

3D сравнительные исследования теплообмена и трения в каналах с модифицированными V-образными лунками и выпуклостями

АННОТАЦИЯ

Приведено сравнение расчетных характеристик теплообмена и трения V-образных лунок с результатами, полученными ранее в экспериментальных условиях. По результатам 3D расчета в ANSYS CFX выполнено расчетное исследование локальных и средних коэффициентов теплоотдачи, гидродинамических характеристик каналов охлаждения с модифицированными V-образными лунками и полусферическими выступами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов охлаждения каналов рабочих и сопловых лопаток турбин являются лунки, исследуемые, начиная с 1977 года в ИАЭ им. И.В. Курчатова [1]. В [1, 2] изучены особенности обтекания газами и жидкостями лунок, как в цилиндрических, так и в плоских каналах, полученные результаты явились начальной стадией изучения нового класса течений сплошной среды. В [3] проведен анализ по численному моделированию лунки различной глубины. Переход от двухъячеистой структуры к моновихревой сопровождался увеличением относительной теплоотдачи от сферической лунки до 1,6, а для участка в следе за лункой - до 1,44.

Изданные монографии, например, [4], зарубежные статьи (работы Ф. Лиграни) привели к частичному обобщению работ по этой проблеме. Так как лунки снижают потери давления относительно ребер и могут увеличить энергетическую эффективность канала, их исследование продолжают, в частности, экспериментальное исследование массива V-образных лунок [5]. В [5] при $Re = 30\ 000 - 40\ 000$ на V-образных поверхностях вторичные течения дополнительно увеличивали теплоотдачу по сравнению с лунками, а при увеличении Re в канале увеличивалась теплопроизводительность.

В [6] установлено, что уникальная характеристика канала с двойными лунками лежит в ее способности задерживать генерацию вихрей в лунке у стенок, эффективно стимулируя турбулентное смешение вблизи стенок без дополнительного увеличения трения. В работе [7] в двухполостных диффузорных выемках обем полостям придали (для возвратного течения) диффузорную форму. По данным автора она обеспечивала условия, благоприятные для дополнительной интенсификации теплообмена в возвратных течениях.

Для того, чтобы оптимизировать геометрию лунок (выпуклостей), таким образом, чтобы предложить усовершенствованную альтернативу ребер, в представленной работе выполнено 3D расчетное исследование коэффициентов теплоотдачи, гидродинамических характеристик каналов охлаждения с модифицированными V-образными лунками и полусферическими выступами.

2. РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД

2.1. Расчетная модель

Модель содержала прямоугольный канал с соотношением сторон 3:1 аналогичный соотношению, используемому в [5] (рис. 1, б). Участок L (рис. 1, б) был покрыт 3 рядами из 22 лунок исследуемой формы. Интересующая область исследования (рис. 1, б) располагалась во второй половине канала ($8,5 \leq x/D_h \leq 10,1$), что гарантировало, полностью развитое турбулентное течение в этой области. Геометрические размеры каналов, представленные в [5], были уменьшены в 10 раз, в варианте 7 (таблица 1) выпуклости были выполнены на верхней и нижней стенках канала. Для интересующей области температура воздуха принималась аналогично температуре измеренной термомпарами в [5] - в средней части двух сечений на входе и выходе из интересующей области L (рис. 1, а). Плоскость определения входного статического давления располагалась у выхода участка L_e (рис. 1, а). Это давление наряду с давлением на выходе из канала обеспечивало базу для расчетов потерь на трение, определяемых для лунок и выпуклостей.

2.2. Исходная конфигурация V-образных лунок

Массив исходных V-образных лунок был получен из массива расположенных в шахматном порядке полусферических лунок. На рис. 1, б показан полученный массив V-образных лунок наряду с оригинальным массивом лунки (обведенных белым). Диаметр лунки равнялся 0,635 мм (рис. 1, в), а глубина - $\delta/D = 0,3$, шаг в поперечном и продольном направлении - $S_{x/d} = S_{y/d} = 0,8$. Лунка V-образной формы определялась соединением 3 полусферических лунок. Глубина V-образных лунок равнялась $\delta/D = 0,3$, однако, шаг лунок становился $S_x/D = S_y/D = 3,2$.

2.3. Граничные условия и геометрия исследуемых лунок

Граничные условия основывались на экспериментальных данных, полученных во время экспериментов [5]. Расход изменялся для достижения требуемых Re близких к 10 000, 20 000, 30 000 и 40 000, базируясь на гидравлическом диаметре ($D_h = 4,0$ мм) канала. Интенсивность турбулентности на входе равнялась 5%. Все течения рассматривались как сжимаемый воздух, используя реальный газ. Для того, чтобы избежать влияния на структуру потока обратного течения во входной зоне, выход из домена был расширен далее от зоны с лунками.

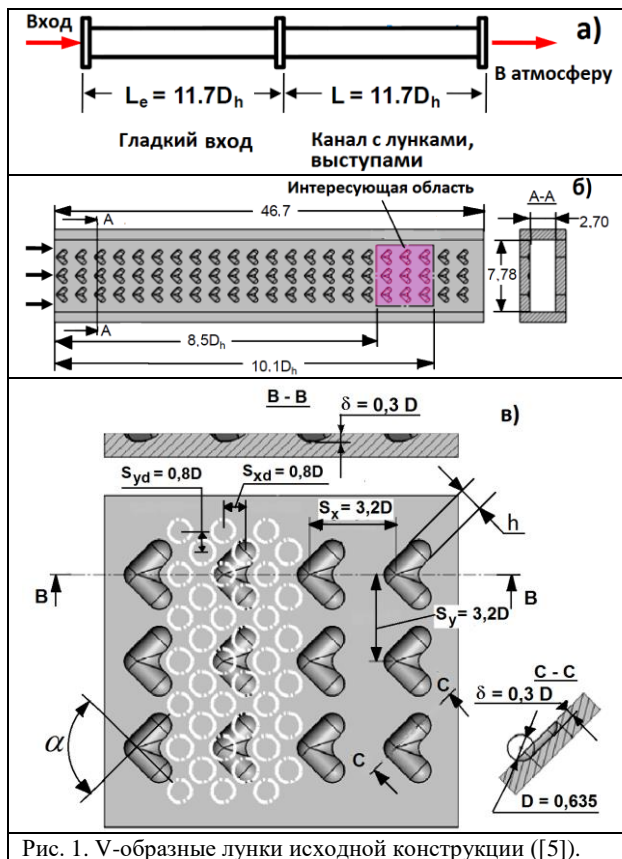


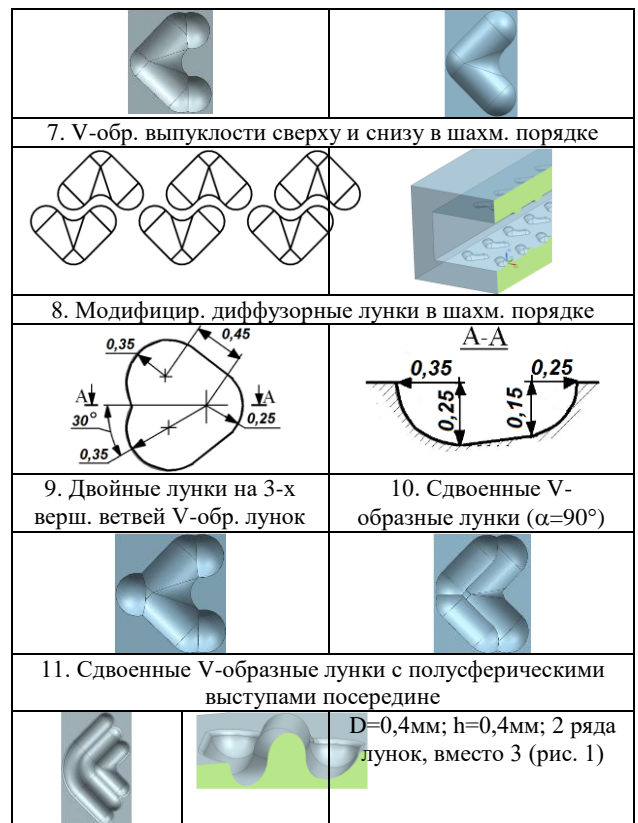
Рис. 1. V-образные лунки исходной конструкции ([5]).

Контрольная пластина моделировалась как пластина с постоянной температурой на $(330 - 400)^\circ\text{C}$ выше, чем температура воздуха. Для имитации воздействия газового потока в лопатках, температура горячего воздуха прикладывалась к нижней стенке, на других стенках назначались адиабатные условия. Все расчеты выполнялись с использованием программы ANSYS CFX17.2. Основные геометрические размеры исследуемых лунок и полусферических выпуклостей представлены в таблице 1.

2.4. Обработка данных и генерация сетки

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.

1. V-образные исходные лунки ($\alpha=90^\circ$) [5]	2. V-образные лунки ($\alpha=45^\circ$)	D=0,4мм h=0,4мм (рис. 1)
3. V-образные лунки ($\alpha=60^\circ$)	4. Лунки из [5] повернутые на 180°	D=0,4мм h=0,4мм (рис. 1)
5. Двойные лунки на 2-х вершинах ветвей V-обр. лунок	6. V-образные выпуклости	



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 трения для канала рассчитывался из уравнения $f = (P_{ax} - P_{вых.}) / (\rho V^2 / 2)$. Для оценки характеристики теплоотдачи исследуемых лунок различной формы в зависимости от механизмов интенсификации теплоотдачи, число Нуссельта среднее на рабочем участке нормировалось относительно Nu_0 в зависимости С.С. Кутателадзе для полностью развитого турбулентного течения в гладкой трубе. На интересующем участке сравнивался исследованный коэффициент трения в канале с модифицированными лунками и в гладкой трубе (уравнение Блазиуса). Основываясь на условиях постоянной мощности на прокачку, используя зависимость [8], теплопроизводительность геометрии лунки определялась как $\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}$.

Сетки для расчетного домена генерировались как тетра сетки при использовании ICEM-CFD 17.2. При создании тетра сетки у стенки канала и на поверхности лунок, полусферических выступов создавалось 20 призматических слоев. Внутри и вокруг лунок (полусферических выступов) предусматривалась высокая плотность сетки для отображения вихревой интенсификации в районе этих поверхностей. На контролируемой стенке величина $y^+ < 1$ при размере сетки 12 млн. элементов.

2.5. Валидация моделей турбулентности, коэффициентов трения и теплопроизводительности для исходных V-образных лунок

С целью демонстрации использования адекватной модели турбулентности для исследования модифицированных лунок и выпуклостей, применительно к V-образным лункам исследовались восемь моделей турбу-

лентности: SST, $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, $k-\omega$, BSL, BSL EARSМ, S-A и SSG Re Stress. На рис. 2 приведены осредненные числа Нуссельта для восьми моделей турбулентности в сравнении с измерениями [5] для $Re = 10000 - 40000$. Из рисунка 4 очевидно, что, хотя 8 моделей турбулентности могут точно предсказать тенденцию прогрессирования кривой, они не могут абсолютно точно прогнозировать измеренные величины. Существенные отличия между измеренными и расчетными величинами получены для

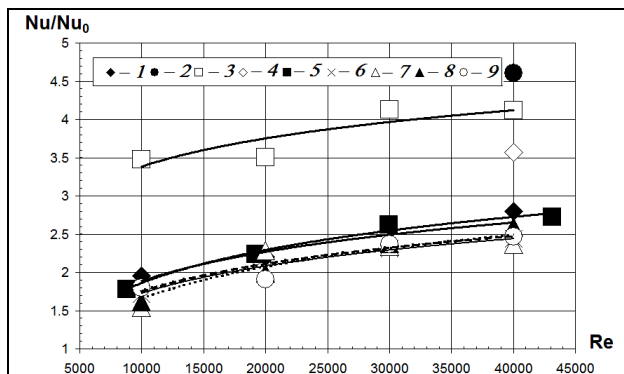


Рис. 2 Сравнение прогнозируемых в CFD Nu/Nu_0 в канале с V-образными лунками для 8 моделей турбулентности и измерениями [5]: 1 - V-образные лунки, эксперимент [5]; 2 - RNG $k-\varepsilon$; 3 - $k-\varepsilon$; 4 - SSG Re Stress; 5 - S - A; 6 - BSL EARSМ; 7 - BSL Re Stress; 8 - SST; 9 - $k-\omega$.

моделей турбулентности $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, SSG Re Stress, при этом отличия для моделей турбулентности S-A и BSL EARSМ являются наиболее низкими, несколько более высокие отличия получены для моделей турбулентности $k-\omega$, BSL Re Stress и SST.

Отличия коэффициентов трения при использовании модели турбулентности S-A составили максимум 8% при $Re=10000$, что является вполне приемлемой величиной. Теплопроизводительность V-образных лунок, полученная в 3D расчете с использованием модели турбулентности S-A, удовлетворительно согласуется с экспериментальной теплопроизводительностью [5]. Предельное отличие (в 11,5%) связано с максимальным отклонением экспериментальных данных от экстраполирующей кривой Nu/Nu_0 при $Re = 30000$. В связи с этим сравнение прогнозируемых с помощью CFD локальных и осредненных чисел Нуссельта в канале для массива модифицированных V-образных лунок и выпуклостей было выполнено с использованием модели турбулентности S - A.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Интенсификация теплоотдачи

Для того, чтобы предложить усовершенствованную альтернативу ребер, в приведенном расчетном исследовании проведено изучение интенсификации теплообмена различных конструкций лунок и выпуклостей (рис. 3). Установлено, что в интересующей области наибольшей интенсификацией теплообмена в диапазоне чисел $Re \approx 6700 - 40000$ обладают сдвоенные V-образные лунки с полусферическими выступами посередине ($Nu/Nu_{гл.} = 4,12 - 4,26$), со сравнительно равномерной интенсификацией теплоотдачи в широком диапазоне Re . Среди лунок без полусфер для рабочего диапазона чисел $Re = 20000 - 40000$ максимальной интенсификацией теплоотдачи обладают двойные лунки на трех вершинах ветвей V-образных лунок ($Nu/Nu_{гл.} = 2,53 - 3,23$). Однако, для $Re \approx 10000$ большая интенсификация теплоотдачи получена

для V-образных выпуклостей ($\alpha = 90^\circ$) и для V-образных выпуклостей сверху и снизу ($\alpha = 90^\circ$) - $Nu/Nu_{гл.} = 2,76$ и 3,05, соответственно.

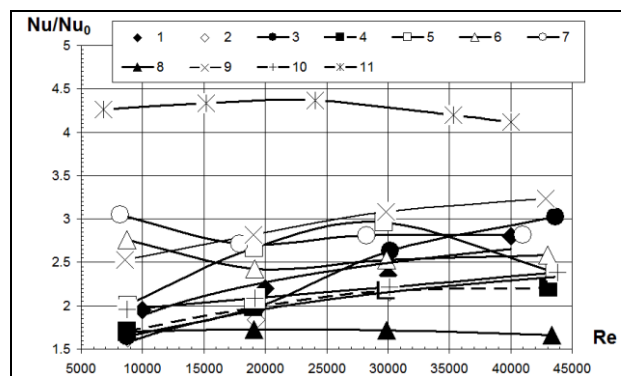


Рис. 3 Сравнение прогнозируемых в CFD относительных Nu в канале с модифицированными лунками для модели S-A и измерениями [5] (нумерация - в табл. 1).

3.2. Увеличение коэффициентов трения

Исследование различных конструкций лунок и выпуклостей показало, что максимальное отношение коэффициентов трения (f/f_0) получено для V-образных выпуклостей в канале сверху и снизу ($\alpha = 90^\circ$) и сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами посередине, несколько ниже f/f_0 получено для V-образных выпуклостей выполненных сверху и снизу. Минимальное отношение (f/f_0) получено для диффузорных лунок.

3.3. Теплопроизводительность

В результате потери трения объединяются с интенсификацией теплоотдачи в форме теплопроизводительности (η) для оценки лунок и полусферических выпуклостей. Сравнение теплопроизводительности для исследованных схем охлаждения приведено на рис. 4. В диапазоне $Re \approx 10000 - 40000$ теплопроизводительность сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами посередине ($\eta = 2,99 - 2,29$) превышает η лунок и

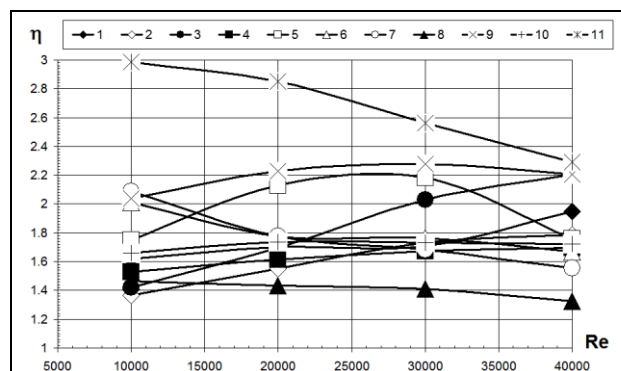


Рис. 4 Сравнение расчетной η различных модификаций лунок и выпуклостей с экспериментальной η V-образных лунок из [5] (нумерация - в табл. 1)

исследуемых полусферических выпуклостей, а при $Re \approx 40000$ практически совпадает с η двойных лунок на 3 вершинах V-образных ветвей ($\eta = 2,21$). В основном интенсификация теплоотдачи (Nu/Nu_0) лунок V-образной формы превосходит интенсификацию полусферических лунок [11]; в действительности суммарная

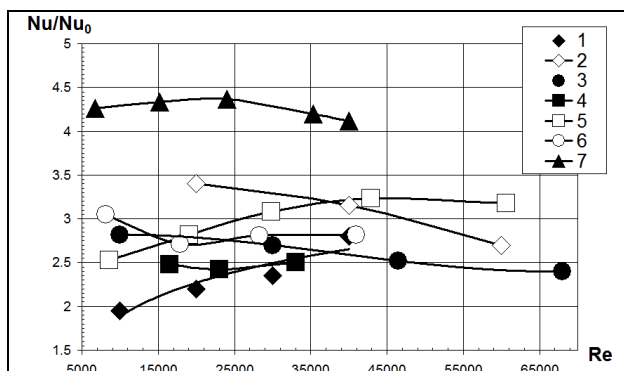


Рис. 5 Сравнение Nu/Nu_0 лунок и выпуклостей с предыдущими исследованиями: 1 - V-образные лунки [5]; 2 - V-образные ребра [9]; 3 - наклонные ребра [10]; 4 - полусф. лунки [11]; 5 - двойные лунки на 3 верш. ветвей V-обр. лунок; 6 - V-обр. выпуклости сверху и снизу ($\alpha=90^\circ$); 7 - сдвоенные V-обр. лунки с полусферическими выступами.

интенсификация теплоотдачи V – образных лунок с увеличением Re приближается к интенсификации традиционных наклонных ребер [10] и даже превышают ее при $Re \approx 30000 - 40000$ для двойных лунок на 3 вершинах ветвей V-образных лунок, а при $Re \approx 30000 - 40000$ - для V-образных выпуклостей выполненных сверху и снизу (рис. 5). При $Re \approx 40000$ интенсификация теплоотдачи для двойных лунок на 3 вершинах ветвей V-образных лунок незначительно выше Nu/Nu_0 для V-образных ребер, а для $Re \approx 60000$ – выше на 18% [9]. Однако, хотя интенсификация теплоотдачи для сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами превышает Nu/Nu_0 для V-образных ребер [9], максимальное отношение f/f_0 получено для сдвоенных V-образных лунок с полусферическими выступами (рис. 5). Поэтому необходимо продолжить исследования теплообмена и трения модифицированных лунок в сочетании с ребрами, увеличивая интенсивность вихрей и теплоотдачу при умеренном росте потерь давления в канале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.А. Гачечиладзе, Г.И. Кикнадзе, Ю.К. Краснов, В.Г. Олейников, Ю.В. Чушкин, О.А. Калинин, А.Г.Самойлов, И.И. Крючков, Ю.М. Ануров, Н.Д. Кузнецов, Г.П. Нагога, К.М. Попов. Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // Теплообмен-ММФ. Конвективный, радиационный и комби-

нированный теплообмен: Проблемные доклады. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1988. – Секции 1, 2. – с. 63 – 125.

2. Александров А.А., Горелов Г.М., Данильченко В.П., Резник В.Е. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при обтекании поверхностей с развитой шероховатостью в виде сферических углублений // Пром. теплотехника. 1989. Т.11, №6. С.57–61.

3. С. А. Исаев, А. И. Леонтьев. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки на стенке узкого канала, Теплофизика высоких температур, 2003, том 41, выпуск 5, с. 755–770.

4. Пристенная интенсификация теплообмена при сложных граничных условиях: монография /А.В. Шукин, А.В. Ильинков. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 252с.

5. C. Neil Jordan and Lesley M. Wright. Heat Transfer Enhancement in a Rectangular (AR = 3:1) Channel with V-shaped Dimples // Proceedings of ASME Turbo Expo 2011. June 6-10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada. GT2011-46128, pp. 1-12.

6. Lucky V. Tran, Michelle I. Valentino, Abhishek Saha, Carson D. Slabaugh, Mark Ricklick, J.S. Kapat, Saptarshi Basu. PIV Study on the Dimple Mid-plane of a Narrow Rectangular Channel with Dimples Applied to One Wall. Proceedings of ASME Turbo Expo 2011: June 6-10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada. GT2011-46132, pp. 1-11.

7. Хабибуллин И. И. Интенсификация теплообмена двухполостными диффузорными выемками. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Казань. 2016 г.

8. Han, J.C., Park, J.S., and Lei, C.K., 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channels with Turbulence Promoters," *ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 628-635.

9. Wright, L.M. and Gohardani, A.S., 2009, "Effect of Coolant Ejection in Rectangular and Trapezoidal Trailing Edge Cooling Passages," *AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 23, No. 2, pp. 316-326.

10. Wright, L.M. and Gohardani, A.S., 2008, "Effect of Turbulator Width and Spacing on the Thermal Performance of Angled Ribs in a Rectangular Channel (AR = 3:1)," *ASME Paper No. IMECE2008-66842*.

11. Chyu, M.K., Yu, Y, Ding, H, Downs, J.P., and Soechting, F.O., 1997, "Concavity Enhanced Heat Transfer in an Internal Cooling Passage," *ASME Paper No. 97-GT-437*.

Yu.G. Gorelov, A.A. Nazarov

Experimental Design Office, PC "SALUT",
Russia, 105118 Moscow, Pr. Budennogo, 16

3D COMPARATIVE INVESTIGATE HEAT EXCHANGE AND FRICTION IN THE CHANNELS WITH MODIFICATED V-SHAPED DIMPLES AND CONVEXITIES

Give comparison calculated behavior of heat exchange and friction V-shaped dimples with results received previously in the experimental conditions. By the results of 3D calculation in ANSYS CFX carried out calculated investigate of local and averaged heat transfer coefficients, hydrodynamic behaviors of cooling channels with modiflicated V-shaped dimples and hemispherical protrusions.