

3D-исследования теплообмена и гидродинамики в каналах при различном сочетании ребер и овально-траншейных лунок

Ю.Г. ГОРЕЛОВ,
канд. техн. наук
(НПП газотурбостроения
«Салют», Москва)
yury.dina@gmail.com

По результатам 3D-расчета в ANSYS CFX выявлены комбинации ребер и овально-траншейных лунок с максимальной теплоэнергетической характеристикой, интенсификацией теплообмена и минимальными коэффициентами трения.

Сдвоенные V-образные лунки с полусферическими выступами между ними, V-образные ребра, теплоэнергетическая характеристика

В настоящее время наиболее эффективными интенсификаторами теплообмена при умеренных числах Рейнольдса, характерных для теплообменников авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), являются лунки, состоящие из двух половин сферической лунки и цилиндрической вставки [1], овально-траншейные углубления большого удлинения [2], дискретная шероховатость [3], а при более высоких числах Рейнольдса, характерных для сопловых и рабочих лопаток турбин, – две V-образные лунки с полусферическими выступами между ними [4]. В то же время в каналах охлаждения рабочих и сопловых лопаток турбин ГТД и газотурбинных установок широко применяются наклонные [5] и V-образные ребра [6].

В связи с этим в настоящем исследовании проведено изучение теплоэнергетической эффективности сочетаний наклонных, V-образных ребер и овально-траншейных лунок, индуцирующих структуры вторичных течений с целью получения максимальной теплоэнергетической эффективности и интенсификации теплообмена в каналах охлаждения лопаток. Геометрия канала и граничные условия базировались на экспериментальных данных [7] (рис. 1).

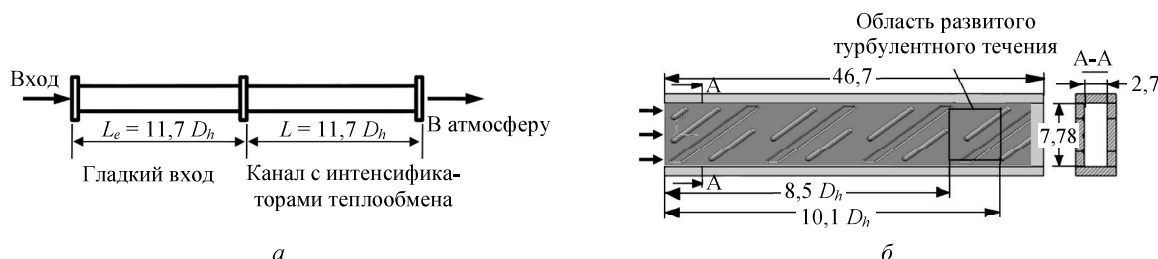


Рис. 1. Модели для исследования теплообмена и трения в каналах с комбинацией наклонных ребер и овально-траншейных лунок: а – модель с гладким входом; б – канал с интенсификаторами теплообмена

Контрольная пластина канала моделировалась как пластина с постоянной температурой на 330–400 К выше, чем температура воздуха. Расчеты выполнялись с использованием программы ANSYS CFX 17.2.

Сравнение методов интенсификации теплоотдачи [8] показало, что, по данным обобщения экспериментов из 271 работ, теплоотдача может превышать значения в гладком канале в 5–6 раз. Применение сферических лунок в каналах рабочих лопаток турбины ПАО «Кузнецов» (Самара) при умеренных температурах газа удовлетворяет требованиям потребной эффективности охлаждения, однако для повышенных температур газа по-прежнему актуальна задача обеспечения потребной эффективности охлаждения. Данная задача может быть решена с использованием комбинации наклонных ребер и овально-траншейных лунок с оптимальной теплоэнергетической характеристикой.

Расчетная методика, поиск адекватной модели турбулентности и геометрические характеристики интенсификаторов теплообмена

Число Рейнольдса рассчитывалось как $Re = \rho w D_h / \mu$, где ρ – плотность потока воздуха; w – среднерасходная скорость потока; D_h – гидравлический диаметр канала; μ – динамическая вязкость воздуха. Число Нуссельта определялось в виде $Nu = \alpha_b D_h / \lambda_b$. При разности между входным и выходным давлением участка с шероховатостью в виде лунок коэффициент сопротивления для канала рассчитывался из

уравнения $\zeta = (P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / (\rho V^2 / 2)$. Число Нуссельта, осредненное на рабочем участке, нормировалось относительно Nu_0 для гладкой трубы [9], коэффициент сопротивления сравнивался с коэффициентом сопротивления в гладкой трубе, полученным из уравнения Блазиуса. С учетом условий постоянной мощности на прокачку и зависимости [9] теплоэнергетическая характеристика геометрии лунок, полусфер и ребер определялась в соответствии с зависимостью $\eta = (Nu/Nu_0) / (\zeta/\zeta_0)^{1/3}$. Сетки для расчетного домена генерировались как тетраэдрические при использовании ANSYS ICEM. При создании тетраэдрической сетки у стенки канала и на поверхности лунок, полусферических выступов, ребер создавалось двадцать призматических слоев. На контролируемой стенке величина y^+ была меньше единицы при размере сетки 12...40 млн элементов.

Целью представленного исследования является получение максимальной интенсификации теплообмена, близкой или превышающей интенсификацию теплообмена V-образных ребер, однако с меньшими относительными коэффициентами сопротивления и максимальной теплоэнергетической характеристикой.

Комбинации исследуемых овально-траншейных лунок, наклонных и V-образных ребер представлены на рис. 2, геометрические характеристики исследуемых моделей каналов охлаждения – в таблице.

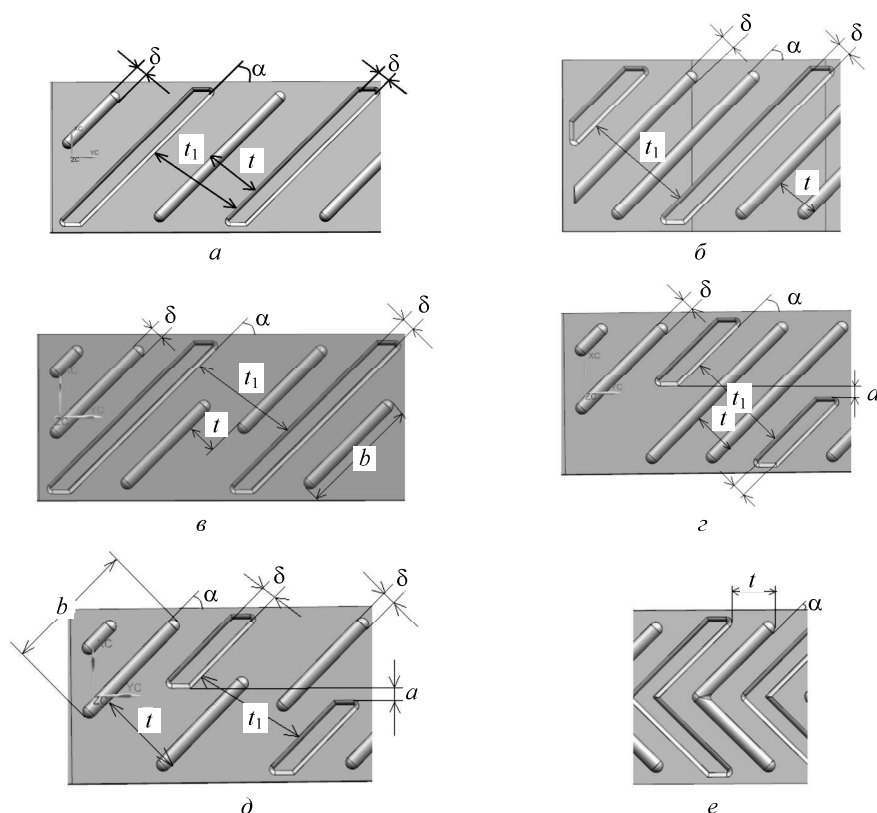


Рис. 2. Овально-траншейные лунки и сплошные ребра с одинаковым шагом (а); две овально-траншейные лунки между соседними сплошными ребрами (б); дискретные овально-траншейные лунки, сплошные ребра (в); сплошные овально-траншейные лунки, дискретные ребра (г); дискретные овально-траншейные лунки, дискретные ребра (д); V-образные ребра, V-образные лунки (е)

№ п/п	Наименование интенсификаторов теплообмена	t/h_p	t_1/h_p	d/D_h	α , град	a/h_p	b/D_h
1	Овально-траншейные лунки и сплошные ребра с одинаковым шагом	4,84	8,13	0,158	45	-	-
2	Дискретные овально-траншейные лунки, сплошные ребра	3,13				-	13,42
3	Дискретные овально-траншейные лунки, дискретные ребра					1,56	
4	Две овально-траншейные лунки между соседними ребрами					-	-
5	Сплошные овально-траншейные лунки, дискретные ребра					-	-
6	V-образные ребра, V-образные лунки	3,91	-			-	-

С учетом технологических ограничений для стенок лопаток турбин ГТД исследуемые наклонные овально-траншейные лунки выполнялись глубиной 0,22 мм, ребра – высотой 0,64 мм, толщина стенок моделей – 1,27 мм.

С целью демонстрации использования адекватной модели турбулентности для исследования овально-траншейных лунок в комбинации с наклонными ребрами применительно к наклонным ребрам [5] исследовалось несколько моделей турбулентности. Существенные отличия между измеренными и расчетными величинами получены для модели турбулентности $k-\epsilon$, при этом отличия для моделей турбулентности S-A, $k-\omega$ и SST являются незначительными. Минимальные отличия от экспериментальных значений [5] получены при использовании модели турбулентности S-A. В связи с этим сравнительные 3D-расчеты в канале для массива комбинаций лунок и наклонных ребер были выполнены с использованием модели турбулентности S-A.

Результаты 3D-сопряженного исследования

По результатам 3D-исследования на участке развитого турбулентного течения установлено, что для $Re < 31500$ максимальная интенсификация теплоотдачи получена для V-образных ребер (рис. 3). Для $Re = 31500 \div 70000$ интенсификация теплоотдачи V-образных ребер, V-образных лунок практически совпадает с интенсификацией теплоотдачи двух V-образных лунок с полусферическими выступами между ними и составляет максимальную величину. Превышение Nu/Nu_0 двух V-образных лунок с полусферическими выступами между ними по сравнению с двумя овально-траншейными лунками между соседними сплошными ребрами при $Re = 60000$ составило 23 %. При относительно низких числах $6800 < Re < 19500$ интенсификация теплоотдачи двух V-образных лунок с полусферическими выступами между ними ниже Nu/Nu_0 для наклонных и V-образных ребер.

На приведенных далее графиках комбинации лунок и ребер обозначены следующим образом: $\blacklozenge$ – дискретные овально-траншейные лунки, сплошные ребра; $\blacksquare$ – наклонные ребра [5]; $\triangle$ – сплошные овально-траншейные лунки, дискретные ребра; $\circ$ – овально-траншейные лунки, сплошные ребра с одинаковым шагом; — — — V-образные ребра, V-образные лунки; $\square$ – две V-образные лунки с полусферическим выступом между ними; $\bullet$ – две овально-траншейные лунки между соседними сплошными ребрами; * – двойные лунки на трех вершинах ветвей V-образных лунок; + – диффузорные лунки [4] (3D-расчет в ANSYS CFX); $\diamond$ – дискретные овально-траншейные лунки, дискретные ребра; $\blacktriangle$ – V-образные ребра [6]; $\diamond$ – V-образные лунки [7]; $\otimes$ – V-образные лунки (3D-расчет).

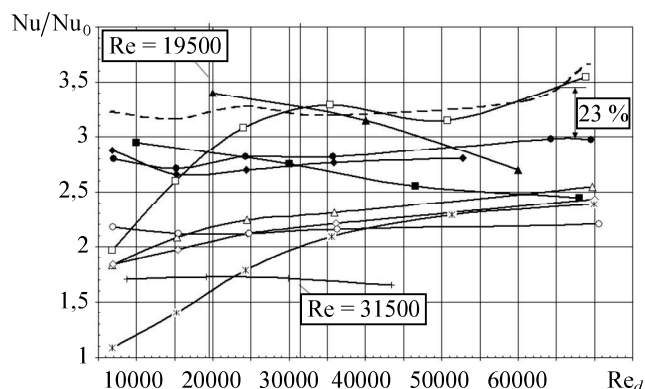


Рис. 3. Сравнение прогнозируемых в ANSYS CFD относительных чисел Нуссельта в канале с комбинацией наклонных ребер и овально-траншейных лунок с экспериментальными данными [5], [6] (участок развитого турбулентного течения)

На участке развитого турбулентного течения максимальное соотношение коэффициентов сопротивления при $Re < 65000$ получено для V-образных ребер, V-образных лунок (рис. 4), а при $Re > 65000$ – для экспериментальных данных в случае наклонных ребер [5].

При $Re > 12500$ максимальная теплоэнергетическая характеристика на участке развитого турбулентного течения получена для двух V-образных лунок с полусферическими выступами между ними, в ламинарной области при $Re < 12500$ максимальную теплоэнергетическую характеристику имеют дискретные овально-траншейные лунки, сплошные ребра (рис. 5). При $Re = 40000$ теплоэнергетическая характеристика двух V-образных лунок с полусферическими выступами между ними на 30 % превышает локальную теплоэнергетическую характеристику η_x для V-образных ребер, V-образных лунок, при $Re = 70000$ это преимущество уменьшается до 14 %.

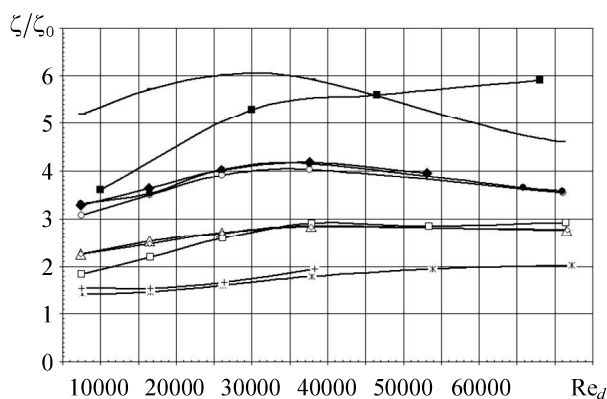


Рис. 4. Сравнение относительного гидравлического сопротивления ζ/ζ_0 , прогнозируемого в ANSYS CFX для канала с комбинацией наклонных ребер и овально-траншейных лунок (модели S–A), с экспериментальными данными для ζ/ζ_0 [5, 6] (участок развитого турбулентного течения)

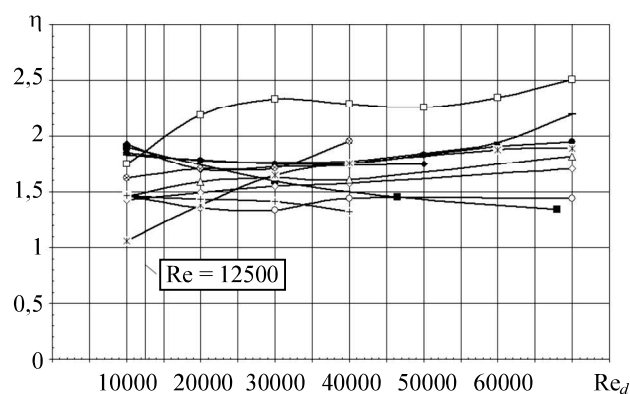


Рис. 5. Сравнение прогнозируемых в ANSYS CFX теплоэнергетических характеристик η для комбинации наклонных ребер и овально-траншейных лунок с экспериментальными данными [5, 6] (участок развитого турбулентного течения)

С целью подтверждения адекватности исследования локального теплообмена и трения для интенсификаторов теплообмена (см. рис. 1) в коротких гладких каналах, характерных для лопаток турбины, проводилась валидация теплообмена и трения для модели плоского гладкого канала в диапазоне Re_d , характерном для каналов охлаждения лопаток турбин. Проведенная валидация показала, что для $Re_d = 40000$ в исследуемой области с интенсификаторами теплообмена локальные числа Нуссельта Nu_x , полученные 3D-расчетом в ANSYS CFX, идентичны зависимости для короткой гладкой трубы и на 6 % ниже зависимости для короткого плоского канала [10]. При $Re_d = 70000$ зависимости $Nu_x = f(Re_x)$ и $Nu_x = f(x/D_h)$, полученные 3D-расчетом в ANSYS CFX, лежат между корреляциями для плоского канала и гладкой трубы [10]. При валидации коэффициентов трения в модели плоского гладкого канала в области чисел Re_x для исследуемой области с интенсификаторами теплообмена обнаружено, что отклонение от известной зависимости [10] составляет 3,6–6 %, что говорит об удовлетворительном согласовании экспериментальных и расчетных данных.

Сравнение локальной интенсификации теплообмена в зависимости от x/D_h вдоль канала для характерного в каналах охлаждения рабочих лопаток турбины числа $Re_d \approx 40000$, показало, что при $x/D_h < 20,2$ максимальная интенсификация локальной теплоотдачи в области с интенсификаторами теплообмена получена для V-образных ребер, V-образных лунок, и она выше, чем для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними, примерно в 1,5 раза (рис. 6).

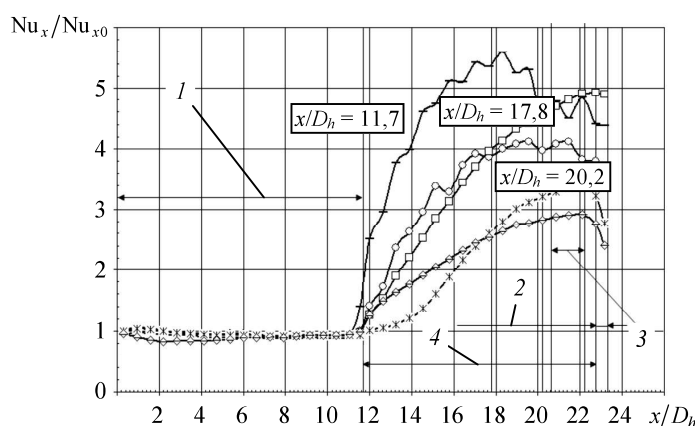


Рис. 6. Сравнение локальной интенсификации теплообмена в зависимости от x/D_h вдоль канала ($Re_d \approx 40000$): 1, 2 – гладкий канал перед интенсификаторами теплообмена и за ними; 3 – область развитого турбулентного течения; 4 – область с интенсификаторами теплообмена

Для $x/D_h < 20,2$ в области гарантированно развитого турбулентного течения интенсификация теплообмена для V-образных ребер, V-образных лунок практически совпадает с интенсификацией

теплоотдачи для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними. При этом в области $x/D_h = 11,7 \div 17,8$ интенсификация теплоотдачи для двух овально-траншейных лунок между соседними сплошными ребрами незначительно превышает локальную теплоотдачу для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними. Наибольшие локальные коэффициенты сопротивления получены для V-образных ребер, V-образных лунок, они заметно превышают коэффициенты сопротивления для других исследованных интенсификаторов теплообмена (примерно в 2,7 раза превышают ζ_x для двух овально-траншейных лунок между соседними сплошными ребрами). Максимальная локальная теплоэнергетическая характеристика получена для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними, несколько ниже η_x для двойных лунок на трех вершинах ветвей V-образных лунок (рис. 7).



Рис. 7. Сравнение локальной теплоэнергетической характеристики различных модификаций лунок и полусферических выпуклостей при $Re_d = 40000$ (модель S–A)

Локальная теплоэнергетическая характеристика для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними превышает η_x для двойных лунок на трех вершинах ветвей V-образных лунок при $x/D_h = 18,3$ на 34 %, в области развитого турбулентного течения – на 22–46 %. Сравнение локальной интенсификации теплоотдачи для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними и V-образных ребер, V-образных лунок при $Re_d \approx 40000$ на участке развитого турбулентного течения и за ним показало, что, несмотря на примерно одинаковую максимальную величину Nu_x/Nu_{x0} для этих типов интенсификаторов, площадь максимальных величин Nu_x/Nu_{x0} за последней лункой больше для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними, причем эта площадь увеличивается при продвижении от входа в участок развитого турбулентного течения к выходу из него. Зоны повышенной интенсификации теплоотдачи за двумя V-образными лунками с полусферическим выступами между ними увеличиваются по мере продвижения к выходу из канала (рис. 8). Применение двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними позволяет создавать более равномерную вихревую структуру в области между двумя V-образными лунками с полусферическими выступами между ними, используя в двух V-образных лунках с полусферическим выступом между ними конфузорно-диффузорный эффект при переходе теплоносителя из лунки в область над полусферой и далее вновь – в лунку. Аналогичная картина получена для двух наклонных овально-траншейных лунок между соседними наклонными ребрами при меньших максимальных величинах Nu_x/Nu_{x0} . При этом области с максимальными величинами Nu_x/Nu_{x0} для двух овально-траншейных лунок между соседними ребрами существенно меньше, чем для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними. Сравнение локальной теплоэнергетической характеристики для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними и V-образных ребер, V-образных лунок на участке развитого турбулентного течения и за ним показало, что максимальная теплоэнергетическая характеристика η_x двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними выше, чем для V-образных ребер, V-образных лунок (рис. 8, 9).

Кроме того, области с более высоким значением теплоэнергетической характеристики ($\eta_x \approx 2,2 \div 2,7$) больше, чем для V-образных ребер, V-образных лунок. Сравнение локальной теплоэнергетической характеристики для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними и двух овально-траншейных лунок между соседними сплошными ребрами также показало, что максимальная теплоэнер-

гетическая характеристика двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними выше η_x для двух овально-траншейных лунок между соседними сплошными ребрами. Области с более высокой теплоэнергетической характеристикой существенно больше, чем для двух овально-траншейных лунок между соседними сплошными ребрами. Более интенсивные пристенные вихревые структуры получены для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними, особенно за второй лункой, по сравнению с V-образными ребрами, V-образными лунками и двумя овально-траншейными лунками между соседними сплошными ребрами. Визуализация вихревых структур в продольной плоскости каналов показала более частое их расположение с более низкой скоростью у поверхности канала с двумя V-образными лунками с полусферическим выступом между ними. Установлено, что за последней из двух V-образных лунок образуется зона повышенной интенсификации теплоотдачи, связанная с образованием дополнительной вихревой структуры 1 (рис. 10, з), генерируемой непрерывно во времени. Мощность и интенсивность этих вихревых структур во многом определяется наличием микроотрывов и микропульсаций в пристенном слое возвратного потока 2 в лунках (см. рис. 10, з). В срединной поперечной плоскости рассматриваемых моделей, особенно в области развитого турбулентного течения ближе к выходу из канала, более высокие скорости получены для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними по сравнению с V-образными ребрами, V-образными лунками и двумя овально-траншейными лунками между соседними сплошными ребрами, что подтверждает наличие более интенсивных пристенных вихревых структур для этого интенсификатора теплообмена.

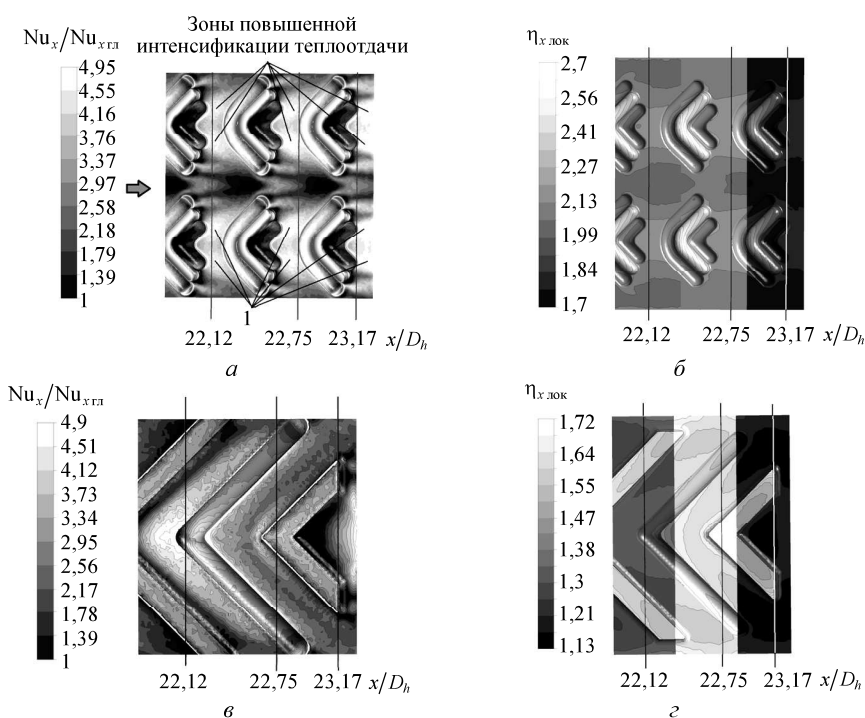


Рис. 8. Сравнение локальной интенсификации теплоотдачи и теплоэнергетической характеристики для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними (а, б) и V-образных ребер, V-образных лунок (в, г) при $Re_d \approx 40000$

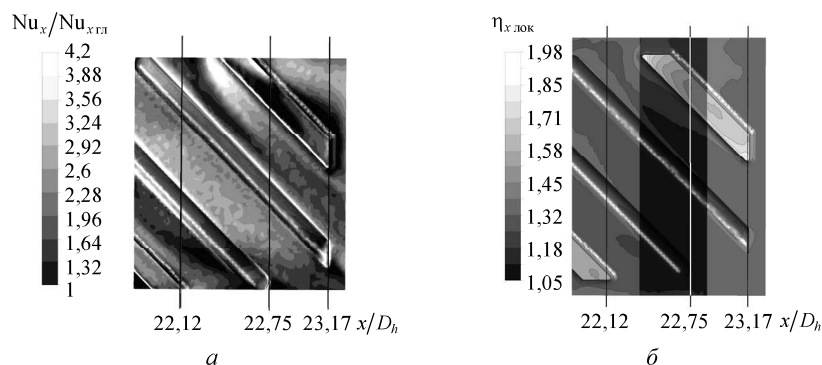


Рис. 9. Локальная интенсификация теплоотдачи (а) и теплоэнергетическая характеристика двух овально-траншейных лунок между соседними сплошными ребрами (б) при $Re_d \approx 40000$

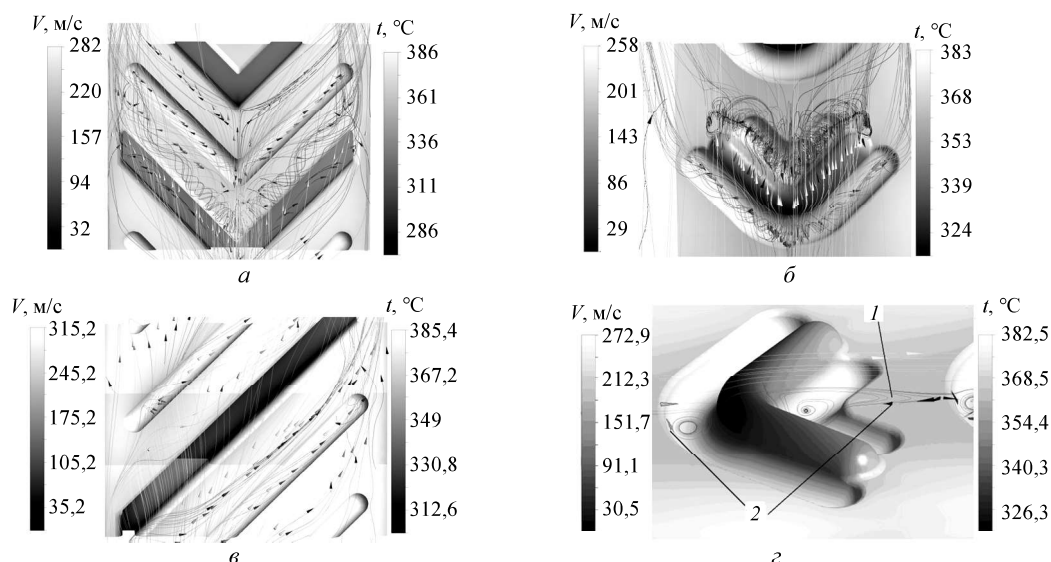


Рис. 10. Сравнение крупномасштабных вихревых структур для V-образных ребер, V-образных лунок (а), двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними (б, в) и с двумя овально-траншейными лунками между соседними сплошными ребрами (г) при $Re_d \approx 40000$ (стрелками показаны скорости, на внутренней поверхности модели – изолинии температур)

В области развитого турбулентного течения ближе к выходу из канала более высокие скорости получены для двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними по сравнению с V-образными ребрами, а также получены более значительные области с низкой температурой воздуха. Исследование распределения линий тока, температуры воздуха в поперечных плоскостях и на нижней поверхности канала показали существование значительной завихренности в канале как в сечениях между V-образными лунками, так и в самих сечениях лунок (рис. 11). Можно видеть парные подковообразные структуры, «затягивание» основного потока воздуха в зоны вблизи поверхности. По мере продвижения к выходу увеличивается высота вихревых структур, их поверхность, при этом вихри становятся более плотными. У поверхности канала с двумя V-образными лунками с полусферическим выступом между ними получены более плотные низкоскоростные вихревые структуры с более низкой температурой воздуха, чем для V-образных ребер, V-образных лунок.

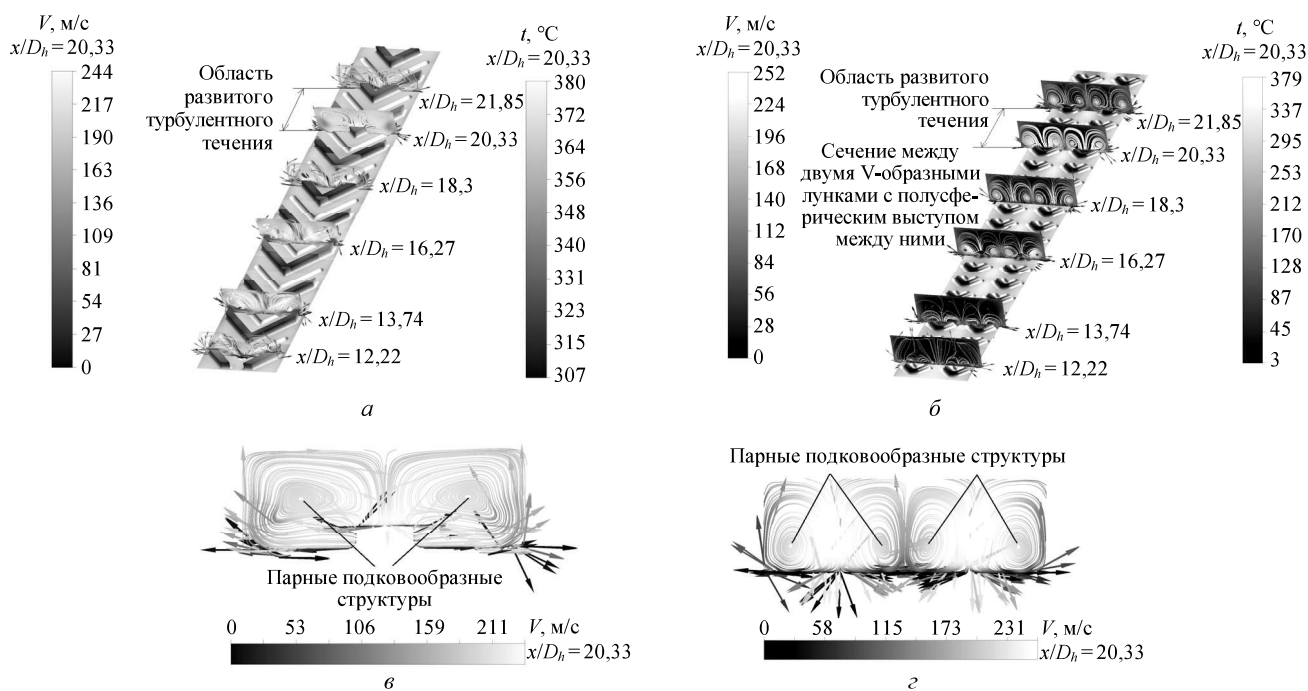


Рис. 11. Распределение линий тока (скоростей) и температур воздуха в поперечных плоскостях и на внутренней поверхности канала при $Re_d \approx 40000$ для V-образных ребер, V-образных лунок (а, в) и двух V-образных лунок с полусферическим выступом между ними (б, г) в сечении модели $x/D_h = 20,33$ (стрелками показаны скорости, на внутренней поверхности модели и в сечениях – изолинии температур)

Установлено, что в двух V-образных лунках с полусферическим выступом между ними за последней из двух V-образных лунок образуется зона повышенной интенсификации теплоотдачи, связанная с образованием дополнительной вихревой структуры и пониженной температурой воздуха в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев С.А. и др. Численное моделирование смерчевой интенсификации теплообмена в узком канале с овальными лунками на нагретой стенке при прокачке воды // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. № 1(12). С. 410–419.
2. Щелчков А.В. Физическое и численное моделирование интенсификации теплообмена поверхностными генераторами вихрей в трактах систем охлаждения: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. 65 с.
3. Попов И.А., Щелчков А.В., Яржаев М.З. Теплогидравлические характеристики дискретно-шероховатых труб на переходных режимах течения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 61–65.
4. Горелов Ю.Г., Назаров А.А. 3D-сравнительные исследования теплообмена и трения в каналах с модифицированными V-образными лунками и выпуклостями // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тр. 22-й Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева, г. Москва, 20–24 мая 2019. М.: Печатный салон «Шанс», 2019. С. 61–65
5. Wright L.M., Gohardani A.S. Effect of Turbulator Width and Spacing on the Thermal Performance of Angled Ribs in a Rectangular Channel (AR = 3:1) // Proc. of the 12th International Symposium on Measurement and Modeling of Environmental Flows. 2008. Vol. 10. P. 1103–1113.
6. Wright L.M., Gohardani A.S. Effect of Coolant Ejection in Rectangular and Trapezoidal Trailing Edge Cooling Passages // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2009. Vol. 23. Iss. 2. P. 316–326.
7. Jordan C.N., Wright L.M. Heat Transfer Enhancement in a Rectangular (AR = 3:1) Channel with V-shaped Dimples // Proc. of ASME Turbo Expo, June 6–10, 2011, Vancouver, Canada. Paper № GT2011-46128. P. 1505–1516.
8. Ligrany Ph. Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling of Turbine Components of Gas Turbine Engines // International Journal of Rotating Machinery. 2013. Vol. 2013. P. 1–32.
9. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. Л.– М.: Госэнергоиздат, 1959. 414 с.
10. Сукомел А.С., Величко В.И., Абросимов Ю.Г. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах. М.: Энергия, 1979. 216 с.

Поступила в редакцию 17.10.19

После доработки 21.10.19

Принята к публикации 22.10.19

3D Investigations of Heat Exchange and Hydrodynamics in Channels with Different Combinations of Ribs and Oval Trench Dimples

YU.G. GORELOV

Salyut Gas Turbine Engineering Research and Production Center, Moscow

As a result of 3D calculation in the ANSYS CFX software, combinations of ribs and oval trenches are revealed of the maximal thermal performance, intensification of heat exchange, and minimal drag coefficients.

Doubled V-shaped dimples with hemispherical protrusions between them, V-shaped ribs, thermal performance