

УДК 532.517.4:536.244

АНАЛИЗ АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА НА СТАБИЛИЗИРОВАННОМ УЧАСТКЕ УЗКОГО КАНАЛА С ОДНОРЯДНЫМИ НАКЛОНЕННЫМИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫМИ ЛУНКАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СЕТОК И МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

© 2021 г. С. А. Исаев^{1,2,*}, А. Ю. Чулюнин³, Д. В. Никущенко²,
А. Г. Судаков¹, А. Е. Усачов⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Московский комплекс Центрального аэрогидродинамического института, Москва, Россия

*E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.02.2020 г.

После доработки 17.05.2020 г.

Принята к публикации 18.06.2020 г.

Дан анализ интенсификации отрывного течения и теплообмена в однорядных, наклоненных под углом 45° овално-траншейных лунках на нагретой стенке узкого канала на участке стабилизации турбулентного потока при $Re = 10^4$. Обнаружены аномально высокие скорости возвратного и вторичного течения (порядка среднemasсовой скорости в канале), а также во входной части лунки многократное превышение абсолютных величин отрицательного трения (в 4.5 раза) и тепловых потоков (в пять раз) над трением и числом Нуссельта на нагретой стенке плоскопараллельного гладкого канала. Установлена связь этого явления с перепадом полного давления между близкими зонами торможения потока на наветренном склоне лунки и разрежения в месте генерации смерчеобразной вихревой структуры. Обсуждаются неопределенности численных прогнозов при использовании различных сеток и полуэмпирических моделей турбулентности в пакетах StarCCM+ и VP2/3.

DOI: 10.31857/S004036442101004X

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные вихревые генераторы вызывают значительный интерес как устройства для интенсификации теплообмена, характеризующиеся умеренным ростом гидравлических потерь [1, 2]. Следует отметить, что намечился переход от упорядоченных пакетов сферических лунок с большой плотностью нанесения таких ямок на омываемые поверхности к одно- и многорядным пакетам наклоненных овално-траншейных лунок (ОТЛ) с меньшей плотностью.

В [3–5] выполнено исследование конвективного теплообмена при турбулентном обтекании водой уединенных наклоненных ОТЛ на стенке узкого канала в широком диапазоне изменения геометрических размеров лунки при фиксированных площади пятна и глубине, отнесенной к высоте канала, с варьированием угла наклона θ от 30° до 60° и числа Рейнольдса от 10^4 до 10^5 . Обосновано значительное преимущество предложенных форм лунок большого удлинения (отношение длины к ширине λ порядка 7) над сфериче-

скими и коническими аналогами по тепловой и теплогидравлической эффективности. Обнаружено, что в наклоненных ОТЛ экстремальные величины скорости вторичного течения приближаются к характерной среднemasсовой скорости потока в узком канале. Показано, что с ростом относительного удлинения λ ОТЛ происходит перестройка отрывного течения с формированием в ней спиралевидного вихря и безотрывного закрученного потока на большей части ОТЛ. Установлен оптимальный угол θ наклона ОТЛ, соответствующий максимальным величинам тепловой и теплогидравлической эффективности и лежащий в диапазоне 45° – 52° .

В [6] рассчитывается ламинарный и турбулентный (Re меняется от 100 до 20000) конвективный теплообмен при движении воздуха в узком канале шириной $B = 2.5$ с пакетом из 22 однорядных наклоненных под углом $\theta = 45^\circ$ овалных лунок умеренного удлинения ($\lambda = 1.8$) и глубины ($\Delta = 0.2$). Ширина лунки b выбрана в качестве характерного линейного размера, радиус скругле-

ния кромки $R = 0.25$, высота канала изменяется от 0.44 до 0.8, а продольный шаг между центрами лунок $S = 1.8$. При таком довольно большом шаге в узком канале можно выделить компактный модуль длиной L с уединенной овальной лункой на нагретой стенке и проточными (входной и выходной) границами, на которых задаются периодические граничные условия (здесь $L = S$). Показано, что локальная и интегральная (оцененная по поперечным полосам и прямоугольным участкам) тепловая нагрузка по длине канала с однорядными овальными лунками нарастает волнообразно, причем пиковые величины сначала достигают наибольшего значения, а затем несколько уменьшаются, выходя на стабильный уровень с некоторой (с 12 при $Re = 20000$) лунки. Выход на автомоделный режим обтекания характеризуется повторяющимися распределениями характеристик потока, турбулентности и температуры, которые оказались близкими к теплогидравлическим характеристикам модуля с периодическими граничными условиями на проточных границах.

В [7–12] анализируются асимптотические характеристики ламинарного и турбулентного течения воздуха, а также конвективного теплообмена в узких каналах с однорядными наклоненными ОТЛ на стабилизированном гидродинамическом участке.

В ламинарном режиме при $Re = 1000$ в центре нагретой стенки в периодическом модуле узкого канала длиной $L = 4$, высотой 1 и шириной $B = 6$ размещается наклоненная под углом $\theta = 45^\circ$ ОТЛ шириной $b = 1$, длиной $\lambda = 4.5$, радиусом скругления кромки $R = 0.025$ и глубиной Δ , изменяющейся в диапазоне от 0 до 0.375 [7, 8]. С ростом Δ обнаружена и объяснена значительная интенсификация ламинарного отрывного течения на входе в наклоненную лунку с двукратным увеличением по модулю максимума относительного трения при $\Delta = 0.375$ по сравнению с уровнем этой величины при $\Delta = 0.1125$ –0.25. Максимальная абсолютная величина скорости вторичного течения в лунке достигает 0.72 от среднемассовой скорости. Для однорядных наклоненных овально-траншейных лунок глубиной свыше 0.25 в узком канале открыто явление ускорения ламинарного потока с полуторакратным ростом максимальной скорости в ядре. Установлено, что причина интенсификации ламинарного отрывного и вторичного течения в наклоненной овально-траншейной лунке заключается в резком перепаде статического давления (максимум порядка 0.34 и минимум порядка -0.14 при $\Delta = 0.3125$) на близком расстоянии между центрами зон высокого и низкого давления во входной части лунки. С ростом Δ увеличиваются локальные относительные тепловые нагрузки на наветренном склоне входной части лунки, достигая 16–17. Тепловая эффективность, определяемая относительным сум-

марным числом Нуссельта, осредненным по омываемой поверхности участка с наклоненной лункой, имеет максимум порядка 1.8 при $\Delta = 0.3125$, однако максимальная теплогидравлическая эффективность реализуется при $\Delta = 0.25$ и составляет 1.3. Следует отметить, что сферические лунки на стенке канала для воздушного теплоносителя оказываются неэффективными.

Аномальная интенсификация отрывного турбулентного течения воздуха и теплообмена исследуется при $Re = 10^4$ в периодических модулях узкого канала высотой 1 с размерами $L = 6$, $B = 7$ [9] и $L = 8$, $B = 9$ [10–12]. Рассматривается ОТЛ шириной $b = 1.05$, длиной $\lambda = 7.05$ и радиусом скругления кромки $R = 0.21$. В [9] глубина лунки $\Delta = 0.3$, $S = L = 6$, а угол наклона $\theta = 45^\circ$. В [10] $\Delta = 0.25$, $S = L = 8$, а θ варьируется от 1° до 89° . В [11, 12] $\Delta = 0.25$, $\theta = 65^\circ$, S варьируется от 2 до 8. В [11] дополнительно анализируется $\theta = 53^\circ$.

Аномальная интенсификация отрывного течения в наклоненной ОТЛ определяется по достижению ультравысокой скорости возвратного течения во входной сферической части лунки, приближающейся по величине к среднемассовой скорости потока в канале. По сравнению со сферическими лунками скорость отрывного течения возрастает в 2–3 раза. Также интенсифицируется вторичное течение в наклоненной ОТЛ, причем максимальная скорость поперечного потока может превысить максимальную скорость в плоскопараллельном гладком канале примерно на 10%. Как и в ламинарном потоке в узком канале с однорядными наклоненными ОТЛ, в ядре турбулентного потока возникают зоны ускорения течения до скоростей, превосходящих в 1.39 раза максимальную скорость потока в гладком канале. Интенсификация отрывного течения и теплообмена в периодическом модуле усиливается по мере уплотнения лунок. Так, при $S = 2$ в отрывной зоне лунки наблюдается четырехкратное падение минимальной величины относительного отрицательного трения и 6.5-кратный рост максимальной величины относительной теплоотдачи. Причина аномальной интенсификации тепло- и массообменных процессов в отрывной зоне внутри наклоненной ОТЛ связана с образованием очень большого перепада (доходящего до 1.2) давления между близко расположенными зонами торможения внешнего втекающего в лунку потока на наветренном ее склоне и зоной глубокого разрежения во входном сферическом сегменте в месте, где генерируется мощный спиралеобразный вихрь.

В данной работе уточняется численное моделирование аномальной интенсификации отрывного течения воздуха и теплообмена в однорядных наклоненных ОТЛ на стенке узкого канала на стабилизированном участке [9]. С этой целью сравниваются характеристики стационарного те-

чения и теплообмена, рассчитанные на сетках разной топологии с помощью различных пакетов, а также с использованием одно- и двухпараметрических полуэмпирических дифференциальных моделей. Анализируются развитие закрученного воздушного потока в наклоненной лунке в периодическом модуле канала и формирование поля высоких тепловых нагрузок в ареале лунки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

На стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала с однорядными ОТЛ, ориентированными под углом 45° к потоку, рассчитывается стационарное турбулентное отрывное течение воздуха и конвективный теплообмен. Верхняя изотермическая и боковые теплоизолированные стенки канала плоские. Ширина канала $B = 7$, а высота, равная единице, выбрана в качестве характерного размера. В центре расчетного периодического канального модуля длиной $L = 6$ на нижней нагретой до постоянной температуры стенке располагается наклоненная ОТЛ. Как и в [9], ширина ОТЛ равна 1.05, глубина – 0.3, длина – 7.05. Радиус скругления кромки лунки принимается равным 0.21. Вводится система декартовых координат (x, y, z) с центром в продольной срединной плоскости на нижней стенке во входном сечении периодического модуля (рис. 1а). Ось x ориентирована вдоль, а ось z поперек канала. Декартовы скорости u, v, w , характеристики турбулентности (энергия k , удельная скорость диссипации ω , вихревая вязкость μ_t) и число Рейнольдса определяются по среднemasсовой скорости потока U_{bl} . В качестве характерной температуры выбрана температура верхней стенки, равная 293 К (безразмерная величина – 1). Нижняя стенка нагрета до 303 К (безразмерная величина – 1.034).

В базовом варианте решения задачи с помощью пакета VP2/3 (скорость–давление, 2D/3D) система стационарных осредненных по

Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, записанная в предположении постоянной плотности низкоскоростного потока воздуха, замыкается с помощью дифференциальных уравнений модели переноса сдвиговых напряжений (SST), модифицированной в рамках подхода Роди–Лещинера–Исаева с учетом кривизны линий тока [13, 14]. При расчете вихревой вязкости μ_t на основе этого подхода используется поправочная функция $f_c = 1/(1 + CcRi_t)$ с полуэмпирической константой $Cc = 0.02$, подобранной из условия наилучшего согласования численных прогнозов и экспериментальных данных для многочисленных примеров отрывных течений (Ri_t – турбулентное число Ричардсона).

Периодические граничные условия выполняются на проточных границах A, B (рис. 1а) расчетного модуля, и условия прилипания задаются на стенках канала. Процедура коррекции давления [14] применяется для решения задачи с фиксированным массовым расходом. Для решения уравнения энергии используется процедура коррекции среднemasсовой температуры [6]. При дискретизации дифференциальных уравнений применяются противопоточные схемы QUICK и TVD [14]. Многоблочные вычислительные технологии [14] и алгебраический ускоритель сходимости итераций в блоке поправки давления [15] реализованы в пакете VP2/3.

В методическом исследовании для описания турбулентного потока в пакете StarCCM+ используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (RANS-подход), замыкаемые выбранными тремя моделями турбулентности: $k-\varepsilon$ -Realizable [16] с двухслойной моделью в формулировке Вольфштейна [17]; SST-модель с поправкой Дурбина [18]; модель вихревой вязкости Спаларта–Аллмареса [19] (SA) с модифицированным членом, описывающим генерацию турбулентности [20]. Для дискретизации конвективных членов во всех случаях используется противопоточная схема второго порядка с ограничи-

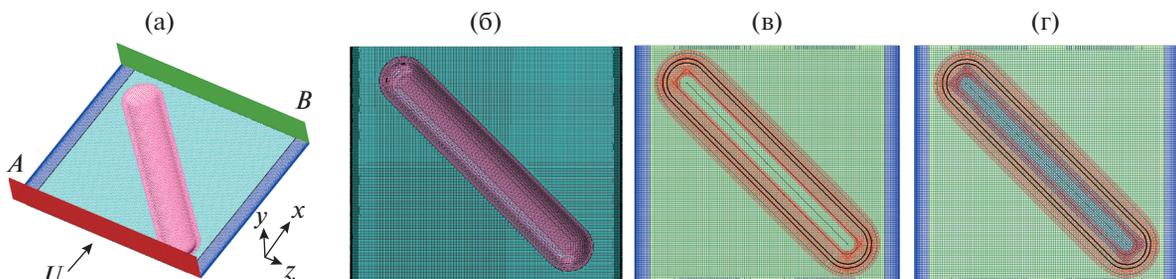


Рис. 1. Периодическая расчетная секция узкого канала с наклоненной под углом 45° овально-траншейной лункой на нижней стенке с нанесенной моноблочной структурированной сеткой MG (а), моноблочной неструктурированной сеткой HJ (б), многоблочной сеткой с тремя фрагментами MBG3 (в) и многоблочной сеткой с четырьмя фрагментами MBG4 (г).

телем [21]. Решение получаемых после дискретизации алгебраических уравнений получается с помощью солвера Algebraic Multigrid (AMG) с предобуславливателем для давления [22].

Следует отметить, что специализированный пакет VP2/3 и универсальный коммерческий продукт StarCCM+ обладают сходными по вычислительной эффективности характеристиками.

Подход к моделированию отрывного течения и теплообмена на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса продолжает вызывать дискуссии. Как правило, его применимость подтверждается при сравнении численных прогнозов с имеющимися экспериментальными данными. Работ, связанных с измерениями характеристик вихревого течения и теплообменом в каналах с лунками, немного, и в подавляющем большинстве в них рассматриваются сферические лунки. В [5] показано хорошее согласие рассчитанных с помощью модифицированной SST-модели и измеренных в [23] локальных и интегральных характеристик в узком канале с уединенной нагретой лункой умеренной глубины. В [24] получено приемлемое согласие численных прогнозов с использованием различных полуэмпирических моделей с данными физического эксперимента [25] в канале с уединенной сферической лункой. В [26] представлено вполне удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных интегральных характеристик по теплоотдаче в канале с шахматным пакетом сферических и каплеобразных лунок. В целом осредненные локальные и интегральные характеристики отрывного течения и теплообмена в лунках прогнозируются вполне удовлетворительно, что позволяет применить RANS-подход для анализа теплообмена в интенсивных отрывных и закрученных потоках в наклоненных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала.

РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ

В табл. 1 собраны сведения обо всех использованных расчетных сетках. Кроме общего количества расчетных ячеек NNN, приведены максимальные шаги сетки $\Delta x z_m$ в продольном и поперечном направлениях срединной части канала. Все сетки сгущаются к стенкам, причем присте-

ночный шаг равен 10^{-4} . В пакете VP2/3 моноблочная структурированная сетка (MG) в центральной части расчетной области имеет квадратные ячейки в x, z -направлениях размером 0.04 (рис. 1а). Также моноблочная, но неструктурированная сетка с преимущественным гексагональным типом ячеек (HG) близкого размера 0.035 используется в расчетах по пакету StarCCM+ (рис. 1б). В пакете VP2/3 применяются многоблочные разномасштабные сетки (MBG3 и MBG4), которые генерируются из трех и четырех пересекающихся фрагментов (рис. 1в, 1г). Первая сетка прямоугольная и согласованная со стенками канала. Размер пристеночных ячеек $\Delta x z_m$ в центральной части модуля выбирается равным 0.05. В MBG3 в нее вкладывается измельченная криволинейная сетка, согласованная с поверхностью лунки (рис. 1в). Третья сетка кромочная и служит для разрешения зон с высокими градиентами скорости вблизи сильных изгибов омываемой поверхности. Однако расчетные ячейки в окрестности кромки характеризуются большими углами скоса, так как сеточные линии кромочной сетки согласуются с вертикальной осью u . В MBG4 вторая измельченная сетка прямоугольная и покрывает область лунки, а также след за ней (рис. 1г). Криволинейная, близкая к ортогональной сетка O-типа строится вокруг наклоненной овально-траншейной лунки со сгущением в окрестности кромки и у стенки. В отличие от кромочной сетки в MBG3 эта криволинейная сетка обладает меньшими ошибками скоса. На дне лунки размещается “заплатка” прямоугольной формы в сечении xz , которая в вертикальном направлении согласуется с криволинейной поверхностью лунки и плоской границей выделенной подобласти над ней.

Следует отметить, что для различных типов расчетных сеток проведены исследования сеточной сходимости результатов. Выбранные в табл. 1 сетки являются локальными сетками, на которых сеточная сходимость была достигнута.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2–6 и в табл. 2, 3 представлены некоторые из полученных результатов.

Показанные в табл. 2 и 3 численные прогнозы экстремальных величин продольной u_{\max} , u_{\min} и поперечной w_{\max} , w_{\min} составляющих локальной скорости течения, энергии турбулентности k_{\max} и вихревой вязкости μ_{\max} , а также суммарного числа Нуссельта Nu_m на квадратном контрольном участке размером 6×6 нижней стенки с ОТЛ и коэффициента гидравлических потерь ζ , измеренного на проточных границах периодического модуля, сравниваются на сетках различного типа с разным количеством расчетных ячеек для моде-

Таблица 1. Характеристики расчетных сеток

| Сетки | Пакет | NNN в млн | $\Delta x z_m$ |
|-------|----------|-----------|----------------|
| MG | VP2/3 | 3.16 | 0.04 |
| HG | StarCCM+ | 3.50 | 0.035 |
| MBG3 | VP2/3 | 3.12 | 0.05 |
| MBG4 | VP2/3 | 2.30 | 0.05 |

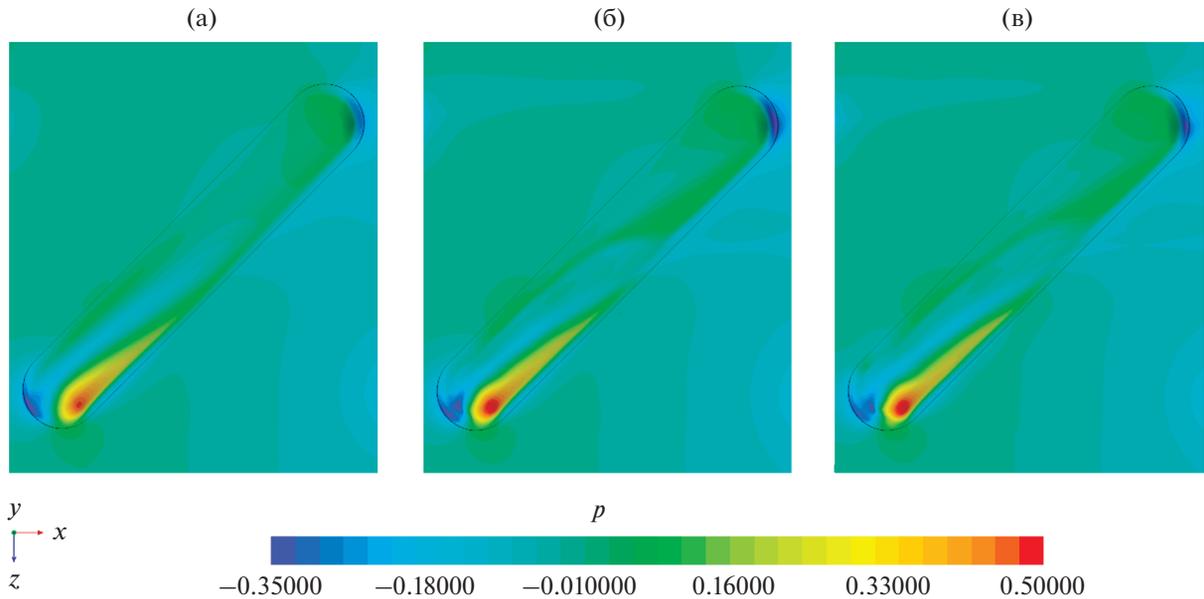


Рис. 2. Сравнение полей статического давления на стенке с лункой, рассчитанных с использованием моделей турбулентности k – ϵ -Realizable (а), SA (б), SST (в).

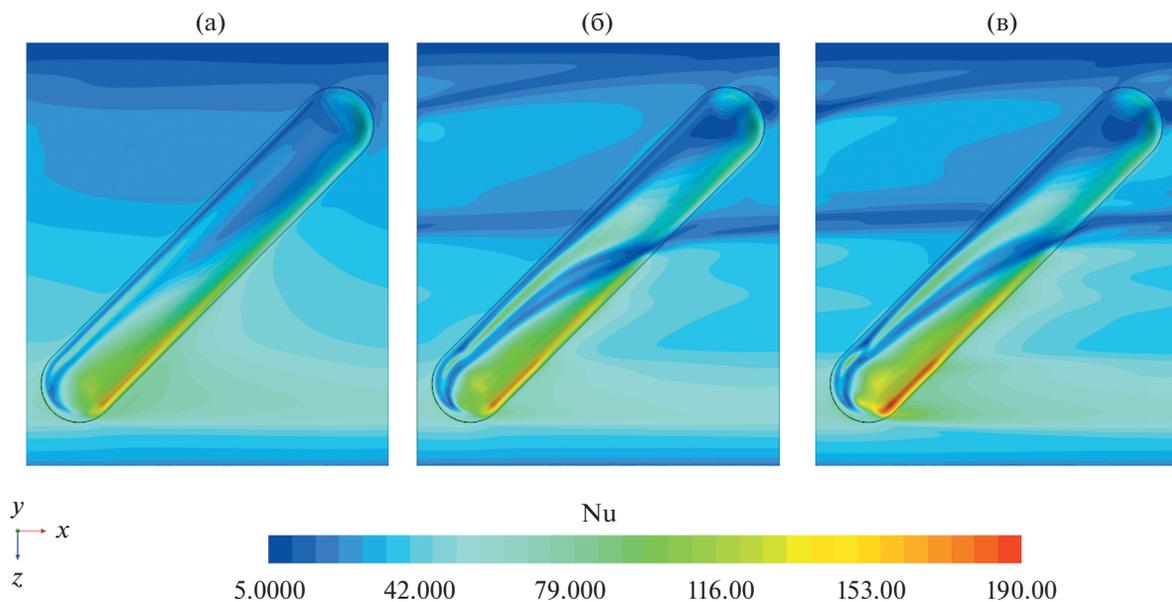


Рис. 3. Сравнение полей числа Нуссельта на стенке с лункой, рассчитанных с использованием моделей турбулентности k – ϵ -Realizable (а), SA (б), SST (в).

лей турбулентности и примененных пакетов. Для сопоставления в табл. 3 также приведены характеристики течения и теплообмена для плоскопараллельного канала.

Важно подчеркнуть, что представленные на рис. 2 и 3 картины полей статического давления и числа Нуссельта на нижней облуненной стенке периодического модуля, а также добавленные к ним на рис. 4 графические распределения x -й составляющей коэффициента трения f_x и числа

Нуссельта в срединном сечении ОТЛ, рассчитанные пакетом StarCCM+ с использованием различных полуэмпирических моделей турбулентности, качественно согласуются между собой.

Модели k – ϵ -Realizable, SA и SST (с поправкой Дурбина) одинаково показывают резкое торможение входящего в наклоненную под углом 45° внешнего потока во входной наветренной части ОТЛ.

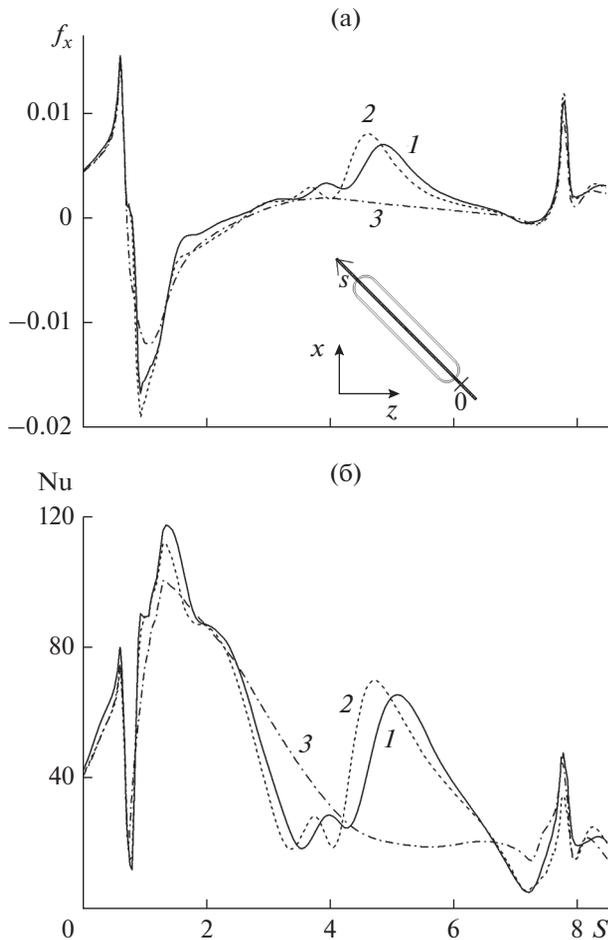


Рис. 4. Сравнение распределений x -компоненты относительного трения $f_x/f_{xp}(S)$ (а) и $Nu/Nu_p(S)$ (б) в продольном сечении наклоненной овально-траншейной лунки, рассчитанных с использованием различных моделей турбулентности: 1 – SA, 2 – SST, 3 – k - ϵ -Realizable.

В то же время на сферическом сегменте возникает зона отрицательного давления в месте формирования спиралеобразного торнадоподобного вихря. Зона разрежения также прогнозируется всеми моделями в следе за сферическим окончанием лунки. Пиковые тепловые нагрузки предсказываются на наветренной кромке ОТЛ. В передней части ОТЛ все модели показывают значительные уровни локальной теплоотдачи. Шлейф

повышенных тепловых потоков регистрируется за этой частью ОТЛ в ближнем следе. В то же время падение теплового потока прогнозируется на подветренной кромке и в районе заднего сферического сегмента ОТЛ.

Однако наблюдаются и существенные качественные отличия прогнозов по модели k - ϵ -Realizable и двум остальным моделям. Как видно из рис. 2а, закрученный вихревой поток, рассчитанный по k - ϵ -Realizable-модели, не выходит из лунки, пока не достигнет заднего сферического сегмента. При этом модели SA и SST предсказывают ранний выход спиралевидной вихревой структуры из лунки (примерно на расстоянии 0.6 длины ОТЛ). Особенно четко этот свищ визуализируется по полям числа Нуссельта, показывая обусловленные им зоны низкой теплоотдачи (рис. 3б, 3в).

Анализ результатов, представленных на рис. 2–4 и в табл. 2, указывает на близость локальных, включая экстремальные величины, и интегральных численных прогнозов по моделям SST (с поправкой Дурбина) и SA. В то же время оказываются значительными количественные и даже качественные рассогласования с ними предсказаний по k - ϵ -Realizable. Так, в прогнозируемых распределениях $f_x(S)$ и $Nu(S)$ отсутствует второй пик в центральной части ОТЛ, который воспроизводится двумя остальными моделями. Также резко ослабевает течение во внутренней отрывной зоне в переднем сферическом сегменте ОТЛ, а именно: значительно уменьшается u_{min} и растет f_{min} . Также падает интенсивность вторичного течения, определяемая $-w_{min}$.

Однако в целом прогнозируемая по k - ϵ -Realizable-модели тепловая эффективность мало отличается от предсказания по модели SA и в пределах 10% уступает Nu_m , оцененной по SST-модели. Кстати, гидравлические потери по k - ϵ -Realizable-модели оказались примерно на 5% ниже, чем прогнозы по двум другим моделям. Важно отметить, что максимальная вихревая вязкость по k - ϵ -Realizable-модели (табл. 2) в полтора раза превосходит аналогичные величины для остальных моделей. Очевидно, что генерация избыточной вихревой вязкости в k - ϵ -Realizable-модели способствует перестройке течения в ОТЛ и приводит к отсутствию выброса спиралевидного вихря из нее.

Таблица 2. Сравнение интегральных теплогидравлических характеристик и экстремальных параметров течения, рассчитанных с помощью различных моделей турбулентности

| | Nu_m | $10^2\zeta$ | u_{max} | u_{min} | w_{min} | w_{max} | 10^2k_{max} | $10^3\mu_{max}$ |
|------------------|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------------|
| SST | 43.34 | 2.26 | 1.46 | -0.76 | -1.2 | 0.42 | 4.86 | 5.02 |
| SA | 40.9 | 2.26 | 1.46 | -0.77 | -1.21 | 0.39 | — | 4.9 |
| k - ϵ | 39.5 | 2.14 | 1.44 | -0.54 | -1.08 | 0.34 | 9.48 | 7.32 |

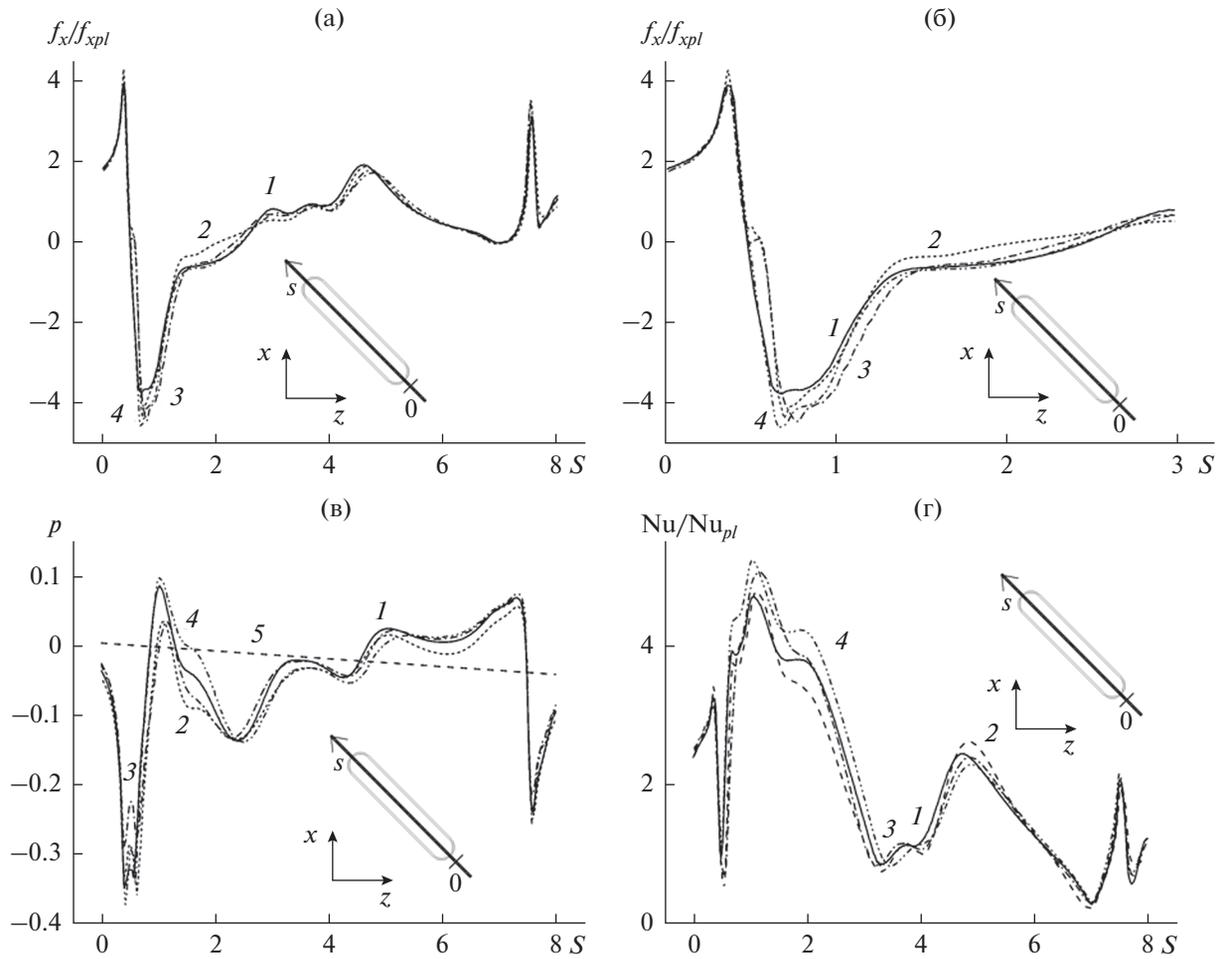


Рис. 5. Сравнение распределений x -компоненты относительного трения $f_x/f_{xpl}(S)$ (а), (б), статического давления $p(S)$ (в) и относительного числа Нуссельта $Nu/Nu_{pl}(S)$ (г) в продольном сечении наклоненной овально-траншейной лунки, рассчитанных с использованием различных сеток: 1 – MG, 2 – HG, 3 – MBG3, 4 – MBG4, 5 – плоскопараллельный канал; (б) – укрупненный фрагмент картины (а).

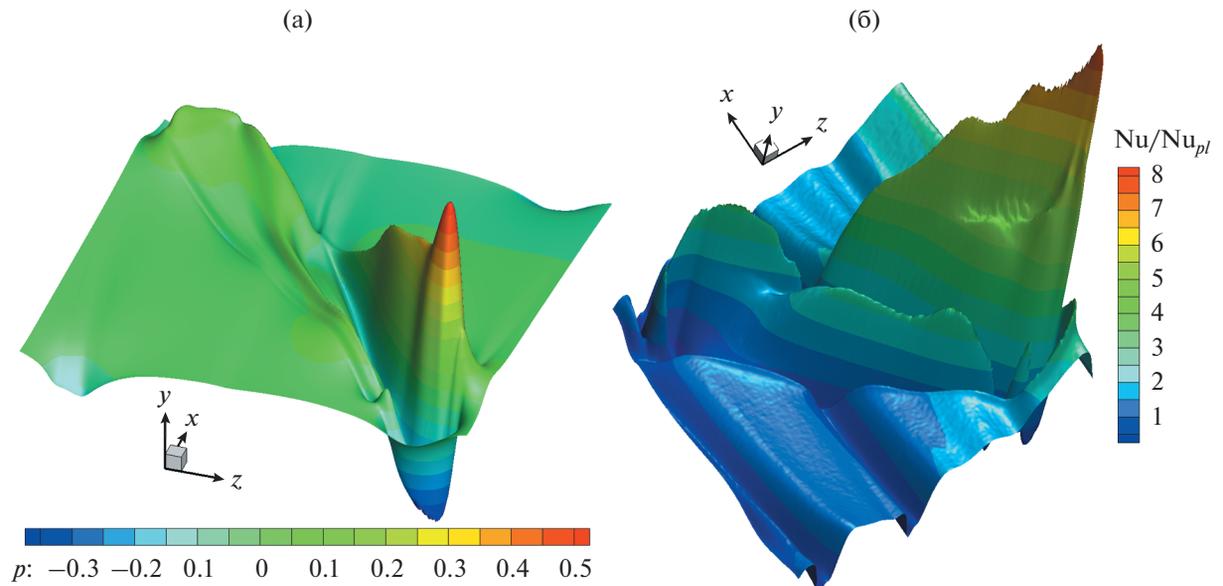


Рис. 6. Картины полей статического давления (а) и относительного числа Нуссельта (б) на стенке канала с наклоненной овально-траншейной лункой.

Таблица 3. Сравнение интегральных теплогидравлических характеристик и экстремальных параметров течения, рассчитанных на различных сетках и пакетах

| Сетки | Nu_m | $10^2\zeta$ | u_{\max} | u_{\min} | w_{\min} | w_{\max} | 10^2k_{\max} | $10^3\mu_{\max}$ |
|-------|--------|-------------|------------|------------|------------|------------|----------------|------------------|
| MG | 44.00 | 2.18 | 1.455 | -0.726 | -1.227 | 0.384 | 5.22 | 5.13 |
| HG | 43.34 | 2.26 | 1.46 | -0.661 | -1.200 | 0.420 | 4.86 | 5.02 |
| MBG3 | 44.08 | 2.29 | 1.456 | -0.784 | -1.230 | 0.461 | 5.42 | 5.17 |
| MBG4 | 45.07 | 2.30 | 1.460 | -0.681 | -1.248 | 0.441 | 4.54 | 5.04 |
| Plate | 25.59 | 1.59 | 1.19 | 0 | -0.0002 | 0.0002 | 1.00 | 4.30 |

На рис. 5 сравниваются распределения трения и числа Нуссельта, отнесенные к соответствующим величинам на плоской стенке, а также статического давления вдоль срединного сечения наклоненной ОТЛ для различных сеточных структур и пакетов при использовании модифицированных SST-моделей. Несмотря на некоторое рассогласование численных прогнозов, наиболее ярко выраженное во входной части ОТЛ (примерно от $S = 1.5$ до 2.5) в области сложного вихревого течения за зоной отрыва, в целом наблюдается количественное их согласие. Особенности использованных сеточных структур в определенной мере объясняют характер возникших рассогласований. Так, моноблочная структурированная сетка с квадратными по осям $x-z$ расчетными ячейками (кривые 1) предсказывает более высокое значение $(f/f_{pl})_{\min}$ и менее низкое $-(Nu/Nu_{pl})_{\max}$ в зоне отрыва, чем остальные сетки. Это свидетельствует о недостаточной разрешимости области высоких градиентов скорости в кромочной области. В то же время сетка MBG3 с косоугольной кромочной сеткой несколько завышает давление в зоне разрежения на сферическом входном сегменте ОТЛ (кривая 3 на рис. 5в). Следует отметить, что на всех сетках хорошо воспроизводятся две впадины $(f/f_{pl})_{\min}$. Первый минимум располагается на плоской стенке перед лункой, а второй – внутри нее на сферическом сегменте.

В целом распределения характеристик в срединном сечении ОТЛ на рис. 5, данные в табл. 3, а также поля давления и относительного числа Нуссельта, показанные на рис. 6, позволяют сделать несколько выводов.

1. Тепловая эффективность облуненного периодического модуля растет в 1.72 раза, а гидравлические потери – в 1.42 раза. Ускорение потока в ядре канала прогнозируется на уровне 23%. Максимальная величина скорости возвратного течения составляет примерно 0.73 от среднемассовой скорости, а наибольшая величина скорости вторичного течения на 3% превышает максимальную скорость потока в плоскопараллельном гладком канале. При переходе от гладкого к облуненному каналу максимум турбулентной энергии

возрастает в пять раз, в то время как максимальный уровень вихревой вязкости растет только на 16%.

2. Аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклоненной ОТЛ характеризуется достигнутым минимальным уровнем относительного трения, равным 4.5, и максимальным уровнем относительной теплоотдачи порядка 5.

Статическое давление в зоне торможения на наветренной кромке ОТЛ превосходит уровень 0.5, в то время как в близко расположенной окрестности формирования торнадоподобного вихря на входном сферическом сегменте отрицательное давление падает до минимума порядка -0.35 (рис. 6а). Пик положительного давления довольно острый, как показано на рис. 6а, и за ним по сглаженной кромке следует гребень высокого давления с вершиной порядка 0.3. Пики давления (с величиной порядка 0.1) и относительной теплоотдачи, достигающей 5, приходятся на зону резкого возрастания x -компоненты относительного трения f_x/f_{xpl} ($S \sim 1.3$). За локальным максимумом давление снижается до -0.15, а затем волнообразно повышается к заднему сферическому сегменту наклоненной ОТЛ, как видно из рис. 5в и рис. 6а. В районе $S = 5$ совпадают локальные максимумы давления, относительных трения и теплоотдачи, причем $(f_x/f_{xpl})_{\max}$ и $(Nu/Nu_{pl})_{\max}$ оказываются порядка 2 и 2.5 соответственно. Следует отметить, что в районе $S = 3.5$ прогнозируется незначительный локальный максимум Nu/Nu_{pl} , соответствующий локальному максимуму статического давления. На задней кромке ОТЛ резко повышается f_x/f_{xpl} , доходя до 3.5, падает давление (до -0.25) и повышается Nu/Nu_{pl} (до 2 раз).

3. Зоны повышения теплоотдачи в ОТЛ рельефно показаны на рис. 6б. Гребень повышения относительной теплоотдачи на наветренной кромке лунки демонстрирует высокие (порядка 3–8) величины в довольно узкой области. Однако и внутри лунки возникает весьма протяженный (занимающий примерно 2/3 длины ОТЛ) гребень с высотами, достигающими до 4.5. После его завершения на наветренной кромке образуется гребень примерно такой же высоты, простирающийся до задней оконечности ОТЛ. Также следует отме-

тить локальный пик относительной теплоотдачи (порядка 3), совпадающий с пиком давления на подветренной стороне входной части наклоненной ОТЛ.

При рассмотренной ориентации ОТЛ с наклоном справа налево интенсификация теплообмена происходит на правой стороне периодического модуля, а слева наблюдаются обширные зоны с незначительным ростом теплоотдачи. Также в самой лунке и в области распространения выходящего из нее спиралевидного вихря теплоотдача оказывается ниже, чем на стенке плоскопараллельного канала. Однако интегральные характеристики тепловой и теплогидравлической эффективности узкого канала с однорядными ОТЛ выше, чем у их сферических аналогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточнено распределение давления, относительного трения и теплоотдачи в срединном сечении наклоненной под углом 45° овально-траншейной лунки глубиной 0.3 в однорядном пакете с шагом 6 на стенке узкого канала шириной 7 и высотой 1 на стабилизированном гидродинамическом участке течения воздуха при $Re = 10^4$. В расчетах использовались достаточно подробные (от 2 до 4 млн ячеек) сетки различной топологии (моноблочные, структурированные и неструктурированные с гексагональными ячейками, многоблочные с пересечением фрагментарных сеток), различные модели турбулентности ($k-\varepsilon$ -Realizable, SA, SST с поправками Дурбина и Роды–Лешцинера–Исаева) и пакеты прикладных программ (SratCCM+ и VP2/3). Обнаружено общее количественное согласие распределений и объяснены зональные рассогласования. Акцентировано внимание к зоне низкого давления в сферическом сегменте с уровнем -0.35 . Отрицательное относительное трение в этой зоне достигает минимума величиной -4.5 , а относительная теплопередача превышает 5.

2. Обнаружено, что прогнозируемая по $k-\varepsilon$ -Realizable-модели тепловая эффективность почти не отличается от предсказания по модели SA и в пределах 10% уступает значению Nu_m , оцененному по SST-модели с поправкой Дурбина. Гидравлические потери по $k-\varepsilon$ -Realizable-модели оказались примерно на 5% ниже, чем прогнозы по двум другим моделям. В то же время установлено качественное различие предсказаний локальных характеристик по разным полуэмпирическим моделям. Так, в прогнозируемых по $k-\varepsilon$ -Realizable распределениях $f_x(S)$ и $Nu(S)$ отсутствует второй гребень повышения в центральной части ОТЛ, который хорошо воспроизводится двумя остальными моделями. Отмечается близость локальных, включая экстремальные величины, и инте-

гральных численных прогнозов по моделям SST (с поправкой Дурбина) и SA.

3. Экстремальные величины декартовых составляющих скорости возвратного течения достигают величин порядка 0.7 среднемаховой скорости, а для вторичного течения они несколько (на 3%) превышают максимальную скорость потока в плоскопараллельном канале (1.19). Тепловая эффективность облученного периодического модуля растет в 1.72 раза, а гидравлические потери – в 1.42 раза. Ускорение потока в ядре канала прогнозируется на уровне 23%.

4. Анализируются причины аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в однорядной овально-траншейной лунке на стенке узкого канала, связанные с перепадом полного давления на ориентированной под углом к внешнему потоку вогнутой стенке между областью торможения на наветренной кромке (0.5) и зоной отрицательного давления (-0.35) на сферическом сегменте в месте генерации смерчеобразного вихря. Сочетание взаимодействия набегающего потока с профилированной стенкой и возникающей мощной, скрытой во впадине смерчеобразной вихревой структуры обеспечивает ранее ненаблюдаемый эффект аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-19-00259.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вихревые технологии для энергетики / Под общ. ред. Леонтьева А.И. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 500 с.
2. *Rashidi S., Hormozi F., Sunden B., Mahian O.* Energy Saving in Thermal Energy Systems Using Dimpled Surface Technology – A Review on Mechanisms and Applications // *Appl. Energy*. 2019. V. 259. P. 1491.
3. *Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A.* Tornado-like Heat Transfer Enhancement in the Narrow Plane-parallel Channel with the Oval-trench Dimple of Fixed Depth and Spot Area // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 109. P. 40.
4. *Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Popov I.* Vortex Heat Transfer Enhancement in Narrow Channels with a Single Oval-trench Dimple Oriented at Different Angles to the Flow // *J. Enhanced Heat Transfer*. 2018. V. 25. № 6. P. 579.
5. *Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I., Sudakov A.* Simulation of Vortex Heat Transfer Enhancement in the Turbulent Water Flow in the Narrow Plane-parallel Channel with an Inclined Oval-trench Dimple of Fixed Depth and Spot Area // *Energies*. 2019. V. 12. № 7. Paper 1296.
6. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П.* Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками // *ТВТ*. 2015. Т. 53. № 3. С. 390.
7. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судakov А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е.* Интенсификация теп-

- лообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклоненными овальными лунками // ИФЖ. 2018. Т. 91. № 4. С. 1022.
8. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G.* Influence of the Depth of Single-row Oval-trench Dimples Inclined to Laminar Air Flow on Heat Transfer Enhancement in a Narrow Micro-channel // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2019. V. 134. P. 338.
 9. *Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I.* Abnormal Enhancement of Separated Turbulent Air Flow and Heat Transfer in Inclined Single-row Oval-trench Dimples at the Narrow Channel Wall // *Acta Astronautica*. 2019. V. 163 (Part A). P. 202.
 10. *Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г.* Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овално-траншейных лунках на стенке узкого канала // *ТВТ*. 2019. Т. 57. № 5. С. 797.
 11. *Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В.* Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овално-траншейных лунок на стенке // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26. № 5. С. 697.
 12. *Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V.* Vortex Enhancement of Heat Transfer and Flow in the Narrow Channel with a Dense Packing of Inclined One-row Oval-trench Dimples // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2019. V. 145. 118737.
 13. *Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E.* Influence of the Reynolds Number and the Spherical Dimple Depth on the Turbulent Heat Transfer and Hydraulic Loss in a Narrow Channel // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2010. V. 53. Iss. 1–3. P. 178.
 14. *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.
 15. *Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A., Guvernuyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D., Dekterev A., Gavrilov A., Shebelev A.* Numerical Simulation and Experiments on Turbulent Air Flow around the Semi-circular Profile at Zero Angle of Attack and Moderate Reynolds Number // *Computers and Fluids*. 2019. V. 188. P. 1.
 16. *Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z.D., Zhu J.* A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows // *Comput. Fluids*. 1995. V. 24. № 3. P. 227.
 17. *Wolfstein M.* The Velocity and Temperature Distribution in One-dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1969. V. 12. P. 301.
 18. *Durbin P.A.* On the $k-\epsilon$ Stagnation Point Anomaly // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 1996. V. 17. P. 89.
 19. *Spalart P.R., Allmaras S.R.* A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // *AIAA-92-0439*. 1992.
 20. *Dacles-Mariani J., Zilliac G., Chow J.S., Bradshaw P.* Numerical/Experimental Study of a Wingtip Vortex in the near Field // *AIAA J*. 1995. V. 33. № 9. P. 1561.
 21. *Venkatakrishnan V.* Convergence to Steady State Solutions of the Euler Equations on Unstructured Grids with Limiters // *J. Comput. Phys*. 1995. V. 118. № 1. P. 120.
 22. *Weiss J.M., Maruszewski J.P., Smith W.A.* Implicit Solution of Preconditioned Navier–Stokes Equations Using Algebraic Multigrid // *AIAA J*. 1999. V. 37. № 1. P. 29.
 23. *Terekhov V., Kalinina S., Mshvidobadze Yu.* Heat Transfer Coefficient and Aerodynamic Resistance on a Surface with a Single Dimple // *Enhanced Heat Transf.* 1997. V. 4. P. 131.
 24. *Abo Amsha K., Craft T.J., Iacovides H.* Computational Modelling of the Flow and Heat Transfer in Dimpled Channels // *Aeronaut. J*. 2017. V. 121. Iss. 1242. P. 1066.
 25. *Kwon H.G., Hwang S.D., Cho H.H.* Measurement of Local Heat/Vass Transfer Coefficients on a Dimple Using Naphthalene Sublimation // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2011. V. 54. P. 1071.
 26. *Rao Y., Li B., Feng Y.* Heat Transfer of Turbulent Flow over Surfaces with Spherical Dimples and Teardrop Dimples // *Exp. Therm. Fluid Sci*. 2015. V. 61. P. 201.