

3D-сопряженные исследования эффективности пленочного охлаждения сопловых лопаток с «меридиональным поджатием» и профилированными отверстиями

Ю.Г. ГОРЕЛОВ,

канд. техн. наук,

К.В. ТЮЛЬКОВ

(НПЦ газотурбостроения

«Салют», Москва)

Yury.Dina@gmail.com

При использовании модели турбулентности S-A исследована протяженность участка активного воздействия пленочного охлаждения по профилю лопаток. Исследуется эффективность охлаждения полок и галтелей пера при использовании отверстий перфорации на входной кромке.

Эффективность пленочного охлаждения, параметр вдува, веерные отверстия, цилиндрические отверстия

С учетом окружной неравномерности локальная температура газа перед существующими сопловыми лопатками турбины высокого давления достигает 1900–2100 К, а перед перспективными примерно 2500 К, в связи с чем возникает проблема охлаждения лопаток. При этом «меридиональное поджатие» сопловых лопаток (рис. 1, а) позволяет улучшить равномерность их обтекания, выровнять параметры на входе в рабочее колесо и выполнить рабочие лопатки с меньшей «круткой», за счет чего увеличивается КПД рабочего колеса, снижается среднемассовая температура газа перед сопловыми лопатками. Однако это приводит к существенному увеличению скорости и коэффициентов теплоотдачи от газа в зоне «меридионального поджатия», особенно существенному на верхней полке, со стороны корытца. Кроме того, в литературе отсутствуют данные по влиянию «меридионального поджатия» на эффективность пленочного охлаждения при использовании цилиндрических и профилированных отверстий. В представленной работе на сопловых лопатках турбины высокого давления с «меридиональным поджатием» проведено исследование наиболее эффективных веерных отверстий, настильных в выходной части, с геометрией отверстий [1, 2], позволяющей получить по этим данным оптимальную эффективность пленочного охлаждения при использовании цилиндрических отверстий ($\eta \approx 0,18$).

В работе [3] в адиабатных условиях показан существенный выигрыш от использования веерных отверстий, настильных в выходной части, над веерными и цилиндрическими отверстиями на всем протяжении корытца. При этом эффективность применения веерных отверстий, настильных в выходной части, эффективнее использования цилиндрических отверстий на всем протяжении корытца между отверстиями в пять раз, на 70 % непосредственно за первым и вторым рядами отверстий и на 10 % – в районе выходной кромки.

Как установлено в экспериментальной работе [4] и подтверждено 3D-сопряженными расчетами, разность эффективностей пленочного охлаждения веерных отверстий по сравнению с цилиндрическими снижается вниз по потоку от отверстий, оставляя область выходной кромки без защиты профильными отверстиями пленочного охлаждения. Однако не выявлено число калибров, на котором сохраняется данное преимущество на корытце и спинке, в частности, отсутствуют данные для лопаток с «меридиональным поджатием».

В работе [5] при сопряженных расчетах для осредненной в поперечном направлении эффективности пленки модель турбулентности S-A обеспечивала наилучшее совпадение с экспериментальными данными для цилиндрических и веерных отверстий на спинке, однако распространение полученных данных на другие местоположения отверстий не подтверждено расчетными и экспериментальными данными.

Кроме того, в зарубежных работах исследуются профилированные отверстия на модельных лопатках и плоских пластинах, исследований, проведенных на реальных лопатках, существенно меньше.

В связи с этим с целью выяснения снижения эффективности пленки вдоль профиля лопатки в представленной работе проведено 3D-сравнение эффективности пленочного охлаждения $\eta_{пл}$ цилиндрических отверстий и веерных отверстий, настильных в выходной части на сопловой лопатке турбины высокого давления с «меридиональным поджатием» в сопряженной постановке (модель турбулентности S-A) в условиях работы авиационного ГТД.

В работе приняты следующие условные обозначения: DR – отношение плотностей; $\eta_{пл} = \frac{T_{гicp}^* - T_{пл}^*}{T_{гicp}^* - T_{охл.ср}^*}$ – эффективность пленочного охлаждения, осредненная в поперечном направлении; $T_{гicp}^*$ – температура газа, осредненная по высоте лопатки на вертикальной i -й линии профиля; $T_{пл}^*$ – температура пленки, осредненная по высоте лопатки; $T_{охл.ср}^*$ – температура охлаждающего воздуха на выходе из отверстий, осредненная по высоте лопатки; $\eta_{пл.сеч} = \frac{T_{г.верх.н.сеч}^* - T_{пл}^*}{T_{г.верх.н.сеч}^* - T_{охл.верх.н.сеч}^*}$ – эффективность пленочного охлаждения в верхнем (нижнем) сечении профиля; $T_{г.верх.н.сеч}^*$ – температура газа в верхнем (нижнем) сечении профиля; $T_{пл}^*$ – температура пленки на линиях тока в верхнем (нижнем) сечении профиля; $T_{охл.верх.н.сеч}^*$ – температура воздуха на выходе из отверстий в верхнем (нижнем) сечении профиля; $\theta_{пл.сеч} = \frac{T_{г.верх.сеч}^* - T_{ст}^*}{T_{г.верх.сеч}^* - T_{возд0}^*}$ – эффективность охлаждения лопатки в верхнем сечении профиля; $T_{г.верх.сеч}^*$ – температура газа в верхнем сечении профиля; $T_{ст}^*$ – температура стенки в верхнем сечении профиля; $T_{в0}^*$ – температура воздуха на входе в лопатку; $\Delta G_{охл} = \frac{G_{охл}^i - G_{охл}^{пил}}{G_{охл}^i} 100\%$ – увеличение расхода охлаждающего воздуха за счет диффузорности отверстий; I – отношение потоков импульса; $\rho_v v_v^2 / \rho_\infty v_\infty^2$; m – параметр вдува, $\rho_v v_v / \rho_\infty v_\infty$.

Рассматривались результаты исследования, проведенного на сопловой лопатке (см. рис. 1, а, б) с пятью рядами отверстий по профилю – цилиндрических и веерных, настильных в выходной части (рис. 1, в, г). Все размеры (см. рис. 1, в, г) соотносились с диаметром отверстия пленочного охлаждения ($D = 0,5$ мм). Отверстия пленочного охлаждения были наклонены под углами к поверхности $35\text{--}38,6^\circ$. В связи с ограниченной толщиной стенок лопаток авиационных ГТД исследование веерных отверстий, настильных в выходной части, проводилось с уменьшенным по сравнению с работой [1] числом калибров по глубине отверстий.

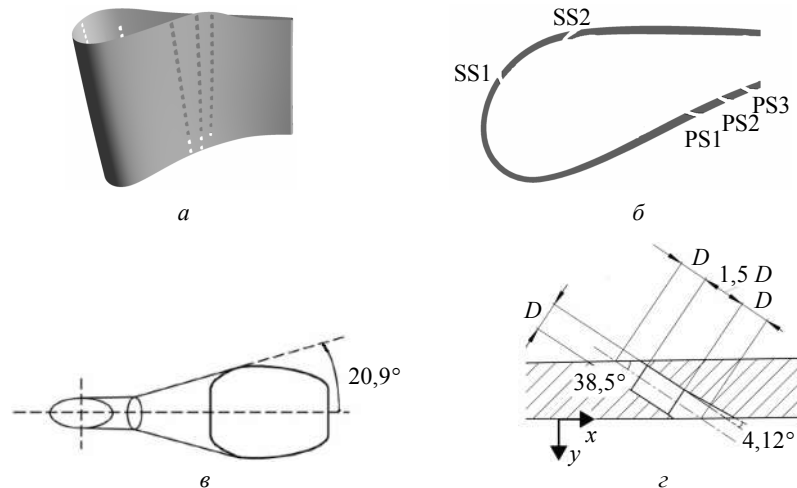


Рис. 1. Модель сопловой лопатки с меридиональным поджатием, конфигурация отверстий и их местоположение: а – вид с корытца; б – расположение отверстий по профилю; в – вид веерного отверстия, настильного в выходной части; г – сечение веерного отверстия, настильного в выходной части

Расчетные исследования были выполнены при двух перепадах давления между газом и воздухом (таблица).

При этом давления и температуры газа на входе и выходе из газового домена оставались неизменными. Параметры (см. таблицу) являются осредненными по высоте для каждого ряда отверстий. Показано, что при одном и том же перепаде давления на отверстиях значения параметров m , I и DR были ниже для веерных отверстий, настильных в выходной части, чем для цилиндрических отверстий, что, очевидно, связано с их диффузорностью на выходе. Схема охлаждения представляла собой два типа отверстий, в сумме на лопатке имелось 80 отверстий охлаждения: два ряда отверстий охлаждения на спинке и три –

на корытце. Ряды отверстий на корытце снабжались воздухом из заднего канала, в то время как отверстия на спинке – из переднего канала, разделенного перегородкой.

Ряд	Отверстия	m		I		DR	
		Варианты расчета					
		1	2	1	2	1	2
PS3	Цилиндрические	1,06	3,72	0,51	5,95	2,25	2,4
	Веерные, настильные в выходной части	0,94	2,25	0,41	2,86	2,18	2,04
PS2	Цилиндрические	2,08	4,64	0,79	8,95	5,68	2,45
	Веерные, настильные в выходной части	0,82	0,72	0,34	0,3	2,06	1,92
PS1	Цилиндрические	3,1	5,82	1,59	12,92	6,14	2,76
	Веерные, настильные в выходной части	1	0,75	0,41	0,37	2,47	1,73
SS1	Цилиндрические	1,37	1,41	0,93	1,15	2,24	2,02
	Веерные, настильные в выходной части	1,19	0,85	0,83	0,46	1,8	1,85
SS2	Цилиндрические	1,4	1	0,8	0,44	2,44	2,34
	Веерные, настильные в выходной части	1,05	0,99	0,57	0,46	1,99	2,21

Использовалась тетраэдральная сетка, сеточное разбиение генерировалось при измельченной сетке в области напротив отверстий и достаточно мелкой сеткой в самих отверстиях. Величина y^+ составила приблизительно единицу, в пограничном слое было сгенерировано шестнадцать призматических слоев, для цилиндрических отверстий использовалась сетка из 10 млн конечных элементов, для веерных отверстий, настильных в выходной части, 18 млн. Сетка генерировалась инструментом автоматической генерации сетки – ANSYS ICEM. На входе была выбрана интенсивность турбулентности набегающего потока: для первого варианта $Tu \approx 5\%$, для второго варианта $Tu \approx 19\%$. При решении использовался ANSYS CFX. На входе устанавливалось одинаковое по высоте полное давление и распределения полных температур, на выходе – условие постоянного статического давления по высоте лопатки.

Результаты расчетного исследования показали, что в связи с диффузорностью веерных отверстий, настильных в выходной части, при постоянном перепаде давлений на отверстиях охлаждения π расходы охлаждающего воздуха увеличиваются по сравнению с цилиндрическими отверстиями на незначительную величину $\Delta G_{\text{охл}}$ (9,8 и 12 %) при существенном увеличении эффективности пленочного охлаждения. При этом числа Маха увеличиваются в зоне «меридионального поджатия» в 2,4–2,9 раза по сравнению с предыдущими вертикальными сечениями (рис. 2), коэффициенты теплоотдачи от газа – в 1,9–2,3 раза. В связи с этим именно в этой зоне охлаждение пера и трактовых полок вызывает наибольшие сложности.

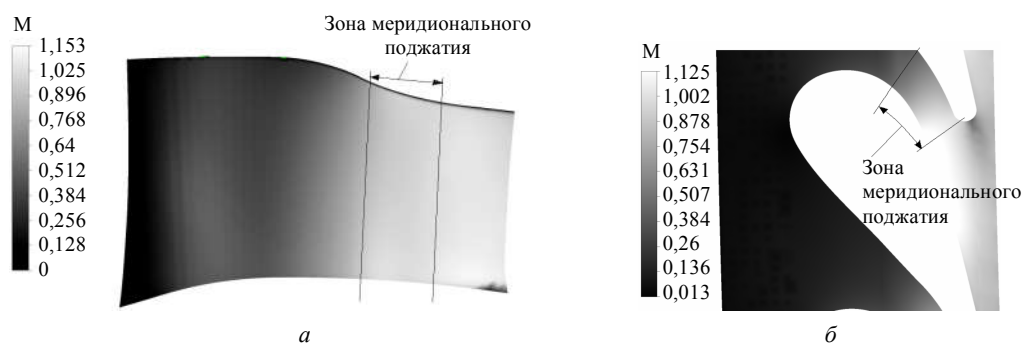


Рис. 2. Увеличение числа Маха в зоне «меридионального поджатия»: a – в среднем продольном сечении межлопаточного канала; b – в районе верхней полки

В работах [6], [7] для осредненной в поперечном направлении эффективности пленки модель турбулентности S–A обеспечивала наилучшие результаты в сравнении с экспериментами, поэтому в данной работе сопряженные расчеты теплообмена проводились с моделью турбулентности S–A (функцией стенки «по умолчанию»). На спинке для веерных и цилиндрических $\eta_{\text{пл}}$ отверстий (при $Tu = 19\%$) выше $\eta_{\text{пл}}$ (при $Tu = 5\%$) примерно на 0,05 при числе калибров $X/D \geq 20$, при $X/D < 20$ отличий в $\eta_{\text{пл}}$ не установлено, при этом на корытце при $X/D \geq 12$ – $\Delta\eta_{\text{пл}} \approx 0,15$, при $X/D < 12$ – $\Delta\eta_{\text{пл}} = 0$. Показано, что температура стенки сопловой лопатки с цилиндрическими отверстиями выше температуры стенки сопловой лопатки с веерными отверстиями, настильными в выходной части. Так же, как и в адиабатных условиях [3], это

превышение существенно выше на корытце, чем на спинке. Так, максимальное превышение на корытце составило 72 °С, на спинке – 62 °С, что объясняется более быстрым отрывом пелены на спинке, чем на корытце, и более плотным прилеганием струй на корытце, чем на спинке. При этом осредненная в поперечном направлении эффективность пленочного охлаждения веерных отверстий, настильных в выходной части, выше эффективности охлаждения цилиндрических отверстий, хотя это превышение меньше, чем по результатам адиабатных расчетов [3].

Так, на корытце, по результатам сопряженных расчетов, это превышение составляет в передней области зоны «меридионального поджатия» 0,019, увеличиваясь до 0,025 в выходной области зоны «меридионального поджатия» и оставаясь за этой зоной на уровне 0,019–0,028; $\eta_{пл. \text{ веерн. наст. вых.ч.}}$ больше $\eta_{пл. \text{ цил. отв.}}$ практически на всем протяжении корытца лопатки примерно на 0,02. На спинке эффективность пленочного охлаждения веерных отверстий, настильных в выходной части, превышает эффективность цилиндрических отверстий в зоне «меридионального поджатия» (0,04–0,045).

При подобных для цилиндрических и веерных, настильных в выходной части отверстий, условиях течения (m , I , DR) применение отверстий пленочного охлаждения демонстрирует относительно подобную и равномерную эффективность, например, за первым рядом отверстий на корытце. Если в верхней части лопатки за первым рядом отверстий ($z = 35 \div 100$ %) $\eta_{пл}$ веерных отверстий, настильных в выходной части, ниже $\eta_{пл}$ цилиндрических отверстий на 0,009–0,055, то в нижней части ($z = 0 \div 35$ %) выше на 0,042–0,1.

В случае использования защиты верхней полки струями пленочного охлаждения из отверстий на корытце применение веерных отверстий, настильных в выходной части, более эффективно, чем цилиндрических отверстий (рис. 3), так как защищает большую (приблизительно на 10–15 %) площадь полки и имеет более высокую $\eta_{пл}$, в частности, в районе «меридионального поджатия» на выходной кромке со стороны корытца (примерно 0,027).

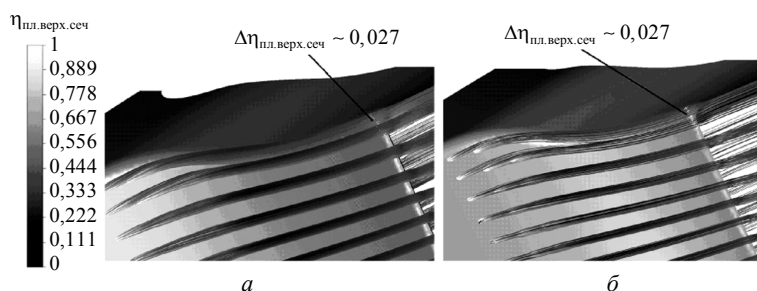


Рис. 3. Сравнение эффективности пленочного охлаждения в области верхней полки со стороны корытца при охлаждении струями: а – из веерных отверстий, настильных в выходной части; б – из цилиндрических отверстий

Струи, инжектируемые из отверстий перфорации на корытце при использовании веерных отверстий, настильных в выходной части, значительно плотнее струй, выходящих из цилиндрических отверстий. При этом параметры вдува в районе выходной кромки со стороны корытца в верхнем подполочном сечении и в области галтели составили для цилиндрических отверстий в области первой и второй струи от верхней полки $m \approx 0,227$ и $m \approx 0,205$; при использовании веерных отверстий, настильных в выходной части, $m \approx 0,208$ и $m \approx 0,234$, что свидетельствует о несколько большем прилегании верхней струи к галтели и полке при использовании отверстий, настильных в выходной части.

Кроме того, весьма эффективным способом охлаждения верхней полки в зоне «меридионального поджатия» является применение цилиндрических отверстий пленочного охлаждения, расположенных на входной кромке в верхней части пера лопатки (рис. 4). Так, использование лишь двух отверстий снижает температуру полки на 35–40 °С, эффективность пленочного охлаждения увеличивается на $\Delta\eta_{пл} \approx 0,034 \div 0,036$. При этом $\eta_{пл}$ в зоне «меридионального поджатия» со стороны корытца выше, чем со стороны спинки на $\Delta\eta_{пл} = 0,096 \div 0,154$.

Весьма эффективна также защита нижней полки со стороны корытца – наклонными книзу цилиндрическими струями пленочного охлаждения из отверстий на входной кромке (рис. 5, а). Однако основная часть струи из отверстий на входной кромке практически не участвует в охлаждении нижней полки со стороны спинки. Малоэффективна защита нижней полки из отверстий перфорации на корытце при ис-

пользовании веерных отверстий, настильных в выходной части (рис. 5, б), так как основная часть нижней струи находится выше полки, а струя достигает поверхности полки лишь за выходной кромкой лопатки.

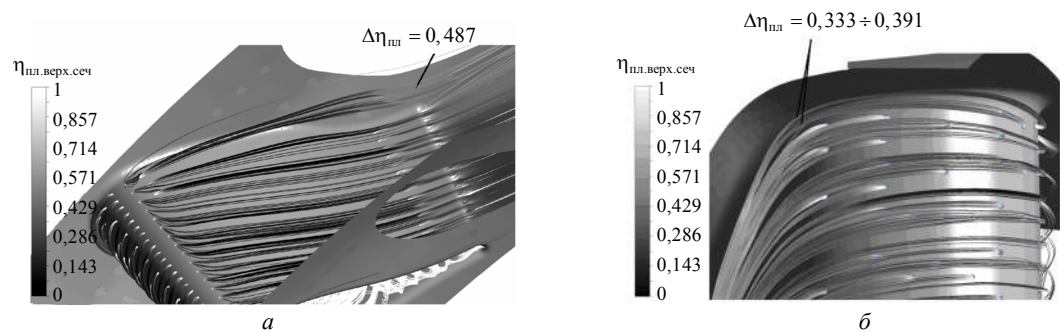


Рис. 4. Защита верхней полки в зоне «меридионального поджатия» струями пленочного охлаждения из цилиндрических отверстий на входной кромке: η_{пл} верхней полки в районе выходной (а) и входной (б) кромок

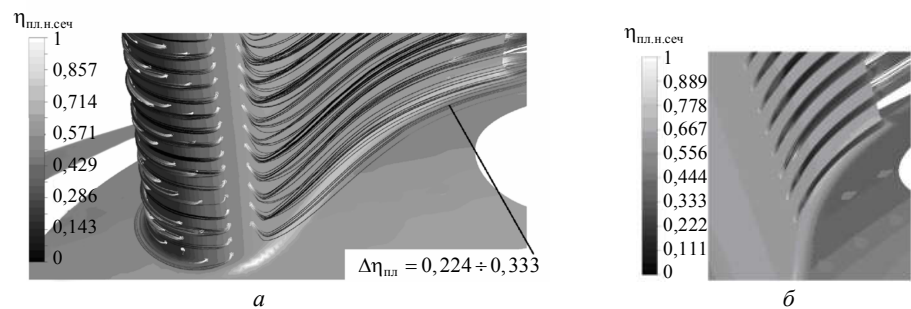


Рис. 5. Омывание нижней полки со стороны корытца струями пленочного охлаждения из отверстий на входной кромке: а – цилиндрическими отверстиями; б – веерными отверстиями, настильными в выходной части

Эффективность пленочного охлаждения в верхнем сечении профиля η_{пл.верх.сеч} при использовании веерных отверстий, настильных в выходной части, выше эффективности применения цилиндрических отверстий примерно на 0,027, а эффективность охлаждения лопатки θ_{пл.верх.сеч} выше на 0,021.

Эффективность пленочного охлаждения в верхнем подположном сечении на корытце при использовании веерных отверстий, настильных в выходной части, превышает эффективность применения цилиндрических отверстий (рис. 6): Δη_{наст. веерн. вых. ч.-цил} = 0,25÷0,053 за тремя рядами отверстий, далее по корытцу 0,067–0,01, а непосредственно на выходной кромке 0,07–0,056. При этом на спинке (рис. 7) эффективность пленочного охлаждения в верхнем подположном сечении для веерных отверстий, настильных в выходной части, выше, чем при применении цилиндрических отверстий: в области между первым и вторым рядом отверстий на 0,039–0,07; в области за вторым рядом отверстий на 0,034–0,021; в зоне выходной кромки на 0,02–0,037.

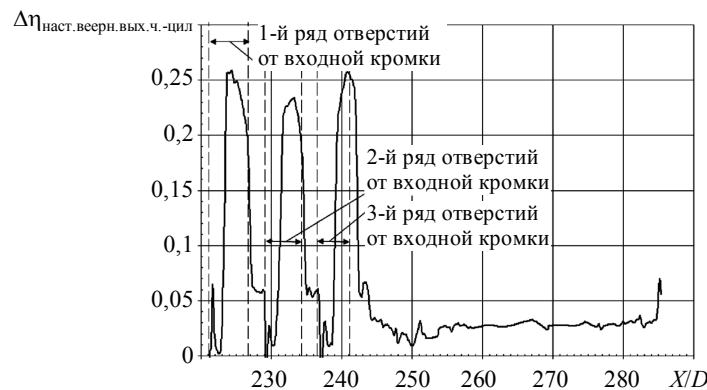


Рис. 6. Разность эффективностей пленочного охлаждения в верхнем подположном сечении на корытце

Несколько ниже это преимущество для нижнего сечения. Со стороны корытца в зоне между отверстиями оно составляет Δη_{наст. веерн. вых. ч.-цил} = 0,185, постепенно снижаясь за отверстиями до 0,011 во второй половине пера; со стороны спинки 0,005–0,086; в области за отверстиями 0,014–0,055.

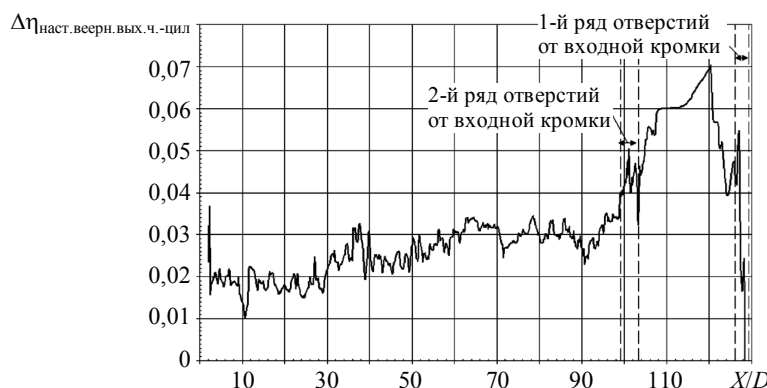


Рис. 7. Разность эффективностей пленочного охлаждения в верхнем подположном сечении на спинке

Таким образом, наиболее эффективным способом охлаждения трактовых полок и пера в зоне «меридионального поджатия» (так же, как и на остальной части пера [3]) является использование веерных отверстий, настильных в выходной части. Дополнительно для охлаждения полок весьма эффективно использование наклонных цилиндрических отверстий, расположенных на входной кромке лопаток в подположных сечениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dileep Chandran P.M. et al. A Comparative Study of Film Cooling Effectiveness on a Flat Plate with Adiabatic and Conjugate Conditions for Different Hole Shapes // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. ASME GT2012-69142. P. 1571–1580.
2. Ki-Don Lee, Kwang-Yong Kim. Shape Optimization of a Laidback Fan-Shaped Film-Cooling Hole to Enhance Cooling Performance // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 14–18, 2010, Glasgow, UK. ASME GT2010-22398. P. 1447–1458.
3. Горелов Ю.Г., Тюльков К.В. Сравнительное исследование эффективности пленочного охлаждения сопловых лопаток турбины с цилиндрическими и профилированными отверстиями в адиабатных и сопряженных условиях // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Самара, 22–24 июня 2016. Самара: Самарский ун-т, 2016. Ч. 1. С. 9–11.
4. Mats K. et al. Fan Shaped and Cylindrical Holes Studied in a Vane Film Cooling Test Rig // Proc. of the ASME Turbo Expo, Glasgow, UK. ASME GT2010-23308. P. 1777–1784.
5. Nadali H.N. et al. CFD Based Sensitivity Analysis of Influencing Flow Parameters for Cylindrical and Shaped Holes in a Gas Turbine Vane // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. ASME GT2012-69023. P. 1–9.
6. Baldauf S., Scheurlen M., Schuls A. CFD Based Sensitivity Study of Flow Parameters for Engine Like Film Conditions // Proc. of the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, June 10–13, 1996, Birmingham, UK. Paper № 96-GT-310. P. 1–9.
7. Горелов Ю.Г., Тюльков К.В. Верификация 3D-расчетов пленочного охлаждения сопловых лопаток в ANSYS CFX // Климовские чтения-2016: перспективные направления развития авиадвигателестроения: Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 20 окт. 2016. СПб.: Скифия-принт, 2016. С. 105–113.

Поступила в редакцию 13.09.17

The 3D Computational Investigation of Film Cooling Effectiveness for Turbine Nozzle Vanes with «Meridian Constriction» and Shaped Film-Cooling Holes

YU.G. GORELOV AND K.V. TYUL'KOV

Active influence dimension of film cooling along the blade profile is investigated with using the Spalart–Allmaras turbulence model. The cooling effectiveness of vane platforms and vane fillets is studied with the use of perforation holes on the leading edge.

Film cooling effectiveness, blowing ratio, fan-shaped holes, cylindrical holes