

Численное исследование теплоотдачи в каналах с неглубокими подковообразными лунками

¹ А.А. Цынаева <a.tsinaeva@rambler.ru>

² С.Е. Разоренов <razserg@list.ru>

¹ В.В. Белая <bonyparkery@gmail.com>

¹ ФГБОУ ВО СамГТУ,

443010, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, дом 244

² АО Транснефть-Приволга, Самарское РНУ,

443020, Россия, г. Самара, ул. Ленинская, дом 100

Аннотация. Работа посвящена численному исследованию теплоотдачи в прямоугольных каналах с односторонним нанесением неглубоких лунок. Математическое моделирование выполнено на базе уравнения Навье-Стокса, уравнения неразрывности, уравнения энергии. Для замыкания системы уравнений использована k-w-sst модель турбулентности. Численное решение получено с помощью программного пакета Code Saturne, распространяемого на основе свободной лицензии. Для построения сетки использовался программный пакет Salome. В работе рассмотрены вопросы верификации получаемого численного решения. На базе выполненного численного исследования проведена оценка теплогидравлической эффективности неглубоких лунок различной конфигурации для прямоугольных каналов с односторонним нанесением неглубоких лунок.

Ключевые слова: свободное программное обеспечение, численное моделирование, аэродинамика, теплообмен, лунки.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-16

Для цитирования: Цынаева А.А., Разоренов С.Е., Белая В.В. Численное исследование теплоотдачи в каналах с неглубокими подковообразными лунками. Труды ИСП РАН, том 29, вып. 5, 2017 г., стр. 329-344. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-16

1. Введение

При разработке теплообменных аппаратов на основе перспективных методов интенсификации теплообмена [1] численное моделирование является способом снижения временных и материальных затрат на проектирование. В настоящее время для численного решения таких научно-технических задач широко

применяются программные комплексы OpenFoam и Code_Saturne, распространяемые на базе свободной лицензии [2,3].

Следует отметить, что программные комплексы со свободной лицензией [2,3] имеют открытый код, и могут быть как с графическим интерфейсом, так и без него. При этом каждый пользователь подбирает такой программный комплекс, который соответствует его запросам и возможностям.

Основной задачей создания перспективных теплообменных аппаратов является разработка таких методов интенсификации теплообмена, для которых рост гидравлического сопротивления будет не столь значительным [1,4,5]. К таким методам следует отнести использование выемок различной конфигурации: сферические, траншейные, двухполостные, гантелеобразные лунки и т.д. [4-7]. Для сравнения параметров выемок обычно используется соотношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту гидравлического трения, определяющее теплогидравлическую эффективность поверхности теплообмена. Использование математического моделирования позволяет снизить число экспериментальных испытаний и оценить эффективность предлагаемых решений на стадии проектирования. При этом разработка новых решений может осуществляться не только с привлечением программных комплексов на базе свободной лицензии [2,3,8], но и с использованием облачных сервисов [9].

Программный комплекс Code_Saturne [2], выбранный авторами в качестве инструмента исследования, изначально разрабатывался с целью решения задач гидродинамики и теплообмена для энергетического оборудования атомных станций [2]. При этом, имеющийся в нем математический аппарат, возможно использовать и при исследовании систем обеспечения микроклимата и их элементов [10], при исследовании естественной конвекции [11], при разработке перспективных теплообменных аппаратов [12,13]. Кроме того, согласно документации, этот программный продукт может использоваться для численного исследования атмосферных течений, электромагнитных явлений и двухфазных потоков [2].

2. Формулировка задачи, расчетные сетки

Работа посвящена численному исследованию течения и теплообмена в прямоугольном канале с двумерными подковообразными лунками относительной глубиной $h/D < 0.15$, где h – глубина лунки, D – диаметр лунки. Такие лунки считаются неглубокими [4]. В качестве рабочего тела задан воздух.

2.1 Математическая модель

Математическое моделирование течения и теплообмена выполнено в программном комплексе Code_Saturne с помощью RANS подхода. Математическая модель включала в себя уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнение сохранения количества движения

(Навье-Стокса), уравнение энергии, уравнение состояния. Проекция на координатные оси x, y, z уравнения движения в форме Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]; \\ \rho \frac{dv}{dt} = g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]; \\ \rho \frac{dw}{dt} = g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right]. \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность; u, v, w – проекции вектора скорости потока на оси x, y, z ; t – время; g_x, g_y, g_z – проекции вектора внешней массовой силы на координатные оси; P – давление; μ – коэффициент динамической вязкости;

Уравнение неразрывности в виду отсутствия при решении поставленной задачи источников массы принимает вид:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\text{div}(\underline{q''}) + q''' - P \text{div}(\vec{V}) + S, \quad (3)$$

где e – внутренняя энергия; $\underline{q''}$ – вектор потока теплоты, равный $\underline{q''} = -\lambda \nabla T$ [2,14]; $q''' = 0$ – тепловая мощность внутренних источников теплоты; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура.

Диссипативная функция S определяется выражением [2,14]:

$$S = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\}, \quad (4)$$

Так, как в качестве рабочего тела рассматривался воздух, то уравнение состояния принимало вид уравнения Менделеева-Клайперона [14]:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{R_m}{m_g} \cdot T, \quad (5)$$

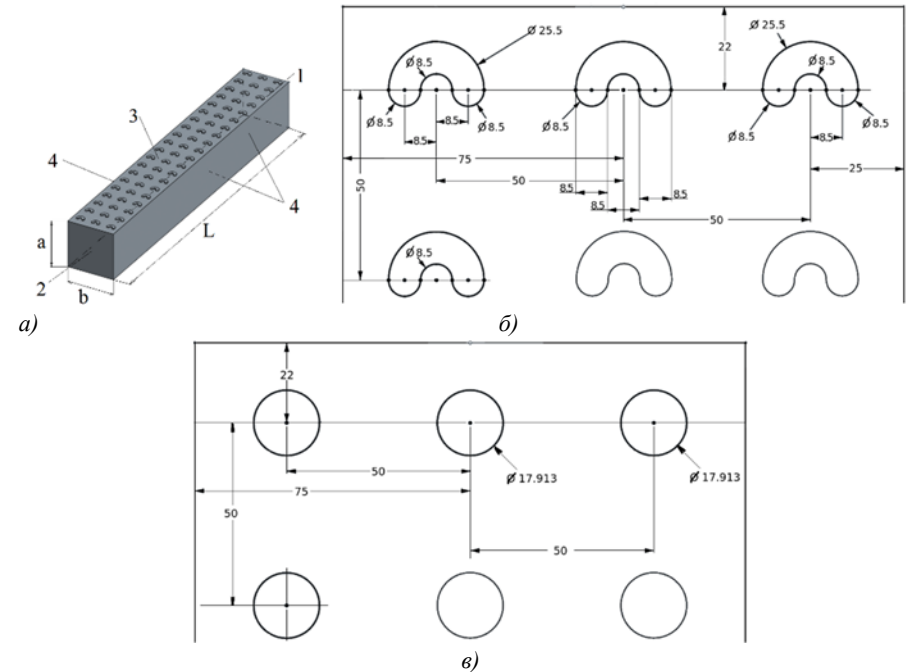
где R_m – универсальная газовая постоянная; m_g – молекулярная масса газа.

В RANS подходе для замыкания дифференциальных уравнений была использована $k-\omega$ *sst* модель турбулентности [15], выбор которой обусловлен опытом численных исследований авторов, а также по результатам анализа работ [6,10,11,12,13,16].

Численное решение получено методом конечных объемов, в рамках которого уравнения интегрируются по каждому контрольному объему Ω_i сетки [2].

2.2 Условия моделирования и характерные масштабы задачи

Численное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в канале подковообразными лунками выполнено для прямоугольного канала (рис. 1) сечением $a \times b = 150 \times 150$ мм и длиной $L = 1000$ мм. Одна из стенок канала имеет подковообразные лунки с относительной глубиной $h/D = 2/17,913 = 0,111 < 0,15$, площадь пятна лунки составляет 252.02 мм^2 . Расположение лунок на стенке – коридорное, в три ряда, продольный и поперечный шаг между лунками составляет 50 мм. Количество лунок в одном ряду по длине канала составляет 20 шт, на стенке лунки выполнены в три ряда. На рис. 1 также представлены геометрические характеристики лунок и их размещение на поверхности канала относительно друг друга.



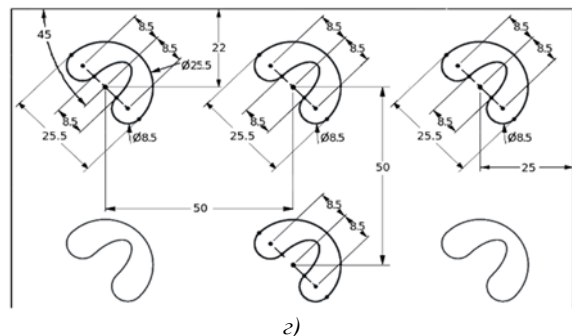


Рис. 1. Конфигурация канала и выемок на его поверхности канала: (а) общий вид расчетной области: 1 – вход; 2 – выход; 3 – обогреваемая стенка канала с неглубокими лунками; 4 – необогреваемые стенки канала без лунок; (б) простые подковообразные 2d лунки; (в) цилиндрические лунки; (г) подковообразные наклоненные к потоку на 45 градусов 2d лунки

Fig. 1. Configuration of the channel and notches on its channel surface: (a) general view of the calculation area: 1 - input; 2 - output; 3 - heated channel wall with shallow wells; 4 - unheated canal walls without holes; (b) simple horseshoe-shaped 2d wells; (c) cylindrical wells; (d) horseshoe-shaped inclined to the flow at 45 degrees 2d wells

Для анализа эффективности разработанной конструкции подковообразной лунки проводилось сравнение параметров с показателями теплообмена и трения для канала с цилиндрическими лунками той же площади пятна и глубины.

Описание условий моделирования, в том числе граничных условий: на входе в канал задавалась скорость потока ($\bar{u}_{00} = 1; 5; 10$ м/с), направленная по нормали, на выходе из канала заданы условия свободного истечения в окружающую среду, стенки канала полагались гладкими, на обогреваемой стенке с лунками задавались условия второго рода, тепловой поток к обогреваемой стенке (поз. 3, рис. 1, а) $q_w = 500$ Вт/м², на необогреваемых стенках (поз. 4, рис. 1, а) $q_w = 0$. Расчет проведен при критерии Рейнольдса $Re_l = 11278$, $Re_l = 56390$, $Re_l = 112782$, l – гидравлический диаметр прямоугольного канала $l = 2ab/(a+b)$, В качестве рабочего тела принят воздух, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 13,28 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $c_p = 1005$ Дж/кг, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Так как по предварительной оценке произведение критериев $Gr \cdot Pr > 10^6$, то влияние внешних массовых сил необходимо учитывать [17]. Эта оценка была в дальнейшем подтверждена в результате численного исследования. Плотность потока определяется температурой в соответствии с уравнением (5). Задание граничных условий осуществлялось в программном комплексе Code_Saturne.

2.3 Дискретизация расчетной области

Построение сетки было выполнено с помощью открытой интегрируемой платформы Salome [8]. Для создания 3-d элементов использовался алгоритм Tetrahedron (3D), параметры определялись по Netgen 3D Parameters: Netgen 1D-2D с минимальным размером 0,002, максимальным размером 0,005. Кроме того, вблизи стенки с неглубокими лунками выполнялось дополнительное сгущение сетки, на поверхности стенки сетка выполнялась из треугольных элементов [6]. На рис. 2 представлен анализ зависимости времени дискретизации t_{gen} расчетной области и времени получения решения t_{num} от количества ячеек N_{el}

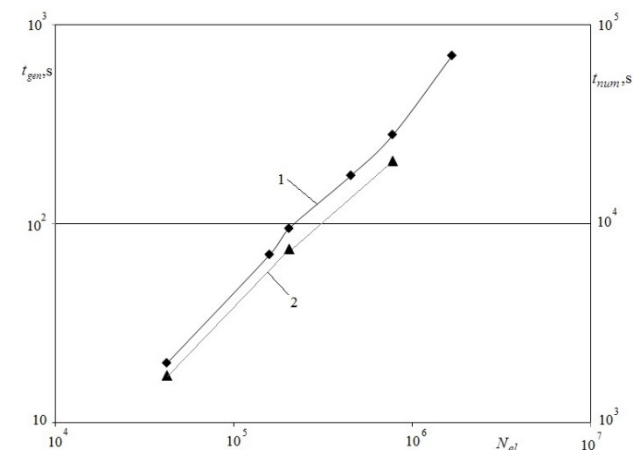


Рис. 2. Характеристика дискретизации расчетной области: 1 – затраты времени на дискретизацию расчетной области; 2 – затраты времени на получение численного решения

Fig. 2. Characterization of the discretization of the computational domain: 1 - the time spent on the sampling area; 2 - the time required to obtain a numerical solution

Размеры ячеек определялись из соотношения времени дискретизации и времени получения численного решения при сохранении приемлемой точности расчета [6], что основано на имеющемся у авторов опыте численного моделирования задач подобного типа (см. работу [6]). Исследование сеточной сходимости при моделировании течения в прямоугольном канале с неглубокими лунками по одной из стенок выполнено одним из авторов (Цынаевой А.А.) в работе [6]. В результате исследования сеточной сходимости в работе [6] выявлено, что при $N_{el} = 700000$ дальнейшее увеличение количества расчетных ячеек сетки не влияет на качество получаемого решения. При количестве ячеек $N_{el} < 500000$ наблюдаются флуктуации скорости потока в пристеночной области [6]. Результаты этого исследования докладывались на 334

конференции OpenClouds 2015, организованной ИСП РАН (г. Москва, дек. 2015 г.). В этой связи, в данной работе представлены результаты моделирования для прямоугольного канала с неглубокими лунками для сетки с $N_{el} = 776904$ объемных элементов. Удельное количество ячеек на длину расчетной области составило $n_{el} = N_{el}/L = 776904/1 = 776904$.

Граничные условия задавались с помощью инструментария программного пакета Code Saturne [2,6] и описаны ранее. В работе использовался графический интерфейс программного пакета Code Saturne [2,6], вычисления производились на компьютере со следующими характеристиками: Intel Core i5, четыре ядра, 4 Гб, 2,6 ГГц. Для разрешения поля давления использовалась схема Multigrid, также, как в работе [6], для поля температуры и для скорости, для кинетической энергии турбулентных пульсаций и для ω , применены автоматические настройки, максимальное количество итераций по каждому циклу задано равным 10000, точность решателя определялась величиной равной 10^{-8} . Схема Multigrid базируется на применении последовательности уменьшающихся сеток, а также операторов, позволяющих осуществлять переход от одной сетки к другой. Численное решение получено итерационным методом, шаг по времени определялся в зависимости от скорости течения, продолжительность численного эксперимента определялась временем трехкратного прохождения рабочего тела в канале, максимальное значение числа Куранта принималось равным пяти. Максимальный шаг по времени был определен из следующего выражения:

$$\Delta \tau_{\max} = \frac{\Delta l \cdot Cr}{u_{00}}, \quad (11)$$

где Δl – линейный размер ячейки расчетной сетки; u_{00} – скорость потока на входе в канал; Cr – число Куранта. Максимальное значение числа Куранта ограничено величиной $Cr = 5$. Это определяется с тем, что для связанного решения уравнений баланса импульса и неразрывности был применен алгоритм SIMPLEC [2].

3. Проверка адекватности

Проверка адекватности численного решения выполнялась путем сравнения результатов математического моделирования с экспериментальными исследованиями.

Во-первых, проводилось сравнение рассчитанных и экспериментально определенных аэродинамических характеристик для течения в канале с неглубокими гантелеобразными лунками. Эксперименты проводились на базе аэродинамической трубы кафедры «Теплогазоснабжения» ФГБОУ ВО СамГТУ. Результаты сравнения экспериментальных и модельных аэродинамических характеристик опубликованы авторами в работах [18,19]. При сравнении аэродинамических характеристик потока расхождение

расчетных и экспериментальных значений находилось в пределах погрешности эксперимента [18,19].

Для проверки качества решения при наличии теплообмена проведено сравнение рассчитанных и экспериментально определенных характеристик теплообмена в узком прямоугольном канале с неглубокими цилиндрическими лунками при различных параметрах течения. В этом случае, были использованы эксперименты КНИТУ им. Туполева-КАИ (г. Казань) [20].

Эксперимент в КНИТУ им. Туполева-КАИ (г. Казань) [20] был выполнен для щелевого канала с сечением $a \times b = 2 \times 96$ мм и длиной $L = 196$ мм, лунки цилиндрические с острой кромкой с $h = 1,6$ мм, $D = 16$ мм, $h/D = 0.1$, расположены выемки в шахматном порядке с шагом 8 мм, рабочее тело – воздух, $Re_l = 200...20000$. В работе [20] также представлен результат обобщения по критериальной зависимости экспериментальных данных КНИТУ им. Туполева-КАИ по теплоотдаче для каналов с цилиндрическими выемками при $Re_l = 2500...20000$:

$$Nu = 0.0164 \cdot Re_l^{0.85} \cdot (h/D)^{0.07}, \quad (12)$$

Nu – критерий Нуссельта, $Nu = \alpha' \cdot l / \lambda$; α' – коэффициент теплоотдачи; l – характерный размер, м; λ – коэффициент теплопроводности рабочего тела.

Так как эти результаты не были авторами опубликованы ранее, то сравнение расчетных и экспериментальных характеристик теплообмена представлено на рис. 3. Анализируя, представленные на рис. 3 результаты, следует отметить, что наблюдается достаточно качественное соотношение результатов расчета с экспериментальными данными, но имеются и некоторые расхождения.

При $Re_l = 3000$ расхождение не превышает 10 процентов, далее расхождение увеличивается, но при $Re_l = 12000$ вновь снижается. Такое рассогласование данных связано, по-видимому с тем, что при $2300 < Re_l < 10000$ режим течения является переходным. Однако расхождение не превышает 25 процентов. В этой связи, численное исследование теплообмена в канале с неглубокими подковообразными лунками ограничено результатами для развитого турбулентного режима течения при $Re_l \gg 10000$, как наиболее распространенного, по мнению авторов, для теплообменных аппаратов.

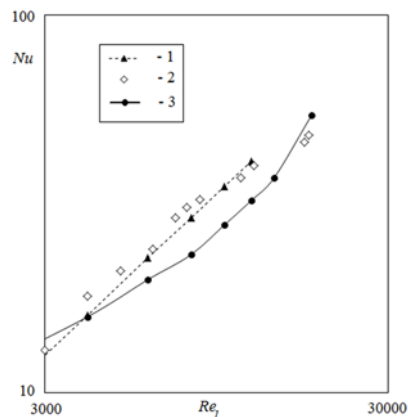


Рис. 3. Данные по теплоотдаче с учетом развития поверхности при наличии выемок: 1 – результаты расчета (12) по критериальной зависимости [20]; 2 – эксперимент КНИТУ им. Туполева-КАИ [20]; 3 – численный расчет авторов в Code Saturne
Fig. 3. Heat transfer data taking into account surface development in the presence of depressions: 1 - calculation results (12) according to the criterial dependence [20]; 2 - experiment Knitov. Tupolev-KAI [20]; 3 - numerical calculation of authors in Code Saturne

4. Результаты численного моделирования и их обсуждение

Численное моделирование выполнено для трех типов расчетной области: прямоугольного канала с цилиндрическими лунками, канала с подковообразными лунками [19], канала с подковообразными лунками, повернутыми к потоку на 45 градусов (см. рис. 1).

Целью численного моделирования являлся анализ течения и теплообмена в прямоугольном канале с неглубокими подковообразными 2d лунками для определения теплогидравлической эффективности каналов с такими лунками. Для корректного сравнения теплогидравлической эффективности поверхностей с различными лунками были выполнены следующие условия: одинаковая глубина ($h/D=0.11$, $h=2$ мм) лунок, равные площади «пятна» исследуемых лунок ($S_p=252.02$ мм²), одинаковый тип расположения и число рядов лунок ($n=3$).

Далее показаны результаты численного исследования течения и теплообмена в канале с неглубокими лунками (рис. 1). На рис. 4 представлены значения температуры стенки канала для центрального ряда лунок, осредненные по площади лунки:

$$t_{bound} = \frac{\sum t_i \cdot F_i}{\sum F_i}, \quad (13)$$

где t_{bound} – средняя температура стенки для лунки; F_i – площадь поверхности ячейки; t_i – температура стенки в i -той ячейке сетки; $\sum F_i = S_p$ – площадь пятна лунки.

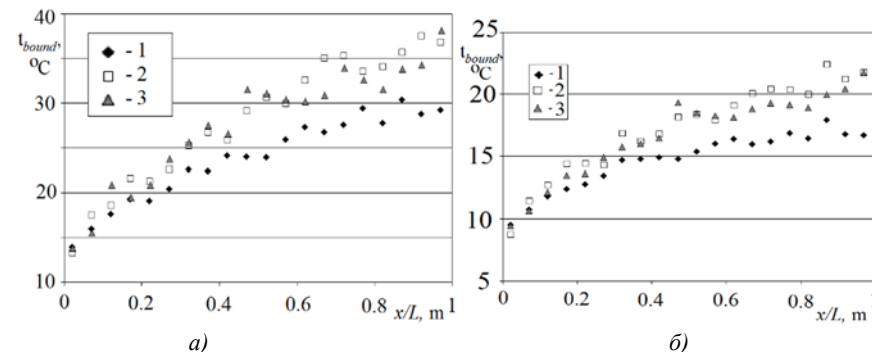


Рис. 4. Температура дна лунки (а) для $Re_l=56391$, (б) для $Re_l=112782$: 1 – подковообразная лунка; 2 – цилиндрическая лунка; 3 – подковообразная лунка, повернутая относительно потока на 45 градусов
Fig. 4. The bottom of the well temperature (a) for $Re_l = 56391$, (b) for $Re_l = 112782$: 1 - horseshoe hole; 2 - a cylindrical hole; 3 - horseshoe hole, rotated relative to the flow by 45 degrees

Как видно из рис. 4, конструкция лунки определяет температуру поверхности лунки.

Величина локального коэффициента теплоотдачи определялась по выражению: $\alpha' = q / (t_{bound} - t_f)$, (13)

где q – удельный тепловой поток от стенки, Вт/м²; t_f – температура потока, определяемая на оси потока над лункой.

Значения локального коэффициента теплоотдачи для центрального ряда лунок показаны на рис. 5. Анализируя рис. 5, следует отметить, что наибольшие значения коэффициента теплоотдачи характерны для канала с подковообразными лунками (рис. 1, б). Для повернутых на 45 градусов относительно потока подковообразных лунок и для цилиндрических лунок коэффициенты теплоотдачи по величине оказываются близкими.

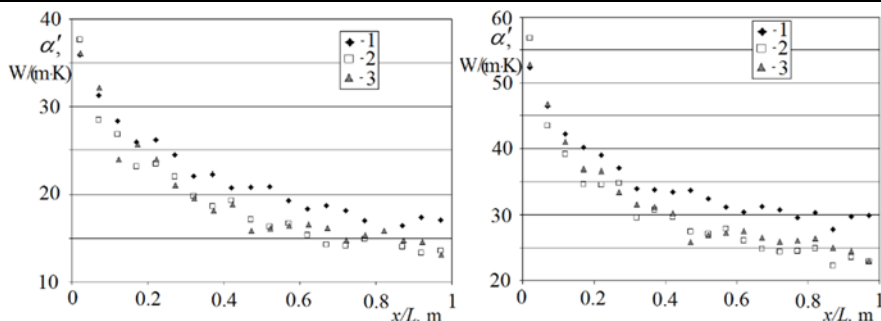


Рис. 5. Коэффициент теплоотдачи (а) для $Re_l = 56391$, (б) для $Re_l = 112782$: 1 – подковообразная лунка; 2 – цилиндрическая лунка; 3 – подковообразная лунка, повернутая относительно потока на 45 градусов

Fig. 5. Heat transfer coefficient (a) for $Re_l = 56391$, (b) for $Re_l = 112782$: 1 - horseshoe hole; 2 - a cylindrical hole; 3 - horseshoe hole, rotated relative to the flow by 45 degrees

На рис. 6 представлены результаты численного исследования эффективной теплоотдачи и гидросопротивления для прямоугольных каналов с односторонним нанесением неглубоких лунок различной геометрии (рис. 1).

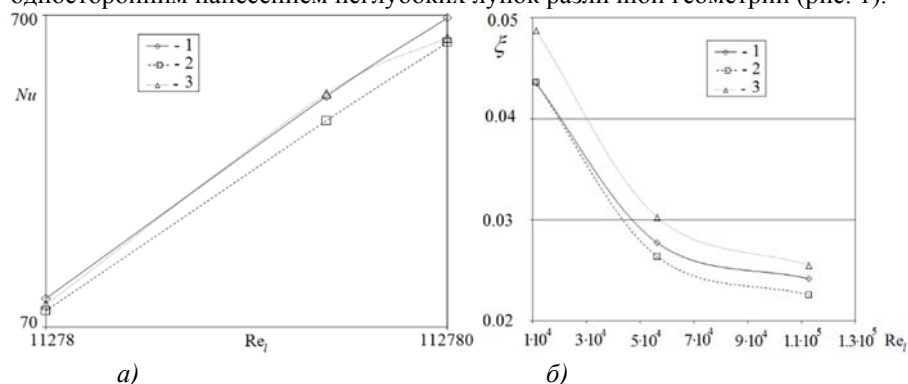


Рис. 6. Результаты численного моделирования (а) данные по теплоотдаче, (б) данные по гидравлическому сопротивлению: 1 – подковообразная лунка; 2 – цилиндрическая лунка; 3 – подковообразная лунка, повернутая относительно потока на 45 градусов

Полученные результаты показали, что коэффициенты теплоотдачи в рассмотренной области изменения скорости потока ($\bar{u}_{00} = 1 \dots 10$ м/с) $Re = 11278 \dots 112780$ для канала с подковообразными лунками (рис. 1, б) оказались выше, чем для канала с цилиндрическими лунками (рис. 1, а) или подковообразными лунками, повернутыми к потоку на 45 градусов (рис. 1, в). Коэффициент гидравлического сопротивления канала с односторонним нанесением неглубоких подковообразных повернутых к потоку на 45 градусов

лунок (рис. 1, в) от 11 до 15 процентов выше, чем для канала с цилиндрическими лунками (рис. 1, а). Гидросопротивление канала с подковообразными лунками (рис. 1, б) только до 5 процентов выше, чем сопротивление канала с цилиндрическими лунками. При этом коэффициент теплоотдачи для канала с подковообразными лунками до 15,6 процента выше, чем для канала с цилиндрическими лунками. Анализ теплогидравлической эффективности каналов с односторонним нанесением неглубоких лунок различной конфигурации по результатам численных исследований представлен на рис. 7.

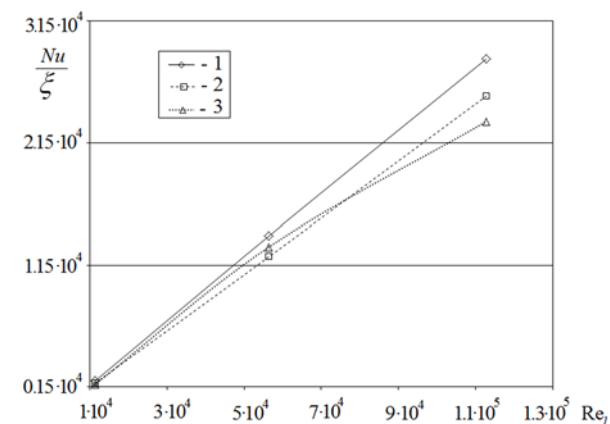


Рис. 7. Анализ теплогидравлической эффективности каналов с односторонним нанесением неглубоких лунок: 1 – подковообразная лунка; 2 – цилиндрическая лунка; 3 – подковообразная лунка, повернутая относительно потока на 45 градусов

Fig. 7. Analysis of thermal and hydraulic efficiency of channels with one-sided application of shallow holes: 1 - horseshoe hole; 2 - a cylindrical hole; 3 - horseshoe hole, rotated relative to the flow by 45 degrees

Как видно из рис. 7, теплогидравлическая эффективность канала с подковообразными лунками выше, чем канала с цилиндрическими лунками или с подковообразными лунками, повернутыми к потоку на 45 градусов при развитом турбулентном течении потока.

5. Заключение

На базе открытого пакета Code Saturne проведено численное моделирование течения и теплообмена в прямоугольном канале односторонним нанесением неглубоких лунок. Проведена оценка построения качественной расчетной сетки применительно к течениям в каналах с неглубокими лунками. По средству сравнения результатов численного и физического эксперимента выполнена проверка адекватности разработанной модели, показавшая адекватность выбранных методов и инструментов численного исследования.

В результате исследования выявлено, что в каналах с неглубокими подковообразными лунками эффективность теплоотдачи до 15,6 процентов выше, чем в каналах с цилиндрическими лунками. При этом гидравлическое сопротивление канала с подковообразными неглубокими лунками, выполненными на одной из его сторон, оказывается до 5 процентов выше, сопротивления канала с цилиндрическими лунками. Так, при $Re=11278$ коэффициент гидравлического трения равен $\xi = 0.0487$, при $Re=56390$ только $\xi = 0.03$, при $Re=112780$ составляет $\xi = 0.0255$. Так что теплогидравлическая эффективность канала с подковообразными лунками выше эффективности канала с цилиндрическими лунками. Кроме того, полученные данные показали, что наклон подковообразных лунок по направлению к потоку значительно сказывается на величине гидравлического сопротивления и интенсивности теплоотдачи. Оказалось, что теплогидравлическая эффективность канала существенно зависит не только от конфигурации лунок, но и их расположения относительно потока.

Список литературы

- [1]. А. Леонтьев, Н. Пилюгин, Ю. Полежаев, В. Поляев. Научные основы технологий XXI века. Москва, Энергомаш, 2000. 136 с.
- [2]. Страница инструмента Code Saturne — <http://code-saturne.org/cms/>
- [3]. Страница инструмента Open Foam — <http://www.openfoam.com/>
- [4]. Ю. Гортышов, И. Попов, В. Олипинов, А. Щелчков, С. Каськов. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография. Казань: Центр инновационных технологий, 2009.
- [5]. С. Исаев, А. Леонтьев, Н. Корнев, Э. Хассель, Я. Чудновский. Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками, Теплофизика высоких температур, том 53, №3, 2015 г., стр. 390-402. doi:10.7868/S0040364415030060
- [6]. А. Цынаева, М. Никитин. Численное моделирование течения в канале с неглубокими лунками с использованием Code Saturne. Труды института системного программирования РАН, том 28 (выпуск 1), 2016 г., стр. 185-196. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-10
- [7]. А. Ильинков, А. Щукин, В. Такмовцев, И. Хабибуллин, В. Ильникова. Особенности обтекания двухполостных выемок. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2014 г., №2, стр. 53-57.
- [8]. Страница инструмента Salome — <http://www.salome-platform.org/>
- [9]. Страница инструмента On Shape — <https://www.onshape.com/>
- [10]. Е. Меньякина, К. Кулясова, М. Никитин. Исследование работы воздушно-тепловой завесы с помощью численного моделирования. В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии сборник статей. Самарский государственный архитектурно-строительный университет; под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, А.К. Стрелкова. Самара, 2016. С. 336-340.
- [11]. М. Nikitin. Modeling of natural convection. Proceedings 7911583: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Date

- of Conference: 19-20 May 2016. Date Added to IEEE Xplore: 27 April 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911583
- [12]. К. Подлипова, М. Никитин. Численное исследование теплообмена с оребренной поверхностью. Труды Академэнерго. 2016. № 4. С. 42-49. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29217306>
 - [13]. A. Tsynaeva, M. Nikitin. The technology of heat transfer enhancement in channels by means of flow pulsations. Proceeding: MATEC Web of Conferences 5. Series "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016" 2016. P. 04018. DOI: 10.1051/mateconf/20168604018
 - [14]. Н. Ковальногов. Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск: Изд. УлГТУ, 2010.
 - [15]. F. Menter. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, 1994, vol. 32, № 8, pp. 1598-1605.
 - [16]. S. Isaev, P. Baranov, N. Kudryavtsev, D. Lysenko, A. Usachov. complex analysis of turbulence models, algorithms, and grid structures at the computation of recirculating flow in a cavity by means of vp2/3 and fluent packages. part 2. Estimation of models adequacy. Thermophysics and Aeromechanics, 2006. vol. 13, issue 1, pp. 55–65. DOI: 10.1134/S1531869906010060
 - [17]. В. Исаченко, В. Осипова, А. Сукомел. Теплопередача. Москва, Энергия. 1981. 440 с.
 - [18]. А. Цынаева, С. Разоренов Исследование потерь давления в канале с гантелеобразными лунками. Сборник. Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии сборник статей, 2016 г., стр. 345-349. — <https://elibrary.ru/item.asp?id=25929084>
 - [19]. А. Цынаева, С. Разоренов. Исследование течения в канале с подковообразными лунками. Материалы X Школы-Семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. секц.4 №005. — <http://x-school.knc.ru/files/prog2.pdf>
 - [20]. И. Габдрахманов, А. Щелчков, И. Попов, С. Исаев. Применение пластинчатых теплообменных аппаратов с поверхностными интенсификаторами теплоотдачи в системах «EGR» для улучшения экологических характеристик ДВС. Вестник Казанского технологического университета, 2015 г., Т. 18. № 5. стр. 205-208.

Numerical modeling of heat transfer of channel with shallow curly dimples

¹ A. Tsynaeva <a.tsynaeva@rambler.ru>

² S. Razorenov <razserg@list.ru >

¹ V. Belaya <bonyparkery@gmail.com>

¹ Samara State Technical University,

244 Molodogvardeiskaya Str., Samara, 443001, Russian Federation.

² Tatneft-Privolga-Samara RNU,

100, Leninskaya Str., Samara, 443020, Russian Federation

Abstract. Numerical investigation is focused to heat transfer of rectangular channel with dimples. Developed model was tested for adequacy by simulating of experiment, conducted by Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. Numerical model was verified too for adequacy by reproducing of experiment by A. Tsynaeva, S.

Razorenov. The test has been held with Reynolds number $Re=3000...30000$. The results was found in enough agreement. The heat transfer in rectangular channel with shallow curly dimples was modeled with source Code_Saturne. Numerical modeling are based by RANS approach with k- ω SST model. The study was conducted to air ($\nu=13.28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$). The 3D computation domain was meshed with source Salome by version 7.6.0. The SIMPLEC algorithm are used for U-p calculation. Generation time of mesh and calculation was estimated. The study of heat transfer was demonstrated by efficiency of curly dimples. Developed model shows heat transfer advantage up to 15.6 % of curly dimples over cylindrical ones of the same depth ($h/D=0.11$, $h=2 \text{ mm}$) and contact patch area ($S = 252.02 \text{ mm}^2$).

Keywords: free software, numerical simulation, heat transfer, flow, dimples.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-16

For citation: Tsynaeva A., Razorenov S., Belaya V. Numerical modeling of heat transfer of channel with shallow curly dimples. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 29, issue 5, 2017. pp. 329-344 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-16

References

- [1]. A. Leont'ev, N. Pilyugin, Yu. Polezhaev, V. Poljaev. Nauchnye osnovy tekhnologiy XXI veka [Scientific basis of technologies in XXI century]. Moscow, Energomash, 2000. 136 s. (in Russian)
- [2]. Page of software Code Saturne — <http://code-saturne.org/cms/>
- [3]. Page of software Open Foam — <http://www.openfoam.com/>
- [4]. Y. Gortyshov, I. Popov, V. Olimpiev, A. Schelchikov, S. Kas'kov. Teplogidravlicheskaya ehffektivnost' perspektivnyh sposobov intensifikatsii teplootdachi v kanalah teploobmennogo oborudovaniya. Intensifikatsiya teploobmena: monografiya. [Thermohydraulic efficiency of the perspective ways of intensification of heat transfer in channels heat transfer equipment. Intensification of heat transfer: monograph]. Kazan. [Kazan], Centr innovatsionnyh tekhnologij [Center for innovative technology], 2009. (In Russian)
- [5]. S. Isaev, A. Leontiev, N. Kornev, E. Hassel, Y. Chudnovskii. Heat transfer intensification for laminar and turbulent flows in a narrow channel with one-row oval dimples in High Temperature, vol 53, Issue 3, 2015. pp. 375-386. doi: 10.7868/S0040364415030060
- [6]. A. Tsynaeva, M. Nikitin. Chislennoe modelirovanie techeniya v kanale s neglubokimi lunkami s ispol'zovaniem Code Saturne [Numerical modeling of rectangular channel with shallow dumbbell dimples based Code Saturne]. *Trudy ISP RAN [Proceedings of ISP RAS]*, Volume 28 (Issue 1), 2016, pp. 185-196 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-10
- [7]. A. Linkov, A. Schukin, V. Tokmoltsev, I. Habibullin, V. Ilenkova Osobennosti obtekaniya dvuhpolostnyh vyemok. [Features of the flow past of bicameral dimples]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. [Bulletin of KSTU by Tupolev]*, Issue 2, 2014, pp. 53-57 (in Russian).
- [8]. Page of software Salome — <http://www.salome-platform.org/>
- [9]. Page of software On-Shape — <https://www.onshape.com/>
- [10]. E. Menyalkina, K. Kulyasova, M. Nikitin. Issledovanie raboty vozdušno-teplovoy zavesy s pomoshchyu chislennogo modelirovaniya. [Study of air curtain with the help of numerical simulation] V sbornike: Tradicii i innovatsii v stroitelstve i arhitekture stroitelnye tekhnologii

- sbornik statej, Samarskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitelnyj universitet pod red. M. I. Balzannikova, K. S. Galickova, A. K. Strelkova. [Proceedings: Traditions and innovations in construction and architecture. Construction techniques a collection of articles, Samara State University of Architecture and Construction; Editors are M. I. Balzannikov, K. S. Galitskov, A. K. Strelkov]. Samara, 2016. pp. 336-340 (in Russian).
- [11]. M. Nikitin. Modeling of natural convection. *Proceedings 7911583: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016*. Date of Conference: 19-20 May 2016. Date Added to IEEE Xplore: 27 April 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911583
 - [12]. K. Podlipnova, M. Nikitin. Chislennoe issledovanie teploobmena s orebrennoj poverhnostyu [Numerical study of heat transfer from finned surface]. *Trudy Akademenergo*. [Proceeding of Academenergo], Issue 4, 2016, pp. 42-49 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=29217306>
 - [13]. A. Tsynaeva, M. Nikitin. The technology of heat transfer enhancement in channels by means of flow pulsations. *Proceeding: MATEC Web of Conferences 5. Series "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016"* 2016. P. 04018. DOI: 10.1051/mateconf/20168604018
 - [14]. N. Kovalnogov. Prikladnaya mekhanika zhidkosti i gaza [Applied mechanics of liquid and gas]. Ul'yanovsk [Ulyanovsk]: UIGTU [UISTU], 2010. (in Russian).
 - [15]. F. Menter. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, issue 8, pp. 1598-1605.
 - [16]. S. Isaev, P. Baranov, N. Kudryavtsev, D. Lysenko, A. Usachov. complex analysis of turbulence models, algorithms, and grid structures at the computation of recirculating flow in a cavity by means of vp2/3 and fluent packages. part 2. Estimation of models adequacy. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006. vol. 13, issue 1, pp. 55–65. DOI: 10.1134/S1531869906010060
 - [17]. V. Isachenko, V. Osipova, A. Sukomel. Teploperedacha. [Heat transfer]. Moscow, 1981. 440 pp. (in Russian)
 - [18]. A. Tsynaeva, S. Razorenov Issledovanie poter' davleniya v kanale s ganteleobraznymi lunkami [Investigation of pressure losses in a channel with a dumbbell dimples]. *Sbornik. Tradicii i innovatsii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'nye tekhnologii sbornik statej [Proceedings of Tradition and innovation in construction and architecture. Construction techniques.]*, 2016. pp. 345-349 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=25929084>
 - [19]. A. Tsynaeva, S. Razorenov Issledovanie techeniya v kanale s podkovoobraznymi lunkami. [Investigation flow by channel with a curly dimples] *Materialy X SHkoly-Seminara molodyh uchenyh i specialistov akademika RAN V.E. Alemasova. sekc.4 No.005. [In: proceedings of X School-Seminar of young scientists and specialists of academician V. E. Alemasov. Section No. 005.]*. (in Russian) — <http://x-school.knc.ru/files/prog2.pdf>
 - [20]. I. Gabdrakhmanov, A. Shchelchikov, I. Popov, S. Isaev. Primenenie plastinchatyh teploobmennyyh apparatov s poverhnostnymi intensifikatorami teplootdachi v sistemah «egr» dlya uluchsheniya ehkologicheskikh harakteristik DVS [The application of plate heat exchangers with surface intensifiers of heat transfer in the systems "egr" to improve the environmental performance of the engine]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Proceedings of Kazan technological University]*, 2015, Vol. 18. Issue 5. pp. 205-208.