УДК 532.517.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕРЧЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В УЗКОМ КАНАЛЕ С ОВАЛЬНЫМИ ЛУНКАМИ НА НАГРЕТОЙ СТЕНКЕ ПРИ ПРОКАЧКЕ ВОДЫ

Исаев С.А.[1], Леонтьев А.И.[2], Гульцова М.Е.[1], Чудновский Я.П.[3]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия*
[3]*Gas Technology Institute, Des Plaines, Illinois, USA*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№11-08-00062 и 12-08-90001).

АННОТАЦИЯ

Анализируется генезис, состояние и перспективы вихревой интенсификации теплообмена (ВИТ) лунками. Важная роль в понимании генезиса и эволюции этой ВИТ отводится технологии, сложившимся в инженерной практике конструкторским решениям. Как результат, преобладающий интерес к сферической лунке с привязкой к диаметру пятна, в то время, как гидравлические потери зависят от соотношения размеров лунки и установки. Эволюция ВИТ тесно связана с анализом физического механизма генерации смерчеобразных структур в лунках и спиралевидных вихрей за ними. Обнаруженная связь перестройки двухячеистой к моносмерчевой структуре в лунке со скачкообразным ростом теплоотдачи создала предпосылки для конструирования овальной лунки, состоящей из двух половинок сферической лунки и цилиндрической вставки. Генерация смерчеобразной структуры в этом случае отличается высокой стабильностью и интенсивностью по сравнению со сферическим аналогом. Здесь представляются численные результаты исследования ВИТ при прокачке воды в узком канале прямоугольного сечения с нанесенной на нагретую стенку (q=const) сферической и овальной лунок одной площади пятна. Показано, что происходящая с ростом относительного удлинения и глубины овальной лунки перестройка вторичного течения с формированием спиралевидного вихря сопровождается ростом теплоотдачи при умеренных гидравлических потерях. В заключение обсуждаются перспективы развития и исследования луночных технологий.

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика интенсификации тепло- и массообменных процессов с помощью поверхностных вихревых генераторов – лунок замечательным образом сочетает фундаментальные и прикладные аспекты. Возрастающий интерес к ней обусловливается, прежде всего, достижением эффекта увеличения коэффициента теплоотдачи при низких (по сравнению с поверхностными выступами) гидравлических потерях, причем ее отличает широкий спектр практических приложений, характеризующихся разнообразием масштабов (от микро до макро), режимов течения, геометрических форм и определяющих размеров исследуемых объектов. Исключительно важна для нее технология изготовления. В последние годы усиливается внимание к решению сопряженных задач, в частности, возникающих в теплообменном оборудовании, когда омываемые различными теплоносителями поверхности с одной стороны покрываются лунками, а с другой стороны формируются ответными выступами. Фундаментальность ВИТ обусловливается еще и тем обстоятельством, что она служит испытательным полигоном для моделей турбулентности, в особенности, учитывающих влияние анизотропии и переходных явлений, для разработки методов численного моделирования. За несколько десятилетий луночной тематики пройден путь от промышленного дизайна до комплексного аэротеплофизиче-

ского проектирования поверхностных рельефов на основе принципов организации струйно-вихревых структур с перспективой применения теории оптимального управления. В настоящей работе наряду с анализом генезиса проблематики, ее состояния и перспектив развития представляются некоторые результаты по выбору рациональной формы лунки на стенке узкого канала. В качестве базового задается канал прямоугольного сечения 2×0.33, на стенке которого располагается овальная лунка с площадью "пятна" как у базовой сферической лунки с глубиной 0.13 (в долях диаметра "пятна"). Число Рейнольдса, определенное по среднемассовой скорости потока воды, принимается равным 10^4.

ГЕНЕЗИС И СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Как известно [1], одним из перспективных способов интенсификации теплообмена в агрегатах энергетического оборудования, в том числе в теплообменниках, представляется нанесение на омываемые поверхности организованной дискретной шероховатости. Однако при расположении периодических выступов, например, на стенках труб, значительное увеличение теплоотдачи сопровождается опережающим ростом гидравлических потерь, что требует, подчас, необходимости задания чрезмерных перепадов полного давления. Снизить потери оказалось возможным при замене выступов на впадины. Важно отметить, что рельеф дискретной шероховатости на стенке во многом предопределяется технологией ее нанесения. Так, наиболее простыми технологическими формами стали первоначально изученные, образованные выдавливанием цилиндрические каверны [2-4]. Однако гидравлические потери при движении теплоносителя в каналах с такими вогнутостями оказались весьма значительными. Другая, достаточно простая технологичная форма каверны - полусферическая - получается воздействием шара на деформируемую стенку. Такие каверны, в первую очередь, привлекли внимание экспериментаторов [5-8], хотя впоследствии довольно часто рассматривались сегментально-сферические лунки относительной глубины менее 0.5 (в долях диаметра пятна). Например, в [5] обнаружен автокобательный режим в каверне с попеременным формированием на боковых склонах смерчеобразных струй.

Большой вклад в понимание физических механизмов вихревой интенсификации теплообмена на рельфах со сферическими лунками внесли Г.Кикнадзе, предложивший концепцию самоорганизующихся торнадоподобных течений [9] для лунок со сглаженными кромками, и Ф.Лиграни [10]. Среди пионерских экспериментальных исследований турбулентного конвективного теплообмена на плоской стенке с неглубокими сферическими лунками, как одиночными, так и пакетными, в частности, в узких каналах, следует отметить [11,12]. Также в ретроспективном анализе работ выделяется фундаментальная статья В.Терехова [13], в которой соединились традиционные методы определения давления, тепловой нагрузки с лазерно-допплеровским измерением средней и пульсационной скорости потока в узком канале с одиночной лункой. Эта работа была использована в качестве прототипа спустя десять лет для исследования характеристик течения в узком канале со сферическими лунками в Ростоке [14].

Большой цикл экспериментальных работ по вихревой динамике и теплообмену на луночных рельефах проведен в начале века [15-20]. Позже к ним прибавились [21-23], при этом следует отметить использование градиентных датчиков теплового потока и оригинальных датчиков пульсаций давления.

Расчетные исследования по сферическим лункам стартовали с начала 90-х гг прошлого века. Прежде всего, надо отметить работы, выполненные на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с замыканием по двухпараметрической диссипативной модели турбулентности. Обнаружен интересный эффект «пылесоса» с вкачиванием среды из ареала в область мелкой лунки [24]. Получены карты отрывных режимов обтекания одиночных лунок на плоскости при увеличении числа Рейнольдса [25-32]. Сравнение лунок и траншей выполнено в [33]. Интенсификация теплообмена в каналах с одиночными сферическими лунками рассмотрена в [34-38], причем обнаружено влияние на нее перестройки вихревой структуры с симметричной на моносмерчевую. Движение теплоносителя (воздух, вода, масло) и теплообмен в каналах с нанесенным на стенки пакетом сферических лунок моделируется в [39-46], причем в ряде работ применяется пакет Fluent с

© Исаев С.А., Леонтьев А.И., Гульцова М.Е., Чудновский Я.П.

необоснованными граничными условиями (неоправданные условия симметрии на боковых границах расчетной области). Большое внимание уделяется моделированию турбулентности в рамках подходов LES/DNS [47-49].

Проблематика данного исследования акцентируется на поиске рациональных форм лунок, в том числе несимметричных. В ретроспективе исследований на эту тему, прежде всего, следует указать на работу по пакетам конических лунок, нанесенных на стенки суживающихся и расширяющихся каналов [50]. В [51] рассмотрены разнообразные по форме пятна лунки. Попытка оптимизировать форму лунок с использованием методов планирования экспериментов предпринята в [52], а генетические алгоритмы оптимизации применены в [53]. Показано, что на дне сферической лунки целесообразно сформировать нарост. К сожалению, в указанных работах при определении рациональной формы лунки не используется концепция управления обтеканием, т.е. конструирование омываемого контура с учетом формирования предпочтительной структуры струйно-вихревого течения.

В одной из пионерских работ по численному моделированию [53] предлагалась идея об организации несимметричного обтекания сферической лунки. С этой целью сбоку от нее ставилась невысокая перегородка, препятствующая затеканию среды внутрь лунки, где возникает зона низкого давления. Потом возникла идея варьирования радиусом скругления с изменением окружной координаты, а также соединения половинки эллиптической лунки с половинкой сферической [54]. Кстати, идея неравномерного сглаживания кромок нашла воплощение в недавней статье [49].

Однако наиболее продуктивной оказалась концепция поверхностного утопленного в стенку генератора спиралевидных вихрей, аналогичных выступающим флюгерного типа элементам, в виде овальной лунки, состоящей из двух половинок сферической лунки, соединенных цилиндрической вставкой. Такая лунка может быть развернута под углом атаки по отношению к набегающему потоку. Акцент делается на формировании интенсивной моносмерчевой структуры в лунке и в следе за ней. Если в глубокой сферической лунке реализуется периодический режим с перещелкиванием вихревых структур слева-направо и наоборот внутри лунки, то овальная лунка генерирует спиралевидный вихрь стабильной ориентации. Первое расчетно-экспериментальное исследование выполнено в [55] и продолжено в [56-63].

Обосновано предпочтение овальных лунок по сравнению со сферическими, в особенности в сильновязких средах. В [59] впервые показано, что при варьировании относительными размерами сферической лунки при сохранении ее формы и размеров узкого канала гидравлические потери падают по мере уменьшения масштабного фактора, в то время, как теплоотдача от масштабированного участка с лункой практически неизменна в широком диапазоне размеров лунки. Это означает, что подбором размера вогнутости и взаимного расположения овальных лунок в ансамбле можно в значительной мере компенсировать несколько большие (в сравнении со сферическими лунками) гидравлические потери, сохранив их преимущества. До недавнего времени не учитывалось, что сравнение различных форм лунок должно проводиться при условии постоянства площади пятна. В данной работе рассмотрены овальные лунки относительно большого удлинения (в долях ширины). Показано, что параметр относительного удлинения лунки существенно влияет на перестройку вихревой структуры и интенсификацию вторичного течения и теплообмена. Следует отметить крупные обобщения [64-68].

Численное моделирование конвективного теплообмена в канале, представляющем компьютерный аналог установки В.И. Терехова [13], на одной из стенок которого размещаются овальные лунки различного удлинения при одной глубине (0.13), близкой площади пятна и фиксированном числе Рейнольдса 10^4, выполнено на методологической основе [38] с переходом от условия на стенке T=const к q=const применительно к водному теплоносителю.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ

Рассматривается конвективный теплообмен в узком канале прямоугольного сечения шириной 2.5 и высотой 0.33 (в долях диаметра сферической лунки), на входе которого задается профиль скорости полностью развитого турбулентного потока несжимаемой жидкости. На омываемых стенках выполняются условия прилипания. Профили продольной, вертикальной и поперечной составляющих скорости u,v,w, а также характеристики турбулентности

(энергия k, удельная скорость диссипации ω, вихревая вязкость μ_t) определяются из решения специальной задачи установления течения в периодической секции рассматриваемого канала при выбранном числе Рейнольдса Re, равном 10^4. В качестве масштабов обезразмеривания задаются среднемассовая скорость U, диаметр пятна сферической лунки D, плотность ρ и вязкость μ теплоносителя – воды (Pr=7). Модель переноса сдвиговых напряжений Ментера 2003 года с модификацией, учитывающей влияние кривизны линий тока, используется в сочетании с решением исходных уравнений с помощью многоблочных вычислительных технологий [38]. Лунки умеренной глубины располагаются на некотором расстоянии (3) от входа в канал, выбранном из условия их незначительного влияния на входные условия, причем их центр находится в продольной срединной плоскости ниже центра декартовых координат (x,y,z) на расстоянии 0.13 (Рис.1). Радиус скругления кромок принимается равным 0.025. На выходе канала длиной порядка 7 задаются мягкие граничные условия.

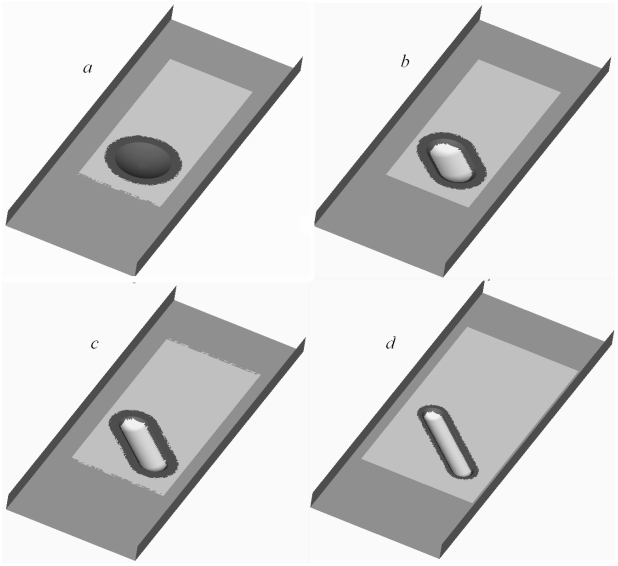

Рис.1 Узкие каналы с овальными лунками с полушириной Δ=0.5 (a), 0.365 (b), 0.274 (c),и 0.214 (d) и площадью пятна S=1 (a), 1.04 (b), 0.93 (c), 0.875 (d).

Тепловая задача решается отдельно от гидродинамической (эффекты естественной конвекции не учитываются). На входе поток изотермический с температурой T_{ref}=293K. Нижняя омываемая стенка канала с лункой нагревается, причем подводимый постоянный тепловой поток q пересчитывается в безразмерный по формуле

$$\bar{q} = \frac{q}{\lambda \,\mathrm{Pr}\,\mathrm{Re}\, T_{ref} / D}$$ (принимается порядка $3.4\ 10^{-5}$).

Здесь λ – теплопроводность воды. Боковые стенки канала адиабатические, а верхняя изотермическая с температурой T_{ref}, принятой в качестве масштаба обезразмеривания. На выходе из канала для T ставятся мягкие граничные условия.

Задача решается на многоблочных пересекающихся структурированных сетках различного масштаба (Рис.2).

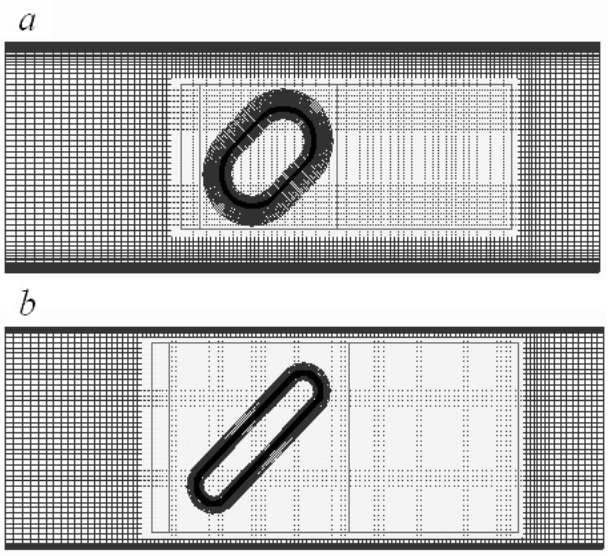

Рис.2 Многоблочные расчетные сетки для каналов с овальной лунками различного удлинения. Δ=0.365 (a), 0.214 (b).

Прямоугольный канал покрывается декартовой сеткой, сгущающейся к стенкам (шаг у стенки 10^{-4}) и к ареалу с лункой (минимальные продольный и поперечный шаги равны 0.06 и 0.05 соответственно).

Общее количество ячеек в канале порядка 119×69×93 (738 тысяч). Около лунки располагается подробная сетка для отображения гидродинамических особенностей в ближнем следе (с минимальными шагами вдоль и поперек потока, равными 0.03).

Высота подобласти с подробной сеткой 0.13, ширина варьируется в зависимости от

размера лунки от 1.6 до 2.1. Длина подобласти порядка 3. В случае сферической лунки подробная сетка декартовая, а для овальных лунок она криволинейная, согласованная с нижней омываемой стенкой канала.

Ареал сферической лунки разбивается цилиндрической сеткой, согласованной с ее поверхностью, причем для предотвращения проблем со сгущением узлов в приосевой сетке вводится дополнительная близкая к прямоугольной сетка. Минимальный шаг в районе кромки 0.002. Для овальных лунок вводится специальная кромочная сетка для описания зон с высокими градиентами определяющих параметров. Общее количество ячеек многоблочных сеток составляет порядка 1.3-1.5 млн. ячеек.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Некоторые из полученных результатов представлены на Рис. 3-8.

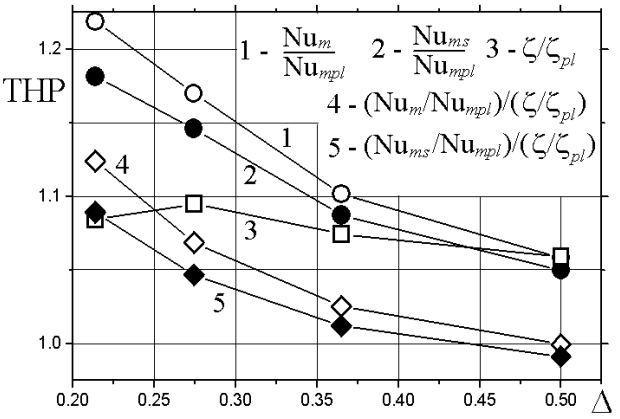

Рис.3 Влияние полуширины овальной лунки на теплогидравлические характеристики. 2, 5 определены с учетом поверхности лунки.

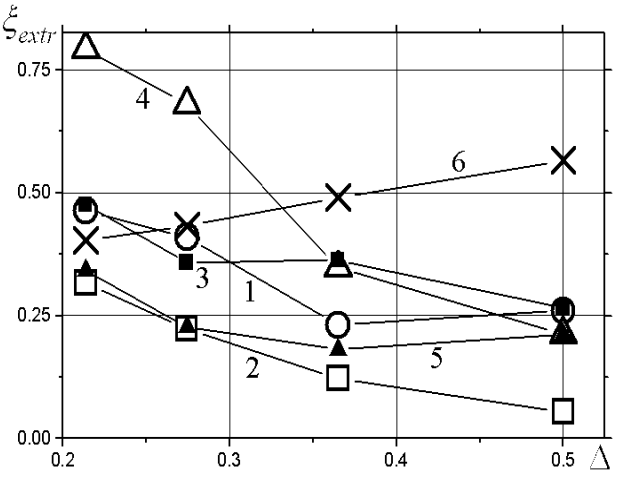

Рис.4 Влияние Δ на экстремальные характеристики течения ξ_{extr}. 1 – $(-u_{min})$; 2 – $(-v_{min})$; 3 – v_{max}; 4 – $(-w_{min})$; 5 – w_{max}; 6 - $10k_{max}$.

Определение влияния полуширины Δ овальной лунки на интегральные характеристики течения и теплообмена является центральным объектом данного исследования. С уменьшением Δ при сохранении плотности лунки, определяемой площадью пятна, растет ее удлинение (от 1 до 4.5), а значит и степень воздействия лунки на течение в ближнем следе.

Суммарное число Нуссельта Nu_m рассчитывается на контрольном прямоугольном участке, окружающем лунку, длиной 3 и шириной 2 (со смещением на 0.5 относительно центра вниз по потоку) без учета и с учетом увеличения криволинейной поверхности лунки (Nu_{ms}).

На рис.3 показано отношение суммарных Nu на участке стенки с лункой к эквивалентной характеристике для плоского канала Nu_{mpl}. Гидравлические потери определяются, как описано в [38], по границам контрольного участка облуненного (ζ) и плоского (ζ_{pl}) каналов. Теплогидравлическая эффективность HHE рассчитывается как отношение тепловой эффективности Nu_m/ Nu_{mpl} к относительным гидравлическим потерям ζ / ζ_{pl}. Показано, что с увеличением удлинения лунки теплогидравлические характеристики облуненного канала существенно улучшаются по сравнению со сферическим аналогом, причем для последнего HHE с учетом увеличения площади омываемой стенки канала получается меньше 1. Таким образом, для удлиненных овальных лунок темп возрастания тепловой эффективности (кривые 1 и 2) значительно опережает рост гидравлических потерь (кривая 3).

Графики поведения экстремальных характеристик турбулентного течения в канале во многом объясняют преимущество удлиненных овальных лунок. С уменьшением Δ кардинально интенсифицируется вторичное течение в лунке, определяемое величиной поперечной составляющей скорости. Конечно, следует учитывать увеличение относительной глуби-

ны лунки, определяемой отношением постоянной глубины 0.13 к постоянно уменьшающейся ширины и доходящей до 0.3. Наряду с некоторым ростом отрицательной минимальной скорости отрывного течения u_m, отрицательная минимальная скорость вторичного течения возрастает в три раза, достигая 0.75 среднемассовой скорости в канале. При этом максимальная поперечная составляющая скорости меняется слабо.

Привлекает внимание монотонное снижение с уменьшением Δ максимальной величины энергии турбулентности, свидетельствующей о том, что вихревое течение в лунке имеет тенденцию к ламинаризации.

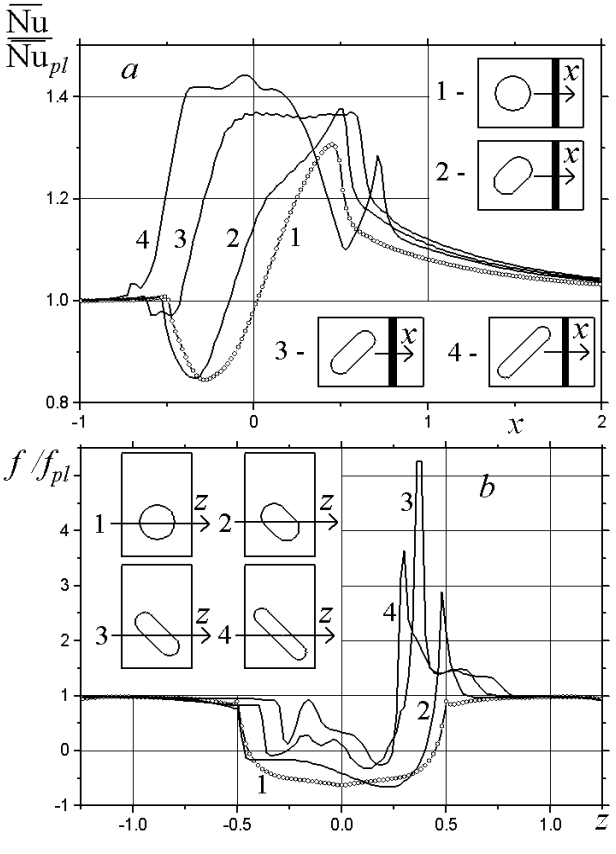

Рис.5 Влияние Δ на распределение по x относительного числа Нуссельта, проинтегрированного по поперечным полосам контрольного участка (a), и на поперечное распределение в срединном сечении лунки относительного трения (b).

На рис. 5 нанесены осредненные по поперечным полосам контрольного участка относительные числа Нуссельта и поперечные распределения относительные трения на стенке с лункой. Обращает внимание перестройка распределений характеристик при переходе от сферических и незначительно удлиненных лунок к узким удлиненным овальным лункам. Она отражается в выходе на полку в ареале лунки распределений тепловых нагрузок и в практическом исчезновении зоны отрыва потока в лунке.

Более того, в центральной части овальной лунки большого удлинения наблюдается интенсификация течения в спиралевидном вихре, формирующемся в удлиненной лунке.

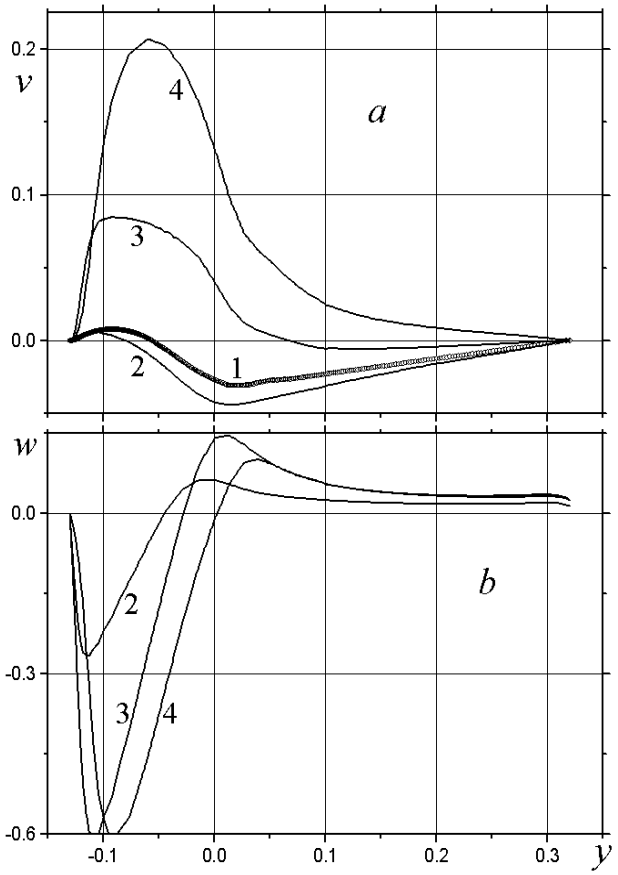

Рис.6 Влияние Δ на профили вертикальной (a) и поперечной (b) составляющей скорости в центре лунки. Δ=0.5 (1), 0.365 (2), 0.274 (3) и 0.214 (4).

Как показано на рис. 6, с уменьшением Δ нисходящие потоки внутри лунки становятся восходящими, а скорости поперечного потока достигают величины порядка 60% от среднемассовой скорости в канале.

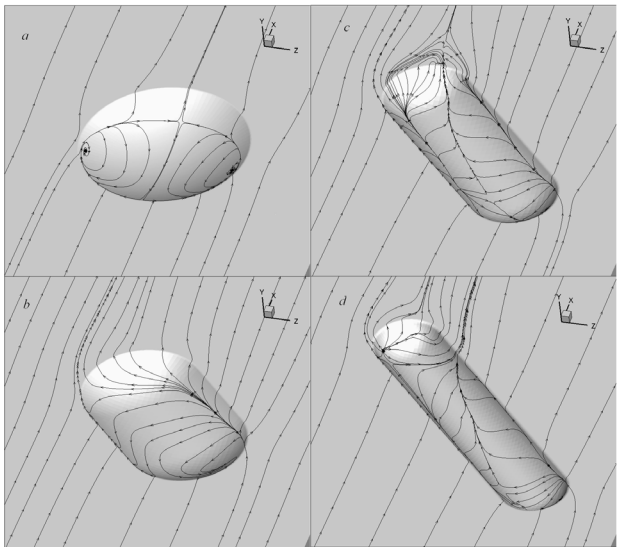

Рис.7 Сравнение картин растекания для сферической и овальной лунок Δ=0.5 (a), 0.365 (b), 0.274 (c) и 0.214 (d).

Численные расчеты интегральных и локальных характеристик вихревого теплообмена, дополненные компьютерной визуализацией вихревых структур (рис.7,8), продемонстрировали перестройку отрывного обтекания овальной лунки с ростом ее удлинения и увеличение теплогидравлической эффективности ее как генератора спиралевидных вихрей.

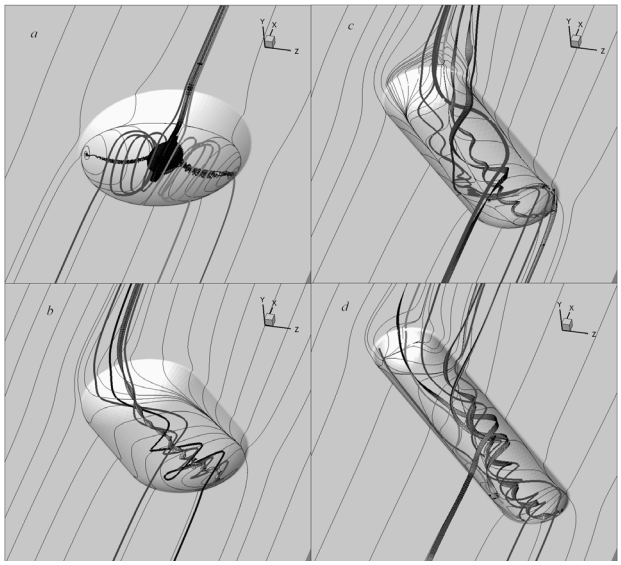

Рис.8 Сравнение струйно-вихревых структур для сферической и овальной лунок Δ=0.5 (a), 0.365 (b), 0.274 (c) и 0.214 (d).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение проведенного численного исследования могут быть сделаны следующие выводы.

1.Удлинение овальной лунки (ориентированной под углом 45° к направлению потока) при постоянной площади пятна и глубине (в долях диаметра эквивалентной сферической лунки) приводит к быстрому увеличению теплоотдачи от облученной части канала, монотонному возрастанию теплогидравлической эффективности при невозрастании гидравлических потерь.

2. Иследованы физические механизмы трансформации вихревого турбулентного течения в окрестности овальной лунки при одновременном относительном удлинении, уширении и углублении (в долях ширины) полости, связанные с преобразованием отрывного течения в закрученный струйный поток при существенном изменении вертикальной составляющей скорости и увеличении (до 80% в долях среднемассовой скорости) скорости вторичного течения. Отмечено, что уровень турбулентной вязкости в крупномасштабных вихрях уменьшается по мере удлинения овальных лунок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dreitser G.A. Problems in developing highly efficient tubular heat exchangers // Thermal Engineering. 2006. – Vol.53. – No.4. – P. 279–287.
2. Hagen R.L. Danak A.M. Heat transfer in the field of the turbulent boundary layer separation over a dimple // Heat Transfer. 1967. – No 4. – P. 62–69.
3. Presser K.H. Empirische gleichungen zur berechnung der stoff – und warmeubertragung fur den spezialfal der abgerissenen stromung // Int. J Heat Mass Transfer. 1972. – Vol. 15. – P. 2447–2471.
4. Hiwada M., Kawamura T., Mabuchi J. and Kumada M. Some characteristics of flow pattern and heat transfer past a circular

cylinder cavity // Bull JSME. 1983. –Vol.26. –No.220. – P. 1744–1750.
5. Snedeker S., Donaldson D.P. Observation of bistable flow in hemispherical cavity // AIAA Journal. 1966. – Vol.4. – P. 735–736.
6. Gromov P.R., Zobnin A.B., Rabinovich M.I. and Sushchik M.M. Creation of solitary vortices in a flow around shallow spherical depressions // Soviet Technical Physical Letters. 1986. – Vol. 12. – No. 11. – P. 1323–1328.
7. Kesarev V.S., Kozlov A.P. Convective heat transfer in turbulized flow past a hemispherical cavity // Heat Transfer Soviet. Research. 1993. – Vol. 25. – P. 156–160.
8. Syred N., Khalatov A., Kozlov A., Shchukin A. and Agachev R. Effect of surface curvature on heat transfer and hydrodynamics within a single hemispherical dimple // ASME Journal of Turbomachinery. 2001. – Vol. 123. – P. 609–613.
9. Kiknadze G.I., Gachechiladze I.A. and Gorodkov A.Yu. Self-organization of tornado-like jets in flows of gases and liquids and the technologies utilizing this phenomenon // Proceedings of 2009 ASME Summer Heat Transfer Conference. San Francisco California USA. 2009. HT 2009 – 88644. –14p.
10. Ligrani P.M., Oliveira M.M. and Blaskovich T. Comparison of heat transfer augmentation techniques // AIAA Journal. 2003. – Vol. 41. – No. 3. – P. 337–362.
11. Afanasyev V.N., Chudnovsky Y.P., Leontiev A.I. and Roganov P.S. Turbulent ow friction and heat transfer characteristics of spherical cavities on a plate // Experimental Thermal and Fluid Science. 1993. – Vol. 7. – P. 1–8.
12. Chyu M.K., Yu Y. and Ding H. Heat transfer enhancement in rectangular channels with concavities // Enhancement Heat Transfer. 1999. –Vol.6. – P.429–439.
13. Terekhov V.I., Kalinina S.V. and Mshvidobadze Yu.M. Heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // Enhanced Heat Transfer. 1997. – Vol.4. – P. 131–145.
14. Turnow J. Flow structure and heat transfer on dimpled surfaces. PhD Thesis. University of Rostock. 2011. – 151p
15. Ligrani P.M., Harrison J.L., Mahmmod G. I. and Hill M.L. Flow structure due to dimple depressions on a channel surface // Phys. Fluids. 2001. – Vol.13. – No.11. – P. 3442–3451.
16. Mahmood G.I., Sabbagh M.Z. and Ligrani P.M. Heat transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls // J. of Thermophysics and Heat Transfer. 2001. – Vol.15. – No. 3. – P. 275–283.
17. Ligrani P.M., Mahmood G.I., Harrison J.L., Clayton C.M. and Nelson D.I. Flow structure and local Nusselt number variations in a channel with dimples and protrusions on opposite walls // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2001. – Vol. 45. – P. 2011–2020.
18. Baranov P.A., Isaev S.A., Leontiev A.I., Mityakov A.V., Mityakov V.Yu. and Sapozhnikov S.Z. Experimental and numerical modeling of vortex heat transfer in turbulent flow past spherical dimple on a plane // Thermophysics and aeromechanics. 2002. – Vol.9. – No.4. – P. 497–508.
19. Ekkad S.V., Nasir H. Dimple enhanced heat transfer in high aspect ratio channels // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2003. – Vol. 10. – No. 4. – P. 395–405.
20. Mahmood G.I., Ligrani P.M. Heat transfer in a dimpled channel combined influences of aspect ratio, temperature, Reynolds number and flow structure // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2004. – Vol. 45. – P. 2011–2020.
21. Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Sapozhnikov S.Z. and Isaev S.A. Local heat fluxes on the surfaces of dimples. Ditches and cavities // Thermal Engineering. 2007. – Vol.54. – No.3. – P. 200–203.
22. Isaev S.A., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Mozhaiskii S.A. and Usachov A.E. Numerical analysis of the influence of the physical viscosity on the vortex heat transfer in laminar and turbulent flows around a heated plate with a shallow spherical hole // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2009. – Vol.82. – No.5. – P. 847–857.
23. Voskoboinik A.V., Voskoboinik V.A., Isaev S.A., Zhdanov V.L., Kornev N.V. and Turnow J. Bifurcation of vortex flow inside a spherical dimple in the narrow channel // Applied Hydromechanics. 2011. – Vol.13. – No.4. – P. 3–21 (in Russian).
24. Chudnovskii Ja.P., Isaev S.A. and Kharchenko V.B. Calculation of a three-dimensional flow of a viscous incompressible liquid in the neighborhood of a shallow well on a flat surface // J. Engineering Physics and Thermophysics. 1994. – Vol.67. – No.5-6. – P. 1013–1017.
25. Isaev S.A., Leontiev A.I., Frolov D.P. and Kharchenko V.B. Identification of self-organizing structures by the numerical

simulation of laminar three-dimensional flow around a crater around on a plane by a flow of viscous incompressible fluid // Technical physics letters. 1998. – Vol.24. – No.3. – P. 209–211.
26. Isaev S.A., Leontiev A.I. and Usachov A.E. Numerical study of the eddy mechanism of enhancement of heat and mass transfer near a surface with a cavity // J. Engineering Physics and Thermophysics. 1998. Vol.71. No.3. P. 481-487.
27. Isaev S.A., Leontiev A.I. and Baranov P.A. Identification of self-organized vortexlike structures in numerically simulated turbulent flow of a viscous incompressible liquid streaming around a well on a plane // Technical physics letters. 2000. Vol.26. No.1. P. 15-18.
28. Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A. and Usachov A.E. Bifurcation of vortex turbulent flow and intensification of heat transfer in a hole // Doklady Physics. 2000. Vol.45. No.8. P. 389-391.
29. Isaev S.A., Baranov P.A., Leontiev A.I. and Usachov A.E. Numerical investigation of tornado enhancement of heat and mass exchange processes in flow past projections in concave surfaces // Heat Transfer Research. 2002. Vol.33. No.1-2. P. 47-55.
30. Isaev S.A., Leontiev A.I., Metov Kh.T. and Kharchenko V.B. Modeling of the influence of viscosity on the tornado heat exchange in turbulent flow around a small hole on the plane // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2002. Vol.75. No.4. P. 890-898.
31. Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A. and Pyshnyi I.A. Numerical analysis of the influence of the depth of a spherical hole on a plane wall on turbulent heat transfer // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2003. Vol. 76. No. 1. P. 61-69.
32. Wang Z., Yeo K.S. and Khoo B.C. Numerical simulation of laminar channel flow over dimpled surface // AIAA Paper. 2003. No 3964. P. 1192-1202.
33. Isaev S.A., Leontiev A.I., Kiknadze G.I., Kudryavtsev N.A. and Gachchiladze I.A. Comparative analysis of the vortex heat exchange in turbulent flows around a spherical hole and two-dimensional trench on plane wall // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2005. Vol.78. No.4. P. 749-761.
34. Isaev S.A., Pyshnyi I.A., Usachov A.E. and Kharchenko V.B. Verification of the multiblock computational technology in calculating laminar and turbulent flow around a spherical hole on a cannel wall // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2002. Vol.75. No.5. P. 1155-1158.
35. Isaev S.A., Leontiev A.I. Numerical simulation of vortex enhancement of heat transfer under condititions of turbulent floe past a dpherical dimple on the wall of a narrow channel // High Temperature. 2003. Vol.41. No.5. P. 665-679.
36. Kornev N., Hassel E., Herwig H., Isaev S., Stephan P. and Zhdanov V. Enhancement of heat transfer from dimpled surfaces by the use of vortex induction // Engineering Research (Forschung im Ingenieurwesen). 2005. Vol.69. No.2. P. 90-100.
37. Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhdanov V.L., Kornev N.V. and Hassel E. Whirlwind-like enhancement of heat transfer on dimpled reliefs // Heat Transfer Research. 2008. Vol..39. No.1. P. 79-90.
38. Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I. and 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. Vol.53. Issues 1-3. P. 178-197.
39. Lin Y.-L., Shih T.I.-P. and Chyu M.K. Computations of flow and heat transfer in a channel with rows of hemispherical cavities // ASME Paper. 1999. 99-GT-263. 6p
40. Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A., Pyshnyi I.A. and Usachov A.E. Numerical analysis of the vortex intensification in a heat transfer in a channel with a set of deep spherical dimples on one of the walls // Doklady Physics. 2002. Vol.47. No.10. P. 755-757.
41. Park J., Desam P.R. and Ligrani P.M. Numerical prediction of flow structure above a dimpled surface in a channel // Numerical Heat Transfer. 2004. Vol.45. Pt.A. P. 1-20.
42. Won S.Y., Ligrani P.M. Numerical predictions of flow structure and local Nusselt number rations along and above dimpled surfaces with different dimple depths in a channel // Numerical Heat Transfer. 2004. Vol. 46. Part A. P. 549–570.
43. Wei X.J., Joshi Y.K. and Ligrani P.M. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface // J. Electronic Packaging. 2007. Vol.127. P. 63-70.
44. Hwang S.D., Kwon H.G. and Cho H.H. Heat transfer with dimple/protrusion arrays in a rectangular duct with a low Reynolds number range // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2008. Vol.29. No.4. P. 916-926.

45. Xiao N., Zhang Q., Ligrani P.M. and Mongia R. Thermal performance of dimpled surfaces in laminar flows // Int.J. Heat and Mass Transfer. 2009. Vol.52. No.7-8. P. 2009-2017.
46. Gotovsky M., Isaev S. Heat transfer enhancement by artificial roughness at Reynolds numbers related with laminar and transitional regimes for high-viscous liquids // Proceedings of the 14 Int. Heat Transfer Conf. IHTC 14, IHTC 14-22303. 2010. 8p.
47. Wang Z., Yeo K.S. and Khoo B.C. DNS of low Reynolds number turbulent flows in dimpled channels // Journal of Turbulence. 2006. Vol.7. No. 37. P. 1-31.
48. Elyyan M.A. Heat transfer augmentation surfaces using modified dimples/protrusions. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2008.181p.
49. Chen Y., Chew Y.T. and Khoo B.C. Enhancement of heat transfer in turbulent channel flow over dimpled surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol.55. P. 8100-8121.
50. Bunker R.S., Gotovskii M., Belen'kiy M. and Fokin B. Heat transfer and pressure loss for flows inside converging and diverging channels with surface concavity shape effects // Proceedings of the 4th International Conference Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology, Paper 2003 GRC016. Crete Island, Greece. 2003. 14p.
51. Park J., Ligrani P.M. Numerical prediction of heat transfer and fluid flow characteristics for seven different dimpled surfaces in a channel // Numerical Heat Transfer. 2005. vol.47. Part A. P. 1-24.
52. Kim K.-Y., Choi J.-Y. Shape optimization of a dimpled channel to enhance turbulent heat transfer // Numerical Heat Transfer. 2005. vol.48. Part A. P. 901-915.
53. Isaev S.A., Leontyev A.I. and Usachov A.Y. Methodological aspects of numerical modeling of vortex structures and heat transfer in viscous turbulent flows // Applied Energy: Russian Journal of Fuel, Power and Heat Systems. 1996. Vol.34. No.4. P. 110-117.
54. Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A., Metov Kh.T. and Usachov A.E. Numerical analysis of the effect of viscosity on the vortex dynamics at laminar separated flow past the dimple on a plane with allowance its asymmetry // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2001. Vol.74. No.2. P. 339-346.
55. Isaev S.A., Leontiev A.I., Mitjakov A.V. and Pyshnyi I.A. Intensification of tornado-like heat transfer in asymmetric dimples // J. of Engineering Physics and Thermophysics. 2003. Vol. 76. P. 31-34.
56. Isaev S.A., Leontiev A.I. and Baranov P.A. Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 1: Selection and justification of calculation methods // Thermal Engineering. 2007. Vol. 54. No. 3. P. 193–199.
57. Isaev S.A., Leontiev A.I. and Baranov P.A. Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 2: Results of parametric studies // Thermal Engineering. 2007. Vol. 54. No. 8. P. 655–663.
58. Kornev N., Turnow J., Hassel E., Isaev S. and Wurm F.-H. Fluid mechanics and heat transfer in a channel with spherical and oval dimples // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2010. Vol.110/ 2010. P. 231-237.
59. Leontiev A., Isaev S., Kornev N., Chudnovsky Ja. and Hassel E. Numerical modeling and physical simulation of vortex heat transfer enhancement mechanisms over dimpled relief // Proceedings of the 14 Int. Heat Transfer Conf. IHTC 14, IHTC14-22334. 2010. 10p.
60. Isaev S.A., Leontiev A.I. Problems of simulating tornado-like heat transfer turbulent flow past a dimpled relief on a narrow channel wall // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2010. vol.83. No.4. P. 783-793.
61. Turnow J., Kornev N., Isaev S. and Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat and Mass Transfer/ Waerme- und Stoffuebertragung. 2011. Vol. 47. Issue 3. P. 301-311.
62. Isaev S.A., Leonardi E., Timchenko V. and Usachov A.E. Vortical investigation of heat transfer in microchannels with oval dimples // Heat Transfer Research. 2010. Vol. 41. No. 4. P. 413-424.
63. Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhukova Yu.V., Baranov P.A., Gotovskii M.A. and Usachov A.E. Numerical simulation of vortex heat transfer enhancement in transformer oil flow in a channel with one-row spherical dimples // Heat Transfer Research. 2011. Vol. 42. Issue 7. P. 613–628.