанский национальный исследовательский технический университет – Казанский авиационный институт

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2013 г.

Конвективный теплообмен при ламинарном обтекании ($Re = 60$) маслом марки М20 и воздухом нагретого до 333 К кругового цилиндра с нанесенной на поверхность волнистой шероховатостью рассчитывается с использованием реализованных в пакете VP2/3 многоблочных вычислительных технологий решения уравнений Навье–Стокса и энергии в рамках процедуры коррекции давления. Показано, что при глубине шероховатости 1% в долях диаметра цилиндра теплоотдача от его поверхности в масле увеличивается на 21%, а теплогидравлическая эффективность на 17%.

DOI: 10.7868/S0040364415050142

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1–4], в значительной мере интенсификация теплообмена в разнообразных энергетических устройствах обуславливается гидродинамическими механизмами, в частности, связанными с генерацией вихрей выступами и впадинами. В аэромеханике накоплен многолетний опыт управления обтеканием тел с помощью организации крупномасштабных вихревых структур. Так, в [5, 6] численно обосновывается способ уменьшения лобового сопротивления и эффекта головной стабилизации затупленного тела за счет формирования в зазоре между телом и выступающим тонким соосным диском системы торообразных и спиралевидных вихрей. В [7–9] анализируется энергозатратный метод управления обтеканием толстых несущих поверхностей встроенными в контур вихревыми ячейками при интенсификации циркулирующих в них потоков с помощью отсоса. При весьма умеренных расходах отсасываемого воздуха в ячейках около аппарата, в особенности в тыльной его части, формируется близкий к безотрывному характер течения, при котором существенно уменьшается полное сопротивление (с учетом энергетических потерь) и увеличивается подъемная сила. Для создания отсоса предполагалось использовать двигательную установку летательного аппарата [6] и сеть перепускных каналов внутри него. Однако более выгодной представляется идея пассивного управления течением, связанная с переброской воздуха из зоны торможения потока перед телом в зону

разрежения (пониженного давления) за ним (так называемый дросселирующий эффект). Выдув струи на поверхности тела приводит к существенному снижению его сопротивления [10]. Исследования пассивных и активных способов управления обтеканием тел обобщены в концепции маломасштабного воздействия на обтекание объекта, приводящего к значительному улучшению его интегральных аэродинамических характеристик, которая, в частности, была реализована в исследовании влияния сгенерированной завихренности на дорожку Кармана за цилиндром [11].

Круг работ, касающихся управления теплообменом, менее обширен. Помимо уже отмеченных работ [1–4] по интенсификации теплообмена в микро-, мини- и макроканалах следует указать на использование для этой цели нанесенной на трубы шероховатости при их обтекании воздухом [12], а также пластинчатых струйных генераторов на трубах в пакете для воздушного [13] и масляного [14] теплоносителя. Исключительно интересными представляются новые научные направления, связанные с интенсификацией теплообмена при создании пульсаций расхода в трубах [15] и сгенерированных осцилляций в импактной турбулентной струе [16].

Данная работа является продолжением численных исследований [12, 17, 18] и посвящена анализу способа увеличения теплоотдачи от кругового цилиндра при замене рабочей среды с воздуха на масло марки М20. Интерес к неоднородным средам, физические свойства которых зави-

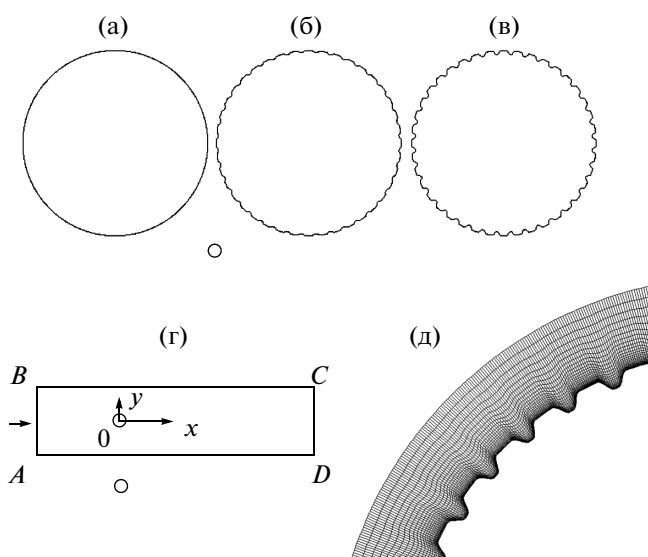


Рис. 1. Контур цилиндра с нанесенной шероховатостью $\Delta = 0$ (а), 0.005 (б), 0.01 (в); его расположение в поперечно ориентированной линейке и в расчетной области (г) и окружающая его цилиндрическая сетка, согласованная с криволинейным контуром (д).

сят от температуры, обуславливается не только существенным влиянием числа Прандтля на теплообмен при ламинарном обтекании пакета труб [19–22], но и связывается со значительным утончением температурных слоев, разрывы которых на периодических траншеях — элементах дискретной шероховатости на поверхности цилиндра, как в случае нанесения сферических [17] и овальных [18] лунок на стенки каналов, способствуют интенсификации теплообмена уже при весьма малых (порядка 60) числах Рейнольдса.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается конвективный теплообмен около кругового цилиндра диаметра D , как гладкого (рис. 1а), так и шероховатого (рис. 1б, 1в). Наносимый на цилиндр рельеф представляет собой равномерно расположенные по периметру, периодически повторяющиеся секции, содержащие траншеи глубиной Δ в долях диаметра D и участки гладкой поверхности. В данном случае на каждой секции протяженность гладких участков цилиндра диаметра D четырехкратно превосходит длину цилиндрического участка на дне траншеи с внутренним диаметром $D(1-2\Delta)$. Таким образом, скаты траншеи имеют суммарную протяженность, равную половине длины секции. В данном исследовании на четверти цилиндра располагается десять секций. Глубина траншеи варьируется в диапазоне от 0 до 0.015.

Гладкие и шероховатые цилиндры, собранные в однорядном пакете с шагом между центрами, равным $6D$, располагаются в поперечном потоке масла марки М20. В качестве характерной скорости принимается среднемассовая скорость U в центральном поперечном сечении, проходящем через оси цилиндров ($x = 0$). Таким образом, на входной проточной границе, достаточно удаленной от центра цилиндра ($7.25D$), формируется равномерный поток со скоростью, равной 0.833 (рис. 1г). На выходе из расчетной области, расположенном на расстоянии $17.25D$ от центра цилиндра, задаются мягкие граничные условия (условия продолжения решения) [4]. На верхней и нижней границе ставятся условия симметрии. Число Рейнольдса, определенное по характерной скорости, диаметру цилиндра и коэффициенту кинематической вязкости при 20°C (293 К), принятой в качестве характерной ($T = 1$), задается равным $Re = 60$. Нагретая поверхность тела изотермическая с температурой 60°C (333 К, безразмерная температура $T = 1.1365$).

Уравнения Навье—Стокса решаются итерационно до достижения сходимости (погрешности по скорости становятся менее 10^{-5}), соответствующей стабилизации обтекания кругового цилиндра. В качестве неоднородной среды рассматривается масло МС-20, широко применяемое для смазывания шарниров винтов вертолетов, авиационных поршневых двигателей и как компонент в смесях для турбовинтовых двигателей. Вводятся табличные значения зависящей от температуры плотности, теплопроводности и теплоемкости. Энтальпия рассчитывается как $c_p(T)T$. Число Прандтля как функция от температуры определяется в ходе расчетов.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДОЛОГИИ. РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ

Для решения исходных уравнений применяются разработанные многоблочные вычислительные технологии [4, 23], позволяющие разрешать с надлежащей точностью разномасштабные структурные элементы течения и высокоградиентные температурные зоны.

Концепция расщепления по физическим процессам положена в основу расчетной процедуры [4, 7, 24], приспособленной для решения задач конвективного теплообмена на многоблочных сетках с их частичным наложением. 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 конечно-объемной процедуры типа SIMPLEC, основанной на кон-

цепции расщепления по физическим процессам, причем используется E -факторная формулировка схемы [25]. 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 противопоточная схема с квадратичной интерполяцией Леонарда [26]. Дискретизация конвективных членов уравнения энергии проводится по схеме Ван-Лира [27]. Монотонизатор Рхи-Чоу используется в блоке поправки давления из-за централизованного расчетного шаблона с эмпирически определенным коэффициентом 0.1 [4].

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.

Коэффициенты релаксации при расчете приращений составляющих скорости принимаются равными 0.5, поправки давления – 0.8, приращения температуры – 0.9. Величина E -фактора задается, как обычно, 2.5 при решении динамической задачи и 100 для тепловой задачи, чтобы обеспечить в последнем случае высокую сходимость. В качестве критерия сходимости процесса глобальных итераций определяется условие малости максимальных величин приращений декартовых составляющих скорости и приращений полного теплосодержания (прерывание счета при достижении уровня погрешностей 10^{-5}).

Расчеты выполняются с помощью оригинального специализированного вычислительного комплекса VP2/3 (двухмерная версия), который последовательно развивается на протяжении последних пятнадцати лет [24, 28] и по своим характеристикам практически не отличается от универсальных пакетов типа FLUENT, CFX, StarCD.

Гладкий цилиндр окружается O -образной, равномерной по окружной координате сеткой, содержащей 320 ячеек по контуру и 20 ячеек по размеру кольцевой зоны, равному 0.15. В радиальном направлении сетка неравномерная со сгущением к телу. Пристеночный шаг равен 10^{-4} . Расчетная сетка O -типа вблизи шероховатого цилиндра выбирается весьма подробной, чтобы разрешить гидродинамические особенности в пределах траншей, и содержит 35×1040 ячеек (рис. 1д).

Сетка O -типа накладывается на декартовую сетку, вводимую для расчета в канале. Сетка содержит 354×300 ячеек. В окрестности тела сетка мелкая с шагами 0.02 в продольном и поперечном

направлениях. Продольный шаг сетки возрастает при приближении к входной и выходной проточным границам, достигая величин порядка 0.1–0.2.

СРАВНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ И МАСЛЯНОЙ СРЕД НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ ГЛАДКОГО КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

На рис. 2. и в табл. 1 представляются некоторые численные результаты по влиянию на струк-

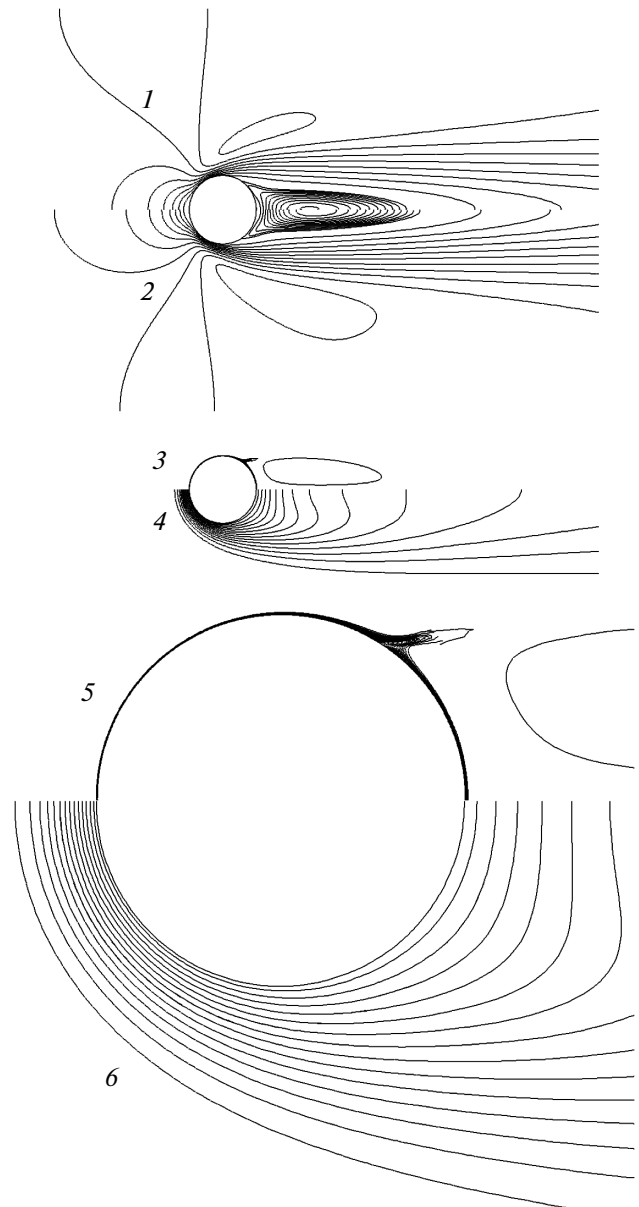


Рис. 2. Сравнение картин изолиний продольной составляющей скорости u (1, 2), нанесенных с шагом 0.1 при $u > 0$ и 0.01 при $u < 0$, а также картин изотерм T (3–6), нанесенных с шагом 0.01, начиная от уровня 1.13, при обтекании кругового гладкого цилиндра маслом марки M20 (1, 3, 5) и воздухом (2, 4, 6).

Таблица 1. Влияние типа рабочей среды на локальные экстремальные и интегральные теплогидравлические характеристики при обтекании гладкого цилиндра

Среда	u_{\min}	u_{\max}	ζ	Nu_s	Nu_m	C_x	C_{xp}	C_{xf}
Воздух	-0.119	1.135	0.1642	12.6	4.0	1.279	0.879	0.400
M20*	-0.113	1.125	0.1608	829.5	264	1.224	0.865	0.359
M20**	-0.145	1.122	0.1600	811.5	258.3	1.216	0.859	0.357

* Цилиндрическая сетка 35×320 .** Цилиндрическая сетка 35×1040 .

туру течения, температурные поля, интегральные теплогидравлические характеристики и экстремальные параметры потока типа рабочей среды (воздуха и масла M20). Прежде всего, следует отметить, что существенное измельчение расчетных сеток при моделировании ламинарного течения масла и теплообмена около кругового цилиндра оказывает слабое влияние на его характеристики.

При переходе от воздушной рабочей к масляной среде картина обтекания цилиндра, характеризуемая положением точек отрыва и конфигурацией циркуляционной зоны, меняется незначительно ($I, 2$ на рис. 2). Некоторое (порядка 5%) уменьшение лобового сопротивления связывается со снижением сопротивления трения, в то время как профильная составляющая остается практически неизменной (табл. 1). Отрывная зона в масле получается несколько короче, чем в воздушном потоке, хотя интенсивность течения в ней мало меняется. Интересно отметить, что область влияния тела на набегающий поток заметно больше для воздушной среды ($I, 2$ на рис. 2).

Влияние рабочей среды на конвективный теплообмен, напротив, имеет кардинальный характер ($3-6$ на рис. 2). Температурный пограничный слой около цилиндра даже не утончается, а фактически исчезает, становясь крайне тонким.

Таблица 2. Влияние глубины траншей Δ на экстремальные характеристики обтекания маслом шероховатого цилиндра

Δ	u_{\min}	u_{\max}
0	-0.145	1.122
0.005	-0.148	1.126
0.008	-0.150	1.124
0.010	-0.151	1.125
0.013	-0.152	1.126
0.015	-0.154	1.126

Лишь в зоне точки отрыва возникает температурный протуберанец, а все остальное пространство близко к изотермическому с фоновой температурой, равной характерной (293 К). Как следствие утончения температурного слоя, теплоотдача от цилиндра возрастает более чем в 60 раз (табл. 1).

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ТРАНШЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ ЦИЛИНДРА В МАСЛЯНОЙ СРЕДЕ

На рис. 3–7 и в табл. 2 представлены некоторые материалы проведенного численного анализа влияния шероховатости на интенсификацию теплообмена при ламинарном обтекании маслом M20 кругового цилиндра.

В [12] показано, что при ламинарном режиме обтекания воздухом нанесенные на поверхность цилиндра упорядоченные траншеи не оказывают существенного влияния на интенсификацию теплообмена. Если обратить внимание на значительную толщину температурного пограничного слоя воздуха на цилиндре (рис. 2), то становится понятным, почему даже крупномасштабная шероховатость не может повлиять на изменение теплоотдачи. И в то же время очевидно, что в масле при тончайших температурных слоях даже малогабаритная шероховатость может воздействовать благоприятным образом на увеличение теплосъема с поверхности тела. Как следует из рис. 3, лишь для траншей малой глубины (порядка 0.003–0.005) суммарное число Нуссельта от цилиндра Nu_s остается неизменным, хотя длина S смоченного периметра увеличивается. При $\Delta > 0.005$ величина Nu_s довольно быстро нарастает, причем, начиная с $\Delta = 0.006$, опережает увеличение S и достигает 1.6 превышения по сравнению с гладким цилиндром (рис. 3а).

Отнесенное к периметру суммарное число Нуссельта Nu_m до $\Delta = 0.006$ не слишком изменяется (рис. 3б), однако при дальнейшем росте глубины траншеи увеличивается, достигая максимума при $\Delta = 0.012$ (рис. 3а, 3б). Гидравлические потери ζ при малых глубинах траншей оказываются меньше,

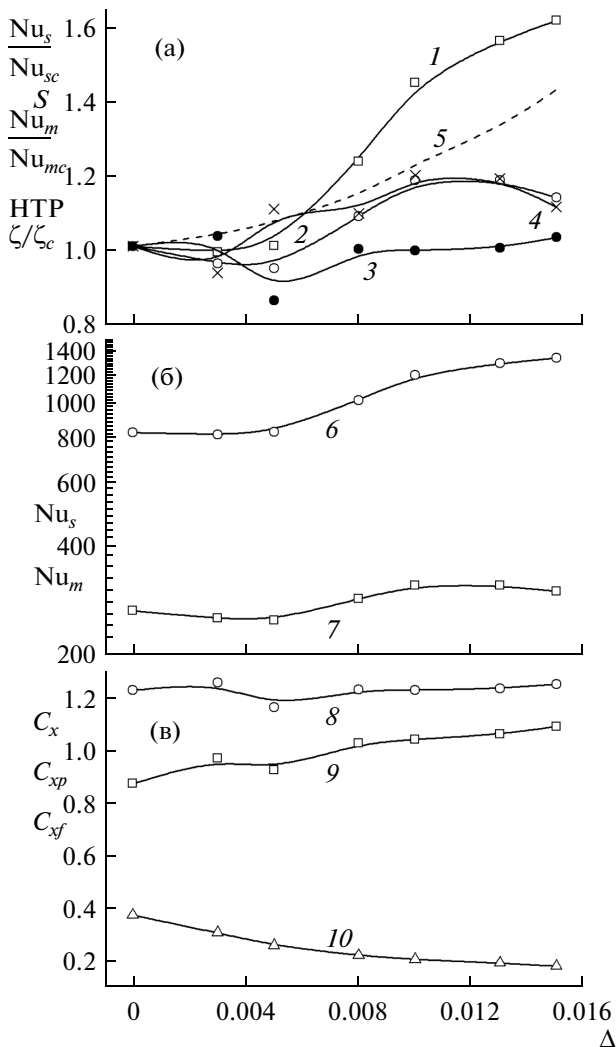


Рис. 3. Влияние глубины траншей Δ на интегральные теплогидравлические характеристики (а): Nu_s/Nu_{sc} (1), Nu_m/Nu_{ms} (2), ζ/ζ_c (3), НТР (4), S (5); на суммарную теплоотдачу (б) Nu_s (6), в том числе отнесенную к периметру шероховатого цилиндра Nu_m (7); на интегральные силовые характеристики (в): лобовое C_x (8), профильное C_{xp} (9) сопротивление и сопротивление трения C_{xf} (10).

чем для гладкого цилиндра, а при последующем возрастании Δ увеличиваются незначительно по сравнению с Nu_m . Как следствие, зависимость теплогидравлической эффективности НТР от Δ имеет характер, аналогичный $Nu_m(\Delta)$, и при $\Delta = 0.012$ наблюдается 20%-ное превышение по сравнению с гладким цилиндром.

Подобно поведению $\zeta(\Delta)$ ведет себя лобовое сопротивление цилиндра, слегка возрастая при глубинах траншей порядка 0.013–0.015 (рис. 3в). Однако при этом значительное увеличение профильного сопротивления цилиндра (на 20% в рассматриваемом диапазоне Δ) компенсируется снижением сопротивления трения.

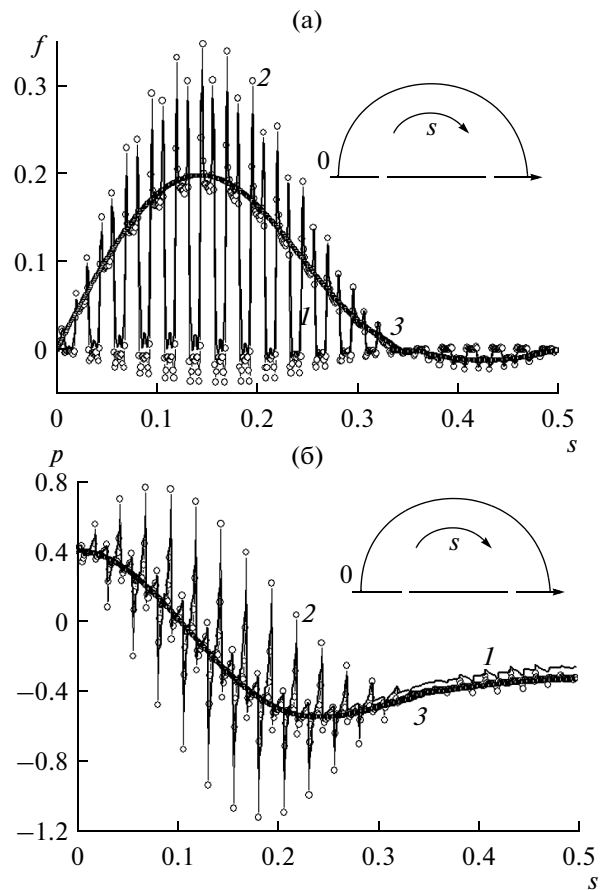


Рис. 4. Сравнительный анализ профилей напряжения трения (а) и статического давления (б) на контурах шероховатого (1, 2) и гладкого (3) цилиндров: 1 – $\Delta = 0.005$, 2 – 0.01.

Снижение сопротивления трения шероховатого цилиндра связывается с образованием в траншеях зон, близких к нулю (при $\Delta = 0.005$), и отрицательных (при $\Delta = 0.01$) величин локального напряжения трения (рис. 4а).

Возрастание силы сопротивления на шероховатый цилиндр с ростом Δ обусловливается увеличением локального давления на наветренных гребнях траншей (рис. 4б). При этом распределение давления на гладких фрагментах контура цилиндра мало отличается от распределения давления на исходно гладком аналоге.

Анализ локального теплообмена около шероховатого цилиндра представляется на рис. 5, причем в первом случае распределения числа Nu отнесены к Nu_m (рис. 5а), а во втором – отмасштабированы по распределению Nu по гладкому цилиндру (рис. 5б). Из полученных результатов следует, что в зоне безотрывного течения на цилиндре относительные числа Нуссельта оказываются существенно выше, чем на поверхности гладкого цилиндра, причем нарастают с увеличе-

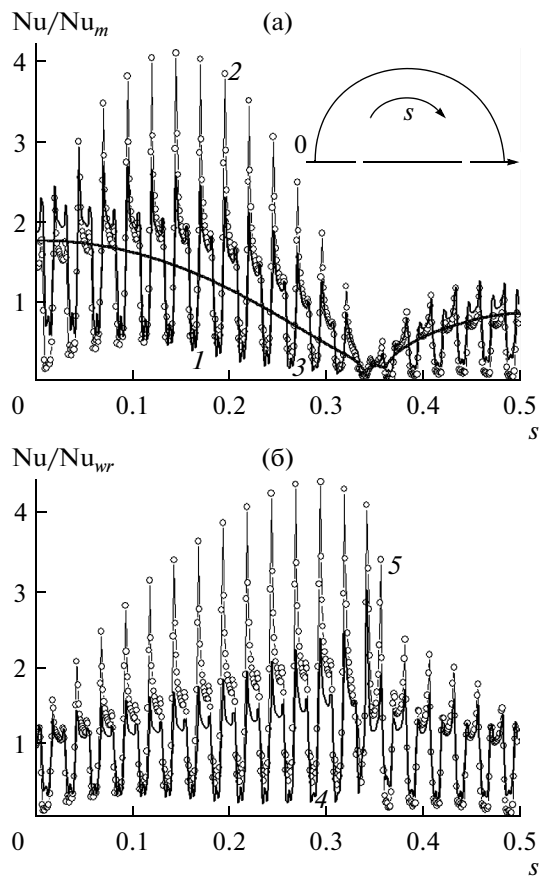


Рис. 5. Сравнительный анализ профилей локального числа Nu , отнесенных к Nu_m на контурах шероховатого (1, 2) и гладкого (3) цилиндров (а), а также Nu_s для шероховатых цилиндров, отнесенных к Nu_s гладкого цилиндра (б): 1, 3 – $\Delta = 0.005$; 2, 4 – 0.01.

нием Δ . В зоне отрывного течения в следе, напротив, относительные Nu оказываются ниже, чем на гладком цилиндре.

Еще одна характерная особенность следует из табл. 2. С увеличением глубины траншеи движение в следе интенсифицируется.

Сравнение картин обтекания гладкого и шероховатого цилиндров (1, 2 на рис. 6) показывает, что для последнего характерны не только удлинение ближнего следа, но и некоторое увеличение максимальной продольной скорости (см. также табл. 2). Следует отметить, что поле продольной скорости перед цилиндром не зависит от степени шероховатости его поверхности.

Хотя теплоотдача от шероховатого цилиндра значительно возрастает, температурное поле около него изменяется мало (несколько увеличивается в размерах пятно повышенной по сравнению с фоновой температурой – 3, 4 на рис. 6). А вот число Прандтля внутри зоны циркуляционного течения снижается меньше, чем для гладкого цилиндра, у которого в ядре крупномасштабного вихря

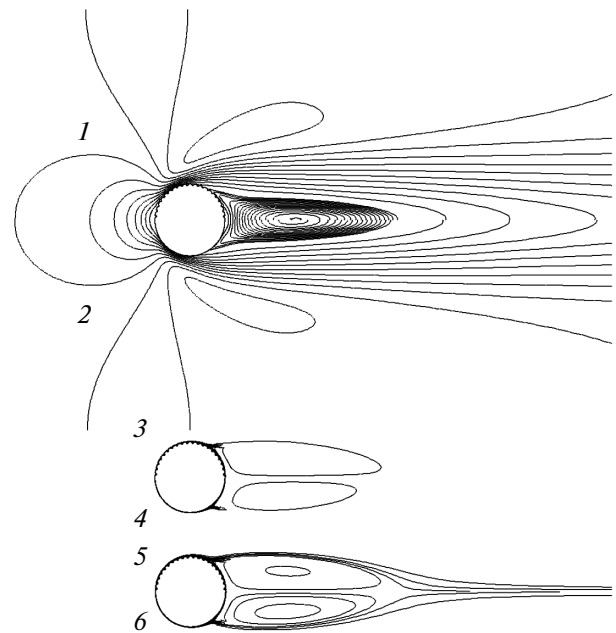


Рис. 6. Сравнение картин изолиний продольной составляющей скорости u (1, 2) с шагом 0.1 при $u > 0$ и 0.01 при $u < 0$, картин изотерм T (3, 4) с шагом 0.01 от уровня 1.13 и картин изолиний числа Прандтля (5, 6), нанесенных с шагом 1000, начиная от 1000 до 15000, при обтекании маслом марки М20 шероховатого (1, 3, 5) и гладкого (2, 4, 6) цилиндров.

Pr опускается до 11000 (граничная изолиния соответствует $Pr = 15000 - 5$, 6 на рис. 6).

В более крупном масштабе (рис. 7) температурные поля и распределения числа Прандтля в окрестности шероховатого и гладкого цилиндров демонстрируют образование умеренных по размерам протуберанцев в районе точки отрыва, причем они оказываются мощнее и протяженнее в случае нанесения периодических траншей. Судя по Pr , на шероховатых поверхностях толщина пристеночных слоев оказывается несколько больше, чем на гладких аналогах.

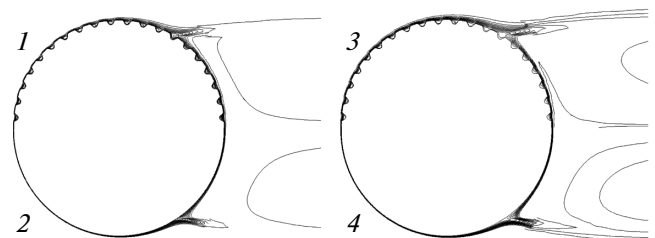


Рис. 7. Сравнение картин изотерм T (1, 2) с шагом 0.01 от уровня 1.13 и картин изолиний числа Прандтля (3, 4), нанесенных с шагом 1000, начиная от 1000 до 15000, при обтекании маслом марки М20 шероховатого (1, 3) и гладкого (2, 4) цилиндров (увеличенный масштаб).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многоблочные вычислительные технологии для решения уравнений Навье–Стокса и энергии, основанные на использовании композитных с пересечением структурированных сеток, применяются для анализа интенсификации теплообмена при ламинарном обтекании маслом марки М20 кругового цилиндра путем нанесения на его поверхность организованной шероховатости в форме упорядоченных траншей. Число Рейнольдса задано равным 60.

2. Сравнение неоднородных рабочих сред типа масел с воздушным теплоносителем продемонстрировало значительное превосходство масла М20 для интенсификации конвективного теплообмена (в 60 раз), причем гидравлические потери цилиндра оказываются ниже в случае неоднородных сред.

3. Нанесение на поверхность цилиндра упорядоченных траншей глубиной Δ порядка 0.015 в долях диаметра приводит к возрастанию суммарной теплоотдачи в 1.6 раза по сравнению с гладким цилиндром, при этом гидравлические потери увеличиваются всего на 3%. Отнесенная к смоченному периметру теплоотдача от шероховатого цилиндра достигает максимума при $\Delta = 0.012$, который в 1.2 раза превышает уровень Nu_m для гладкого аналога.

4. Незначительное влияние глубины траншей Δ на лобовое сопротивление цилиндра обусловлено тем обстоятельством, что увеличение с ростом Δ профильного сопротивления компенсируется монотонным уменьшением сопротивления трения.

Работа выполнена при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – С. Исаев, КНИТУ–КАИ, г. Казань) по гранту Правительства России № 14.Z50.31.0003.

Обозначения. D – диаметр цилиндра, м; x, y – продольная и поперечная координаты (в долях D); Δ – глубина траншеи (в долях D); s – координата вдоль контура цилиндра (в долях длины периметра кругового цилиндра); u – продольная составляющая локальной скорости (в долях среднемаксимальной скорости); ρ – плотность, кг/м³; c_p – теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг К); μ – вязкость, Па с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К); U – среднемаксимальная скорость, м/с; θ – температура, К; T – безразмерная температура; Re – число Рейнольдса ($Re = \rho U D / \mu$); Pr – число Прандтля ($Pr = c_p \mu / \lambda$); Nu – число Нуссельта, определенное как dT/dn ; ζ – коэффициент гидравлических потерь; C_x, C_{xp}, C_{xf} – коэффициенты лобового, профильного сопротивления и сопротивления трения; p, f – статическое давление и трение на стенке (в долях

ρU^2); $HTP = (Nu_m / Nu_{ms}) / (\zeta / \zeta_c)$ – теплогидравлическая эффективность. Нижние индексы: c – параметры для гладкого цилиндра; m – осредненные по ширине стенки параметры; max, min – максимальные и минимальные величины; s – суммарная характеристика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
2. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплообмена в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена / Под общ. ред. Гортышова Ю.Ф. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
3. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холланов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. М.: ФГУП “ЦНИИАТОМИНФОРМ”, 2008. 532 с.
4. 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.
5. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
6. Бобышев В.К., Гувернюк С.В., Исаев С.А. Идентификация вихревого механизма головной стабилизации при моделировании несимметричного обтекания цилиндра с выступающим диском потоком несжимаемой жидкости // ИФЖ. 1999. Т. 72. № 4. С. 634.
7. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. Ермишина А.В., Исаева С.А. М.: МГУ, 2003. 360 с.
8. Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г. Численное моделирование ламинарного обтекания цилиндра с пассивными и активными вихревыми ячейками в рамках концепции декомпозиции расчетной области и при использовании многоярусных сеток // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 8. С. 33.
9. 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.
10. 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. V. 90. № 11. P. 1217.
11. 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.

12. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Кудрявцев Н.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В.* Интенсификация вихревого теплообмена в пакете поперечных труб с упорядоченными траншеями // ИФЖ. 2005. Т. 78. № 1. С. 112.
13. *Baranova T.A., Zhdanov V.L., Zhukova Yu.V., Isae S.A.* Reduction of Resistance and Heat Transfer Enhancement in Flow Past a Cylinder with Jet and Vortex Generators // Heat Transfer Research. 2010. V. 41. № 4. P. 401.
14. *Жукова Ю.В., Исаев С.А.* Численное моделирование ламинарного течения масла и теплообмена вблизи кругового цилиндра с дугообразными направляющими пластинами // ИФЖ. 2008. Т. 81. № 4. С. 705.
15. *Давлетшин И.А., Михеев Н.И.* Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 442.
16. *Пахомов М.А., Терехов В.И.* Влияние частоты импульсов на теплообмен в точке торможения импульсной турбулентной струи // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 287.
17. *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. V. 42. № 7. P. 613.
18. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Готовский М.А., Усачов А.Е., Жукова Ю.В.* Анализ повышения теплогидравлической эффективности при движении трансформаторного масла в миниканале с однорядным пакетом сферических и овальных лунок на нагретой стенке // ТВТ. 2013. Т. 51. № 6. С. 884.
19. *Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А.* Численное моделирование теплообмена при турбулентном течении с отрывом в пакетах труб // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 291.
20. *Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А.* Численное моделирование ламинарного отрывного течения и теплообмена в трубных пучках с помощью многоблочных вычислительных технологий // ИФЖ. 2004. Т. 77. № 1. С. 122.
21. *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 труб различной плотности // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 1. С. 87.
22. *Isaev S.A., Baranov P.A., Baranova T.V., Kudryatsev N.A.* Numerical Simulation of Vortical Heat Transfer in Tube Banks // Heat Transfer Research. 2006. № 7. P. 593.
23. *Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Харченко В.Б.* Расчет нестационарного обтекания кругового цилиндра в рамках многоблочных вычислительных технологий // ИФЖ. 2002. Т. 75. № 5. С. 115.
24. *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2013. 316 с.
25. *Van Doormaal J.P., Raithby G.D.* Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flow // Numer. Heat Transfer. 1984. V. 7. № 2. P. 147.
26. *Leonard B.P.* A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1979. V. 19. № 1. P. 59.
27. *Numerical Methods in Heat Transfer* // Ed. Lewis R.W., Morgan K., Zienkiewicz O.C. N.Y.: John Wiley and Sons Ltd, 1981. 536 p.
28. *Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Усачов А.Е., Стрижак С.В., Лоханский Я.К., Губернюк С.В.* Разработка, верификация и применение основанного на многоблочных вычислительных технологиях распараллеленного пакета открытого типа VP2/3 для решения фундаментальных, прикладных и эксплуатационных задач аэромеханики и теплофизики // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. 2009. № 17(150). Вып. 3. С. 59.