

Численное моделирование течения в канале с неглубокими лунками с использованием Code Saturne

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

²М.Н. Никитин <nikitin.pro@gmail.com>

¹ФГБОУ ВПО СГАСУ, 443001, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, дом 194

²ФГБОУ ВПО СамГТУ, 443010, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, дом 221.

Аннотация. Работа посвящена построению модели и численному исследованию течения в прямоугольном канале с неглубокими лунками. Математическое моделирование выполняется на базе дифференциальных уравнений движения, энергии и состояния. Численное решение получено с использованием метода конечных объемов на базе программного пакета с открытым программным кодом Code Saturne. Построение сетки, учитывающей особенности течения вблизи лунок, выполнено в программном пакете Salome со свободной лицензией. В работе рассмотрены вопросы создания сетки, показана зависимость получаемого решения от размерности сетки, проведен анализ влияния типа сетки на время ее генерирования и качество получаемого численного решения для течения в прямоугольном канале с неглубокими лунками.

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

DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-10

Для цитирования: Цынаева А.А., Никитин М.Н. Численное моделирование течения в канале с неглубокими лунками с использованием Code Saturne. Труды ИСП РАН, том 28, вып. 1, 2016 г..с. 185-196 DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-10

1. Введение

Численное моделирование является перспективным методом исследования при разработке и проектировании новых образцов техники: теплообменных аппаратов, энергетических установок и другого оборудования. Однако профессиональный теплофизик не всегда является профессиональным программистом. Программные комплексы позволяют пользователю, имеющему узкоспециальный нематематический профиль подготовки, решать

поставленные перед ним технические задачи [1]. При этом коммерческие программные пакеты [2,3] для моделирования течения и теплообмена являются достаточно дорогостоящими и имеют существенные недостатки, обусловленные невозможностью изменения разработанного программного кода для решения конкретной задачи, неизменности используемых решателей. В этой связи, использование программных пакетов с открытым кодом предоставляет возможность для решения достаточно сложных научно-технических задач путем численного моделирования [4,5]. К таким задачам относится исследование течения в канале вблизи неглубоких лунок. В настоящее время известно, что использование неглубоких лунок для интенсификации теплообмена не приводит к значительному изменению гидравлического сопротивления поверхности [6,7,8]. Однако для оптимизации геометрии лунки с целью минимизации гидравлических потерь и интенсификации отвода (подвода) теплоты требуется проведение большого числа экспериментов по исследованию характеристик течения и теплообмена. Это требование может быть выполнено за счет проведения множества численных экспериментов с помощью программных пакетов с открытым кодом. Программные комплексы и интегрируемые платформы, обладающие графическим интерфейсом, например, Salome [9] и Code Saturne [10] могут быть более приемлемыми для решения пользователями инженерно-технических задач, нежели пакеты без графического интерфейса.

2. Формулировка задачи, расчетные сетки

В работе выполнено решение трехмерной задачи течения в прямоугольном канале с неглубокими лунками.

2.1 Математическая модель

Для численного исследования течения в канале с неглубокими лунками в качестве инструмента исследования выбран программный пакет Code Saturne с открытым кодом [10], в котором моделирование течения базируется на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Эти уравнения для ламинарного потока имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \underline{u}) = \Gamma \\ \frac{d(\rho \underline{u})}{dt} + \text{div}(\underline{u} \otimes \rho \underline{u}) = -\nabla P + \text{div} \left(\mu \left[\underline{\nabla} \underline{u} + \underline{\nabla} \underline{u}^T - \frac{2}{3} \text{tr}(\underline{\nabla} \underline{u}) \underline{Id} \right] \right) + \rho \underline{g} + \underline{ST}_u - \underline{Ku} + \Gamma \underline{u}^{in} \end{cases}, \quad (1)$$

где ρ – плотность; \underline{u} – скорость; Γ – член уравнения, соответствующий источнику массы; ∇ – оператор Гамильтона; μ – динамическая вязкость; P – давление; $\text{tr}(\underline{\cdot})$ – след тензора; \underline{g} – ускорение свободного падения; \underline{ST}_u , \underline{Ku} –

явный и неявный источник, при этом $\underline{\underline{K}}$ симметричный положительный тензор.

Для турбулентного потока при $\underline{u} = \bar{\underline{u}} + \underline{u}'$ уравнения Навье-Стокса записываются в виде:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \bar{\underline{u}}) = \Gamma \\ \rho \frac{d\bar{\underline{u}}}{dt} + \bar{\underline{\underline{u}}} \cdot (\rho \bar{\underline{u}}) = -\nabla P + \text{div} \left(\mu \left[\nabla \bar{\underline{u}} + \nabla \bar{\underline{u}}^T - \frac{2}{3} \text{tr}(\nabla \bar{\underline{u}}) \underline{\underline{Id}} \right] \right) + \rho \underline{\underline{g}} - \text{div}(\rho \underline{\underline{R}}) + \\ + \underline{\underline{ST}}_{\underline{u}} - \underline{\underline{K}} \underline{u} + \Gamma(\bar{\underline{u}}^{in} - \bar{\underline{u}}) \end{cases}, \quad (2)$$

здесь дополнительный член уравнения $\underline{\underline{R}} \equiv \bar{\underline{u}}' \otimes \underline{u}'$; $\mu = \mu_l + \mu_T$, μ_T – динамическая турбулентная вязкость; $\rho \underline{\underline{R}} = \frac{2}{3} \rho k \underline{\underline{1}} - 2 \mu_T \bar{\underline{\underline{S}}}^D$, k – кинетическая энергия турбулентности $k \equiv \frac{1}{2} \text{tr}(\underline{\underline{R}})$.

При моделировании течения из-за наличия особенностей поверхности (неглубоких лунок) применялась $k-\omega$ *sst* модель турбулентности [11]. Численное исследование получено в пакете программ Code Saturne [10] методом конечных объемов, в рамках которой уравнения интегрируются по каждой ячейке сетки (контрольный объем Ω_i).

2.2 Условия моделирования, характерные масштабы задачи

В качестве начальных условий задается поле скоростей на входе в канал ($\bar{\underline{u}}_{00} = 10$ м/с), свободное истечение потока на выходе из канала. Стенки канала заданы гладкими.

Канал длиной $L=120$ мм имеет прямоугольную форму с размерами сечения $a \times b = 70 \times 20$ мм. На одной из поверхностей канала выполнены неглубокие лунки (глубиной $h=1,2$ мм), расположенные в три ряда по шесть лунок в каждом.

Численное исследование течения в канале с неглубокими лунками характеризуется следующими размерными параметрами: рабочее тело – газ, (при давлении 101325 Па имеет $\rho = 1,205$ кг/м³, $\mu = 1,72 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $c_p = 1005$ Дж/кг), ускорение свободного падения $\underline{\underline{g}} = 9,81$ м/с². При моделировании физические свойства приняты постоянными, так как рассматривалась задача газодинамики потока. Вышеперечисленные параметры формируют характерные масштабы времени, скорости, вязкости, длины, отношение которых дает характерные критерии задачи, например, критерий Рейнольдса $Re_l = \bar{\underline{u}} \cdot l / \nu$, (l – гидравлический диаметр

прямоугольного канала, м; ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$). Для рассматриваемого прямоугольного канала, имеющего лунки на одной из внутренних поверхностей, $l=0,042$ м, $\text{Re}_l = 31626,5$.

2.3 Дискретизация области исследования

Для дискретизации расчетной области использовалась открытая интегрируемая платформа Salome [9]. Так как, вблизи стенки канала с неглубокими лунками формируются вихревые структуры, обусловленные рельефом поверхности, то с целью повышения качества решения сетка выполнялась структурированной по поверхности канала с формированием элементов для моделирования пограничного слоя. Минимальный размер ячейки определялся из условия размещения нескольких параллельных рядов ячеек расчетной сетки по глубине лунки для наилучшего воспроизведения особенностей течения в ней.

Рис. 1. показывает зависимость времени t_{gen} (в секундах) дискретизации расчетной области от количества ячеек N для неструктурированной и структурированной сеток.

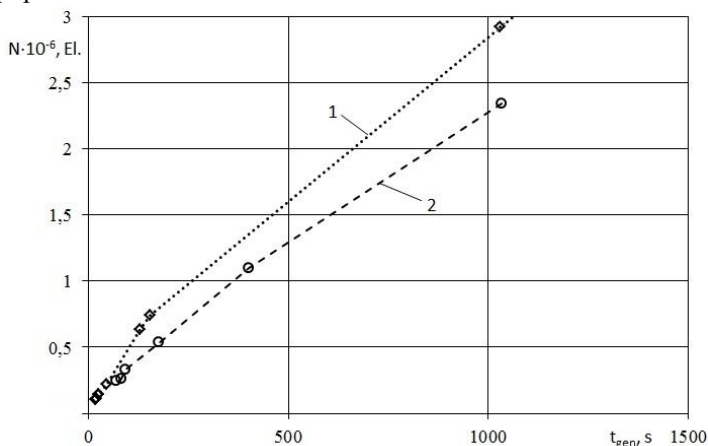


Рис. 1. Характеристика дискретизации расчетной области: 1 – неструктурированная сетка; 2 – структурированная сетка

Fig. 1. Discretisation characteristics of computational region: 1 - unstructured grid; 2 - structured grid

Для исследуемой расчетной области, согласно (рис. 1), время построения структурированной сетки при том же количестве ячеек несколько выше, чем неструктурированной сетки. При этом структурирование сетки позволяет выполнять более качественную послойную дискретизацию расчетной области вблизи поверхности стенок канала. Толщина структурного слоя выбиралась

соразмерной глубине ($h=1,2$ мм) лунок и составляла 2 мм при разбиении этого слоя на 6 подслоев.

Для дискретизации граничных условий применялся инструментарий пакета Code Saturne [10].

Code Saturne представляет собой программный комплекс, имеющий графический интерфейс, с инструментарием для численного решения задач гидрогазодинамики и тепломассообмена. Следует отметить наличие возможности реализации параллельных вычислений с определением способа разделения расчетного домена между процессорами. В качестве граничных условий в Code Saturne могут быть заданы условия Дирихле и Неймана. В Code Saturne для разрешения поля скорости использована схема второго порядка (SOLU), для энергии турбулентных пульсаций – 1-го порядка (Upwind), для разрешения поля давления выбран решатель Multigrid, принятое максимальное число итераций по каждому циклу составляло 10000, точность решателя (Solver Precision) выбрана равной 10^{-8} . Для получения решения применен итерационный решатель с шагом по времени 0,0001 сек. с количеством итераций 2000.

3. Проверка адекватности

Проверка адекватности полученного решения выполнялась посредством сравнения результатов численного расчета, выполненного в программном комплексе Code Saturne [10] с экспериментальными данными, представленными в работах Института теплофизики СО РАН и Института гидромеханики НАН Украины [12,13,14]. Экспериментальные исследования течения в прямоугольном канале с лункой [12,13,14] были проведены независимо друг от друга для сходной геометрии канала и лунки, отличие заключалось в используемых средствах измерения. Прямоугольный канал шириной 0,2 м и высотой 0,015 м с длиной 1,34 м выполнен с одиночной лункой с острыми кромками диаметром $D=0,046$ м, расположенной на оси канала на расстоянии равном $l_f \sim 11D$. Рабочей средой являлась несжимаемая жидкость – вода, скорость жидкости на входе в канал составляла 0,43 м/с. Течение в канале турбулентное, значение $Re_D = \bar{u} \cdot D/\nu = 20000$. Численное моделирование было выполнено с условием симметрии по оси лунки для сокращения времени расчета. Такое допущение оказалось возможным на основе анализа экспериментальных данных. Для моделирования использовалась система уравнений (2), для замыкания задачи турбулентного течения применена $k-\omega$ *sst* модель турбулентности [11]. Дискретизация расчетной области осуществлена в Salome [10], сетка выполнена структурированной, вблизи стенок канала сгенерированы 6 параллельных слоев, толщиной 0,5 мм. Для дискретизации трехмерных элементов выбрана гипотеза Tetrahedron(Netgen), для двумерных элементов алгоритм Netgen 1d-2d с минимальным размером ячейки 0,7 мм и максимальным размером 2,5 мм. В результате дискретизации получена сетка из 878977 объемных элементов.

Дискретизация начальных и граничных условий выполнялась средствами Code Saturne [10]. Для расчета давления, скорости и энергии турбулентных пульсаций применены описанные выше схемы и решатели. Задача решалась в стационарной постановке. Результаты численного расчета представлены для коэффициента давления вблизи поверхности, рассчитанного в соответствии с работой Терехова В.И. и др. [12] по формуле:

$$C_p = (p_i - p_0) / \left(\rho \bar{u}_s^2 / 2 \right) \quad (3)$$

где p_i – текущее значение давления; p_0 – давление у верхней по потоку кромки лунки; ρ – плотность воды; \bar{u}_s – средняя скорость потока воды для тестового эксперимента. Результаты сравнения численного и физического эксперимента с целью проверки адекватности представлены на рис. 2.

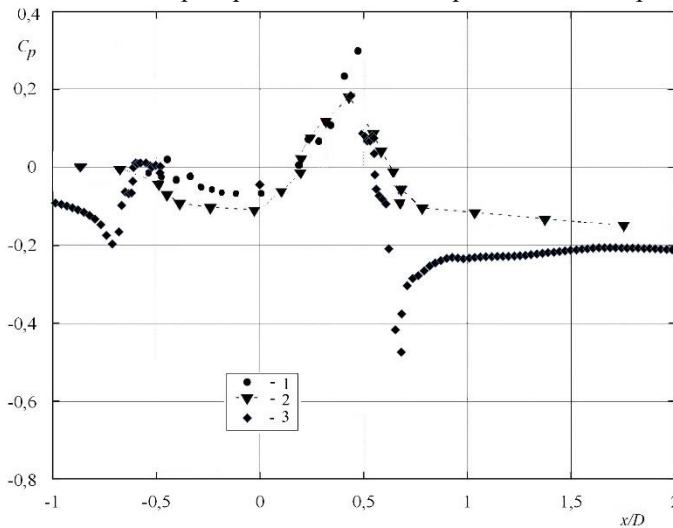


Рис. 2. Распределение давления на обтекаемой поверхности в окрестности сферической лунки: 1 – эксперимент Терехова В.И. и др. [12]; 2 – эксперимент Воскобойника В.А. и др. [13,14]; 3 – расчет авторов в Code Saturne

Fig. 2. Pressure distribution at streamlined surface in a vicinity of the dimples: 1 - experiment of V.I. Terekhov and others. [12], 2 - experiment of V.A. Voskoboynik and others. [13,14]; 3 - calculation of the authors with Code Saturne

Анализируя, представленные на рис. 2 данные для параметров вблизи поверхности стенки, следует отметить качественное совпадение экспериментальных [12,13,14] и расчетных данных. Имеющиеся отличия незначительны, но наблюдаются в узкой области непосредственно за одиночной лункой. На рис. 3 представлена картина распределения статического давления в одиночной лунке.

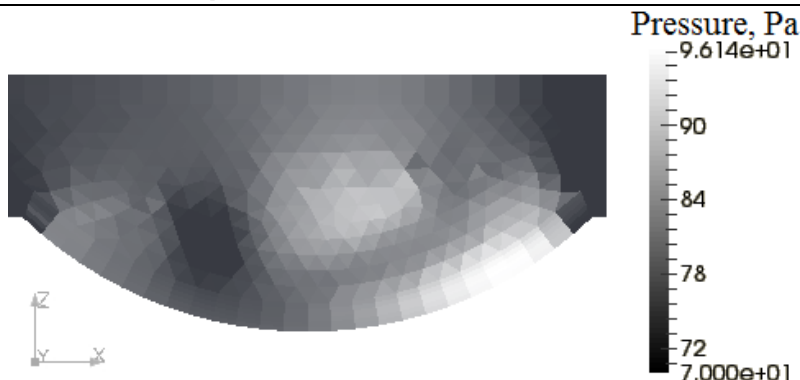


Рис. 3. Распределение статического давления в лунке по расчету в Code Saturne
Fig. 3. Distribution of static pressure in the dimple on the calculation with the Code Saturne

Анализ картины течения показывает наличие вихревых структур в лунке, что показано в работах [6-8,12-15]. В связи вышесказанного, был сделан вывод об адекватности выбранного метода и инструмента численного исследования.

4. Результаты численного решения и обсуждение

Численное исследование проводилось для двух основных типов расчетной области: прямоугольного канала с тремя рядами сферических лунок и того же канала с гантелеобразными лунками. Целью численного моделирования являлся анализ параметров течения в канале с гантелеобразными трехмерными лунками. Для проведения сравнения параметров течения для каналов с различными лунками необходимо выполнить следующие условия: одинаковая глубина ($h=1,2$ мм) лунок исследуемой конфигурации и сферических лунок, равные площади «пятна» исследуемых лунок ($S_p=59,76$ мм²).

Первым этапом исследования явилось определение влияния качества расчетной сетки на продолжительность расчета и качество получаемого решения. Анализ проводился для канала со сферическими лунками. Согласно полученным данным (рис. 4), продолжительность расчета t_c определяется не только количеством элементов сетки, но и типом поверхностного элемента разбиения. На рис. 5 представлены результаты расчета скорости в зависимости от качества дискретизации расчетной области; профиль скорости построен для течения на расстоянии $l_1=6,25D$; линии 1,3 соответствуют оси канала; 2,4 – построены для пристеночной области, секущая плоскость на расстоянии 1 мм от стенки с лунками. Анализ результатов (рис. 5) показал значительные флуктуации скорости потока в пристеночной области при малом N_{el} , которые носят случайный характер. В связи с чем, для проведения дальнейших исследований выбрана сетка с $N_{el}=766796$ объемными элементами.

На рис. 6 представлены результаты численного исследования для канала со сферическими и гантелеобразными лунками.

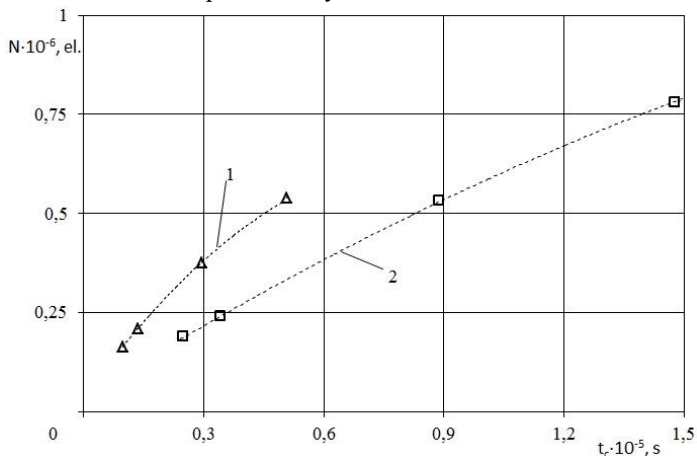


Рис. 4. Зависимость продолжительности расчета от параметров дискретизации расчетной области: 1 – сетка по поверхностям выполнена в виде треугольных элементов; 2 – сетка по поверхностям выполнена в виде четырехугольных элементов
 Fig. 4. Dependency of calculation duration on discretisation parameters of calculation region: 1 – grid on a surfaces is formed as triangular elements; 2 – grid on surfaces is formed as a quadrangle elements

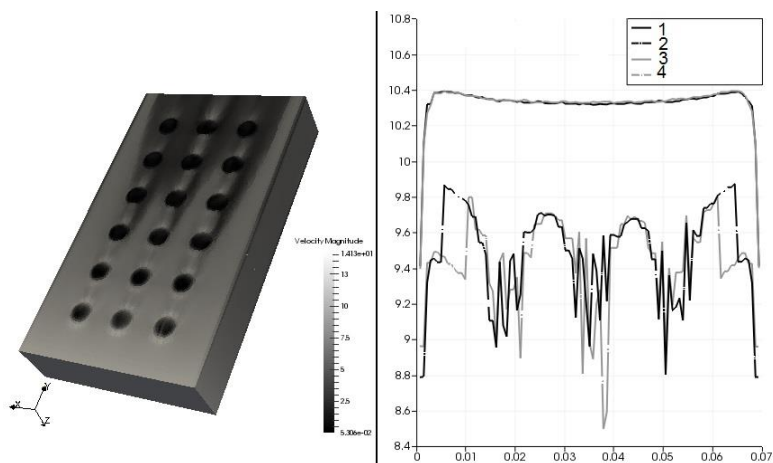


Рис. 5. Влияние качества дискретизации расчетной области на результаты расчета: 1, 2 – профиль скорости на оси канала и вблизи поверхности с лунками при $N_{el}=766796$; 3,4 – тоже при $N_{el}=537459$

Fig. 5. Impact of the quality of discretisation of the computational domain to results: of calculation, 1, 2 – velocity profile on the channel axis and near surface with dimples at $N_{el} = 766,796$; 3,4 – the same when $N_{el} = 537459$

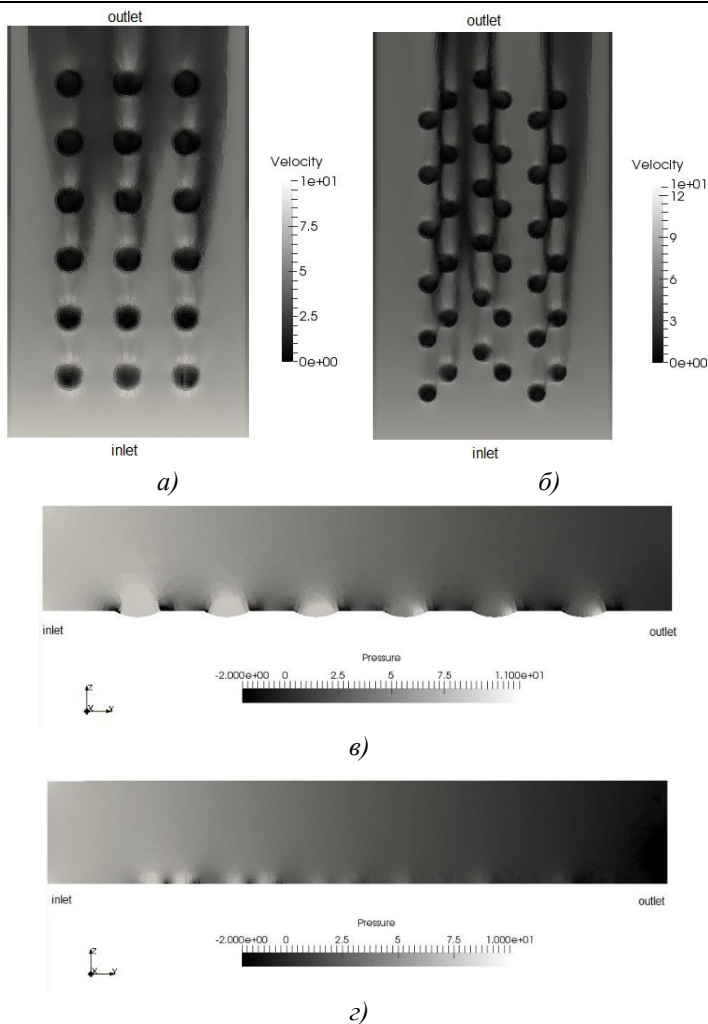


Рис. 6. Результаты численного моделирования: а, б – поле скоростей; в – поле статического давления в осевом сечении канала со сферическими лунками; г – то же с гантелеобразными лунками

Fig. 6. The results of numerical modeling: a, b - the velocity field; a - static pressure field in the axial channel section with dimples; g - the same hole with dumbbell dimples

Полученные результаты показали существенную зависимость скорости течения от угла наклона гантелеобразной лунки к направлению потока. Выявлено образование области с пониженными скоростями, в которых совместное влияние гантелеобразных лунок ведет к ламинаризации потока вблизи стенки. Анализ поля давления для канала с гантелеобразными лунками

(рис. 6) показал, что гидравлическое сопротивление канала до 10 % ниже, чем для канала со сферическими лунками.

5. Заключение

Проведено численное моделирование течения в канале с неглубокими лунками на базе открытого пакета Code Saturne. Отработана процедура построения качественной расчетной сетки, учитывающей особенности течения вблизи поверхности с лунками. Проведена проверка адекватности разработанной модели путем сравнения результатов численного и физического эксперимента, показавшая адекватность выбранных методов и инструментов численного исследования.

В результате моделирования выявлена зависимость характеристик течения в канале от угла наклона гантелеобразной лунки к направлению течения. В результате анализа полученных данных выявлено, что гидравлическое сопротивление канала со сферическими лунками несколько выше, чем канала с гантелеобразными лунками.

Список литературы

- [1]. А. Леонтьев, Н. Пилюгин, Ю. Полежаев, В. Поляев. Научные основы технологий XXI века. Москва, Энергомаш, 2000. 136 с.
- [2]. Страница пакета Ansys — <http://www.ansys.com/>
- [3]. Страница пакета CATIA — <http://www.3ds.com/>
- [4]. Страница 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) — <http://www.wccm-eccm-ecfd2014.org/frontal/default.asp>
- [5]. А. Цынаева, Е. Цынаева. Моделирование задач теплообмена и гидрогазодинамики с помощью свободного программного обеспечения. Вестник Ульяновского государственного технического университета, №4, 2014 г. стр. 42-45.
- [6]. S. Isaev, A. Guzeev, S. Sapozhnikov, V. Mityakov, A. Mityakov. Visualization of a Flow in a Spherical Dimple Built in the Lower Wall of the Rectangular-Section Channel of a Water Tunnel and Numerical Identification of the Vortex-Jet Structures in It. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol 88(2), 2015. P. 438-454. doi:10.1007/s10891-015-1210-x
- [7]. 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
- [8]. G. Kiknadze, I. Gachechiladze, T. Barnaveli Jr. The mechanisms of the phenomenon of torn ado-like jets self-organization in the flow along the dimples on the initially flat surface. *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE*, 2012. pp. 3017-3026. doi: 10.1115/IMECE2012-93581
- [9]. Страница инструмента Salome — <http://www.salome-platform.org/>
- [10]. Страница инструмента Code Saturne — <http://code-saturne.org/cms/>
- [11]. Страница Langley Research Center: Turbulence Modeling Resource — <http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>

- [12]. V. Terekhov, S. Kalinina, and Yu. Mshviobadze. Heat Transfer Coefficient and Aerodynamic Resistance on a Surface with a Single Dimple. Journal of Enhanced Heat Transfer, 1997, vol. 4, pp. 131 -145. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.v4.i2.60
- [13]. В. Воскобойник. Распределение давления на обтекаемой поверхности со сферической лункой. Водный транспорт, том 3, 2014 г. Стр.90-96.
- [14]. V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. Flow, turbulence and combustion, № 90(4), 2013, pp 709-722. doi: 10.1007/s10494-012-9433-9
- [15]. Г. Коваленко, А. Халатов. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов. Прикладна гідромеханіка, том 10, № 1, 2008 г. Стр. 23-32.

Numerical modeling of rectangular channel with shallow dumbbell dimples based Code Saturne

¹A. Tsynaeva < a.tsynaeva@rambler.ru >

²M. Nikitin < nikitin.pro@gmail.com >

¹SSUACE, 194 Molodogvardeiskaya Str., Samara, 443001, Russian Federation

²SamGTU, 224 Molodogvardeiskaya Str., Samara, 443010, Russian Federation

Abstract. Numerical study was conducted for rectangular channel with dimples. Developed model was tested for adequacy by simulating of experiment, conducted by Dr. Terekhov, which was found in good agreement. Experimental setup utilized a single spherical dimple which was set at 11 diameters from inlet. Test simulation was conducted for incompressible fluid (water) in accordance with experiment conditions: inlet velocity 0.43 m/s, Reynolds for dimple 20000 and channel length 1.34 m. A 3D computation domain was meshed for 0.8 million elements with six viscous layers totalling 3 mm thick applied to smooth walls. A turbulent flow ($Re = 31627$) in rectangular channel with shallow dumbbell dimples was modelled with open source Code_Saturne. An ideal gas ($\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$) was considered as working medium. A 3D computation domain was meshed with open source Salome Meca for 0.77 million elements ranged 0.2...1.0 mm. Six viscous layers totalling 2 mm thick were applied to smooth walls. Unsteady flow simulated with k-w SST model utilizing 2nd order discretization schemes (SOLU) for velocity. 2000 iterations were calculated so far with pseudo time step of 0.1 ms. Additionally impact of mesh quality regarding elements size on computation results was shown. Generation time of mixed mesh (quadrangles and triangles on surface) was proved to be greater than of strictly triangular one. Obtained results showed a strong dependence of flow velocity from inclination of dumbbell towards flow axis. Adjacent dumbbell dimples cause partial flow laminarization. Developed model shows aerodynamic advantage up to 10 % of dumbbell dimples over spherical ones of the same depth ($h = 1.2 \text{ mm}$) and contact patch area ($S = 59.76 \text{ mm}^2$).

Keywords: free software, numerical simulation, aerodynamics, flow, dimples.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-10

For citation: Tsynaeva A., Nikitin M. Numerical modeling of rectangular channel with shallow dumbbell dimples based Code Saturne. Trudy ISP RAN /Proc. ISP RAS, 2016, vol. 28, issue 1, pp. 185-196 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-10

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 Ansys — <http://www.ansys.com/>
- [3]. Page of software CATIA — <http://www.3ds.com/>
- [4]. Page of 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) — <http://www.wccm-eccm-ecfd2014.org/frontal/default.asp>
- [5]. A. Tsynaeva, E. Tsynaeva. Modelirovanie zadach teploobmena i gidrogazodinamiki s pomog'ju svobodnogo programmnogo obespechenija [Modelling of heat transfer and fluid dynamics problems using free software]. Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Journal of Ulyanovsk State Technical University], no. 4, 2014. pp.42-45. (In Russian)
- [6]. S. Isaev, A. Guzeev, S. Sapozhnikov, V. Mityakov, A. Mityakov. Visualization of a Flow in a Spherical Dimple Built in the Lower Wall of the Rectangular-Section Channel of a Water Tunnel and Numerical Identification of the Vortex-Jet Structures in It. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol 88(2), 2015. pp. 438-454. doi:10.1007/s10891-015-1210-x
- [7]. S. Isaev, A. Leont'ev, N. Kornev, Je. KHassel', Ya. Chudnovskij. Intensifikacija teploobmena pri laminarnom i turbulentnom techenii v uzkom kanale s odnorjadnymi oval'nymi lunkami [Heat transfer intensification for laminar and turbulent flows in a narrow channel with one-row oval dimples], Teplofizika vysokikh temperature [High Temperature], vol. 53, no. 3, 2015. pp. 390-402. doi:10.7868/S0040364415030060 (In Russian)
- [8]. G. Kiknadze, I. Gachechiladze, T. Barnaveli Jr. The mechanisms of the phenomenon of torn ado-like jets self-organization in the flow along the dimples on the initially flat surface. *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE*, 2012. pp. 3017-3026. doi: 10.1115/IMECE2012-93581
- [9]. Page of software Salome — <http://www.salome-platform.org/>
- [10]. Page of software Code Saturne — <http://code-saturne.org/cms/>
- [11]. Page of Langley Research Center: Turbulence Modeling Resource — <http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>
- [12]. V. Terekhov, S. Kalinina, and Yu. Mshviobadze. Heat Transfer Coefficient and Aerodynamic Resistance on a Surface with a Single Dimple. Journal of Enhanced Heat Transfer, 1997, vol. 4, pp. 131 -145. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.v4.i2.60
- [13]. V. Voskobojnik. Raspredelenie davlennija na obtekaemoj poverkhnosti so sfericheskoy lunkoj [Pressure distribution on streamlined surface with spherical dimple]. Vodnij transport [Water transport], vol. 3, 2014. pp.90-96. (In Ukrainian)
- [14]. V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. Flow, turbulence and combustion, № 90(4), 2013, pp 709-722. doi: 10.1007/s10494-012-9433-9
- [15]. G. Kovalenko, A. Khalatov. Granicy rezhimov techenija v uglubljenijakh na ploskoj poverkhnosti, imejuvikh formu sfericheskikh segmentov [The boundaries of flow regimes in the pits on a flat surface in the shape of spherical segments.]. Prikladna gidromekhanika [Applied Fluid Mechanics], vol. 10, no 1, 2008. pp. 23-32. (In Ukrainian)