

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАНАЛОВ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТА В ПАКЕТЕ ANSYS CFX

Д.К. Волкинд

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

COMPARISON OF EFFICIENCY OF CHANNELS OF REGENERATORS FILLINGS ON THE BASIS OF RESULTS OF CALCULATION WITH THE USE OF LICENSE PACKAGE ANSYS CFX

D.K. Volkind

Chelyabinsk, South Ural State University

Представлены результаты сравнения четырех различных профилей каналов насадки: квадратного, круглого, диффузорно-конфузорного и квадратного канала с нанесенными сферическими лунками в условиях высокотемпературного нагрева воздушного потока, полученные с использованием лицензионного пакета ANSYS CFX.

Ключевые слова: теплообмен, канал насадки, регенератор, сопротивление.

There are presented the results of comparison of four various profiles of channels of regenerator filling: square, round, divergent-convergent and square channel with the applied spherical holes in the conditions of high-temperature heating of the air stream, with the use of license package ANSYS CFX.

Keywords: heat exchange, channel of regenerator filling, a regenerator, resistance.

В качестве определяющих температур для теплообменной стенки и воздуха на входе были приняты усредненные по высоте насадки температуры реального доменного воздухонагревателя [1]. Давление воздуха на выходе было принято равным 0,2 МПа; площадь входного сечения была принята одинаковой для всех каналов и равной $S = 0,045^2 = 2,025 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; длина каждого канала составляла $L = 1,5 \text{ м}$.

Для получения установившегося профиля течения начальный участок гидродинамической стабилизации был выбран равным 1 м. В качестве определяющих уравнений для расчета использовались уравнения сплошности, количества движения и тепловой энергии. Ориентация канала в пространстве была учтена включением вектора массовых сил в уравнение количества движения, в качестве модели турбулентности была использована $k-\omega$ SST-модель.

Круглый канал. Сетка представляет собой совокупность тетраэдрических и призматических элементов; максимальная длина ребра элемента не превышает 3 мм, толщина пограничного слоя для среднего значения числа Рейнольдса определяется как

$$\delta = 0,035 L \text{Re}_L^{-1/7} = 0,035 \cdot 0,05 \cdot 10000^{-1/7} = 0,47 \text{ мм}. \quad (1)$$

Методом последовательных приближений были определены параметры призматического слоя: $q = 1,1$, $h_1 = 0,02 \text{ мм}$, $n = 15$. При этом толщина слоя:

$$H_{15} = h_1 \frac{q^n - 1}{n - 1} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{1,1^{15} - 1}{1,1 - 1} = 0,63 \text{ мм}, \quad (2)$$

где H – высота призматического слоя, h_1 – высота первой призмы, q – знаменатель прогрессии, n – число рядов призматических элементов. Высота десяти первых призматических слоев:

$$H_{10} = h_1 \frac{q^n - 1}{n - 1} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{1,1^{10} - 1}{1,1 - 1} = 0,319 \text{ мм}. \quad (3)$$

Таким образом, толщина пограничного слоя находится в интервале между 10-м и 15-м призматическими слоями, что обеспечивает необходимую точность при использовании пристеночной функции [2]. Характеристики расчетной сетки: количество узлов 550 013, количество элементов 1 700 772, в том числе тетраэдрических 953 188, призматических 747 584. На входе в расчетный канал задавался плоский профиль скорости, причем скорость рассчитывалась по фиксированному числу Рейнольдса 10^4 и температурным зависимостям для теплофизических характеристик потока

среды при температуре на входе $t_b = 560^\circ\text{C}$, температура стенки $t_c = 820^\circ\text{C}$.

Задание начальных условий в стационарном режиме обычно не применяется, но помогает сократить время компьютерного расчета. В данном случае это целесообразно, так как модель состоит из большого количества конечных элементов. Начальные условия распространяются равномерно в пределах всей расчетной области: начальная температура $t = 560^\circ\text{C}$; начальное абсолютное давление $p = 0,2$ МПа, начальная скорость в направлении оси канала $w = 8,93$ м/с, в качестве масштаба времени было принято 20% времени пребывания.

Расчеты показали, что коэффициент гидравлического сопротивления убывает с увеличением числа Рейнольдса от 6300 до 16000 по зависимости

$$\lambda = 131,07 / \text{Re}^{0,8425}, \quad (4)$$

число Нуссельта увеличивается в этом же интервале чисел Рейнольдса по зависимости

$$\text{Nu}_{\text{cp}} = 0,0087 \text{Re}^{0,835}. \quad (5)$$

Квадратный канал. Тип сетки аналогичен типу сетки круглого канала. Толщина пограничного слоя

$$\delta = 0,035 \text{Re}_L^{-1/7} = 0,035 \cdot 0,045 \cdot 10000^{-1/7} = 0,42 \text{ мм}. \quad (6)$$

Методом последовательных приближений были определены параметры призматического слоя: $q = 1,1$; $h_1 = 0,02$ мм; $n = 15$. При этом толщина слоя

$$H_{15} = h_1 \frac{q^n - 1}{n - 1} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{1,1^{15} - 1}{1,1 - 1} = 0,63 \text{ мм}. \quad (7)$$

Высота десяти первых призматических слоев:

$$H_{10} = h_1 \frac{q^n - 1}{n - 1} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{1,1^{10} - 1}{1,1 - 1} = 0,319 \text{ мм}. \quad (8)$$

Толщина пограничного слоя также находится в интервале между 10-м и 15-м призматическими слоями. Характеристики полученной сетки: количество узлов 604 395, количество элементов 1 795 862, в том числе тетраэдрических 941 222, призматиче-

ских 854 640. Граничные и начальные условия были заданы такими же, как для круглого канала.

Результаты определения коэффициента гидравлического сопротивления можно представить в виде формулы

$$\lambda = 50,734 / \text{Re}^{0,7465}, \quad (9)$$

зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса имеет вид

$$\text{Nu} = 0,00727 \text{Re}^{0,8525}. \quad (10)$$

Диффузно-конфузорный канал. Исследованный участок канала представлял собой сочетание конических элементов высотой 30 мм, соединенных чередующимися широкими и узкими основаниями диаметром 50 и 42 мм соответственно.

Тип конечно-элементной сетки аналогичен круглому каналу. Шаг сетки – не более 5 мм. Для повышения точности расчета в дополнение к призматическим слоям в области переменного сечения модели задано местное сгущение сетки с максимальным шагом 2 мм и коэффициентом роста 1,2. Определяющий линейный размер совпадает с диаметром круглого канала, поэтому в повторном определении примерной толщины пограничного слоя нет необходимости. Характеристики сетки: количество узлов 355 626, количество элементов 1 141 047, в том числе тетраэдрических 680 247, призматических 460 800.

На рис. 1 показано распределение турбулентной кинетической энергии в области переменного сечения, а также притупление профиля скорости на выходе из него, что также является следствием турбулизации потока. Из рисунка очевидно, что турбулизация происходит в местах отрыва пограничного слоя при расширении канала. При этом турбулентная кинетическая энергия возрастает лавинообразно по ходу движения среды.

В результате моделирования получены зависимости для коэффициентов сопротивления

$$\lambda = 7,64 / \text{Re}^{0,45} \quad (11)$$

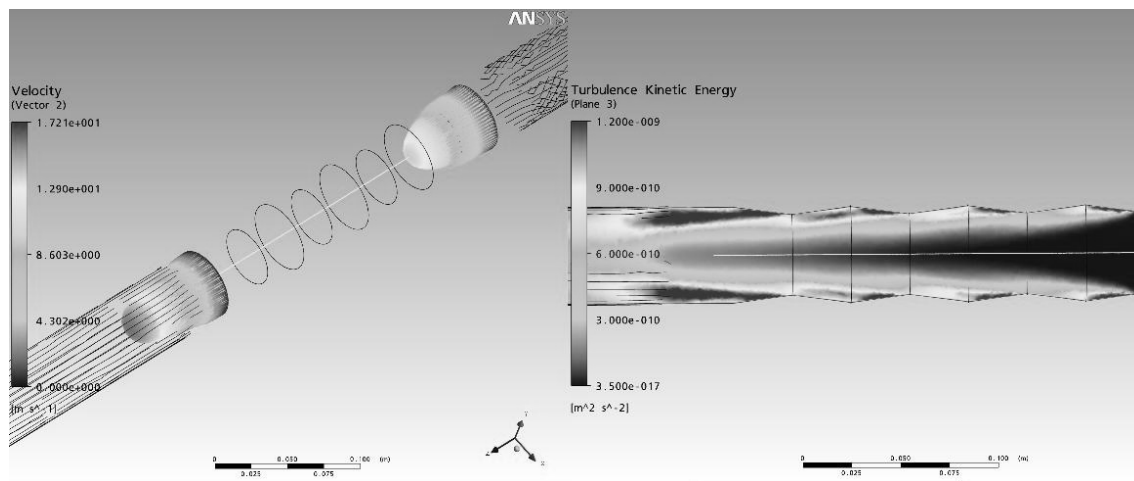


Рис. 1. Профили скорости и распределение энергии

и числа Нуссельта

$$Nu_{cp} = 0,0131 Re^{0,81}. \quad (12)$$

Канал со сферическими лунками имеет квадратное сечение с нанесенными на внутренней поверхности сферическими углублениями. Авторы статьи [3] показали, что оптимальной относительной глубиной лунки с точки зрения теплообмена являются значения, близкие к интервалу от 0,05 до 0,3. Под относительной глубиной понимается отношение d/h , где d – диаметр образующей лунку сферической поверхности, h – максимальная глубина лунки. При подборе глубины лунки с точки зрения вихреобразования при помощи моделирования линий тока в ее окрестности в ANSYS CFX было замечено, что при значениях, превышающих указанный выше интервал, в лунке образовывались застойные зоны и вихрь не покидал лунки. При слишком малых значениях глубины практически не происходило вихреобразования. Поэтому было выбрано значение $d/h = 0,15$ с радиусом скругления острой кромки $r = 4$ мм. Диаметр образующей лунку сферы выбран равным 40 мм из конструктивных соображений.

Тип конечно-элементной сетки – тетраэдрическая с призматическими слоями у стенки. Шаг сетки – не более 5 мм. Призматический слой аналогичен призматическому слою квадратного канала. Для повышения точности расчета в луночной области модели задано местное сгущение сетки с максимальным шагом 1 мм и коэффициентом роста 1,2. Определяющий линейный размер совпадает с диаметром квадратного канала, поэтому в повторном определении примерной толщины пограничного слоя нет необходимости. Характеристики сетки: количество узлов 1359 291, количество элементов 5 275 646, в том числе тетраэдрических 3 959 996, призматических 1 315 650.

Граничные, начальные условия и температурное состояние стенки были выбраны такими же,

как и в расчетах гидродинамики в каналах круглого, квадратного и диффузорно-конфузорного сечений. Результаты моделирования можно описать следующими зависимостями:

$$\lambda = 0,9897/Re^{0,2525}, \quad (13)$$

$$Nu_{cp} = 0,041 Re^{0,8825}. \quad (14)$$

Сопоставляя данные расчетов (4)–(5) и (9)–(14), можно выстроить гомологический ряд, который характеризует динамику изменения показателей сопротивления λ и теплоотдачи Nu_{cp} при интенсификации процесса в последовательности: «круглый», «квадратный», «диффузорно-конфузорный» и «луночный» каналы. Ряд для λ : 1; 0,886; 0,534; 0,300 и для Nu_{cp} : 1; 1,021; 0,970; 1,057.

Как показали результаты моделирования, сопротивление участка с лунками при некоторых значениях числа Re превышает значения для других каналов. При этом коэффициент теплоотдачи имеет относительно низкие значения. Это объясняется тем, что в лунках имеет место отрыв пограничного слоя и образуется область пониженного давления, что снижает полную теплоемкость воздуха. В то же время в аэродинамическом следе поверхности с лунками было обнаружено заметное возрастание коэффициента теплоотдачи и снижение гидравлического сопротивления. Поэтому дополнительно был рассчитан контрольный участок сразу за луночной поверхностью. Явление интенсификации теплообмена и снижения сопротивления в аэродинамическом следе луночной поверхности представляет определенный интерес для дальнейших исследований.

Процессы, происходящие в этой области, можно проследить на рис. 2 и 3.

При рассмотрении интегральных зависимостей на рис. 4 и 5 следует сделать вывод о том,

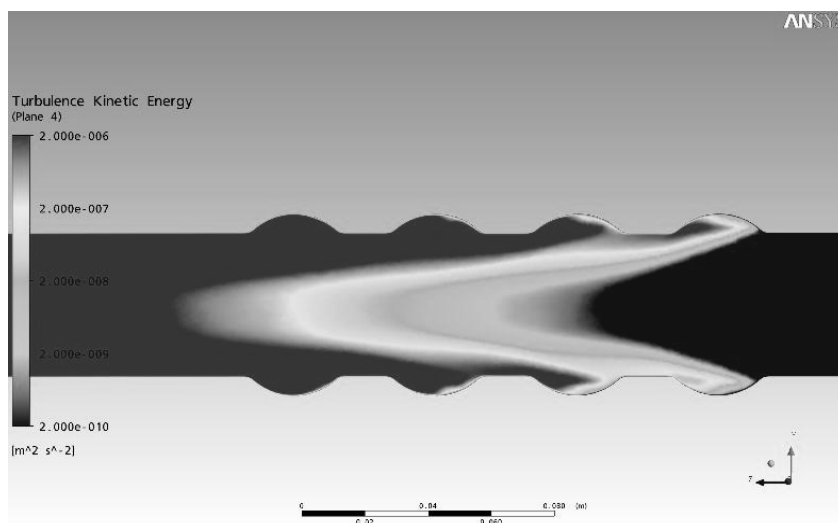


Рис. 2. Распределение турбулентной кинетической энергии

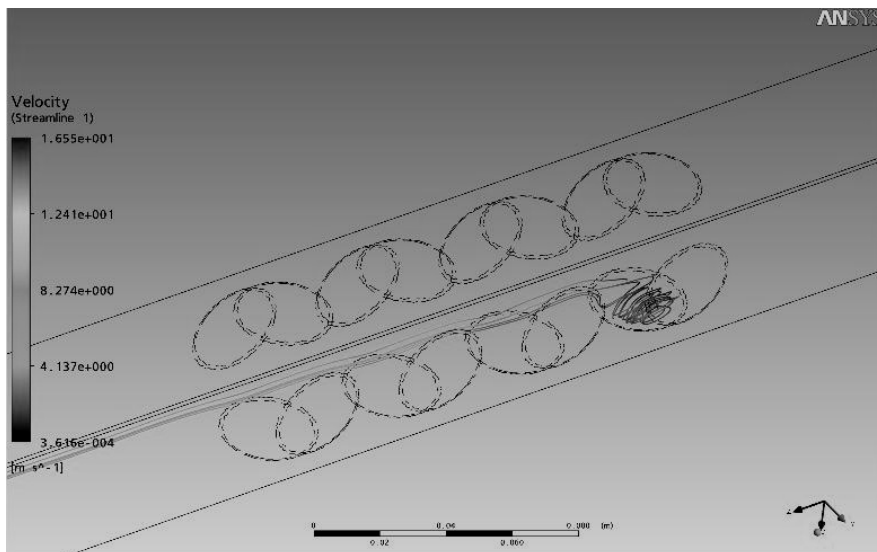


Рис. 3. Образование вихря в лунке первого ряда

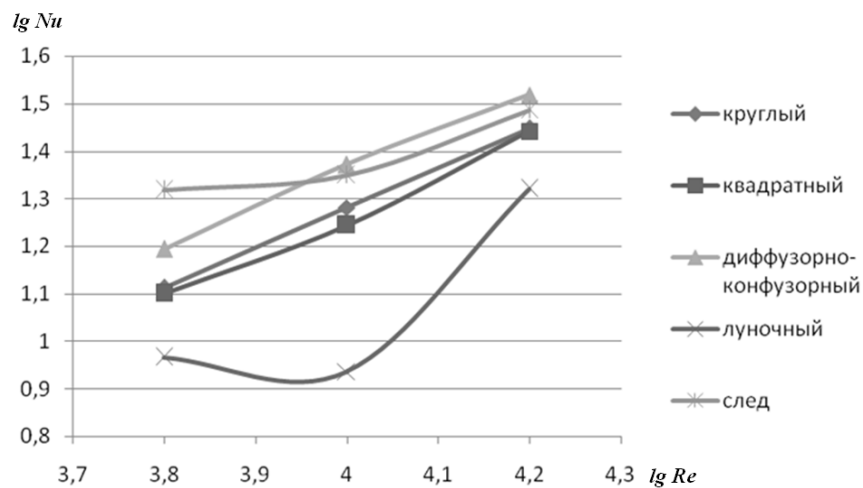
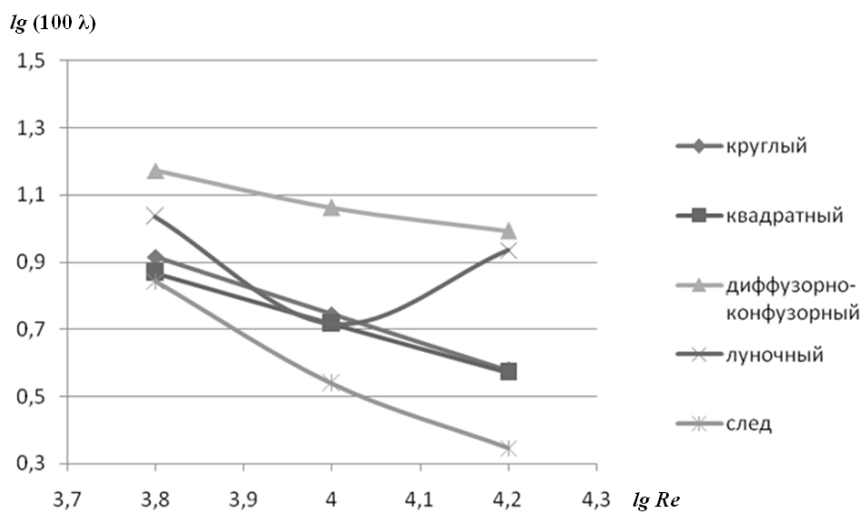


Рис. 4. Зависимость логарифма числа Нуссельта от логарифма числа Рейнольдса

Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления ($\lg 100\lambda$) от логарифма числа Рейнольдса

что при явно нелинейной зависимости для канала с луночной поверхностью необходимо принимать другие методы аппроксимации для получения средних по поверхности значений.

Вывод

Полученные с помощью пакета ANSYS CFX теплогидравлические характеристики ряда насадок регенераторов позволяют произвести сравнительные расчеты по оптимизации размеров каналов при последующей адаптации данных к фактическим условиям работы насадок.

Литература

1. Доменные воздушнонагреватели: конструкции, теория, режимы работы / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каушанова и др. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
2. ANSYS CFX Release 11.0 Documentation [Internet resource] / ANSYS, Inc. – <http://www.ansys.com>
3. Исаев, С.А. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, Н.В. Корнеев // VI Минский Международный форум по тепломассообмену. – Минск: НАН РБ, 2008. – С. 99–100.

Поступила в редакцию 29.06.2012 г.

Волкинд Дмитрий Константинович – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет.

Volkind Dmitry Konstantinovich – post-graduate student of Industrial Heat Power Department of South Ural State University.