

## 3D-исследование эффективности охлаждения трактовых полок соплового блока турбины высокого давления с «меридиональным поджатием» и веерными отверстиями

**Ю.Г. ГОРЕЛОВ,**

канд. техн. наук

(АО НПО газотурбостроения  
«Салют», Москва)

Yury.Dina@gmail.com

По результатам расчета в ANSYS CFX сделан вывод о большей эффективности охлаждения полки с веерными отверстиями перфорации по сравнению с эффективностью охлаждения полки с цилиндрическими отверстиями.

**Трактовая полка, эффективность охлаждения, сопловой блок, турбина высокого давления, газотурбинный двигатель**

Для обеспечения потребной эффективности охлаждения трактовых полок соплового блока турбины высокого давления (ТВД) приходится применять 3–10 рядов цилиндрических отверстий [1] (рис. 1, а). В случае двигателя GE-E<sup>3</sup> продолжают исследования влияния на эффективность охлаждения полки с четырьмя рядами пленочного охлаждения (щели на выходе из камеры сгорания) и так называемого «фантомного» охлаждения (из выходной кромки сопловых лопаток [2]), вращающегося против часовой стрелки потока на входе в сопловые лопатки при различных синхронных позициях по окружности [3], геометрического и струйного воздействия на вторичные течения и тепловое состояние полок [4].

Охлаждение трактовых полок соплового блока ТВД осложняется тем, что в современных газотурбинных двигателях (ГТД) применяется «меридиональное поджатие» сопловых блоков турбины высокого давления (рис. 1, б), позволяющее улучшить равномерность обтекания сопловых лопаток, выровнять значения параметров на входе в рабочее колесо и выполнить профиль рабочих лопаток с меньшей «закруткой».

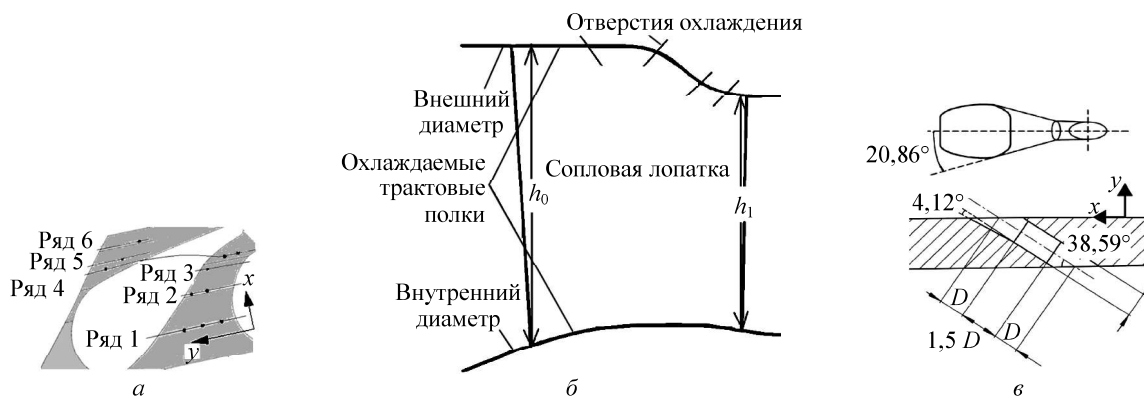


Рис. 1. Варианты охлаждения трактовых полок сопловых блоков ТВД существующих ГТД:

а – меридиональный профиль; б – шесть рядов отверстий на исследуемой полке авиационного ГТД; в – веерное отверстие, настильное в выходной части

За счет «меридионального поджатия» увеличивается кпд рабочего колеса, снижается температура газа перед сопловыми лопатками, что приводит к увеличению скорости и коэффициентов теплоотдачи от газа в зоне «меридионального поджатия», особенно значительному на верхней полке со стороны корытца.

В работе [5] показано, что при «меридиональном поджатии» из-за применения цилиндрических отверстий с коническим выходом возникают более высокие профильные потери (примерно на 10 %) по сравнению с использованием цилиндрических отверстий, однако обеспечивается лучшая теплозащита за счет небольшого увеличения расхода охладителя. Однако на трактовой полке исследуемого в работе [5] соплового блока применяется четыре ряда отверстий перфорации (46 отверстий в одном межлопаточном канале), что приводит к существенному увеличению расхода охлаждающего воздуха, допустимому для большеразмерных газотурбинных установок, но непригодному для малоразмерных авиационных ГТД,

из-за применения которых остро стоит вопрос экономичности при обеспечении допустимых температур металла. В связи с этим обеспечение допустимой температуры полок с «меридиональным поджатием» для малоразмерных авиационных ГТД при использовании пленочного охлаждения с веерными отверстиями, настильными в выходной части, и струйного охлаждения является актуальной задачей. В представленной работе использовались оптимизированные в работе [6] веерные отверстия перфорации, настильные в выходной части (рис. 1, в).

Основной целью исследования является оптимизация охлаждения верхней трактовой полки соплового блока ТВД с «меридиональным поджатием» при использовании вычислительной гидродинамики (CFD).

Для того чтобы охарактеризовать локальные условия инжекции, был выполнен комплекс исследований относительных расходов воздуха  $G_{\text{ряд}}/G_{\text{перф.сум}}$  (в процентах) и параметров вдува  $m_{\text{лок}}$  для каждого ряда отверстий, в то время как решетка находилась в условиях исследований на трех режимах (таблица).

Параметры вдува для отверстий перфорации на верхней полке

Режим	$m_{\text{ср}}$		MFR, %	
	Цилиндрические отверстия	Веерные отверстия	Цилиндрические отверстия	Веерные отверстия
Минимальный	0,974	0,522	0,304	0,333
Максимальный	0,955	0,549	0,292	0,317
Чрезвычайный	2,777	1,056	1,079	1,116

Для минимального и максимального (рис. 2) режима исследований на входной плоской и вогнутой части зоны «меридионального поджатия» верхней трактовой полки в рядах 1–3 (см. рис. 1) расход воздуха при использовании цилиндрических отверстий незначительно превысил расход воздуха при использовании веерных отверстий (на 0,18–1,64 %). При этом на вогнутой части зоны «меридионального поджатия» и в выходной части полки расход воздуха при использовании цилиндрических отверстий превышал расход воздуха при использовании веерных отверстий (на 0–2,26 %). Значения параметров вдува для цилиндрических отверстий  $m_{\text{лок}}$  превышают значения параметров вдува с применением веерных отверстий для всех рядов отверстий верхней полки (например, в 2,25 раза в ряду 1 и в 1,4 раза в ряду 4). Это установлено для относительно низкого, ранее не исследованного диапазона величин MFR < 0,5 %, полученных на основных режимах работы ГТД – минимальном и максимальном.

В работе [7] показано, что для лучшего понимания влияния кривизны поверхности на эффективность охлаждения применимо отношение тангенциальных потоков импульса  $I \cos^2 \alpha$ , где  $\alpha$  – угол вдува. В отличие от параметров вдува, существенные отличия тангенциальных потоков импульса для веерных и цилиндрических отверстий получены в передней части полки: в ряду 1 на минимальном режиме – в 4,2 раза, на максимальном режиме – в 3,2 раза (рис. 3), на чрезвычайном режиме – в 6,2 раза. При этом в рядах 4–6 для выпуклой и плоской поверхности отличие на минимальном и максимальном режимах в 1,5–2,8 раза, на чрезвычайном режиме – в 3–3,6 раза.

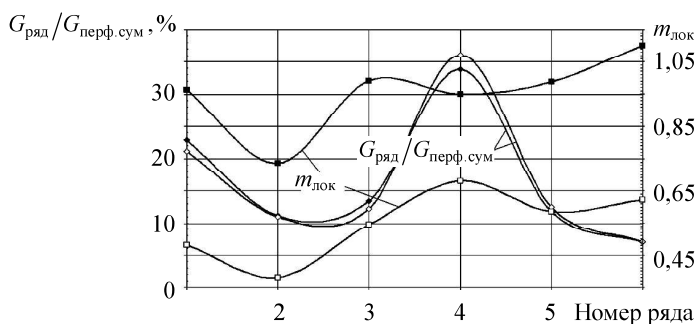


Рис. 2. Распределение относительного расхода воздуха через ряды отверстий перфорации и локальных параметров вдува  $m_{\text{лок}}$  для верхней полки с цилиндрическими и веерными отверстиями на максимальном режиме:  
◆, ■ – цилиндрические отверстия; ◇, □ – веерные отверстия

Установлено, что в области рядов отверстий локальные параметры вдува и относительные потоки импульса существенно снижаются от корытца к спинке, однако параметр вдува снижается в меньшей степени, чем относительный поток импульса. Так, на максимальном режиме в ряду 1 параметр вдува снижается примерно в 1,6 раза, относительный поток импульса – в 2,25 раза, при этом в ряду 4 – в 1,26 и

1,67 раза. Значения параметров вдува  $m_{\text{лок}}$  и относительные потоки импульса  $I \cos^2 \alpha$  при использовании цилиндрических отверстий значительно выше, чем при применении веерных отверстий, например, на максимальном режиме – в 1,54–2,24 раза ( $m_{\text{лок}}$ ) и в 1,34–4,57 раза ( $I \cos^2 \alpha$ ).

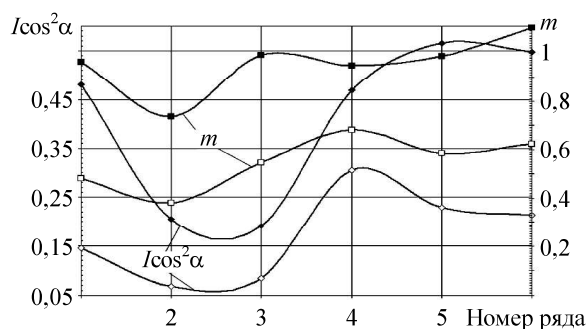


Рис. 3. Тангенциальное отношение потоков импульса  $I \cos^2 \alpha$  и локальных параметров вдува  $m$  на максимальном режиме для цилиндрических и веерных отверстий:  $\blacklozenge$  –  $I \cos^2 \alpha$  (цилиндрические отверстия);  $\blacklozenge$  –  $I \cos^2 \alpha$  (веерные отверстия);  $\blacksquare$  –  $m$  (цилиндрические отверстия);  $\square$  –  $m$  (веерные отверстия)

Максимальное превышение отмечено в ряду 1 отверстий – у корытца.

Несколько отличается соотношение потоков импульса для цилиндрических и веерных отверстий в области за рядами перфорационных отверстий. Так, на большей части входной плоской зоны полки за рядом 1 отверстий  $I_{\text{цилиндр}}/I_{\text{веерн}} = 1,3 \div 1,5$ , еще больше это отличие за рядом 2 отверстий на вогнутой части полки: 1,85–2,06. Существенные отличия (в 10–20 раз) относительных потоков импульса получены при применении цилиндрических и веерных отверстий на выпуклой части полки за рядами 5, 6 отверстий.

Таким образом, при наличии веерных отверстий регистрировалось снижение  $I$  и параметра  $I \cos^2 \alpha$  в зоне рядов отверстий и практически во всей области межлопаточного канала за рядами отверстий. Веерные отверстия используются для улучшения теплозащиты, так как одинаковый расход инжектируется при более низком импульсе, откладывая явление отрыва струи при более высоких условиях вдува. Улучшение охлаждения получено при использовании профилированных отверстий благодаря минимальному проникновению струи и удовлетворительному распространению в поперечном направлении.

Проведенная ранее в ANSYS CFX верификация эффективности пленочного охлаждения ( $\eta_{\text{расч}}$ ) вдоль профиля сопловой лопатки показала, что отличие  $\eta_{\text{расч}}$  от экспериментального значения ( $\eta_{\text{экспер}}$ ) –  $\Delta \eta_{\text{ANSYS CFX}}$  – составляет незначительную величину. Величина  $\Delta \eta_{\text{ANSYS CFX}}$  практически не отличается от разностей эффективностей охлаждения  $\Delta \eta$  для других CFD-пакетов и соответствующих моделей турбулентности [8].

С целью увеличения интенсификации охлаждения верхней трактовой полки было проведено сравнительное исследование веерных отверстий, настильных в выходной части, размещенных в зоне «меридионального поджатия» при расположении их как по течению газа, так и против течения (рис. 4).

Установлено, что поворот отверстий против потока в зоне «меридионального поджатия» привел к снижению расхода воздуха через каждое из этих отверстий на незначительную величину при практически не изменившейся эффективности охлаждения для двух отверстий во входной части зоны «меридионального поджатия»  $\Theta \approx \text{const}$  (рис. 4, а, в), а на выходе в выпуклой части зоны «меридионального поджатия» (рис. 4, б, г) – к увеличению эффективности охлаждения на  $\Delta \Theta \approx 0,13$  (с 0,45 до 0,576), что эквивалентно снижению температуры полки примерно на 80 °С (рис. 5).

В результате в зоне за этим отверстием удалось ликвидировать локальный перегрев полки и существенно увеличить эффективность пленочного охлаждения с 0,074 до 0,355.

В представленном исследовании фронтальная часть нижней трактовой полки эффективно защищалась пленочной завесой из пазов в «козырьке» камеры сгорания непосредственно в зоне за пазами и дополнительно – струйным охлаждением в зоне перед входной кромкой. Эффективность охлаждения нижней полки в зоне за пазами составила приблизительно 0,565, в зоне перед входной кромкой она была снижена до 0,5, а непосредственно за этой зоной составила 0,34. Передняя часть верхней трактовой полки эффективно защищалась пленочной завесой из пазов в козырьке камеры сгорания на расстоянии примерно 1/3 хорды от входной кромки и дополнительно – струйным охлаждением на расстоянии от 1/3

до  $2/3$  хорды. Так, на расстоянии  $1/3$  хорды эффективность охлаждения снижалась от 0,75 до 0,7. В зоне приблизительно  $2/3$  хорды эффективность охлаждения изменялась от 0,67 до 0,38, при этом в зоне перед «горлом» пучок струй резко сжимался, прижимаясь к спинке.

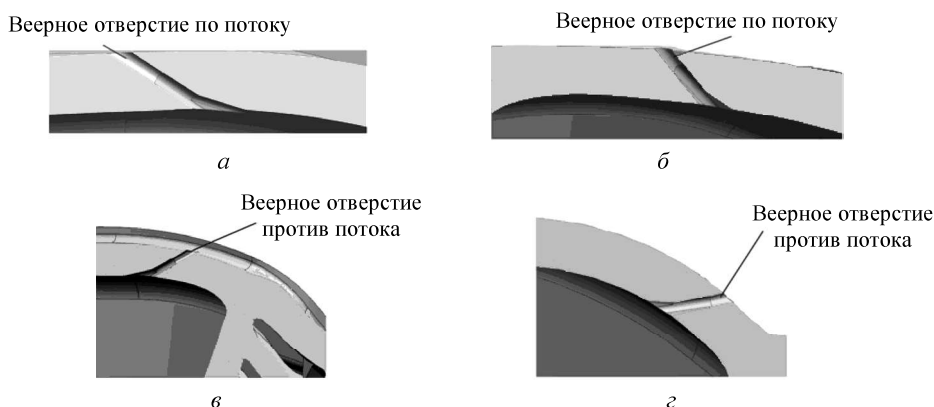


Рис. 4. Отверстия в зоне «меридионального поджатия»

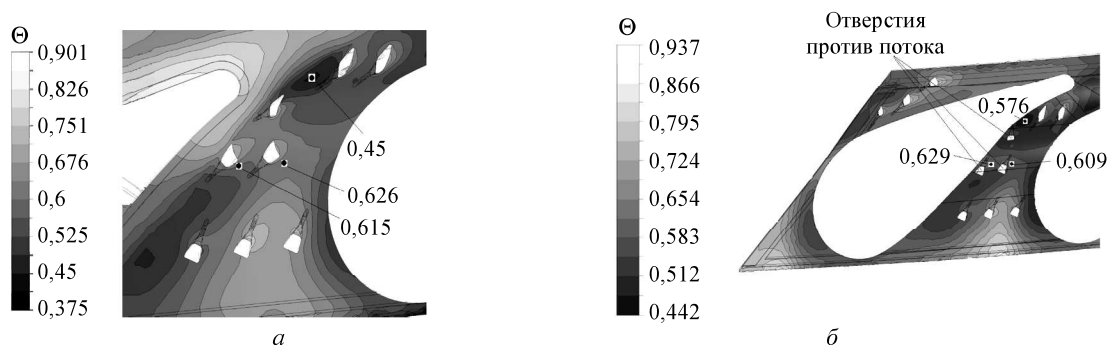


Рис. 5. Влияние расположения трех отверстий перфорации по потоку (а) и против потока (б) в зоне «меридионального поджатия»

В связи с этим на верхней и нижней полках добавлен ряд из двух веерных отверстий, настильных в выходной части вблизи корытца, так как область вблизи спинки достаточно хорошо охлаждалась жгутом струй из пазов в камере сгорания. Эти ряды позволили существенно увеличить эффективность охлаждения полок, например, на верхней полке за рядом 1 из трех отверстий до 0,57 и до 0,55 в зоне превращения струй из камеры сгорания в тонкий жгут.

Если на минимальном режиме на корытце между полилиниями 4, 5 не удалось избавиться от зоны с пониженной эффективностью охлаждения за счет введения веерных отверстий, то на максимальном (рис. 6) и чрезвычайном режимах она отсутствует как для цилиндрических, так и для веерных отверстий.

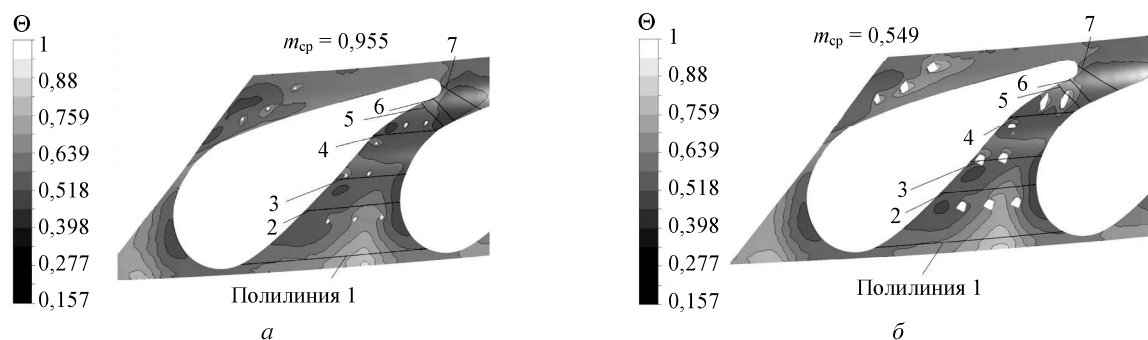


Рис. 6. Эффективность охлаждения верхней трактовой полки  $\Theta$  с цилиндрическими (а) и веерными отверстиями, настильными в выходной части (б), на максимальном режиме

На максимальном и чрезвычайном режимах в выпуклой части зоны «меридионального поджатия» на полилиниях 5–7 зона с более высокой эффективностью охлаждения для веерных отверстий существ-

венно больше, чем для цилиндрических, что, очевидно, связано с более значительным отрывом цилиндрических струй в этой области.

Анализ изменения эффективности охлаждения верхней трактовой полки в направлении течения газа для минимального, максимального и чрезвычайного режима (рис. 7) показал, что в передней зоне трактовой полки на полилиниях 1, 2 эффективность охлаждения полки с цилиндрическими и веерными отверстиями отличается незначительно.

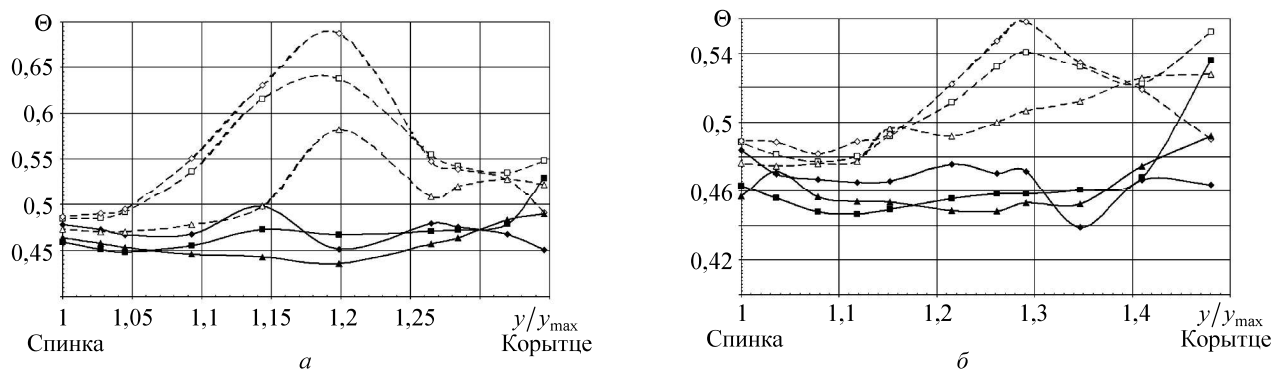


Рис. 7. Эффективность охлаждения верхней трактовой полки  $\Theta$  с цилиндрическими и веерными отверстиями, настильными в выходной части, на полилиниях по длине межлопаточного канала: *а* – полилиния 5; *б* – полилиния 6 (■ – цилиндрические отверстия, максимальный режим ( $m_{cp} = 0,955$ ); □ – веерные отверстия, максимальный режим ( $m_{cp} = 0,549$ ); ◇ – веерные отверстия, минимальный режим ( $m_{cp} = 0,522$ ); ♦ – цилиндрические отверстия, минимальный режим ( $m_{cp} = 0,974$ ); ▲ – цилиндрические отверстия, чрезвычайный режим ( $m_{cp} = 2,777$ ); △ – веерные отверстия, чрезвычайный режим ( $m_{cp} = 1,056$ ))

При этом для чрезвычайного режима на полилинии 3 это отличие составило 0,038 (41 К) со стороны спинки и 0,017 (18 К) со стороны корытца, на полилинии 4 в зоне «меридионального поджатия» 0,026 (28 К), а на полилиниях 5, 6 в выходной выпуклой части зоны «меридионального поджатия» 0,06–0,146 (64–270) К, на полилинии 7 за зоной «меридионального поджатия»  $\Delta\Theta = 0,072$  (77 К).

Для максимального режима на полилинии 4 в зоне «меридионального поджатия» эффективность охлаждения полки с веерными отверстиями превышает эффективность полки с цилиндрическими на 0,024 (26 К) со стороны спинки, а на полилиниях 5, 6 (см. рис. 7) в выходной выпуклой части зоны «меридионального поджатия» – на 0,107–0,254 (114–270 К). При этом на полилинии 7 за зоной «меридионального поджатия» это отличие весьма существенно:  $\Delta\Theta = 0,073$  (78 К).

Для минимального режима на полилинии 5 (рис. 7, *а*) в выпуклой зоне «меридионального поджатия» эффективность охлаждения полки с веерными отверстиями больше, чем эффективность охлаждения полки с цилиндрическими отверстиями на 0,236 (252 К). Далее это преимущество снижается и составляет на полилинии 6–0,096 (102 К), на полилинии 7 – на 0,049 (52 К).

Очевидно, увеличение эффективности охлаждения полки с веерными отверстиями  $\Theta$  по сравнению с  $\Theta$  цилиндрических отверстий связано с более широким поперечным распространением уплотненных струй при использовании веерных отверстий по сравнению с цилиндрическими, а также с незначительным увеличением суммарного расхода воздуха на пленку (на 0,02 %). Расход увеличивается в основном в отверстиях выходной части зоны «меридионального поджатия» – на незначительную величину через каждое отверстие (примерно 0,0015–0,0028 %). При сравнении эффективностей охлаждения осредненных по характерным участкам при использовании веерных и цилиндрических отверстий перфорации (рис. 8) установлено, что максимальное увеличение эффективности охлаждения полки с веерными отверстиями по сравнению с эффективностью полки с цилиндрическими отверстиями получено для участка 5 в выпуклой части зоны «меридионального поджатия». Так, на максимальном режиме это превышение составило 0,039 (42 К). Меньше это отличие на вогнутой части зоны «меридионального поджатия» – на участках 3 и 4:  $\Delta\Theta = 0,006 \div 0,015$  (6–16 К). На плоской поверхности полки за зоной «меридионального поджатия» на участке 6 –  $\Delta\Theta = 0,012 \div 0,031$  (13–33 К), на участке 7 –  $\Delta\Theta = 0,006 \div 0,023$  (6–25 К).

При исследовании отношения MFR в зависимости от входного параметра вдува  $M_1$  для исследуемых геометрий установлено, что благодаря восстановлению давления в расширяющемся сечении отверстия введение расширенного выхода продуцирует вдув с незначительно большим расходом для всех ис-

следуемых условий инжекции. При осреднении в осевом направлении локальных величин эффективности охлаждения  $\Theta$  были получены осредненные по поверхности верхней полки суммарные эффективности охлаждения  $\Theta_{\Sigma}$ . Оптимальная величина  $\Theta_{\Sigma}$  при использовании цилиндрических отверстий была получена на минимальном режиме для  $M_1 = 1,372$  и  $MFR = 0,304$  %, а в случае веерных отверстий – для  $M_1 = 1,839$  и  $MFR = 0,333$  %. Близкие величины  $\Theta_{\Sigma}$  получены для максимального режима: при реализации цилиндрических отверстий с  $M_1 = 1,365$  и  $MFR = 0,292$  %, веерных отверстий – с  $M_1 = 1,795$  и  $MFR = 0,317$  %.

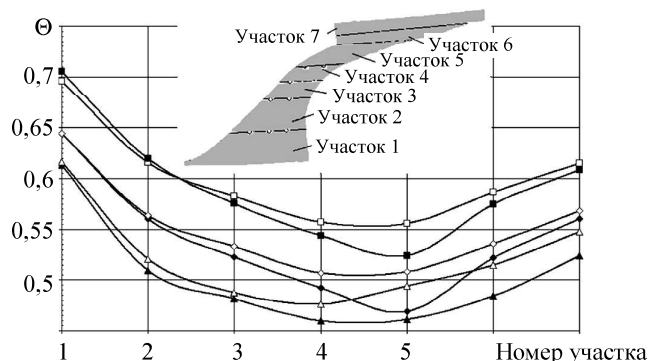


Рис. 8. Распределение эффективности охлаждения, осредненной по шагу, для участков 1–7 на верхней полке с цилиндрическими и веерными отверстиями, настильными в выходной части, для различных режимов: ■ – цилиндрические отверстия, максимальный режим ( $m_{cp} = 0,955$ ); □ – веерные отверстия, максимальный режим ( $m_{cp} = 0,549$ ); ◇ – веерные отверстия, минимальный режим ( $m_{cp} = 0,522$ ); ◆ – цилиндрические отверстия, минимальный режим ( $m_{cp} = 0,974$ ); ▲ – цилиндрические отверстия, чрезвычайный режим ( $m_{cp} = 2,777$ ); △ – веерные отверстия, чрезвычайный режим ( $m_{cp} = 1,056$ )

При введении веерных отверстий вместо цилиндрических выполняется смещение величины пика на графике для  $\Theta_{\Sigma}$ : на минимальном режиме от 0,603 для цилиндрических отверстий (при  $MFR = 0,304$  %) до 0,611 для веерных отверстий при  $MFR = 0,333$  %. Это увеличение получено за счет незначительного увеличения расхода охладителя (на 0,02 %). Во всяком случае, лучшая характеристика достигается при больших инжекционных условиях. Так, при увеличении перепада давлений на отверстиях увеличенная эффективность охлаждения полки с веерными отверстиями по сравнению с эффективностью охлаждения полки с цилиндрическими отверстиями увеличивается с  $\Delta\Theta_{\Sigma} = 0,009$  (для минимального режима) до  $\Delta\Theta_{\Sigma} = 0,017$  (для чрезвычайного режима). В работе [5] для большеразмерных стационарных газотурбинных установок оптимальное превышение получено при  $M_1 = 3$ :  $\Delta\Theta_{\Sigma} = 0,095$ . Однако в представленном исследовании основными режимами являются максимальный и минимальный режимы с  $M_1 = 1,365 \div 1,839$ , и, несмотря на то что превышение средней по площади эффективности охлаждения составляет незначительную величину ( $\Delta\Theta_{\Sigma} = 0,009 \div 0,017$ ), превышение локальных величин эффективности охлаждения весьма значительно. Так, в выходной выпуклой части зоны «меридионального поджатия» оно составляет 0,107–0,254 (114–270 К), а за зоной «меридионального поджатия» –  $\Delta\Theta_{\Sigma} = 0,073$  (78 К). В заключение необходимо отметить, что эти результаты согласуются с результатами для плоской пластины, указывая на то, что профилированные отверстия обеспечивают значительное улучшение характеристик, особенно при высоких параметрах вдува [9].

В современных ГТД с целью повышения КПД ТВД широко применяется «меридиональное поджатие» сопловых блоков ТВД, которое приводит к существенному увеличению скорости и коэффициентов теплоотдачи от газа в этой зоне, особенно на верхней полке со стороны корытца. В связи с этим обеспечение допустимой температуры в этой области полки с цилиндрическими либо веерными отверстиями перфорации является актуальной задачей.

В представленном исследовании для относительно низкого, ранее не исследованного диапазона величин  $MFR < 0,5$  %, полученных на основных режимах работы малоразмерного ГТД, установлено, что параметры вдува для цилиндрических отверстий перфорации превышают параметры вдува при использовании веерных отверстий в области всех рядов отверстий верхней полки.

Введение веерных отверстий с настильной выходной частью улучшает свойства тепловой защиты охладителем по всей поверхности верхней и нижней трактовых полки, приводит к более равномерной защите при более высоком режиме.

Оптимальные условия вдува были получены с  $MFR = 0,333 \%$  для профильного отверстия, в то время как в случае цилиндрической геометрии наиболее высокие значения тепловой характеристики были найдены для  $MFR = 0,304 \%$ . Увеличение локальных величин эффективности охлаждения полки с веерными отверстиями по сравнению с использованием цилиндрических отверстий составляет значительную величину. Так, в выходной выпуклой части зоны «меридионального поджатия»  $\Delta\Theta = 0,107 \div 0,254$  (115–270 K), а за зоной «меридионального поджатия» –  $\Delta\Theta = 0,073$  (78 K).

При незначительном увеличении расхода охладителя ( $MFR = 0,333 \%$  вместо  $0,304 \%$ ) получено существенное улучшение эффективности охлаждения. Улучшение происходит при увеличении расхода охладителя для более сложных в изготовлении веерных отверстий, настильных в выходной части. В то же время дополнительный расход охладителя более существенно ухудшает характеристику цилиндрических отверстий. На это необходимо обратить внимание, когда требуется большая холодопроизводительность, чем та, которая может быть получена с цилиндрическими отверстиями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов Ю.Г., Матвеев А.С. Результаты экспериментального исследования перспективных способов охлаждения бандажа рабочих и трактовых полок сопловых лопаток высокотемпературных ГТД // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Самара, 23–25 июня 1997. Самара: СГАУ, 1997. Т. 2. С. 12–18.
2. Yang Zhang, Xin Yuan. Experimental Investigation of Turbine Phantom Cooling on Endwall with Trailing Edge Discharge Flow // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 16–20, 2014, Düsseldorf, Germany. GT2014-26781. P. 1–14.
3. Yang Zhang, Xin Yuan. Experimental Investigation of Nonperiodic Endwall Film Cooling in Neighboring Passages with Upstream Rotating Flow // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 16–20, 2014, Düsseldorf, Germany. GT2014-26824. P. 1–13.
4. Полетаев В.А. и др. Особенности аэродинамического и теплового совершенствования сопловых аппаратов турбин перспективных газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 81–86.
5. Barigozzi G. et al. Film Cooling of a Contoured Endwall Nozzle Vane through Fan-Shaped Holes // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2010. Vol. 31. Iss. 4. P. 576–585.
6. 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. P. 1447–1458. ASME GT2010-22398.
7. Ito S., Goldstein R.J., Eckert E.R.G. Film Cooling of a Gas Turbine Blade // Journal of Engineering for Power. 1978. Vol. 100. Iss. 3. P. 476–481.
8. 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.
9. Gritsch M., Schulz A., Wittig S. Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes with Expanded Exits // Proc. of the ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, June 2–5, 1997, Orlando, USA. ASME Paper 97-GT-164. P. 121–159.

Поступила в редакцию 2.10.18

После доработки 20.10.18

Принята к публикации 8.02.19

### 3D Investigation of Film Cooling Effectiveness for Nozzle Vane Platform of High Pressure Turbine with “Meridian Constriction” and Laidback Fan-Shaped Film-Cooling Holes

YU.G. GORELOV

Salyut Gas Turbine Engineering Research and Production Center, Moscow

*As the results of ANSYS CFX calculation, a conclusion draws about greater cooling effectiveness of vane platform with laidback fan-shaped perforation holes as compared with cooling effectiveness of vane platform with cylindrical holes.*

**Vane platform, cooling effectiveness, nozzle set, high pressure turbine, gas turbine engine**