

УДК 536.24

Экспериментальное исследование турбулентной структуры течения в ячейке решетчатой матрицы*

А.В. Золотухин^{1,2}, И.А. Чохар¹, В.И. Терехов^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: zoloav@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования турбулентной структуры течения в ячейке вихревой матрицы, представляющей собой область между пересекающимися ребрами на противоположных стенках плоского канала. Угол между ребрами составлял $2\beta = 60^\circ, 90^\circ$ и 120° ; число Рейнольдса, рассчитанное по средней скорости и гидравлическому диаметру канала изменялось в диапазоне $Re = (1-7) \cdot 10^4$. Измерения аэродинамических характеристик потока внутри ячейки решетчатой матрицы, размещенной в прямоугольном канале сечением 20×150 мм и длиной 400 мм, проводились с помощью двухкомпонентного лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Изучена структура течения в отдельных ячейках размером 15×15 мм, образованных скрещивающимися ребрами на противоположных стеках канала. Показана сложная трехмерная структура течения в ячейках матрицы и сильная турбулизация потока в пристенных областях. Установка ребер приводит к значительному росту гидравлических потерь, особенно при больших углах скрещивания.

Ключевые слова: решетчатая матрица, компланарные каналы, угол скрещивания ребер, аэродинамика, профили скорости и турбулентных пульсаций, гидравлические потери.

Введение

Проблема интенсификации конвективного теплообмена в энергетических установках на протяжении длительного периода времени остается актуальной и продолжает привлекать внимание многих исследователей. Известно, что среди большого числа существующих методов интенсификации теплообмена наиболее высокими показателями по степени интенсификации обладают каналы с установленными в них решетчатыми матрицами [1, 2]. В общем случае такое теплообменное устройство представляет собой плоский или кольцевой канал, на противоположных стенках которого с определенным шагом установлены ребра под различным углом к оси канала. В промежутке между пластинами теплоноситель движется по сложной системе каналов, образованных взаимно

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 075-15-2021-575).

пересекающимися ребрами [3]. В литературе такие устройства получили название вихревых или решетчатых матриц, а также компланарных каналов со скрещивающимися ребрами. При этом в канале реализуется перекрестное течение газа, так что направление потока постоянно меняется по высоте канала. Общий вид канала представлен на серии фото (рис. 1) для различного значения угла скрещивания ребер. Подобные теплообменники имеют высокие значения коэффициентов теплопереноса и получили широкое распространение при организации тепловой защиты стенок в теплонапряженных энергетических установках, таких как камеры сгорания жидкостных реактивных двигателей [4], в лопатках газовых турбин [5], лазерных зеркал [6] и т.д.

К настоящему времени накоплен большой материал экспериментальных и численных исследований аэродинамики и теплообмена внутри решетчатых матриц [1, 2, 4, 7–14]. Представленные в литературе результаты свидетельствуют о значительном усилении теплоотдачи при опережающем росте гидравлических потерь. Однако следует отметить, что в подавляющем числе экспериментальных работ получены лишь интегральные характеристики, тогда как для понимания сложных особенностей аэродинамики и теплопереноса в решетчатых каналах требуются данные о локальных характеристиках и прежде всего о трехмерной структуре течения и турбулентности во всей области течения, включая пристенные зоны. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию профилей скорости внутри решетчатых ячеек, а также их турбулентных пульсаций. Основное внимание уделяется изучению структуры течения при угле пересечения ребер $2\beta = 90^\circ$.

1. Экспериментальная установка

Для изучения аэродинамики внутри вихревых матриц использовалась бесконтактная оптическая измерительная система, состоящая из блока двухкомпонентного лазерного доплеровского измерителя скорости с временной селекцией компонент вектора скорости, которая имеет значительный диапазон измерения скорости ($0 \div 100$ м/с). Минимальное расстояние от стенки, с которого начиналось измерение профилей скорости, составляло $\sim 0,8$ мм. Оптический блок перемещался с помощью трехкомпонентного

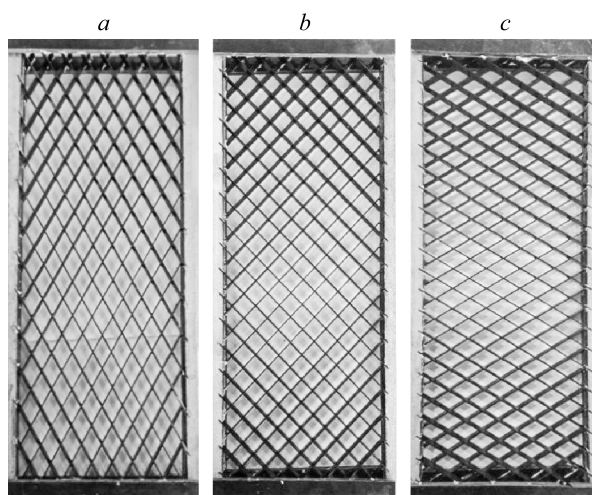


Рис. 1. Рабочие участки с углом скрещивания 2β между пересекающимися ребрами, равным 60° (a), 90° (b) и 120° (c).

координатного устройства с точностью позиционирования не более 0,1 мм. В качестве трассеров в потоке использовались частицы глицерина в виде аэрозоля, который образовывался при реконденсации паров глицерина в специальном термогенераторе. Размер частиц не превышал 0,5 мкм.

Высоконапорный вентилятор с расходом воздуха до 0,9 кг/с имел обратную связь через электронный дифференциальный манометр, который обеспечивал поддержание заданных расходных параметров потока. Рабочей средой был воздух комнатной температуры.

Экспериментальный стенд представлял собой прямоугольный плоский канал поперечным сечением 20×150 мм с прозрачными стенками длиной 400 мм. Размеры канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении. Непосредственно перед входом в канал устанавливалось сопло Витошинского со степенью поджатия потока $K = 5,8$, так что профиль скорости на входе был равномерным со степенью турбулентности 2 %.

Решетчатая матрица создавалась внутри канала следующим образом. На противоположных стенках по широкой стороне размещались ребра, выполненные из стали толщиной 1 мм и шириной 10 мм. Они устанавливались под определенным углом к продольной оси канала с постоянным шагом, тем самым образуя систему взаимно пересекающихся каналов (рис. 1). Зазор между торцами ребер на середине канала отсутствовал, таким образом газовый поток в матрице распространялся по системе параллельных каналов. Угол пересечения ребер в экспериментах варьировался и принимал значения $2\beta = 60^\circ, 90^\circ$ и 120° . Расстояние между ребрами, образующими ячейку матрицы, во всех случаях составляло 15 мм (рис. 1 и 2).

Поверхность ребер была покрыта полимерной краской черного цвета, что предотвращало возникновение бликов при проведении опытов. Так как метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) является точечным методом измерения параметров потока, то для детального исследования течения внутри компланарных каналов была составлена схема точек измерения внутри отдельной ячейки в центре экспериментального участка ($z = 200$ мм) с углом скрещивания ребер $2\beta = 90^\circ$ (рис. 2). Выбор данного угла обусловлен возможностью обеспечения приемлемых оптимальных теплогидравлических характеристик устройств, в которых он используется, что объясняет его распространенность

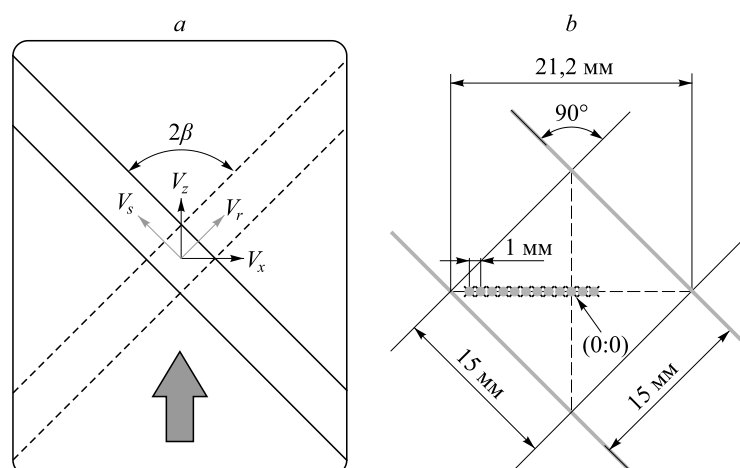


Рис. 2. Схема расположения ребер в матрице и системы координат (a), а также расположение точек измерения скоростей (b).

на практике. Число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости и гидравлическому диаметру канала, изменялось в диапазоне $Re = (1-7) \cdot 10^4$ и вычислялось по формуле

$$Re = \frac{V_m d_h}{\nu}.$$

На рис. 2а изображены направления координатных осей, связанных как с каналом (z - x), так и с ребрами (r - s). Для проведения исследований аэродинамики потока в ячейке вихревой матрицы было выбрано двенадцать точек по горизонтали с шагом 1 мм: центральная точка с координатой (0;0), девять точек слева с указанным шагом до точки с координатой (0;-9) и две точки справа до координаты (0;2). Расположение измерительных точек показано на рис. 2б. В эксперименте проводилось измерение средней и пульсационной компонент скорости в ортогональных направлениях z - x координат по высоте плоского канала более чем в 70 точках. Компоненты скорости в координатах r - s рассчитывались по данным измерений в z - x -направлениях.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Профили относительной продольной V_z и поперечной V_x скоростей по высоте канала при числе $Re = 9,6 \cdot 10^3$ в центре ячейки вихревой матрицы ($x = 0$) приведены на графиках рис. 3. В качестве масштаба использовалась величина среднерасходной скорости в канале V_m . Все представленные здесь данные получены по высоте канала H на расстоянии 200 мм от начала рабочего участка и на расстоянии 75 мм от боковых стенок. Из рис. 3а видно, что продольная компонента скорости V_z в центре ячейки экспериментального

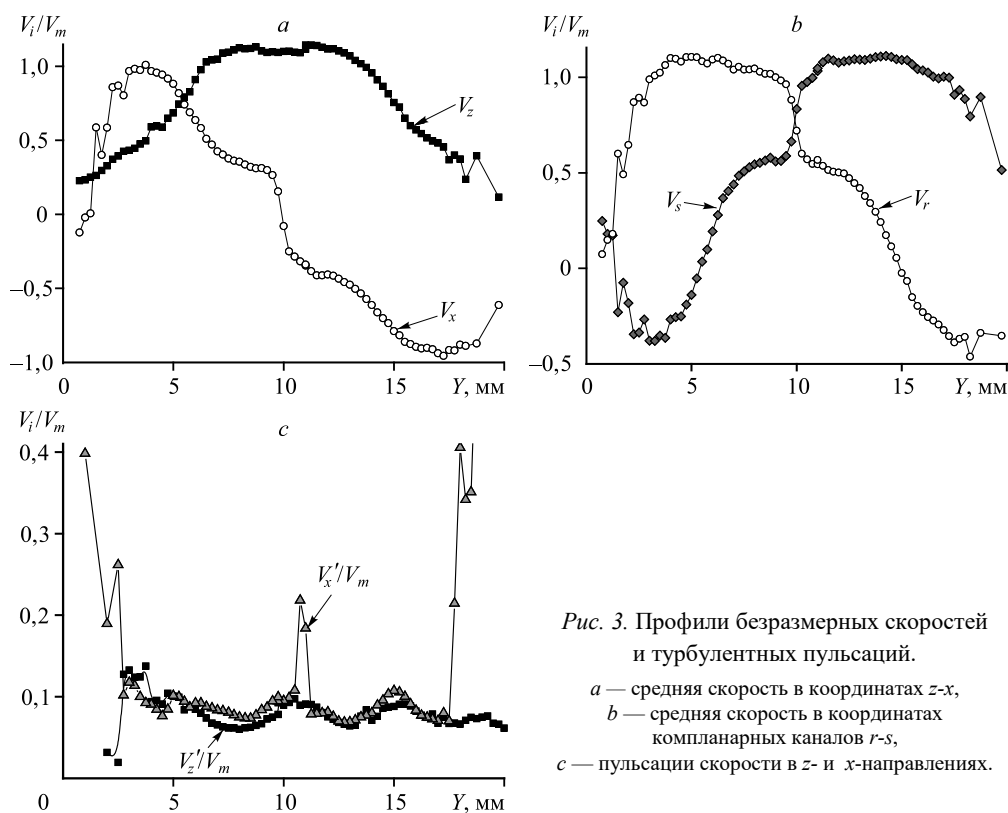


Рис. 3. Профили безразмерных скоростей и турбулентных пульсаций.
 а — средняя скорость в координатах z - x ,
 б — средняя скорость в координатах компланарных каналов r - s ,
 с — пульсации скорости в z - и x -направлениях.

участка с углом скрещивания $2\beta = 90^\circ$ является симметричной относительно середины высоты канала. В центре канала наблюдается протяженное плато с величиной скорости, примерно равной среднерасходному значению. В пристенных областях на обеих стенках профили имеют меньшую заполненность по сравнению со стабилизированным течением газа в плоском канале. Трансверсальная компонента скорости асимметрична относительно продольной оси канала и газовый поток на верхней и нижней стенках движется в противоположных направлениях.

Компоненты скорости в системе координат, связанной с ребрами, определялись из геометрических соотношений как

$$V_s = V_z \sin \beta - V_x \cos \beta, \quad V_r = V_z \sin \beta + V_x \cos \beta.$$

Из рис. 3*b* следует, что профили скоростей в r - и s -направлениях являются подобными и зеркально отраженными. Действительно, в той части канала, где течение газа формируется в промежутке между ребрами, профиль скорости является наполненным, тогда как во второй половине высоты канала происходит резкое снижение скорости с образованием возвратного течения небольшой интенсивности.

Можно также отметить неустойчивый характер течения в окрестности стенок, что является причиной значительной турбулизации течения на этом участке. В этом можно убедиться, обратившись к рис. 3*c*, где демонстрируется поведение турбулентных пульсаций в z - и x -направлениях. Распределение пульсационных скоростей является неравномерным по высоте канала, что объясняется неоднородностью течения и наличием больших градиентов скорости. Продольная компонента турбулентных пульсаций как в окрестности стенок, так и в ядре течения не превышает величины, характерной для течения в канале — $V'_z/V_m < 0,12$, тогда как трансверсальная составляющая вблизи поверхности боковых стенок превышает величину $V'_x/V_m > 0,4$. По-видимому, эта особенность поля турбулентности является одной из причин интенсификации теплообмена в решетчатых каналах.

Течение в решетчатой матрице носит ярко выраженный трехмерный характер. Причем компоненты скорости в плоскости z - x сопоставимы между собой и их величина может существенно изменяться по высоте канала. Проанализируем поведение величин полной скорости и ее направления в ячейке решетчатой матрицы. Модуль вектора скорости и его направление при угле скрещивания ребер $2\beta = 90^\circ$ могут быть найдены из следующих соотношений:

$$V_\Sigma = \sqrt{(V_z^2 + V_x^2)}, \quad \varphi = \arctg(V_x/V_z).$$

Изменение модуля полной скорости и ее направления относительно продольной оси представлено на рис. 4*a* и 4*b* соответственно. Профили полной скорости определялись для различных расстояний от центра ячейки. Величина $x = 0$ соответствует центру ячейки, а $x = 9$ — самому удаленному расстоянию от ее оси (см. рис. 2*b*). Профили полной скорости для различных удалений от центра оказались сходными между собой: вблизи стенок канала течение имеет типичный для пограничного слоя характер, а в окрестности центра наблюдается своеобразный провал, обусловленный взаимодействием двух скрещивающихся потоков газа на противоположных стенках канала. Отметим, что величина полной скорости заметно уменьшается по мере перемещения от центра ячейки к периферии, что объясняется торможением потока, но уже ребрами, и это приводит к формированию пограничных слоев на поверхности ребер.

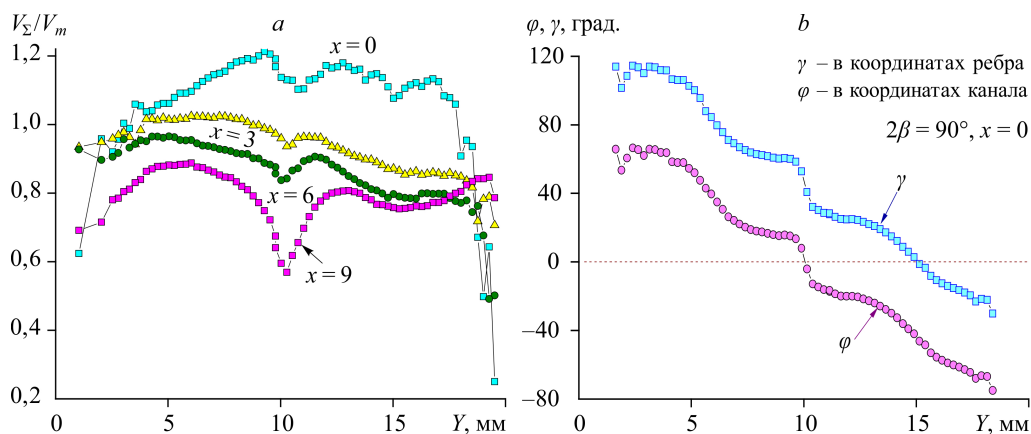


Рис. 4. Изменение модуля скорости (а) и ее направления (б) в промежутке между стенками канала.

Как видно на рис. 4б, направление вектора скорости внутри решетчатой ячейки непрерывно меняется по высоте канала. Угол наклона ϕ определяется взаимным расположением ребер на нижней и верхней стенках канала. При ортогональной их ориентации максимальное значение угла поворота вектора скорости составляет $2\phi_{\max} = 90^\circ$. Подобным образом изменяется и величина угла γ , характеризующего угол скоса потока в системе координат z - x .

Сопоставление полученных данных с результатами измерений структуры течения, представленными в литературных источниках, приведено на рис. 5. В данной области исследований существуют только две работы [1, 2], измерения в которых были проведены многоканальным пневмозондом. Как следует из анализа рис. 5а, получить для продольной компоненты скорости V_z хорошее согласование с данными настоящей работы не удалось. Особенно сильные отличия наблюдаются в пристенных зонах, где измерения [1] демонстрируют более наполненный профиль скорости. Причин несовпадения данных может быть много, к основным из них следует отнести отличия в геометрии каналов, числах Рейнольдса, погрешностей контактных методов диагностики и др.

В отличие от распределения продольной скорости измерения трансверсальной компоненты, несмотря на разницу в условиях течения, хорошо совпадают между собой.

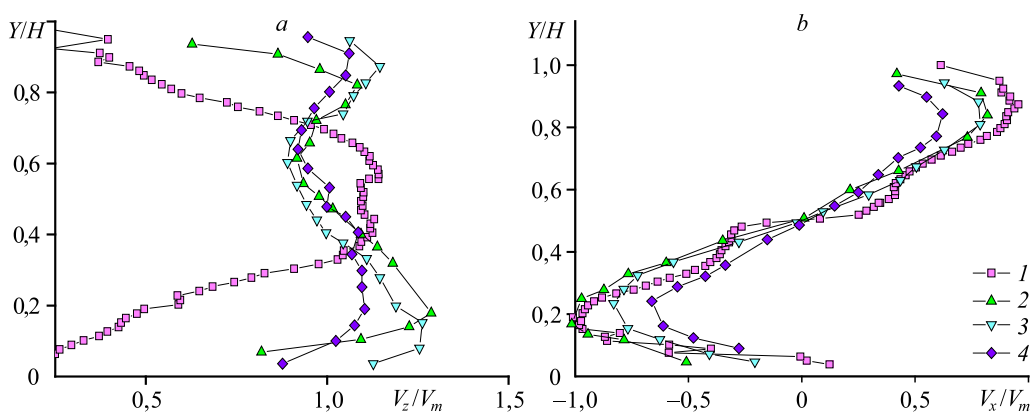


Рис. 5. Сопоставление профилей продольных (а) и поперечных (б) скоростей внутри решетчатых матриц с данными работы [1].

а — данные настоящей работы при $z/d_h = 3$ (1) и работы [1] при $z/d_h = 4,5$ (2), 10,5 (3), 21 (4);
 б — данные настоящей работы при $x/d_h = 3$ (1) и работы [1] при $x/d_h = 4,5$ (2), 10,5 (3), 21 (4).

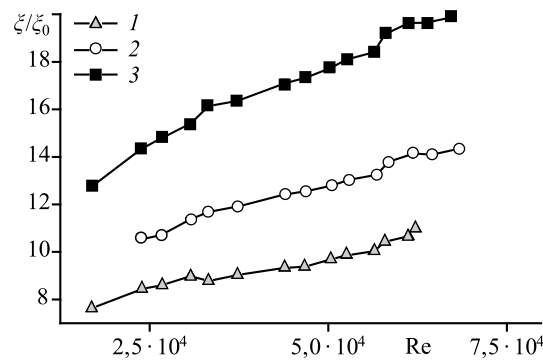


Рис. 6. Зависимость относительного коэффициента гидравлического сопротивления решетчатых каналов от числа Рейнольдса.
 $2\beta_{\max} = 60^\circ$ (1), 90° (2), 120° (3).

Такой вывод следует из данных, приведенных на рис. 4b. Подобная универсальность распределения скоростей в трансверсальном направлении может быть использована как при обобщении результатов, так и при разработке моделей расчета течения и теплообмена.

Важным параметром для оценки эффективности используемых приемов интенсификации теплообмена является рост гидравлических потерь за счет установки вихрегенераторов. Определение гидравлических потерь на участке с решетчатой матрицей проводилось по разности статического давления до и после нее. Давление измерялось через специальные отверстия диаметром 0,8 мм, расположенные на расстоянии 200 мм до участка и 200 мм после него. Тем самым устранялось влияние возможных возмущений турбулентного потока на величину статического давления. Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывался как

$$\xi = 2\Delta P / (\rho V_m^2),$$

где ΔP — перепад статического давления между точками отбора, а V_m — среднерасходная скорость в канале.

Все опытные данные по гидравлическим потерям представлены на рис. 6 в относительном виде ξ/ξ_0 , где ξ_0 — коэффициент гидравлического сопротивления в плоском канале при отсутствии решетчатой матрицы. Гидравлические потери возрастают по мере увеличения числа Рейнольдса и угла скрещивания ребер. При этом уровень потерь оказывается достаточно велик, и для условий проведенных экспериментов они возрастают до $\xi/\xi_0 \sim 20$. В то же время следует принимать во внимание, что для оценки пригодности использования решетчатых матриц в практических приложениях полученные результаты необходимо рассматривать совместно с данными по интенсификации теплообмена в форме параметров теплогидравлической эффективности.

Заключение

Проведен комплекс экспериментальных исследований по изучению структуры течения в плоском канале при наличии решетчатой матрицы. Измерения выполнены с помощью бесконтактной оптической системы ЛДА. Показано, что течение в вихревой ячейке носит сложный трехмерный характер. Продольная компонента скорости имеет вид, сходный с течением в плоском канале, за исключением образования своеобразного плато в центре канала при существенно меньшей наполненности пристенных пограничных

слоев. Установлено, что трансверсальная компонента средней скорости асимметрична относительно центра канала и по порядку величины равна продольной компоненте. Турбулентные пульсации в этом направлении в окрестности стенок достигают больших значений, что может быть одной из причин интенсификации теплопереноса. Обнаружено, что распределение модуля вектора полной скорости имеет минимум в центре канала, а его направление непрерывно изменяется в промежутке между стенками канала, где значительное влияние на формирование течения оказывают ребра решетчатой матрицы. Сопоставления с литературными данными свидетельствуют об отсутствии хорошей корреляции по продольной компоненте скорости и в то же время о полном согласовании результатов измерения её трансверсальной компоненты.

Список литературы

1. Нагога Г.П., Копылов И.С., Рукин М.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов // Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей. (Межвуз. науч. сб.). Казань, КАИ: 1989. С. 35–41.
2. Копылов И.С., Нагога Г.П. Теплообмен, гидросопротивление и макро-структура потока в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов // Тепломассообмен ММФ. Конвективный радиационный и комбинированный теплообмен. Минск: ИМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1991. С. 47–52.
3. Соколов Н.П., Полищук В.Г., Андреев К.Д., Забелин Н.А., Рассохин В.А. Гидравлика и теплообмен в компланарных каналах. СПб: Изд-во СПбПУ, 2013. 210 с.
4. Александренков В.П. Теплогидравлическая эффективность применения компланарных трактов охлаждения камер ЖРД // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 2. С. 44–56.
5. Ануров Ю.М. Эффективные методы интенсификации теплообмена в системах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин // Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук. СПб: СПбПУ, 2005, 32 с.
6. Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал. М.: Изд-во МИФИ, 1993. 152 с.
7. Choi S.M., Bang M., Kim S.Y., Lee H., Joo W.-G., Cho H.H. Numerical simulation of effect of various rib configurations on enhancing heat transfer of matrix cooling channel // Intern. J. Mechanical and Mechatronics Engng. 2017. Vol. 11, No. 12. P. 1906–1910.
8. Du W., Luo L., Wang S., Liu J., Sunden B. Heat transfer and flow structure in a detached latticework duct // Appl. Thermal Engin. 2019. Vol. 155. P. 24–39.
9. Chang S.W., Su L.M., Yang T.L. Heat transfer in a swinging rectangular duct with two opposite walls roughened by 45 staggered ribs // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2004. Vol. 47. P. 287–305.
10. Carcasci C., Facchini B., Pievaroli M., Tarchi L., Ceccherini A., Innocenti L. Heat transfer and pressure loss measurements of matrix cooling geometries for gas turbine airfoils // J. of Turbomachinery. 2014. Vol. 136. P. 121005-1–121005-8.
11. Нагора Г.П. Эффективные методы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин. М.: Изд-во МАИ, 1996. 100 с.
12. Bunker R.S. Latticework (vortex) cooling effectiveness. Part 1: Stationary channel experiments // In Proc. ASME Turbo Expo 2004, Power for Land, Sea, and Air. 2004. No. GT P. 2004-54157.
13. Luo J., Rao Y., Yang L., Yang M., Su H. Computational analysis of turbulent flow and heat transfer in latticework cooling structures under various flow configurations // Intern. J. Thermal Sci. 2021. Vol. 164. P. 106912-1–106912-15.
14. Terexhov V.I., Zolotukhin A.V., Chohar I.A. Experimental study of a flow structure in coplanar channels // J. of Physics: Conf. Series. 2020. Vol. 1683. P. 022088-1–022088-6.

*Статья поступила в редакцию 11 ноября 2022 г.,
после доработки — 16 ноября 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*