

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.438

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-49-57

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В СОПЛОВЫХ ЛОПАТКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Виктор Тимофеевич Перевезенцев¹, Максим Андреевич Шилин², Андрей Николаевич Дорошенко^{3✉}, Роман Андреевич Ивашов⁴

^{1,2,3,4}Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

¹79208318347@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-2177-0709>

²max05t@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0007-8781-2886>

³andrey.doroshenkov@ya.ru, <http://orcid.org/0009-0008-3071-1651>

⁴shroma755@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4013-5009>

Аннотация. Приведены результаты численного исследования плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины. Отверстия в ячейках сотовой конструкции для вдува охлаждающего воздуха на внешнюю поверхность пластины способствуют созданию на внешней поверхности пластины пленки охлаждающего воздуха (пленочное охлаждение). Так как отверстий для вдува охлаждающего воздуха в сотовой конструкции больше, чем при пленочном охлаждении, то такой способ охлаждения лопатки газовой турбины сравним с эффузионным охлаждением, которое считается одним из наиболее эффективных способов, и такой метод по эффективности охлаждения располагается между пленочным и транспирационным (пористым) охлаждением. В исследовании применен комбинированный способ охлаждения, который сочетает в себе как конвективный способ охлаждения, обусловленный вихревым движением охлаждающего воздуха внутри ячеек сотовой конструкции, располагающейся на внутренней поверхности лопатки, так и эффузионный способ охлаждения, реализованный вдувом охлаждающего воздуха на поверхность лопатки через отверстия в каждой ячейке сотовой структуры.

Ключевые слова: газовая турбина, сопловая лопатка, воздушное охлаждение, интенсификация теплообмена, сотовая конструкция

Для цитирования: Перевезенцев В.Т., Шилин М.А., Дорошенко А.Н., Ивашов Р.А. Использование сотовой поверхности для повышения интенсивности теплообмена в сопловых лопатках газовых турбин // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 49-57. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-49-57.

Original article

Open Access Article

USE OF HONEYCOMB SURFACE TO INCREASE THE HEAT EXCHANGE INTENSITY IN NOZZLE BLADES OF GAS TURBINES

Viktor T. Perevezentsev¹, Maxim A. Shilin², Andrey N. Doroshenkov^{3✉}, Roman A. Ivashov⁴

^{1,2,3,4}Bryansk State Technical University; Bryansk, Russia

¹79208318347@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-2177-0709>

²max05t@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0007-8781-2886>

³andrey.doroshenkov@ya.ru, <http://orcid.org/0009-0008-3071-1651>

⁴shroma755@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4013-5009>

Abstract. The results of a numerical study of a flat plate containing honeycomb cells without holes for blowing cooling air onto the plate surface, and a flat plate containing honeycomb cells with holes in each cell for blowing cooling air onto the plate surface are presented. Holes in the cells of the honeycomb structure for blowing cooling air on the outer surface of the plate contribute to creating a film of cooling air on the outer surface of the plate (film cooling). Since

there are more holes for blowing cooling air in the honeycomb design than in film cooling, this method of cooling a gas turbine blade is comparable to effusion cooling, which is considered one of the most effective methods, and this cooling method is located between film and transpiration (porous) cooling. The study used a combined cooling method that puts together both a convective cooling method due to the swirling movement of cooling air inside the honeycomb structure cells located on the blade inner surface, and an effusion cooling method, implemented by blowing cooling air onto the blade surface through holes in each honeycomb cell.

Keywords: gas turbine, nozzle blade, air cooling, heat exchange intensification, honeycomb design

For citation: Perevezentsev V.T., Shilin M.A., Doroshenkov A.N., Ivashov R.A. Use of Honeycomb Surface to Increase the Heat Exchange Intensity in Nozzle Blades of Gas Turbines. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 49-57. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-49-57.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения коэффициента полезного действия газовой турбины является увеличение температуры газового потока на входе в турбину высокого давления. На сегодняшний день температура газа на входе в турбину достигает порядка 1850...1950 К. Для изготовления сопловых и рабочих лопаток газовых турбин используются жаропрочные сплавы. Однако допустимый уровень температуры, которую смогут выдержать сплавы, составляет около 1300 К [1].

С целью продления ресурса сопловых и рабочих лопаток газовых турбин в высокотемпературных условиях применяются различные способы воздушного охлаждения. Одним из способов повышения эффективности охлаждения является турбулизация потока в пристеночной зоне лопаток, которая осуществляется нанесением на поверхность лопаток ребер [2, 3], сферических углублений [4, 5], вихревых матриц [6, 7] и т.д. Для охлаждения внешней поверхности лопаток газовых турбин применяется пленочное охлаждение [8, 9]. Данный способ сопровождается формированием на внешней поверхности лопатки пленки охлаждающего воздуха, поступающего через отверстия для пленочного охлаждения. Наиболее перспективным и высокоэффективным на сегодняшний день является транспирационное (пористое) охлаждение [10, 11]. При таком способе охлаждения охлаждающий воздух поступает на поверхность лопатки через пористый материал и равномерно распределяется на внешней поверхности лопатки. Эффузионный способ охлаждения [12, 13] по эффективности располагается между пленочным и пористым охлаждением. Основное отличие между пленочным охлаждением и эффузионным заключается в количестве и размере используемых отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность лопатки. Эффузионное охлаждение сочетает в себе множество плотно расположенных друг к другу отверстий для вдува охлаждающего воздуха малого диаметра, в то время как пленочное охлаждение связано с относительно меньшим количеством отверстий большого диаметра.

Сотовая конструкция также способствует турбулизации потока в пристеночном течении [14]. В настоящей статье приведены результаты численного исследования плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке сотовой структуры для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины.

Расчетная область проведенного исследования

В представленном численном исследовании использовался метод конечных объемов. На рис. 1 обозначены граничные условия расчетной области и ее описание. На рис. 2 отображены геометрические размеры расчетной области настоящего исследования.

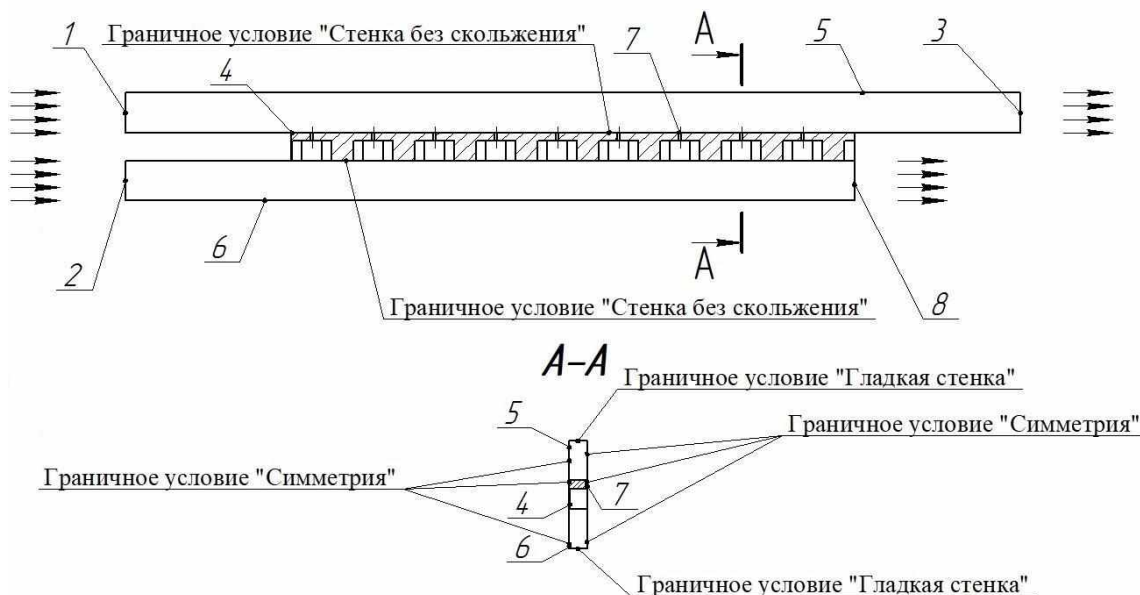


Рис. 1. Расчетная область:

1 – область входа основного потока (газ), 2 – область входа вторичного потока (охлаждающий воздух), 3 – область свободного выхода, 4 – сотовая поверхность, 5 – аэродинамический канал, в котором течет основной поток (газ), 6 – аэродинамический канал, в котором течет вторичный поток (охлаждающий воздух), 7 – отверстия для вдува охлаждающего воздуха на поверхность плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры, 8 – область выхода вторичного потока

Fig. 1. Design area:

1 – the main stream inlet area (gas), 2 – the secondary stream inlet area (cooling air), 3 – the free outlet area, 4 – honeycomb surface, 5 – the aerodynamic channel into which the main stream (gas) flows, 6 – the aerodynamic channel in which a secondary stream (cooling air) flows, 7 – holes for injecting cooling air onto the surface of a flat plate containing cells of a honeycomb structure, 8 – the outlet area of the secondary stream

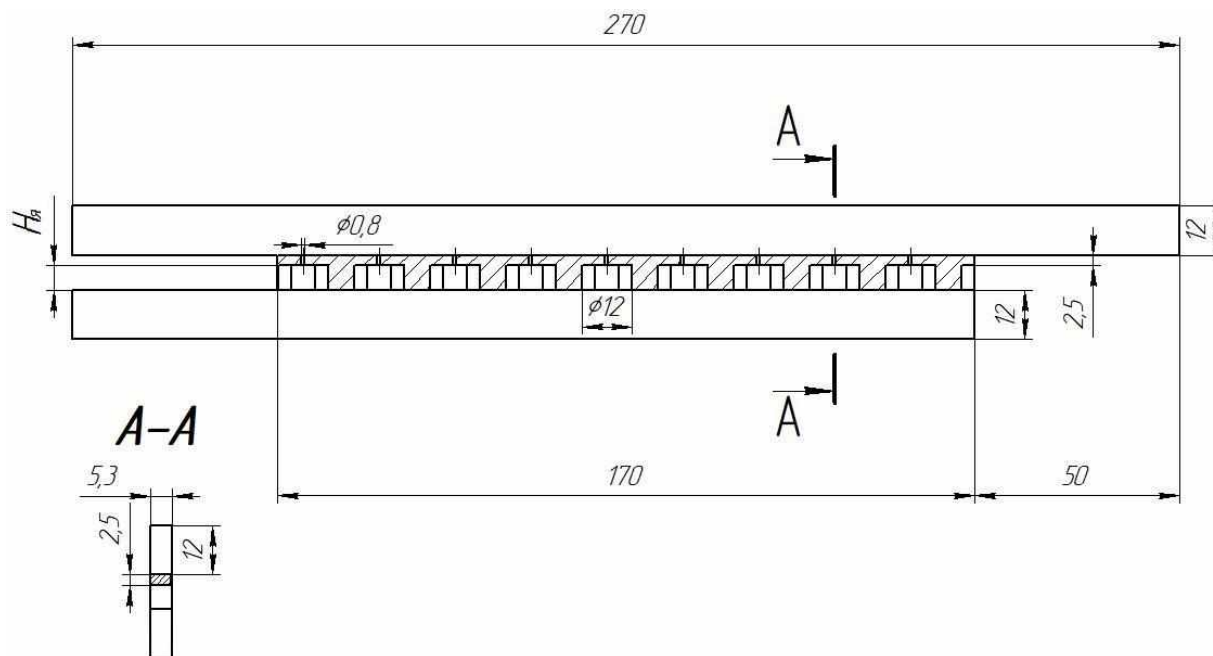


Рис. 2. Геометрические размеры расчетной области

Fig. 2. Geometric dimensions of the calculated area

Исследование было выполнено в программе OpenFOAM. В численном моделировании применялся метод конечных объемов. Материалом для сотовой структуры в данном исследовании является медь. Для основного потока (газ) и вторичного (охлаждающий воздух)

задаем газообразную среду – воздух. Поток частично сжимаемый. Длина канала, в котором течет основной поток составляет $L_{осн} = 270$ мм, длина канала, в котором течет вторичный поток составляет $L_{вт} = 220$ мм, высота канала, в котором течет основной поток составляет $H_{осн} = 12$ мм, высота канала, в котором течет вторичный поток составляет $H_{вт} = 12$ мм, длина пластины, содержащей ячейки сотовой структуры, составляет $L_{пл} = 170$ мм, значение диаметра отверстия для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины составляет $d_{отв} = 0,8$ мм, толщина пластины, содержащей ячейки сотовой структуры составляет $H_{пл} = 2,5$ мм, диаметр окружности, описанной вокруг ячейки сотовой структуры составляет $d_я = 12$ мм.

Для области входа основного потока задаем начальные параметры: скорость основного потока составляет $V_г = 200$ м/с, температура основного потока составляет $T_г = 400$ К, течение турбулентное. Выбираем модель турбулентности для численного исследования SST.

Для области входа вторичного потока задаем начальные параметры: абсолютное давление охлаждающего воздуха составляет $p_{охл} = 200\ 000$ Па, температура вторичного потока составляет $T_{охл} = 293$ К.

Для проведения численного исследования отношение высоты ячейки сотовой структуры к диаметру окружности, описанной вокруг ячейки сотовой структуры, варьируется от $H_я/d_я = 0,25...2$ (0,25; 0,5; 1; 2). В настоящем эксперименте исследование проводится как с плоской пластиной, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины.

Результаты моделирования и их обсуждение

На первом этапе произведем обдув плоской пластины, не содержащей ячейки сотовой структуры, с целью дальнейшего сравнения значения средней температуры поверхности со значением температуры, получаемой от нанесения на плоскую поверхность ячеек сотовой структуры как с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры, так и без отверстий.

В настоящем исследовании горячий воздух (основной поток) обтекает внешнюю поверхность плоской пластины, а холодный воздух (вторичный поток) воздействует на внутреннюю поверхность плоской пластины. По результатам исследования происходит полное и равномерное прогревание плоской пластины под воздействием основного потока и совсем незначительное ее охлаждение, сопровождающееся обтеканием внутренней поверхности пластины вторичным потоком. На внутренней поверхности плоской пластины, обтекаемой холодным воздухом, происходит постепенное равномерное нарастание пограничного слоя вдоль течения охлаждающего воздуха. Пограничный слой способствует незначительному снижению воздействия охлаждающего воздуха на поверхность пластины. С внешней стороны плоской пластины вдоль течения основного потока также происходит постепенное нарастание пограничного слоя, который препятствует воздействию теплового потока на поверхность пластины.

Средняя температура поверхности плоской пластины в результате исследования составила $T_{ср. \text{плоск. пл}} = 397$ К.

На втором этапе реализован обдув плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха. Для проведения исследования на текущем этапе отношение высоты ячейки сотовой структуры к диаметру окружности, описанной вокруг ячейки сотовой структуры, варьируется $H_я/d_я = 0,25...2$ (0,25; 0,5; 1; 2). Результаты значений средней температуры поверхности представлены в табл. 1.

Результаты исследований

Table 1

Research results

Модель для исследования	$H_{я}/d_{я}$	Средняя температура поверхности $T_{ср}$, К
Плоская пластина	-	397,00
Плоская пластина, содержащая ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха	0,25	378,60
	0,50	375,00
	1,00	372,00
	2,00	370,00
Плоская пластина, содержащая ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха	0,25	318,04
	0,50	318,50
	1,00	317,80
	2,00	319,20

При обтекании плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, отношение $H_{я}/d_{я}$ которой составляет 0,25, холодным воздухом, внутри ячеек сотовой структуры формируется маленький вращающийся вихрь, обтекающий внутреннюю поверхность каждой ячейки сотовой структуры и выходящий из ячеек в область вторичного потока (охлаждающего воздуха). При этом температура охлаждающего воздуха, касающегося поверхностей ячейки сотовой структуры повышается. Температура охлаждающего воздуха внутри первой по ходу течения вторичного потока ячейке ниже для каждого соотношения $H_{я}/d_{я}$, чем в последующих ячейках сотовой структуры, и она заметно выше в каждой последующей ниже находящейся по течению ячейке, чем в первой. При этом средняя температура поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, ниже, чем средняя температура поверхности плоской пластины без сотовой структуры, но этого недостаточно для обеспечения высокой эффективности охлаждения. С увеличением отношения $H_{я}/d_{я}$ происходит увеличение вихря, обтекающего внутреннюю поверхность ячейки сотовой структуры. При соотношении $H_{я}/d_{я} = 2$ (рис. 3) в ячейках сот в поле зрения наблюдается большой одиночный медленно вращающийся вихрь.

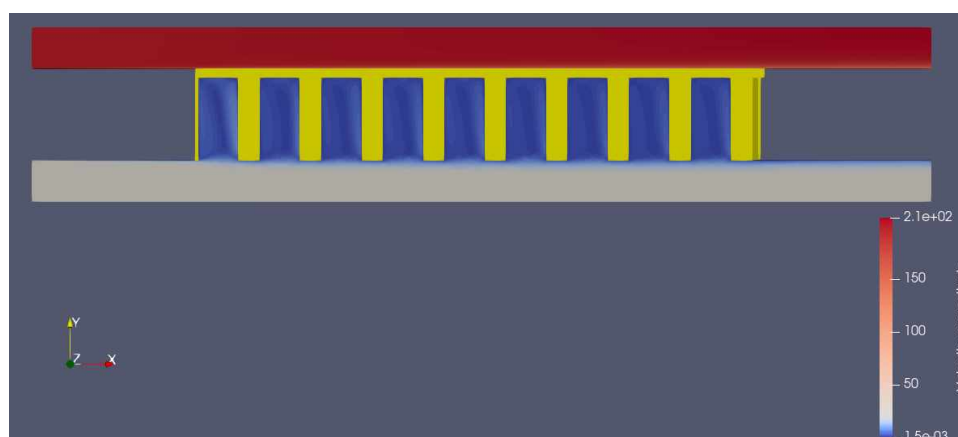


Рис. 3. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, при $H_{я}/d_{я} = 2$. Распределение скорости
 Fig. 3. The result of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure without holes for injecting cooling air, at $H_{я}/d_{я} = 2$. Velocity distribution

На плоской поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры, со стороны горячего газа вдоль направления течения происходит незначительное постепенное нарастание пограничного слоя при всех соотношениях $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$. Также с увеличением отношения $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$ от 0,25 и до 2, средняя температура поверхности образцов снижается (см. табл. 1), что говорит о небольшом повышении эффективности охлаждения сотовой поверхности с увеличением соотношения $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$.

Распределение температуры на поверхности плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, представлено на рис. 4.

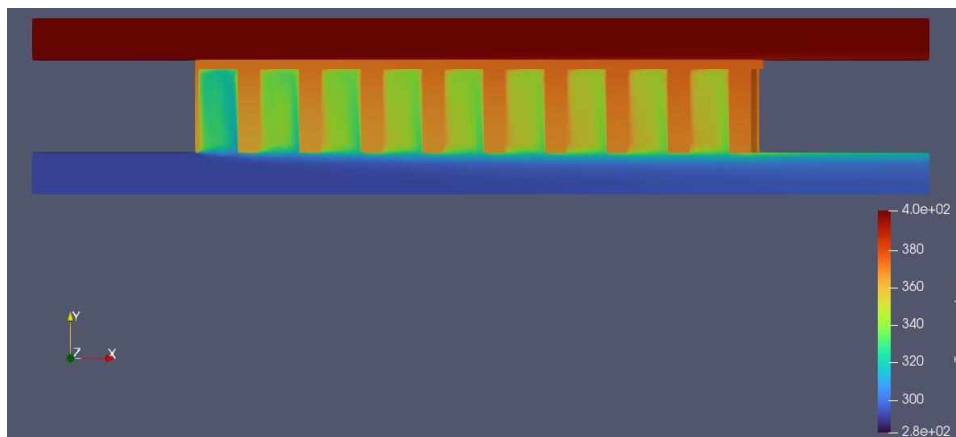


Рис. 4. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, при $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 2$. Распределение температуры
Fig. 4. The result of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure without holes for injecting cooling air, at $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 2$. Temperature distribution

На третьем этапе произведен обдув плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на плоскую поверхность со стороны горячего газа. Для данного этапа исследования значения отношения $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$ варьируются в тех же значениях, как и для второго этапа.

По сравнению со значениями средней температуры поверхности, полученными во втором этапе исследования, происходит снижение средней температуры поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха. То есть значения средней температуры поверхности плоских пластин, содержащих ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, ниже значений средней температуры поверхности плоских пластин, содержащих ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха. На поверхности плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, со стороны основного потока (горячего газа) наблюдается образование пленки охлаждающего воздуха, толщина которой постепенно растет по направлению течения основного потока для каждого соотношения $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$. Образовавшаяся на внешней поверхности образцов пленка охлаждающего воздуха препятствует воздействию теплового потока со стороны горячего газа.

Распределение значений скорости и температуры при обтекании плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, при $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 2$ представлено на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

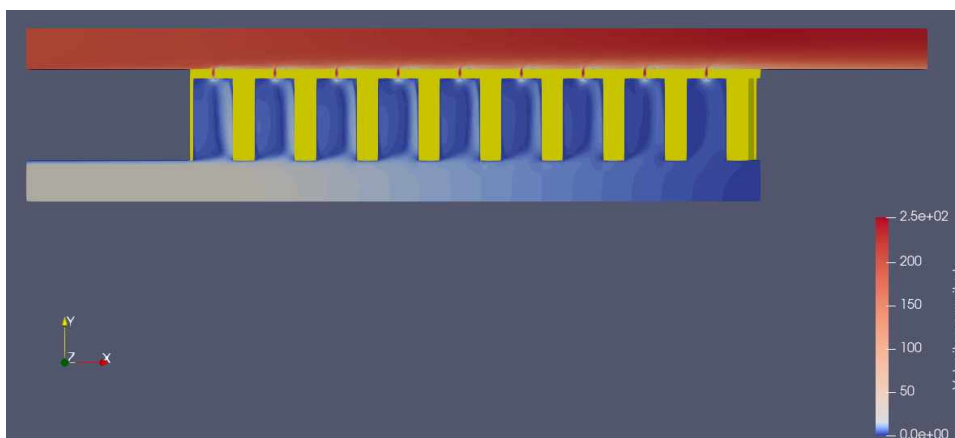


Рис. 5. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, при $H_w/d_n = 2$. Распределение скорости
Fig. 5. Results of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure with holes for injecting cooling air, at $H_w/d_n = 2$. Speed distribution

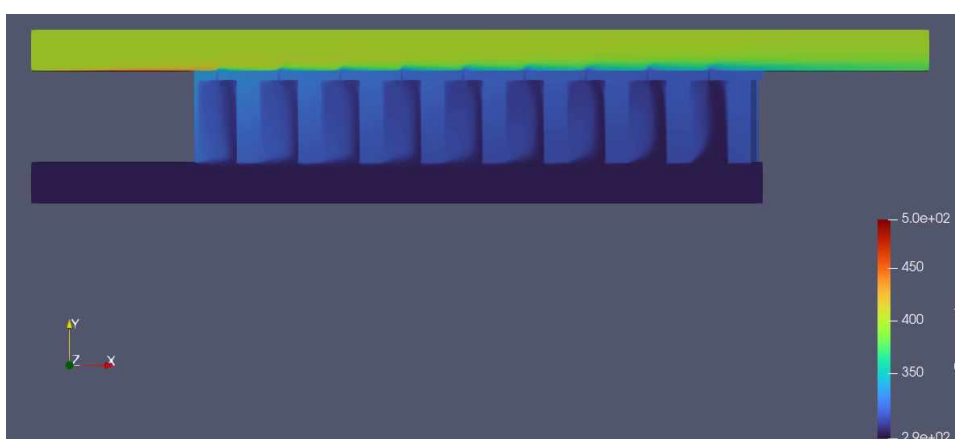


Рис. 6. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, при $H_w/d_n = 2$. Распределение температуры
Fig. 6. Results of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure with holes for injecting cooling air, at $H_w/d_n = 2$. Temperature distribution

Заключение

В статье приведены результаты численного исследования плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины. Сочетание поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на плоскую поверхность со стороны горячего газа приводит к снижению средней температуры поверхности образцов. Стремление сформировать отверстия для вдува охлаждающего воздуха в каждой из ячеек приводит к приближению транспирационного способа охлаждения, которое является самым перспективным на сегодняшний день. Представленный способ охлаждения следует отнести к конвективному способу охлаждения, формирующемуся созданием на плоской поверхности сотовой структуры, и к эффузионному способу охлаждения, сопровождающемуся вдувом охлаждающего воздуха через отверстия в каждой ячейке сотовой структуры, которое способствует охлаждению внешней поверхности лопатки газовой турбины. Пример конструктивного выполнения конвективного способа для направляющей (сопловой) лопатки высокотемпературной газовой турбины представлен в патенте [15].

Список источников:

1. Хабибуллин И.И. Интенсификация теплообмена двухполостными диффузорными выемками: специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хабибуллин Ильмир Ильдарович. – Казань, 2016. – 124 с.
2. Xu J. et al. Systematic Comparison on Convective Heat Transfer Characteristics of Several Pin Fins for Turbine Cooling // *Crystals*. – 2021. – Vol. 11(8). – P. 1-17.
3. Moradi T., Shahbazian H., Hoseinalipour M., Sunden B. Effects of wavy ribs on vortex generation and thermal-hydraulic performance in a rotating rectangular channel // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 222. – P. 1-20.
4. Rao Y., Li B., Feng Y. Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2015. – Vol. 61. – P. 201-209.
5. Zhou W., Rao Y., Hu H. An experimental investigation on the characteristics of turbulent boundary layer flows over a dimpled surface // *Transactions of the ASME. J. of Fluids Engineering*. – 2016. – Vol. 138. № 2. – P. 1-13.
6. Ярославцев Н.Л., Викулин А.В., Ремчуков С.С. Использование вихревых матриц в конструкции лопаток высокотемпературных газовых турбин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2019. – Т. 21. – № 1. – С. 172-177.
7. Oh I.T. et al. Local Heat/Mass Transfer and Friction Loss Measurement in a Rotating Matrix Cooling Channel // *J. of Heat Transfer*. – 2012. – Vol. 134 (1). – P. 1-9.
8. Wei H., Zu Y.Q. Experimental study on heat transfer and throughflow losses characteristics of single/triple-row holes with an engine-representative density ratio // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 28. – P. 1-19.
9. Грине М., Боуэлем Х., Деллил А.З., Аззи А. Улучшение эффективности адиабатического пленочного охлаждения в поперечном и продольном направлениях путем сочетания преграды в форме бархана и антивихревых компоновок // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2020. – Т. 27, № 5. – С. 787-797.
10. Викулин А.В. Ярославцев Н.Л., Земляная В.А. Исследование транспирационного охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 6. – С. 27-32.
11. Cerminara Adriano Turbulence Effect on Transpiration Cooling Effectiveness Over a Flat Plate in Hypersonic Flow and Sensitivity to Injection Parameters // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2023. – №. 110 (4). – P. 945-968.
12. Murray Alexander V. et al. High Resolution Experimental and Computational Methods for Modelling Multiple Row Effusion Cooling Performance // *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. – 2018. – Vol. 3, № 1. – P. 1-16.

References:

1. Khabibullin I.I. Intensification of Heat Exchange With Two-Cavity Diffuser Recesses. Candidate's Thesis in Engineering. Kazan; 2016.
2. Xu J, et al. Systematic Comparison on Convective Heat Transfer Characteristics of Several Pin Fins for Turbine Cooling. *Crystals*. 2021;11(8):1-17.
3. Moradi T., Shahbazian H., Hoseinalipour M., Sunden B. Effects of Wavy Ribs on Vortex Generation and Thermal-Hydraulic Performance in a Rotating Rectangular Channel. *Applied Thermal Engineering*. 2023;222:1-20.
4. Rao Y., Li B., Feng Y. Heat Transfer of Turbulent Flow Over Surfaces With Spherical Dimples and Teardrop Dimples. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015;61:201-209.
5. Zhou W., Rao Y., Hu H. An Experimental Investigation on the Characteristics of Turbulent Boundary Layer Flows Over a Dimpled Surface. *Journal of Fluids Engineering*. 2016;138(2):1-13.
6. Yaroslavtsev N.L., Vikulin A.V., Remchukov S.S. The Using of Vortex Matrices in the Construction of Blades and High-Temperature Gas Turbines. *Izvestia of Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 21(1):172-177.
7. Oh IT, et al. Local Heat/Mass Transfer and Friction Loss Measurement in a Rotating Matrix Cooling Channel. *Journal of Heat Transfer*. 2012;134(1):1-9.
8. Wei H., Zu Y.Q. Experimental Study on Heat Transfer and Throughflow Losses Characteristics of Single/Triple-Row Holes With an Engine-Representative Density Ratio. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;28:1-19.
9. Grine M., Boualem H., Dellil A.Z., Azzi A. Improving Adiabatic Film-Cooling Effectiveness Spanwise and Lateral Directions by Combining BDSR and Anti-Vortex Designs. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2020;27(5):787-797.
10. Vikulin, A.V. Yaroslavtsev N.L., Zemlyanaya V.A. Investigations Into Transpiration Cooling of Blades in High-Temperature Gas Turbines. *Thermal Engineering*. 2019;6:27-32.
11. Cerminara A. Turbulence Effect on Transpiration Cooling Effectiveness Over a Flat Plate in Hypersonic Flow and Sensitivity to Injection Parameters. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2023;110(4):945-968.
12. Murray AV, et al. High Resolution Experimental and Computational Methods for Modelling Multiple Row Effusion Cooling Performance. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. 2018;3(1):1-16.

13. Wang W., Cui J., Qu S. Effects of hole arrangement and trenched hole on multirow film cooling // AIP Advances. – 2022. – Vol. 12, № 4. – P. 1-13.

14. Сотовые уплотнения в турбомашинах: монография / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, С.В. Перевезенцев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Брянск: БГТУ, 2006. – 192 с.

15. Патент № 2810858 Российская Федерация МПК F01D 5/18 (2006.01), СПК F01D 5/18 (2023.08). Способ охлаждения направляющей лопатки турбины и устройство, реализующее способ: № 2023106228: заявл. 16.03.2023; опубл. 28.12.2023 / Перевезенцев В. Т., Осипов А. В., Куликова Д. А., Дорошенко А. Н. – 6 с.

13. Wang W., Cui J., Qu S. Effects of Hole Arrangement and Trenched Hole on Multirow Film Cooling. AIP Advances. 2022;12(4):1-13.

14. Buglaev VT, Perevezentsev VT, Perevezentsev SV, et al. Honeycomb Seals in Turbomachines. 2nd ed. Bryansk: BSTU; 2006.

15. Perevezentsev V.T., Osipov A.V., Kulikova D.A., Doroshenkov A.N. Patent No. 2810858 Russian Federation, IPC F01D 5/18 (2006.01), SPK F01D 5/18 (2023.08). A Method for Cooling a Turbine Guide Blade and a Device that Implements the Method, no. 2023106228 (28.12.2023).

Информация об авторах:

Перевезенцев Виктор Тимофеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0003-2177-0709>

Шилин Максим Андреевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0007-8781-2886>

Дорошенко Андрей Николаевич

аспирант, ассистент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0008-3071-1651>

Ивашов Роман Андреевич

студент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0002-4013-5009>

Information about the authors:

Perevezentsev Viktor Timofeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

Shilin Maxim Andreevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

Doroshenkov Andrey Nikolaevich

Postgraduate student, assistant at the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

Ivashov Roman Andreevich

Student of the department of «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 21.02.2024; принята к публикации 23.03.2024.

The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 21.02.2024; accepted for publication 23.03.2024.

**Рецензент – Голушко А.Н., кандидат технических наук, ООО «Новатэк-Юрхаровнефтегаз».
Reviewer – Golushko A.N., Candidate of Technical Sciences, PAO NOVATEK.**