

УДК 532.517.4:536.24

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕРЧЕВОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЛУНКАМИ (СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)

С.А. Исаев¹, А.И. Леонтьев², Н.В. Корнев³

¹ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»

²Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана

³Университет г. Росток, Росток, Германия

Дан анализ состояния и перспектив численного моделирования смерчевого теплообмена при обтекании луночных рельефов на плоской стенке, в том числе в узких каналах. Многоблочный алгоритм, реализованный в пакете VP2/3, и модель переноса сдвиговых напряжений Менстера тестируются при сопоставительном анализе расчетных и экспериментальных данных Терехова В.И. для уединенных лунок. Сравниваются по тепловой эффективности рельефы из сферических и траншейных лунок.

Ключевые слова

Лунка сферическая и траншейная, плоская стенка, узкий канал, теплоотдача, интенсификация, многоблочные вычислительные технологии, модель турбулентности Менстера.

Условные обозначения

c_p - теплоемкость при постоянном давлении (кДж/(кг К)); d - диаметр лунки (м); L - длина цилиндрической вставки (в долях d); φ - угол наклона траншейной лунки (град.); h - высота канала (в долях d); L_x, L_z - длина и ширина канала (в долях d); C_f - напряжение трения, отнесенное к скоростному напору (в долях $\rho U^2/2$); k - энергия турбулентных пульсаций (в долях U^2); n - координата, отсчитываемая по нормали к контуру (в долях d); Nu - число Нуссельта, определенное как $d\theta/dn$; p - давление (в долях ρU^2); C_p - коэффициент давления (в долях $\rho U^2/2$); Pr - число Прандтля ($Pr=c_p \mu / \lambda$); r - радиус скругления острой кромки (в долях d); Re - число Рейнольдса ($Re=\rho U d/\mu$); T - температура (град. Кельвина); U - характерная скорость потока (м/с); u - горизонтальная составляющая вектора скорости (в долях U); x, y, z - декартовы координаты (м); α - температуропроводность (m^2/c); δ - начальная толщина пограничного слоя (в долях d); Δ - глубина лунки (в долях d); ϵ - скорость диссипации турбулентной энергии (в долях U^3/d); λ - коэффициент теплопроводности (Вт/(м К)); μ - вязкость (Па с); ν - кинематическая вязкость (μ/ρ); θ - безразмерная температура [$\theta = (T-T_{wall})/(T_m-T_{wall})$]; ρ - плотность (kg/m^3); ω - удельная скорость диссипации турбулентной энергии (в долях U/d), ζ - коэффициент гидравлических потерь. Индексы нижние: inlet - параметры на входе в расчетную область; m - среднemasовые и осредненные по площади выделенного участка параметры; pl - параметры на плоскости без лунки; wall - параметры на стенке.

Введение

Смерчевая интенсификация теплообмена при обтекании луночных рельефов продолжает привлекать внимание теплофизиков всего мира. В основном используются экспериментальные методы исследований, однако методы численного моделирования

становятся все более робастными и эффективными, особенно в связи с прогрессом в компьютерной технике, вычислительных технологиях и совершенствованием моделей турбулентности. Представляет интерес проанализировать состояние и перспективы разработок в этой области, а также некоторые из полученных результатов. Как и ранее на трех предыдущих минских форумах, главное внимание уделяется исследованиям взаимосвязи организованных и самоорганизующихся в лунках смерчевых структур с интенсификацией теплообмена в окрестности лунок. Однако сейчас они дополняются оценкой гидравлических потерь и теплогидравлической эффективности.

Краткий анализ расчетных работ. Тенденции развития проблематики.

Разработанная расчетная методология опирается преимущественно на решение факторизованной конечно-объемной процедурой осредненных по Рейнольдса уравнений Навье-Стокса (URANS), замкнутых полуэмпирическими дифференциальными моделями турбулентности [1]. Систематические исследования последних лет [2-8] проведены с помощью оригинальных многоблочных вычислительных технологий (МБТ), реализованных в пакете VP2/3 (скорость-давление, 2D и 3D). Их достоинство состоит в улавливании разномасштабных элементов структуры отрывного течения и температурных полей на совокупности сеток простой топологии соответствующего масштаба, накладываемых друг на друга. Достигается не только значительная экономия сеточных ресурсов, но и повышение точности решения за счет размещения сеток только в желательных местах (определяемых интерактивно) с настройкой на рассчитываемую картину течения. Многоблочный подход был обобщен для анализа пространственных отрывных течений, интерпретации нестационарных режимов, конвективного теплообмена в каналах с лунками, в том числе при движении неоднородных сред (масел) и учете толщины и материала стенок. Разработаны оригинальные подходы к интерпретации периодических граничных условий, позволившие оценить предельные характеристики луночных рельефов в узких каналах. МБТ распространены для моделирования теплообмена при до-, транс-, сверх- и гиперзвуковом обтекании криволинейных рельефов при наличии скачков уплотнения. В качестве модели замыкания URANS наиболее предпочтительной представляется модель сдвиговых напряжений Ментера (MSST), модифицированная с учетом поправки на кривизну линий тока.

Из наиболее существенных результатов, полученных в численных экспериментах, можно отметить следующие.

- *Идентификация струйно-вихревой природы интенсификации теплообмена.* Идентификация струйно-вихревых структур пространственных отрывных течений, проведенная методами компьютерной визуализации в пристеночном слое около сферической лунки [8,9], выявила самоорганизацию на ее боковых склонах смерчеобразных струй, взаимодействующих с образованием симметричной картины с двумя вихревыми ячейками или несимметричной структуры с формированием моносмерчевого режима течения в лунке. Смерчеобразные закрученные струйные потоки начинаются в особых точках типа фокус на картине растекания жидкости по криволинейной стенке.

- *Разработка карты режимов.* Формирующиеся режимы обтекания лунки и совокупности лунок определяются большим количеством геометрических и режимных параметров, основными из которых в случае сферической лунки являются ее глубина, радиус скругления кромки, радиус кривизны образующей контура (в долях диаметра "пятна"), высота и ширина канала, число Рейнольдса, степень и масштаб турбулентности внешнего потока. Таким образом задача проектирования рационального по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению рельефа является

многопараметрической. В [10,11] анализируется влияние вязкости и глубины сферической лунки на структуру ее обтекания.

- *Бифуркация вихревой структуры течения и скачкообразный прирост теплоотдачи в ареале глубокой сферической лунки.* Один из замечательных результатов численного моделирования связан с обнаружением перестройки картины отрывного течения от симметричной к моносмерчевой при увеличении глубины сферической лунки [12-14], обуславливающей скачкообразный рост теплоотдачи внутри лунки и в следе за ней.

- *Преимущество лунок над траншеями.* Пространственный характер течения в следе за лункой определяет более высокие темпы роста теплоотдачи по сравнению с траншеей [15].

- *Обоснование теплогидравлической эффективности сферической лунки на стенке узкого канала.* Особенность лунок как вихревых интенсификаторов теплообмена состоит в том, что они не приводят к заметному росту гидравлических потерь. Для узкого канала показано, что теплоотдача от ареала со сферической лункой возрастает темпом, опережающим увеличение гидравлических потерь, т.е. их теплогидравлическая эффективность больше единицы (на 16%) [2].

- *Эффект синхронизации вихрей в пристеночном слое около рельефа из упорядоченных лунок.* Анализ картин растекания жидкости по стенке с пакетом упорядоченных лунок указывает на согласованность вихревых структур в пристеночном слое, причем по мере увеличения луночных рядов наблюдается мультипликационный эффект нарастания теплоотдачи [16,17].

- *Конструирование траншейных лунок, обладающих повышенной теплоотдачей по сравнению со сферическими аналогами.* Поскольку моносмерчевые режимы обтекания глубоких сферических лунок оказываются предпочтительными по теплоотдаче от стенки, сконструированы формы лунок, генерирующих такие вихревые структуры. В [18] предлагаются траншейные лунки, представляющие две разнесенные половинки сферической лунки, соединенные цилиндрической вставкой. Помимо длины вставки L вводится еще один геометрический параметр – угол наклона продольной оси лунки по отношению к набегающему потоку φ . Таким образом, расширяется набор параметров для оптимизации луночных рельефов. В [1,7] показано, что траншейные лунки имеют значительные преимущества перед сферическими аналогами по тепловой и теплогидравлической эффективности.

- *Эффективное скругление кромки лунки.* В численных исследованиях [7] показано, что при сохранении неизменным радиуса кривизны центральной части сферической лунки увеличение скругления кромки приводит к возрастанию теплоотдачи при одновременном снижении гидравлических потерь. Таким образом, лунки со скругленной кромкой обладают большей тепловой и теплогидравлической эффективностью по сравнению с острокромочными.

- *Тепловое проектирование луночных рельефов. Их предельные характеристики.* Тепловое проектирование луночных рельефов предлагается проводить на основе использования зигзагообразных траншейных лунок со сглаженными краями [3,19]. Анализируются предельные теплогидравлические характеристики при рассмотрении периодического расчетного модуля, на границах которого задаются периодические граничные условия [4].

- *Захлаждающее воздействие луночных рельефов при их сверх-и гиперзвуковом обтекании,* обнаруженное в экспериментальных исследованиях ИМ МГУ, подтверждено численно. Показано, что 2–3-кратное (по сравнению с плоской стенкой) увеличение сопротивления сопровождается снижением теплоотдачи (порядка 8-14%) для многорядных, траншейных и луночных рельефов. Предложены рельефы из

сотовых лунок, обладающие лучшими по сравнению со сферическими лунками характеристиками [5].

- *Снижение сопротивления и гидравлических потерь каналов/труб с нанесенным луночным рельефом обосновано численно.* При незначительных глубинах ($\Delta=0.03$) прогнозируется эффект существенного уменьшения гидравлических потерь (примерно на 5%) [20].

На ближайшее будущее наиболее актуальными представляются исследования нестационарного механизма смерчевой интенсификации теплообмена при обтекании луночных рельефов на основе эволюции методов численного моделирования, а также распараллеливания алгоритмов (в частности, на базе MBT в пакете VP2/3) применительно к многопроцессорным кластерным платформам. Также привлекает внимание уточнение турбулентной природы вихревой интенсификации теплообмена в рамках современных подходов к моделированию турбулентности: URANS, SAS, DES, LES [21].

Перспективы численных исследований по луночной проблематике связываются с поиском оптимальных рельефов в теплообменниках, с анализом работоспособности лунок и выступов в различных практических приложениях, в особенности при ламинарных режимах течения, с моделированием процессов очистки поверхностей от осаждающихся загрязнений, снижения шума около поверхностей с лунками.

Верификация MBT и пакета VP2/3 на примере обтекания сферической лунки в узком канале (эксперимент В.И.Терехова)

Проведено сравнение имеющихся экспериментальных данных [22] и численных результатов для турбулентного обтекания воздухом сферической, близкой к острокромочной лунки диаметра 1 на стенке плоскопараллельного канала высотой 0.33, шириной 2.5 и длиной 6.7. Центр симметрично расположенной относительно боковых стенок лунки располагается на расстоянии 1.4 калибра от входной границы, на которой задается профиль полностью развитого турбулентного течения при $Re=4 \times 10^4$ (в качестве характерной скорости выбирается среднемассовая скорость). Рассматриваются лунки умеренной и большой глубины, для которых $\Delta=0.13$ и 0.26 (рис.1).

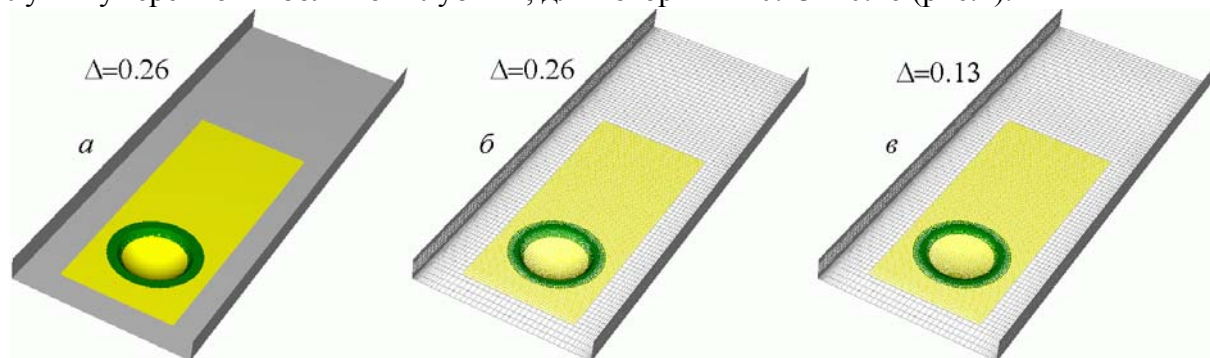


Рис.1. Картина плоскопараллельного канала со снятой верхней стенкой и с глубокой лункой на нижней стенке (а) и многоблочные сетки для глубокой (б) и мелкой (в) лунок

Расчетная область разбивается блочными структурированными сетками с частичным перекрытием [1]. Первая декартовая сетка со сгущением к стенкам плоскопараллельного канала содержит $82 \times 54 \times 86$ ячеек. Пристеночный шаг сетки – 10^{-4} . Минимальные шаги сетки в окрестности лунки 0.08 и 0.07 соответственно в продольном и поперечном направлениях. Лунка сверху накрывается криволинейной, согласованной с контуром, сеткой (показана желтым цветом на рис.1), содержащей $131 \times 26 \times 58$ ячейку. Шаги сетки в продольном и поперечном направлениях в

окрестности лунки и в следе за ней равны 0.03. Высота подобласти, в которой располагается сетка, составляет 0.14. Острая кромка в расчетной модели скругляется с малым радиусом, равным 0.025. Для корректного расчета течения в окрестности скругленной острой кромки вводится специальная цилиндрическая сетка, содержащая $103 \times 19 \times 28$ ячеек. Шаг сетки в окрестности кромки составляет 2×10^{-3} .

На границах области задаются следующие условия: на стенках - условия прилипания, на выходной границе - мягкие граничные условия. Нижняя граница нагревается до температуры 100°C , а верхняя поддерживается при «комнатной» температуре 20°C . Боковые стенки теплоизолированные. Поток на входе имеет температуру 20°C . Ламинарное и турбулентное числа Прандтля составляют 0.7 и 0.9 соответственно. Степень турбулентности на входной границе принимается равной 1.5%, а масштаб турбулентности задается порядка диаметра лунки.

Модель турбулентности MSST корректируется с учетом поправки на кривизну линий тока в рамках подхода Роди-Лещинера [1] с введением дополнительной константы, подобранной из условия согласования расчетных и экспериментальных данных для ряда тестовых задач и равной 0.02.

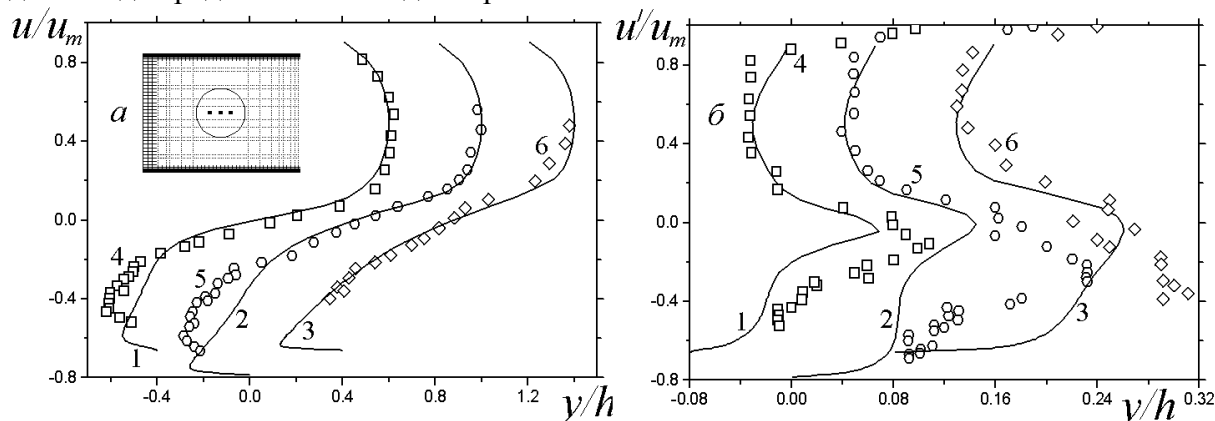


Рис.2. Сравнение расчетных (1-3) и экспериментальных (4-6) профилей продольной составляющей скорости (а) и ее пульсации (б) в поперечных сечениях канала с глубокой лункой. 1,4 - $x=-0.22$; 2,5 - 0; 3,6 - 0.22. Профили u/u_m и u'/u_m для первого и третьего сечения смещены влево и вправо на 0.4 и 0.08 соответственно.

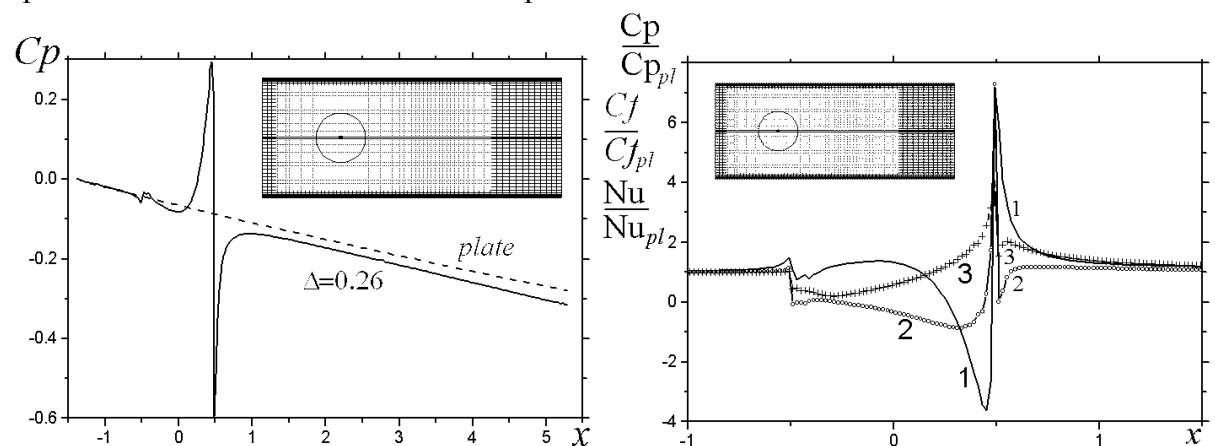


Рис.3. Распределение $C_p(x)$ (а) и профили относительных величин $C_p/C_{p,pl}$ (1), $C_f/C_{f,pl}$ (2), Nu/Nu_{pl} (3) вдоль канала с глубокой лункой (б)

На рис.2 - показаны некоторые из полученных результатов, причем большая часть расчетных результатов для канала с лункой сравнивается с аналогичными данными для гладкого канала.

В целом, можно отметить весьма удовлетворительное согласие рассчитанных и измеренных осредненных и пульсационных локальных характеристик турбулентного течения в канале с глубокой лункой (рис.2), что свидетельствует об адекватности расчетной и физической моделей.

Распределение давления вдоль канала носит регрессивный характер близкий к линейному закону(рис.3,*a*), как для гладкого канала, так и для канала с глубокой лункой. Однако в окрестности острой кромки ниже по потоку возникает значительный перепад давления, связанный с разрежением до кромки и резким повышением давления за ней (рис.3,*б*). Вся область лунки находится в области отрывного течения. Отрывная зона также возникает ниже по потоку за острой кромкой. Относительные тепловые потоки резко падают в подветренной части лунки и возрастают в наветренной. Пик нагрузок (четырекратное превышение) приходится на район острой кромки. В то же время за кромкой отмечается резкое падение относительной теплоотдачи, хотя она и двукратно превышает уровень для плоской стенки.

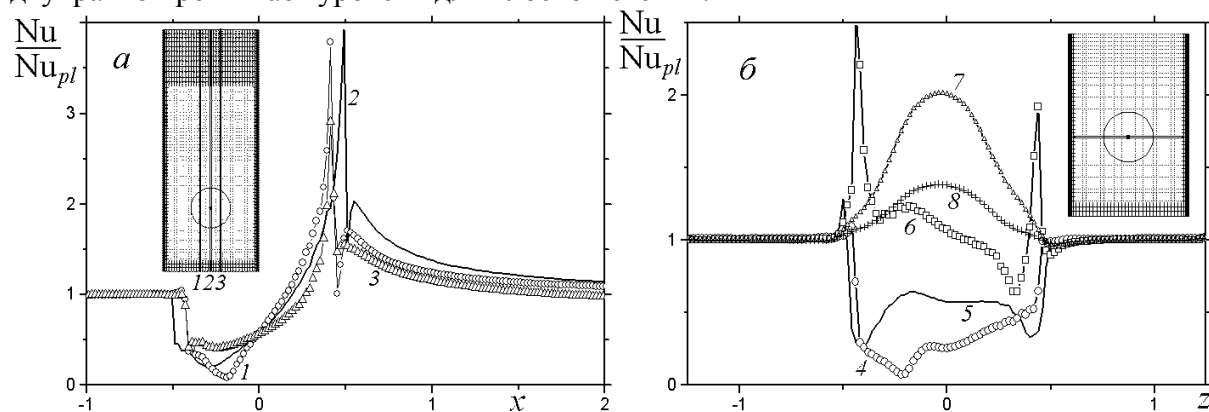


Рис.4. Распределения относительной локальной теплоотдачи в продольных (*a*) и поперечных (*б*) сечениях канала с глубокой лункой. 1– $z = -0.25$; 2–0; 3–0.25. 4– $x = -0.22$; 5–0; 6–0.22; 7–0.55; 8–1.

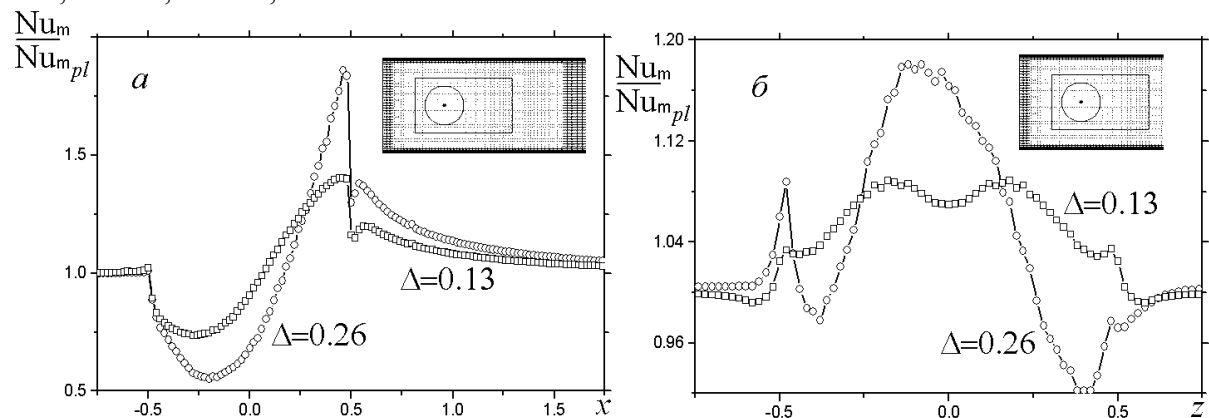


Рис.5. Распределения осредненной по площади выделенной области с лункой в продольном (*a*) и поперечном (*б*) направлениях для лунок различных глубин

Распределения относительной локальной теплоотдачи на нижней стенке канала в продольных и поперечных сечениях (рис.4) показывают существенную неравномерность в распределении теплоотдачи от нагретой поверхности лунки и в следе за ней. А вот с боковых сторон от лунки тепловые нагрузки однородны и практически не отличаются от аналогичных нагрузок в гладком канале.

Осредненные по площади поперечных и продольных полос выделенной области с лункой интегральные тепловые нагрузки, с одной стороны, коррелируют с локальными тепловыми нагрузками (в продольном направлении), а, с другой стороны,

позволяют оценить тепловую эффективность луночного рельефа (рис.5). Очевидно, что тепловая эффективность рельефа с лункой возрастает по мере ее углубления, причем симметричное распределение $Nu/Nu_{pl}(z)$ меняется на асимметричное. Следует отметить, что существует зона пониженных относительных интегральных тепловых нагрузок справа от центра лунки, скорее всего, обусловленная неравномерностью распределения локальных тепловых потоков на ее наветренной части (кривая б на рис.4).

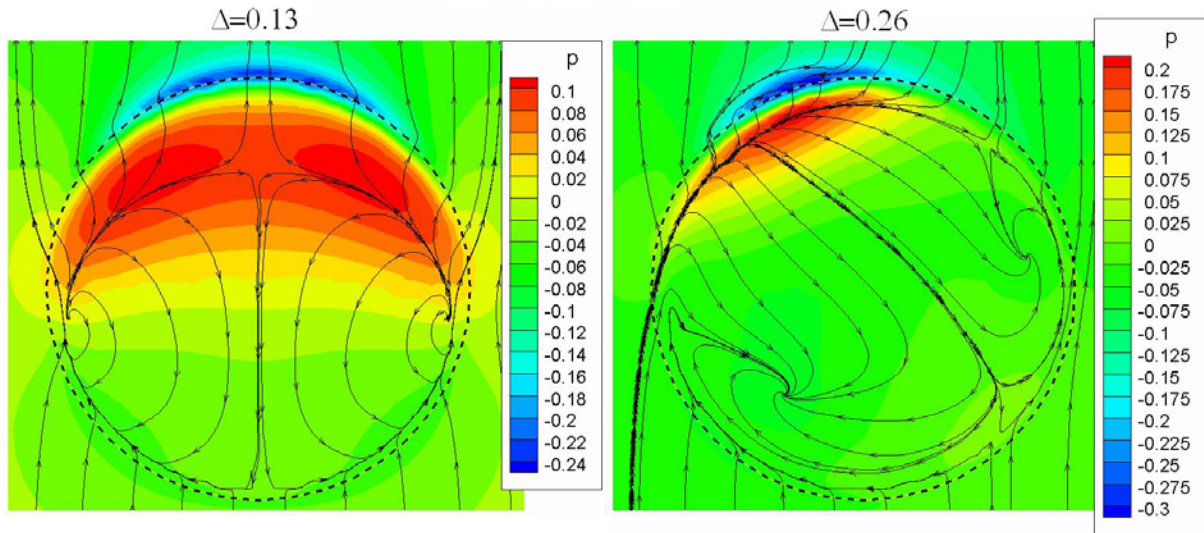


Рис.6. Сравнение картин растекания по стенкам лунки умеренной и большой глубины с нанесенными полями давления. Пунктиром показаны края лунки.

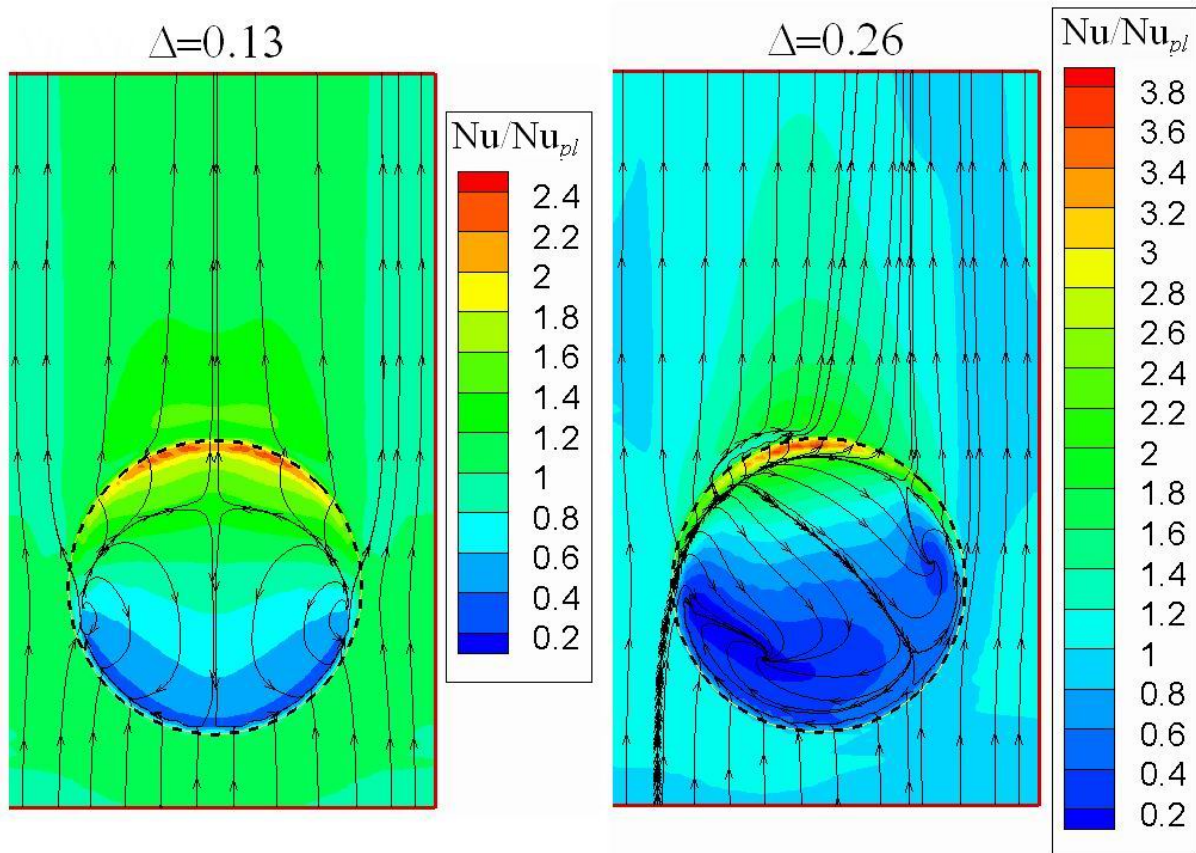


Рис.7. Сравнение картин растекания жидкости по стенке канала с лункой для умеренной (а) и большой (б) глубины с нанесенными полями Nu/Nu_{pl} . Пунктиром показаны края лунки.

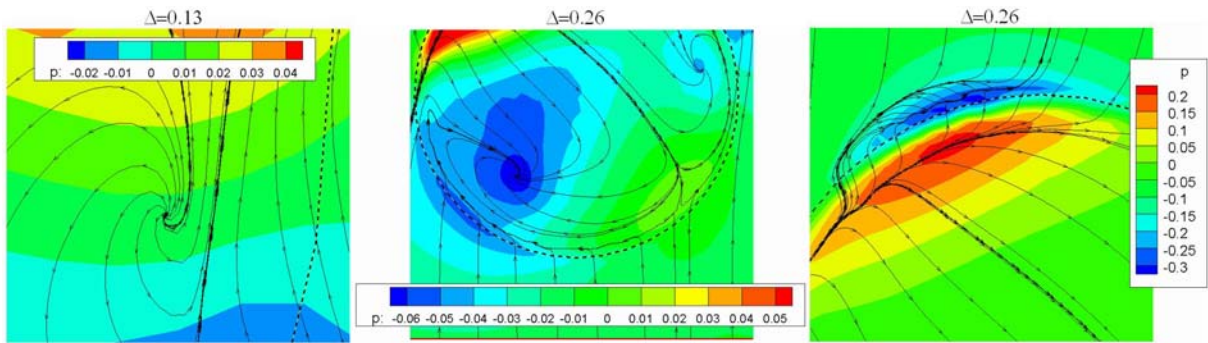


Рис.8. Особенности течения в окрестности особых точек в лунках умеренной и большой глубины. Пунктиром показаны края лунки.

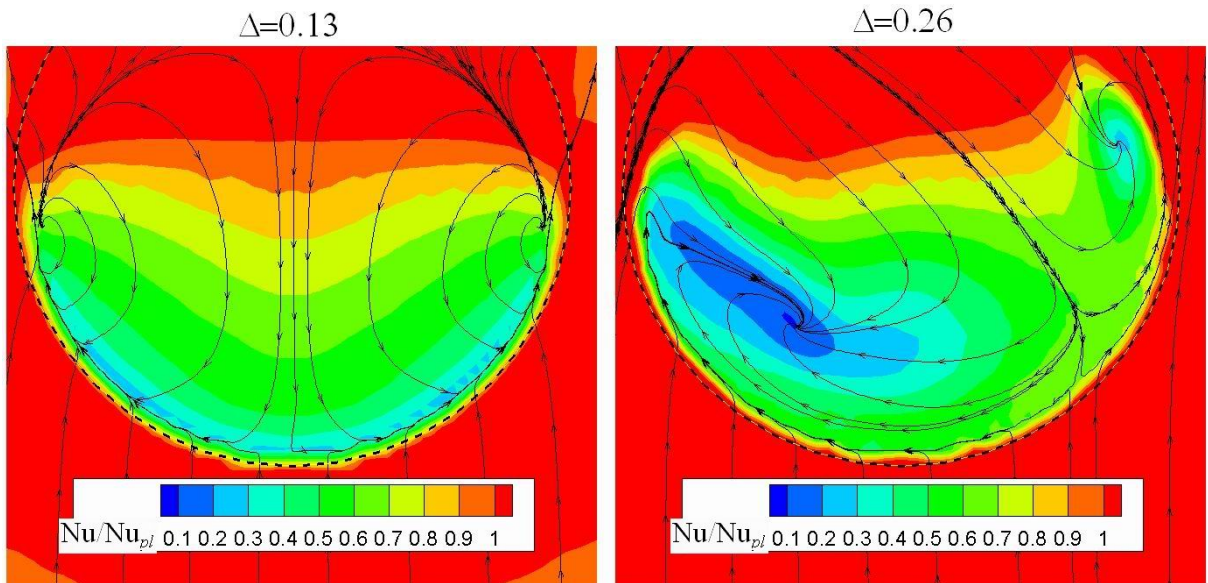
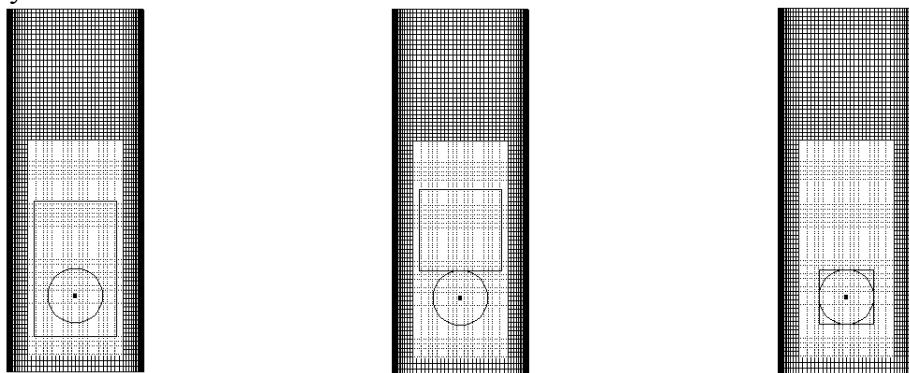


Рис.9. Особенности распределения тепловых потоков в окрестности лунок

Таблица 1

Сравнение интегральных теплогидравлических характеристик участков в канале со сферической лункой



Δ	Nu/Nu_{pl}	ζ/ζ_{pl}	$(Nu/Nu_{pl})/\zeta/\zeta_{pl}$	Nu/Nu_{pl}	ζ/ζ_{pl}	$(Nu/Nu_{pl})/\zeta/\zeta_{pl}$	Nu/Nu_{pl}	ζ/ζ_{pl}	$(Nu/Nu_{pl})/\zeta/\zeta_{pl}$
0.26	1.095	1.202	0.911	1.128	0.996	1.133	1.086	1.505	0.722
0.13	1.055	1.112	0.949	1.074	0.982	1.094	1.049	1.297	0.809

При двукратном увеличении глубины лунки от 0.13 до 0.26 симметричная картина растекания сменяется на асимметричную (рис.6-9), отрывная зона занимает

всю область лунки, зоны повышенного давления смещаются на край лунки, уровень силовых и тепловых нагрузок растет. Следует отметить, что для лунки умеренной глубины имеет место размыкание линий стекания, формирующих смерчевую структуру и ограничивающей влияние внешнего потока. В глубокой лунке в окрестности ножки смерча возникает зона пониженного давления, а за острой кромкой – зона возвратного течения (рис.8). Зоны пониженных по сравнению с гладким каналом тепловых нагрузок располагаются с подветренной стороны лунок, причем максимальное охлаждение имеет место в центре смерчеобразного вихря.

Собранные в таблице 1 теплогидравлические характеристики участков канала с лункой показывают, что несмотря на некоторое увеличение теплоотдачи от лунки и от ее ареала, наблюдается рост гидравлических потерь, существенно снижающий теплогидравлическую эффективность. В то же время в следе за лункой интенсификация теплообмена сопровождается локальным снижением гидравлического сопротивления. С целью проверки расчета гидравлических потерь в плоскопараллельном канале проведено сравнение численных прогнозов с оценочными характеристиками по справочнику Идельчика Е.И. [23]. Отклонение не превысило 3-5%.

Таким образом, тестовое исследование вихревого течения и теплообмена в узком канале с острокромочной сферической показывает приемлемость численных прогнозов, а также указывает на проблемы с теплогидравлическими характеристиками таких уединенных лунок.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проектам 08-08-00065 и 08-08-90001, а также по проекту DFG HA 2226/11-1.

Л и т е р а т у р а

1. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб, Судостроение, 2005.
2. Исаев С.А. Моделирование смерчевой интенсификации теплообмена около луночных рельефов (состояние и перспективы) // Тр. 4 Рос. нац. конф. по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. С.230 – 233.
3. Исаев С.А., Корнев Н.В., Харченко В.Б. Анализ смерчевой интенсификации теплообмена на облуненных стенках узких каналов. Тепловое проектирование // Тр. 4 Рос. нац. конф. по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. С.226 – 229.
4. Баранов П.А., Исаев С.А., Ключева О.Г., Стернин Л.Е. Численное моделирование интенсификации теплообмена в трактах двигательных установок при нанесении на стенки одного продольного ряда сферических и траншейных лунок // Тр. 4 Рос. нац. конф. по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. С.162 – 165.
5. Баранов П.А., Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е. Численное моделирование снижения аэродинамического нагрева рельефа со сферическими и сотовыми лунками при сверх-и гиперзвуковых скоростях // Тр. 4 Рос. нац. конф. по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. С. 158 – 161.
6. Isaev S.A., Leont'ev A.I., 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.

7. Isaev S.A., Leont'ev A.I., 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.
8. Isaev S.A., Leont'ev A.I., Frolov D.P., 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.
9. Isaev S.A., Leont'ev A.I., 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. N1. P.15-18.
10. Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A., Metov Kh.T., 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.
11. Isaev S. A., Leont'ev A. I., Baranov P. A., 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.
12. Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A., Usachov A.E. Bifurcation of vortex turbulent flow and intensification of heat transfer in a hole // *Doklady Physics*. 2000. V.45. No.8. P.389-391.
13. Isaev S.A., Leontiev A.I. Numerical simulation of vortex enhancement of heat transfer under conditions of turbulent flow past a spherical dimple on the wall of a narrow channel // *High Temperature*. 2003. Vol.41, N5. Pp.665-679.
14. Isaev S.A., Leontiev A.I., Kudryavtsev N.A., Pyshnyi I.A. The effect of rearrangement of the vortex structure on heat transfer under condition of increasing depth of a spherical dimple on the wall of a narrow channel // *High Temperature*. 2003. Vol.41. No.2. P.229-232.
15. Isaev S.A., Leontiev A.I., Kiknadze G.I., Kudryavtsev N.A., 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.
16. Isaev S. A., Leontiev A. I., Baranov P. A., Pyshnyi I. A., 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.
17. Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhdanov V.L. Simulation of tornado-like heat transfer at the flow passing a relief with dimples // *Heat Transfer 2002, Proceedings of the Twelfth Int. Heat Transfer Conf., Grenoble, 2002*. Vol.2. P.735-738.
18. Isaev S.A., Leontiev A.I., Mityakov A.V., Pyshnyi I.A., Usachov A.E. Intensification of tornado turbulent heat exchange in asymmetric holes on a plane wall // *J. Engineering Physics and Thermophysics*. 2003. Vol. 76. No. 2. P. 266-270.
19. 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.
20. Исаев С.А. Моделирование циклических и периодических вихревых течений и температурных полей с помощью многоблочных вычислительных технологий // *Тр.ХVI Шк.-сем. молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И.*

Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках”. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Т.1. С.57-61.

21. Elyuan M.A., Tafti D.R. LES investigation of flow and heat transfer in a channel with dimples and protrusions//Proc. GT2007 ASME Turbo Expo. 2007. N GT2007-27811.13p.
22. 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. Vol4. P.131-145.
23. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Машиностроение, 1992. 672с.