

УДК 532.517.4:536.244

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ОБЛУНЕННОМ УЗКОМ КАНАЛЕ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ОТРЫВНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ С РОСТОМ УГЛА УКЛОНА УЕДИНЕННОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЛУНКИ

© 2022 г. С. А. Исаев<sup>1, 2, \*</sup>, Д. В. Никущенко<sup>2</sup>, И. А. Попов<sup>3</sup>,  
А. Г. Судаков<sup>1</sup>, Н. В. Тряскин<sup>2</sup>, Л. П. Юнаков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева (Казанский авиационный институт), Казань, Россия

<sup>4</sup>Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова, Россия

\*E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Проведено численное исследование турбулентного ( $Re = 40000$ ) обтекания уединенной конической лунки глубиной 0.233 диаметра пятна на стенке узкого (сечением  $2.5 \times 0.33$ ) канала при изменении угла уклона  $\theta$ . Трансформация струйно-вихревой структуры осредненного течения от симметричной системы парных вихрей к моносмерчевому потоку приводит к интенсификации отрывного течения и теплообмена. Максимальные скорости возвратного и вторичного течения возрастают на 25 и 40% соответственно, а максимум турбулентной энергии скачкообразно падает на 30%. В 2.5 раза уменьшается минимум относительного отрицательного трения на дне лунки (доходит до  $-1.5$ ). После  $\theta = 45^\circ$  происходит достаточно быстрое уменьшение интенсивности отрывного течения в лунке. Тепловая эффективность контрольного участка с лункой заметно отстает от роста относительных гидравлических потерь, однако теплогидравлическая эффективность  $THE = (Nu_{mm}/Nu_{mmp})/(\xi/\xi_{pl})^{1/3}$  близка к единице.

DOI: 10.31857/S004036442202020X

### ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективные поверхности, структурированные лунками, являются одной из перспективных вихревых технологий для энергетики [1]. Оказывается, что тепловая эффективность таких поверхностей по сравнению с гладкими стенками двигательных трактов и элементов энергооборудования может превосходить увеличение относительных гидравлических потерь. В обзоре [2] уделяется внимание разнообразным геометрическим формам лунок: сферическим, каплевидным, со сложным рельефом дна и удлиненным наклонным овално-траншейным лункам. Бурный прогресс в области аддитивных технологий способствует успешному созданию рельефов структурированных поверхностей из профилированных на основе численного моделирования лунок. Однако в проведенном анализе [2] оказались практически не затронутыми простые технологические формы лунок, такие как цилиндрические и конические. Исследования теплообмена при обтекании составленных из них рельефов довольно редки.

Среди них следует отметить работы [3–5], в которых рассматриваются уединенные цилиндрические и пакетные конические лунки на плоских стенках, в том числе в конфузорных каналах. Так, численные и экспериментальные исследования показали, что интенсификация теплообмена в конфузорном канале с углом раскрытия  $1.37^\circ$  и шахматным пакетом конических углублений на стенке составляет около 40% по сравнению с гладким каналом, при этом гидравлическое сопротивление увеличивается примерно на 10% (глубина лунок  $h = 0.23D$ , где  $D$  – диаметр пятна, угол конусности –  $45^\circ$ , шаг между лунками – 1.33, число Рейнольдса варьируется в диапазоне 6300–13500). В [6] рассчитан конвективный теплообмен в плоскопараллельном узком канале с цилиндрической лункой умеренной глубины ( $h/D = 0.12$ ), расположенной на его нагретой постоянным тепловым потоком стенке, при  $Re_H = 20000$  ( $H$  – высота канала). На основе компьютерного анализа струйно-вихревой структуры течения в цилиндрической лунке установлены гидродина-

мические особенности интенсификации теплообмена в ней, связанные с взаимодействием втекающего в лунку потока с ее боковыми стенками, обуславливающим кардинальное увеличение теплоотдачи на боковых и задней гранях лунки. Суммарная теплоотдача в лунке, определенная по площади ее пятна, оказалась на 68% больше по сравнению с соответствующим участком гладкой стенки плоскопараллельного канала при 47% росте гидравлических потерь. С учетом всей площади внутренней поверхности лунки тепловая эффективность цилиндрической лунки умеренной глубины составила 1.22. Цилиндрическая лунка по тепловой и теплогидравлической эффективности оказывается предпочтительнее сферической лунки того же углубления.

В [7] представлены предварительные результаты расчета конвективного теплообмена при турбулентном обтекании конических лунок глубиной  $0.233D$  на стенке узкого канала, который является компьютерным аналогом экспериментальных стенов [8, 9], при  $Re_D = 40000$ . Угол уклона  $\theta$  лунок варьируется от  $10^\circ$  до  $60^\circ$ . В данном исследовании производится уточнение и анализ результатов с акцентом на влияние перестройки отрывного течения с ростом  $\theta$  на локальные и интегральные характеристики течения и теплообмена. Методическая основа работы представлена в статье [10], где, в частности, детально излагается и обосновывается подход к оценке гидравлических потерь. В [11, 12] сравниваются симметричные и асимметричные уединенные лунки умеренной глубины ( $0.13D$ ), в том числе  $10^\circ$  усеченный конус по тепловой и теплогидравлической эффективности. Показывается, что удлиненные наклонные лунки генерируют более интенсивные вихревые структуры.

Особое внимание в данном исследовании уделяется смене режима отрывного течения в конической лунке, подобного тому, который происходит в сферической лунке по мере ее углубления [13, 14]. В [13] впервые замечена трансформация двухячейстой вихревой структуры в моносмерчевой наклоненный струйный поток при обтекании сферической лунки глубиной  $0.22D$  с радиусом скругления  $0.1D$  на плоскости при  $Re_D = 23500$  и толщине турбулентного пограничного слоя  $0.175D$ . Обнаружено, что трансформация структуры сочетается со скачкообразным возрастанием теплоотдачи. В [14] уточняется, что перестройка отрывного потока сопровождается интенсификацией теплообмена как в области глубокой ( $0.22D$ ) сферической лунки (~60%), так и в следе за ней (~45%). Показано, что при асимметризации вихревой картины происходит почти двукратное увеличение максимального значения локального числа Нуссельта, которое в пять раз превышает уровень теплопередачи для гладкой стенки. В самом углуб-

лении тепловая нагрузка с подветренной стороны оказывается значительно ниже, чем в случае гладкой стенки. В [15] детально анализируются перестройки вихревых структур с увеличением глубины сферической лунки на стенке узкого канала, аналогичного [11].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Рассматривается турбулентный конвективный теплообмен в окрестности уединенной конической лунки на нагретой стенке узкого канала (рис. 1), соответствующего экспериментам [8, 9]. В качестве характерных параметров выбираются диаметр пятна лунки  $D$  и среднемассовая скорость потока  $U$ . Высота канала принимается равной  $0.33$ , а ширина —  $2.5$ . Рассматриваются конические лунки глубиной  $h/D = 0.233$  с переменным углом  $\theta$  от  $10^\circ$  до  $60^\circ$  и для сравнения сферическая лунка с  $h/D = 0.26$ . Степень турбулентности задается близкой к экспериментальной (1–5%), а масштаб турбулентности принимается порядка характерного размера. Относительный радиус скругления кромки —  $0.025$ . Число Прандтля принимается равным  $0.7$  (в качестве рабочей среды рассматривается воздух), стенка канала с лункой поддерживается при постоянной температуре  $100^\circ\text{C}$  ( $373\text{ K}$ ), а верхняя плоская противоположная стенка канала изотермическая с температурой, равной  $20^\circ\text{C}$ . Боковые стенки принимаются адиабатическими. На входе в расчетную область задается профиль полностью развитого турбулентного течения. Постановка задачи аналогична [10].

Расчетная область охватывает ограниченное стенками пространство узкого канала протяженностью  $6.7$ . Входная граница располагается на расстоянии  $1.4$  от проекции центра лунки на плоскость нижней стенки, принимаемой в качестве центра декартовой системы координат  $x, y, z$ .

Для решения задачи применяется многоблочная расчетная сетка, содержащая порядка 1 млн ячеек. Композиционно сетка состоит из трех разномасштабных фрагментов: 1) канальной прямоугольной (с минимальным шагом по продольной координате  $0.08$  и по поперечной координате  $0.07$ ) сетки со сгущением узлов к стенке, предназначенной для отображения течения в пределах канала; 2) подробной, предназначенной для детализации течения в ближнем следе лунки, декартовой сетки, покрывающей окрестность лунки с размерами  $3.3 \times 0.1 \times 1.7$  (с передней границей, удаленной от центра на расстояние  $0.44$ ); 3) цилиндрической, прилегающей к облуненной стенке криволинейной, согласованной с поверхностью сферической лунки, эллиптической сетки, сгущающейся к стенке; 4) косоугольной сетки, покрывающей ось цилиндрической луночной сетки — “заплатки” размером  $0.2 \times 0.2$  (см. [10, 11]). Присте-

ночный шаг выбирается равным  $10^{-4}$ . Канальная сетка содержит  $83 \times 69 \times 87$  ячеек, а окружающая сферическую лунку детальная прямоугольная сетка —  $132 \times 31 \times 59$  ячеек. Для подробной сетки 2 минимальные величины продольного и поперечного шага равны 0.03. Цилиндрическая эллиптическая сетка, согласованная с лункой, содержит  $108 \times 53 \times 103$  ячейки, а косоугольная сетка, накрывающая ось, —  $21 \times 53 \times 21$ .

Методология решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса URANS базируется на концепции расщепления по физическим процессам и реализуется в процедуре коррекции давления SIMPLEC [10, 11], приспособленной для моделирования конвективного теплообмена на многоблочных структурированных сетках с их частичным перекрытием. Развиваемая методология распараллеливается применительно к кластерным (многоядерным и многопроцессорным) системам и обобщается на случай неструктурированных сеток. Для уменьшения эффектов численной диффузии, связанных с ошибками аппроксимации конвективных членов уравнений количества движения, используется схема Леонарда с квадратичной интерполяцией против потока [16]. Для замыкания URANS применяется модифицированная с учетом влияния кривизны линий тока модель переноса сдвиговых напряжений [12]. В уравнениях переноса турбулентных характеристик и уравнении энергии конвективные члены дискретизируются по схеме Ван Лира [17], ориентированной на расчет параметров с их скачкообразным изменением.

Расчетная методология имеет второй порядок аппроксимации по пространственным переменным и первый порядок по времени. Безразмерный шаг по времени — 0.02. На каждом временном шаге многократно (6–10 итераций) решается уравнение поправки давления и рассчитываются поля составляющих скорости, давления, а также характеристик турбулентности. Вычислительный процесс заканчивается при выходе на периодические режимы изменения локальных и интегральных параметров, включая поперечную силу, действующую на контрольный участок с лункой. Приемлемость URANS для расчета пространственных отрывных течений обосновывается в ряде численных исследований, в том числе в расчетах периодического обтекания кубика в канале (эксперимент Мартинуццы) [18]. Обоснование достоверности RANS-прогнозов характеристик теплообмена при отрывном обтекании неглубокой сферической лунки на стенке узкого канала представлено в [12] в сравнении с данными экспериментов В.И. Терехова [7].

В настоящей работе анализируются осредненные по периоду колебаний локальные и интегральные характеристики, определенные по ме-

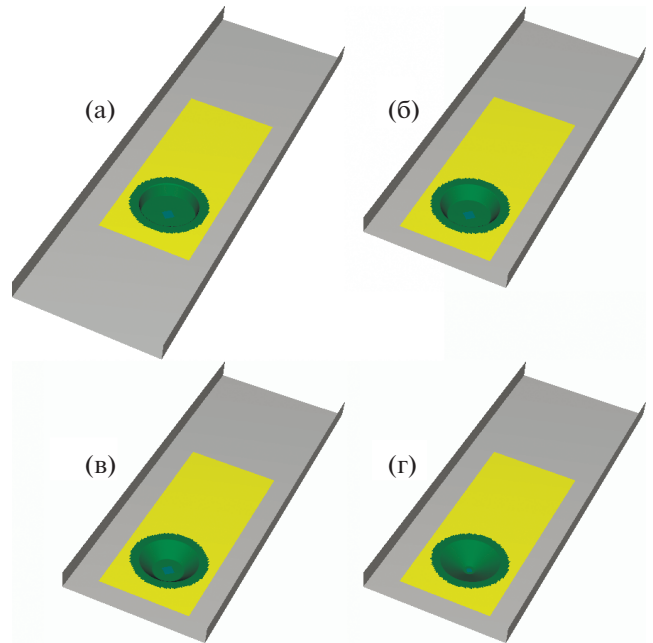


Рис. 1. Плоскопараллельный канал с конической лункой на нагретой стенке с различными углами уклона  $\theta$ : (а) —  $\theta = 10^\circ$ , (б) —  $30^\circ$ , (в) —  $45^\circ$ , (г) —  $60^\circ$ .

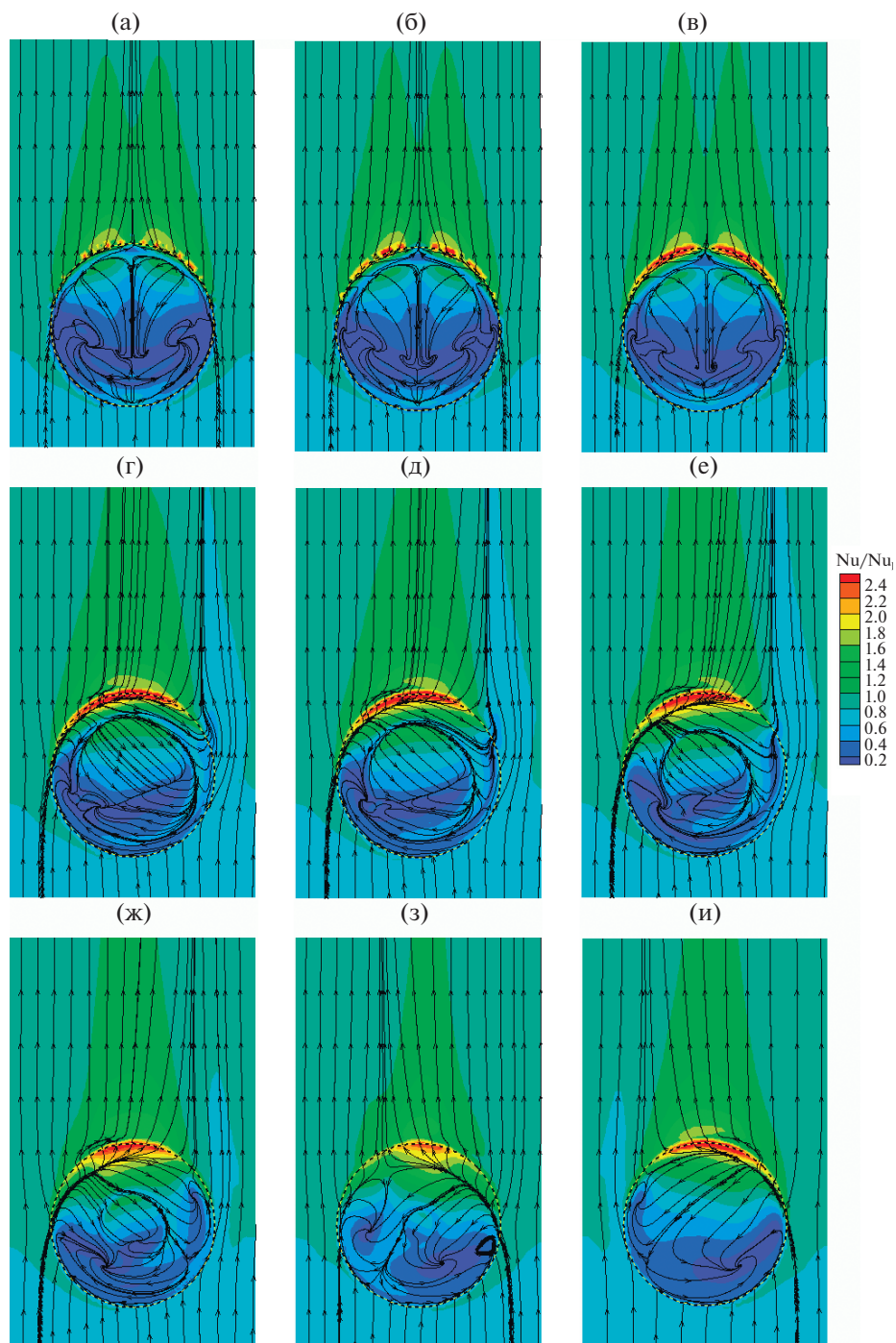
тодике [18]. В их число входят распределения перепада коэффициентов давления на омываемой облуненной стенке и стенке плоскопараллельного канала  $C_p - C_{p1}$  и относительного трения  $C_f/C_{f1}$  в срединном продольном сечении лунки. Также анализируются зависимости от угла уклона  $\theta$  экстремальных характеристик течения  $U_{\min}$ ,  $W_{\max}$ , турбулентности  $K_{\max}$ , тепловой и теплогидравлической эффективности, а также относительных коэффициентов гидравлических потерь  $\xi/\xi_{pl}$ .

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2–5 представлены некоторые из полученных результатов.

Расчеты обтекания конической лунки глубиной 0.233 на стенке узкого канала при  $Re = 40000$  (рис. 2) показали, что при углах уклона  $\theta$  в диапазоне от  $10^\circ$  до  $22.5^\circ$  реализуется симметричная структура осредненного течения с двумя зеркальными струйно-вихревыми структурами, а свыше  $30^\circ$  она трансформируется в моносмерчевую наклонную структуру, ориентированную справа налево или слева направо в пространстве лунки. Перестройка вихревой структуры сопровождается интенсификацией возвратного и вторичного течений, а также снижением уровня турбулентной энергии. При  $\theta$  свыше  $45^\circ$  отрывное течение в лунке начинает ослабевать, а гидравлические потери снижаются.

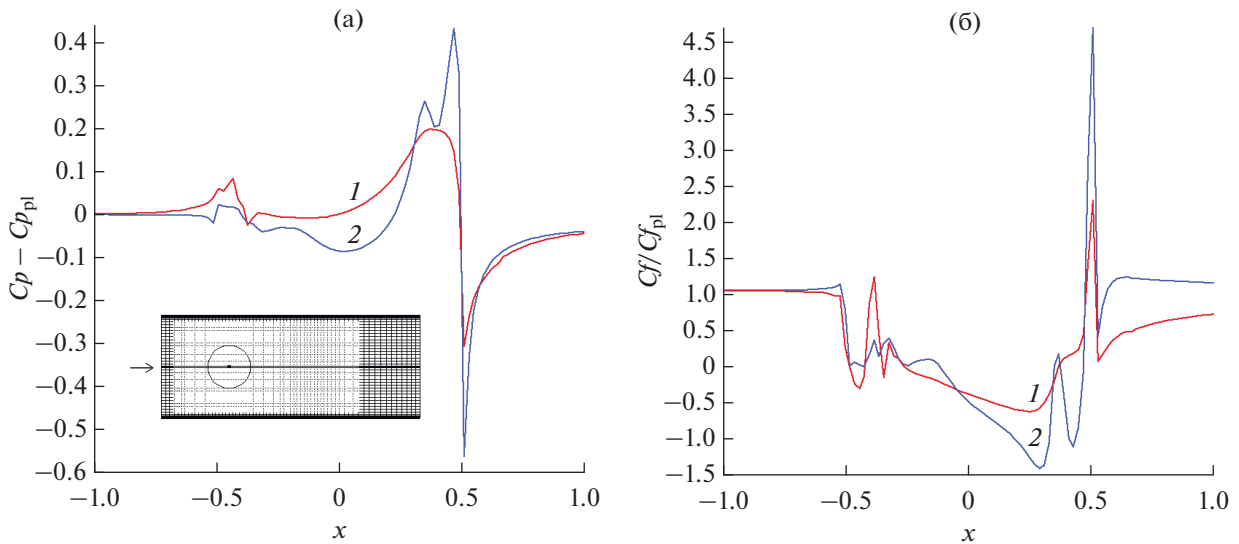
Асимметризация осредненной вихревой структуры обтекания конической лунки при переходе  $\theta$



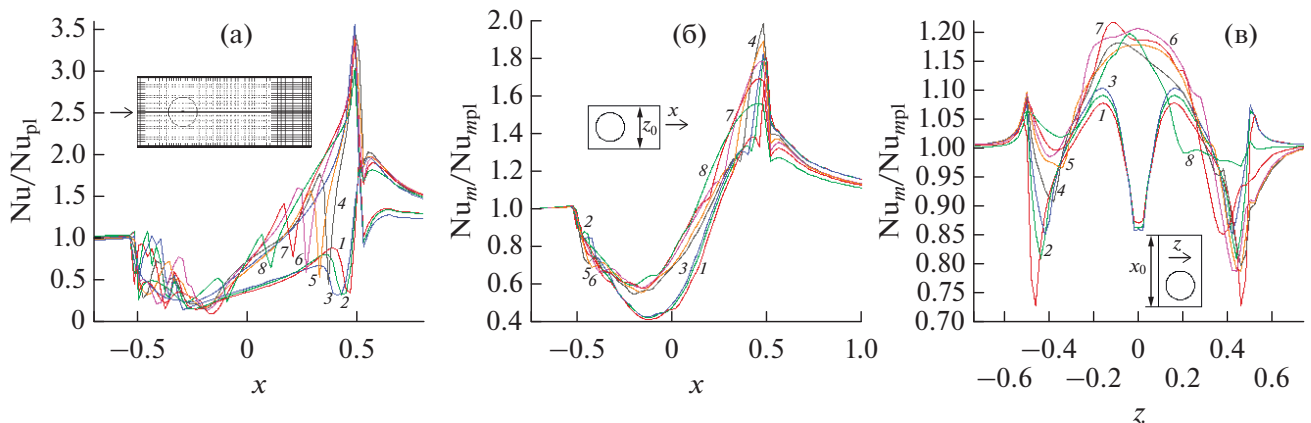
**Рис. 2.** Поля распределений относительного числа Нуссельта  $Nu/Nu_0$  с нанесенными картинками растекания по омываемой поверхности с конической лункой: (а) –  $\theta = 10^\circ$ , (б) –  $17.5^\circ$ , (в) –  $22.5^\circ$ , (г) –  $30^\circ$ , (д) –  $37.5^\circ$ , (е) –  $45^\circ$ , (ж) –  $52.5^\circ$ , (з) –  $60^\circ$ ; (и) – сферическая лунка.

от  $22.5^\circ$  к  $30^\circ$  приводит к двукратному возрастанию локальных силовых нагрузок на наветренную кромку лунки и в 2.5-кратному снижению минимума относительного отрицательного трения на дне лунки (до  $-1.5$ ) в продольном срединном сечении лунки (рис. 3).

Обнаружено кардинальное различие распределений относительного числа Нуссельта для режимов с двумя симметричными вихрями и асимметричной наклонной смерчевой структурой (рис. 4). Минимальный уровень осредненных по поперечным полосам контрольного участка  $Nu_m/Nu_{mpl}(x)$



**Рис. 3.** Сравнение распределений перепада коэффициента давления  $C_p - C_{ppl}$  (а) и относительного трения  $C_f/C_{fpl}$  (б) в срединной плоскости лунки при углах уклона, соответствующих трансформации вихревых структур: 1 –  $\theta = 22.5^\circ$ , 2 –  $30^\circ$ .



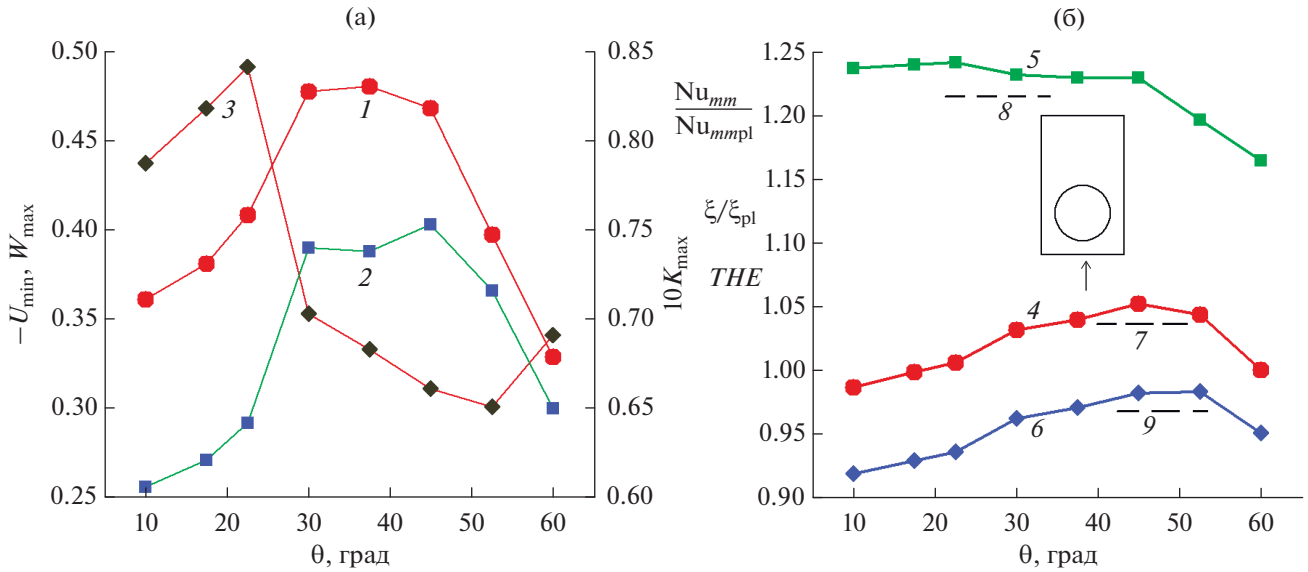
**Рис. 4.** Сравнение распределений локальных и интегральных относительных характеристик теплоотдачи  $Nu/Nu_{pl}(x)$  (а),  $Nu_m/Nu_{mpl}(x)$  (б),  $Nu_m/Nu_{mpl}(z)$  (в) при изменении угла уклона лунки: 1 –  $\theta = 10^\circ$ , 2 –  $17.5^\circ$ , 3 –  $22.5^\circ$ , 4 –  $30^\circ$ , 5 –  $37.5^\circ$ , 6 –  $45^\circ$ , 7 –  $52.5^\circ$ , 8 –  $60^\circ$ .

внутри подветренной стороны лунки для первого режима оказывается порядка 0.4, а для второго – 0.6. Максимум на наветренном склоне лунки достигает величины 2 при  $\theta = 30^\circ$  и с ростом  $\theta$  снижается примерно до 1.5 при  $\theta = 60^\circ$ . Минимумы осредненных по продольным полосам контрольного участка  $Nu_m/Nu_{mpl}(z)$  для первого режима симметричны и возникают на боковых склонах лунок, а также в продольном срединном сечении. Максимумы (с величинами 1.06–1.1) приходятся на середины прилегающих к наветренному склону зон. Для второго режима характерно асимметричное распределение осредненных по полосам относительных тепловых нагрузок с максимумами (1.17–1.22) в центральной зоне лунок. Моношерчевые структуры ориентированы слева

направо. Левые минимумы  $Nu_m/Nu_{mpl}$  увеличиваются с ростом  $\theta$ , достигая 1.02 при  $\theta = 60^\circ$ . Правые минимумы, наоборот, монотонно уменьшаются, стабилизируясь на уровне 0.8. На наветренном склоне конической лунки максимум относительного числа Нуссельта доходит до 3.5 при  $\theta = 45^\circ$ . На дне конической лунки при  $\theta > 30^\circ$  возникает вторичный максимум  $Nu/Nu_{pl}$ , который по мере роста  $\theta$  снижается с 1.7 до 1 при  $60^\circ$ .

Увеличение  $\theta$  в первом режиме сопровождается незначительным ростом максимальных скоростей возвратного ( $-U_{min}$ ) и вторичного  $W_{max}$  течения в конической лунке, а также максимальной величины энергии турбулентности  $K_{max}$ . Трансформация вихревой структуры в лунке при пере-





**Рис. 5.** Сравнение зависимостей от угла  $\theta$  экстремальных характеристик: (а) –  $U_{\min}$  (1),  $W_{\max}$  (2),  $K_{\max}$  (3); (б) – тепловой  $Nu_{mml}/Nu_{mmpl}$  (4, 7) и теплогидравлической  $THE$  (6, 9) эффективностей, относительных гидравлических потерь  $\xi/\xi_{pl}$  (5, 8); 7–9 – данные для сферической лунки.

ходе от  $\theta = 22.5^\circ$  к  $30^\circ$  кардинально влияет на экстремальные параметры течения и характеристики турбулентности. Резко увеличиваются примерно до 0.47 и 0.4 ( $-U_{\min}$ ) и  $W_{\max}$  соответственно и остаются на этом уровне до  $\theta = 45^\circ$ . Уровень  $K_{\max}$  после резкого падения при смене режима продолжает монотонное снижение до  $\theta = 52.5^\circ$  (рис. 5а). Также после  $\theta = 45^\circ$  происходит достаточно быстрое уменьшение интенсивности отрывного течения.

Тепловая эффективность, определенная по теплосъему с контрольного участка с лункой (размером 2 на 1.5 со смещением центра на 0.5 по потоку),  $Nu_{mml}/Nu_{mmpl}$  заметно отстает от роста относительных гидравлических потерь  $\xi/\xi_{pl}$ , причем теплогидравлическая эффективность  $THE = (Nu_{mml}/Nu_{mmpl})/(\xi/\xi_{pl})^{1/3}$  не превосходит единицы, хотя и близка к ней (рис. 5б). Увеличение  $\theta$  в первом режиме сопровождается слабым ростом тепловой эффективности и относительных гидравлических потерь. Трансформация вихревых структур приводит к заметным изменениям интегральных характеристик: повышению тепловой эффективности и уменьшению уровня гидравлических потерь.  $Nu_{mml}/Nu_{mmpl}$  растет примерно с 1.01 до 1.03, а  $\xi/\xi_{pl}$  убывает от 1.24 до 1.23.  $THE$  поднимается несколько заметнее – с 0.93 до 0.96. С увеличением  $\theta$  свыше  $30^\circ$  тепловая эффективность снижается, сначала медленно до  $45^\circ$ , а затем быстрее, достигая 0.985 при  $\theta = 60^\circ$ . Относительные гидравлические потери до  $45^\circ$  держатся на уровне 1.23, а затем быстро уменьшаются примерно до 1.17. Также монотонно снижается  $THE$  до уровня 0.95.

Интересно отметить, что расчетные данные для сферической лунки близкой глубины с коническими ( $0.26$ ) уступают лункам с углами уклона  $\theta$  в диапазоне  $40^\circ$ – $52.5^\circ$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное исследование посвящено анализу влияния на конвективный теплообмен перестройки вихревой структуры турбулентного обтекания при  $Re = 40000$  уединенной конической лунки глубиной 0.233 на стенке узкого канала (сечением 2.5 на 0.33) при изменении угла уклона  $\theta$ . При малых углах  $\theta$  (до  $22.5^\circ$ ) лунка близка по форме к цилиндрической и для нее характерен близкий к переключательному режим течения с попеременным образованием смерчеобразных структур на боковых склонах лунки. При осреднении нестационарного течения наблюдается симметричная (зеркальная) вихревая картина с взаимодействием закрученных струй от боковых склонов в продольной плоскости симметрии и формированием веерной струи, истекающей из конической лунки. При умеренных углах  $\theta$  (свыше  $30^\circ$ ) нестационарное течение в лунке приобретает монотонный характер с образованием наклоненного закрученного потока, истекающего из лунки с боковой стороны. При этом ориентация потока (слева направо или справа налево) получается случайной. Для больших углов  $\theta$  (свыше  $45^\circ$ ) наблюдается стационарное обтекание лунки. Трансформация струйно-вихревой картины течения от симметричной системы вихрей к монотонной структуре приводит к интенсификации отрывного течения и теплообмена. Макси-

мальные скорости возвратного и вторичного течения возрастают примерно на 25 и 40% соответственно, а максимум турбулентной энергии скачкообразно падает на 30%. Двукратно возрастают локальные силовые нагрузки на наветренную кромку лунки и в 2.5 раза уменьшается минимум относительного отрицательного трения на дне лунки (до  $-1.5$ ) в продольном срединном сечении лунки. После  $\theta = 45^\circ$  происходит достаточно быстрое уменьшение интенсивности отрывного течения в лунке. Тепловая эффективность, определенная по теплосъему с контрольного участка с лункой,  $Nu_{mm}/Nu_{mmp}$  заметно отстает от роста относительных гидравлических потерь  $\xi/\xi_{pl}$ , однако теплогидравлическая эффективность  $THE = (Nu_{mm}/Nu_{mmp})/(\xi/\xi_{pl})^{1/3}$  близка к единице, хотя и не превосходит ее.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня “Передовые цифровые технологии” (соглашение от 16.11.2020 № 075-15-2020-903).

#### 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. *Hiwada M., Kawamura T., Mabuchi I., Kumada M.* Some Characteristics of Flow Pattern and Heat Transfer Past a Circular Cylindrical Cavity // *Bull. Jap. Soc. Mech. Eng.* 1983. V. 26. № 220. P. 1744.
4. *Bunker R.S., Gotovskii M., Belen'kiy M., Fokin B.* Heat Transfer and Pressure Loss for Flows Inside Converging and Diverging Channels with Surface Concavity Shape Effects // *Proc. 4th Int. Conf. Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology*. Crete Island, Greece. Sep. 29–Oct. 3. 2003. 10 p.
5. *Banker R., Belen'kii M.Ya., Gotovsky M.A., Fokin B.S., Isaev S.A.* Experimental and Computational Investigation of the Hydrodynamics and Heat Transfer in a Flat Channel of Variable Width for Smooth and Intensified Surfaces // *Heat Transfer Res.* 2004. V. 35. № 1–2. P. 34.
6. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Попов И.А., Щелчков А.В., Габдрахманов И.Р.* Численное моделирование интенсификации теплообмена в плоскопараллельном канале с цилиндрической неглубокой лункой на нагретой стенке // *ИФЖ*. 2016. Т. 89. № 5. С. 1195.
7. *Leontiev A., Isaev S., Kornev N., Chudnovsky Ja., Hassel E.* Numerical Modeling and Physical Simulation of Vortex Heat Transfer Enhancement Mechanisms over Dimpled Relief // *Proc. 14th Int. Heat Transfer Conf. “IHTC 14”*. 2010. IHTC14-22334.
8. *Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M.* Heat Transfer Coefficient and Aerodynamic Resistance on a Surface with a Single Dimple // *Enhanced Heat Transfer*. 1997. V. 4. P. 131.
9. *Turnow J.* Flow Structure and Heat Transfer on Dimpled Surfaces. PhD Thesis. University of Rostock, 2011. 151 p.
10. *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.
11. *Isaev S.A., Schelchikov 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.
12. *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. № 1296. P. 1.
13. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Бифуркация вихревого турбулентного течения и интенсификация теплообмена в лунке // *Докл. РАН*. 2000. Т. 373. № 5. С. 615.
14. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Кудрявцев Н.А., Пышный И.А.* О влиянии перестройки вихревой структуры с увеличением глубины сферической лунки на стенке узкого плоскопараллельного канала на скачкообразное изменение теплоотдачи // *ТВТ*. 2003. Т. 41. № 2. С. 268.
15. *Isaev S.A., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Baranov P.A., Gulcova M.E.* Numerical Simulation of the Turbulent Air Flow in the Narrow Channel with a Heated Wall and a Spherical Dimple Placed on it for Vortex Heat Transfer Enhancement Depending on the Dimple Depth // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 94. P. 426.
16. *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.
17. *Oosterlee C.W., Gaspar F.J., Washio T., Wienands R.* Multigrid Line Smoothers for Higher Order Upwind Discretizations of Convection-Dominated Problems // *J. Comp. Phys.* 1998. V. 139. № 2. P. 274.
18. *Исаев С.А., Лысенко Д.А.* Расчет нестационарного обтекания кубика на стенке узкого канала с помощью URANS и модели турбулентности Спаларта–Аллмареса // *ИФЖ*. 2009. Т. 82. № 3. С. 429.