

определения концевых потерь, так и оценки области оттеснения от стенок в случае расчета параметров потока вдоль проточной части машины. При этом модель более реалистично учитывает особенности формирования профильного ПС и его перемещение к концам рабочих лопаток.

Литература

1. Камписти Н. Аэродинамика компрессоров: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
2. Гостелю Дж. Аэродинамика решеток турбомашин: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. – 392 с.
3. Коваль В. А., Ковалева Е.А., Литвинов Е.В. Анализ возможности применения трехмерного пакета ANSYS CFX для проведения численного эксперимента на компрессорных ступенях// Компрессорная техника и пневматика. – М.: 2009, – №8. – С.19–23.
4. Венкатесваран С. Экспериментальные исследования пограничных слоев на корпусе в многоступенчатом осевом

компрессоре//Современное машиностроение. Сер. А., 1991, №9, -С.78-83.

5. Русанов А.В., Ершов С.В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин: Монография. – Харьков, ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с.
6. Коваль В.А., Васильев Б.П. Определение концевых потерь в ступени осевого компрессора на прерывных режимах работы // Конверсия в машиностроении. – М.– 2005. – Вып. 1, 2. – С. 141 – 145.
7. A. Corsini, B. Perugini, F. Rispoli. Experimental and numerical investigations on passive devices for tip-clearance induced noise reduction in axial flow fans // Mat. 7th ETC Fluid dynamics and thermodynamics. Greece, 5-9 March, 2007. – 13 pp.
8. B. Dobrzynski, H. Sothoff, G. Kosyna. Influence of the rotor tip stagger angle on axial compressor stall inception // Mat. 7th ETC Fluid dynamics and thermodynamics. Greece, 5-9 March, 2007. – 11 pp.

У даній статті, у вигляді аналітичного огляду, наведено ряд досліджень, направлених, перед усім, на підвищення ефективності плівкового охолодження лопаток сучасних високотемпературних енергетичних двигунів. Розглянуто також переваги та недоліки наведених методів охолодження

Ключові слова: адиабатична ефективність плівкового охолодження, коефіцієнт вдуву, геометрія отворів

В настоящей статье, в виде аналитического обзора, представлен ряд исследований, направленных, прежде всего, на повышение эффективности пленочного охлаждения лопаток современных высокотемпературных энергетических ГТД. Рассмотрены также достоинства и недостатки представленных методов охлаждения

Ключевые слова: адиабатическая эффективность пленочного охлаждения, коэффициент вдува, геометрия отверстий

The present report gives an analytical survey of investigations, aimed, first of all, on increasing of film-cooling systems effectiveness for the turbine nozzle vanes and blades being used in modern advanced gas turbines for power generation. Advantages and disadvantages of the presented cooling techniques are also discussed

Key words: film-cooling adiabatic effectiveness, blowing ratio, holes geometry

УДК 621.438:226.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТД

Ю. Я. Дашевский

Начальник сектора тепловых и гидравлических расчетов

Отдел турбин

ГП НПКГ «Зоря-Машпроект»

пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина, 54018

Контактный тел.: (0512) 49-37-09

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

1. Введение

В современных наиболее высокотемпературных зарубежных энергетических ГТД большой мощности

температура газа перед турбиной достигает 1500 °С. Уже в 2011г. фирма «Мицубиси» планирует начать поставку двигателей нового поколения «J» мощностью 320МВт с температурой газа перед турбиной 1600 °С,

при этом работы по ее повышению продолжают. Необходимо также отметить, что указанные значения температур достигнуты в двигателях с чисто воздушными системами охлаждения лопаток.

Технические решения, заложенные в системах охлаждения лопаток современных высокотемпературных ГТД, в частности, представлены в [1,2]. Среди наиболее перспективных схемных решений можно выделить циклонное охлаждение, проникающее (внутристеночное) охлаждение, щелевое пленочное охлаждение с ячеистым подводом воздуха [2]. Важнейшей конструктивной особенностью как сопловых, так и рабочих лопаток является то, что независимо от мощности ГТД в комбинации с конвективным широко применяется пленочное (заградительное) охлаждение. По этой причине, совершенствование систем пленочного охлаждения как в плане повышения глубины охлаждения, так и в плане уменьшения расхода охлаждающего воздуха, является крайне важным аспектом совершенствования систем охлаждения лопаток в целом.

Совершенство систем пленочного охлаждения обычно оценивают по адиабатической эффективности пленочного охлаждения (далее по тексту «эффективность пленочного охлаждения»), которая во всех, представленных в данной работе исследованиях, оценивалась по формуле

$$\eta = \frac{T_r - T_{ад.ст.}}{T_r - T_b},$$

где T_r - полная температура основного потока газа с учетом коэффициента восстановления;

$T_{ад.ст.}$ - адиабатическая температура защищаемой поверхности;

T_b - температура охлаждающего воздуха, подающегося на охлаждение.

Наиболее часто для оценки эффективности пленочного охлаждения используются значения η , усредненные в поперечном к основному потоку направлении ($\eta_{ав}$), в некоторых случаях дополнительно *используются* и значения вдоль средней линии отверстий пленочного охлаждения ($\eta_{сl}$).

Ввиду широкого применения пленочного охлаждения в лопатках авиационных ГТД, обширные исследования в этой области для цилиндрических отверстий (перфорации) были проведены еще в 70-80-е годы. При этом было установлено, что для одного ряда перфорационных отверстий наиболее приемлемая по конструктивным соображениям, расходам охлаждающего воздуха и эффективности охлаждения геометрия должна быть примерно следующей: угол выхода потока к защищаемой поверхности (γ) около 30°, отношение шага отверстий к диаметру (t/D) около 3,0, отношение длины отверстия к диаметру (l/D) не менее 3,0.

Проведенные в те годы исследования показали, что в большинстве случаев струи воздуха не «прилипают» к защищаемой поверхности, а достаточно глубоко проникают в основной (газовый) поток. При истечении струй под острым углом к поверхности между струей и поверхностью создается зона разрежения, что приводит к «подсосу» потока газа к защищаемой поверхности (эффект Коанда). К тому же, выпуск воздуха на защищаемую поверхность приводит к интенсификации теплообмена со стороны газового потока, что крайне нежелательно. Исследованиями было также показано,

что отрыв струи происходит при коэффициентах вдува $M > 0,5$, которые рассчитываются по формуле:

$$M = \frac{\rho_b W_b}{\rho_r W_r},$$

где ρ_b, ρ_r - плотности, соответственно, воздуха и газа;

W_b, W_r - скорости, соответственно, воздуха и газа.

В то же время, для большинства схем пленочного охлаждения лопаток турбин характерны значительно более высокие значения коэффициента вдува $1,0 \leq M \leq 2,0$. Кроме того, при низких значениях M , в условиях высокой турбулентности газового потока, кривизны поверхности и градиента давлений происходит более интенсивное размывание струи охладителя, что на практике приводит к некоторому повышению η только в зоне вдува, а на удалении от нее - даже к снижению η .

Результаты многочисленных исследований, например, приведенных [3], а также собственный опыт проектирования показывает, что реально достижимая эффективность пленочного охлаждения лопаток при использовании цилиндрических отверстий невысока. Даже непосредственно в зоне выдува охладителя проблематично обеспечить эффективность пленочного охлаждения для одного ряда отверстий указанной геометрии на уровне $\eta_{ав} \approx 0,3$, а на расстоянии 20 диаметров отверстий ($X/D=20$) ее величина, как правило, не превышает 0,15. Повышение $\eta_{ав}$ за счет увеличения числа рядов перфорации приводит к увеличению расхода охлаждающего воздуха и к снижению КПД как турбины, так и двигателя в целом. Рядом исследований было установлено, что причина низкой эффективности пленочного охлаждения, во многом, обусловлена взаимодействием струй охладителя с основным потоком, которое имеет сложный характер и сопровождается сильным вихреобразованием. Так, в работе [4] была предложена следующая классификация основных вихревых структур, вызванных выпуском охладителя на пленочное охлаждение плоской пластины:

- «почкообразный» вихрь (“kidney shaped vortex”) - вихрь, состоящий из системы двух вихрей противоположного вращения в ядре струи;
- «подковообразный» вихрь (“horseshoe vortex”) - вихрь, вызванный внезапным торможением пограничного слоя перед передней кромкой струи;
- «пара половинных вихрей зоны возмущения» (“half wake vortex pair”) - пара вихрей в зоне пониженного давления за струей;
- «пара половинных пристенных вихрей» (“half wall vortex pair”) - пара вихрей, вызываемых почкообразным вихрем.
- «кромочный» вихрь (“lip vortex”) - вихрь, вызванный взаимодействием основного потока с передней кромкой струи охладителя.

Наличие всех перечисленных вихрей подтверждено экспериментами по визуализации течения. Было также установлено, что формирование «почкообразного» вихря в струе оказывает наибольшее влияние на эффективность пленочного охлаждения, по сравнению с другими вихревыми структурами, в том числе и из-за вызываемого им «подсоса» газа к защищаемой поверхности. Причем, интенсивность «почкообразного» вихря резко увеличивается с повышением M .

Таким образом, дальнейшие исследования по повышению эффективности пленочного охлаждения были проведены уже с учетом этих данных и были направлены, прежде всего, на устранение отрыва струи от поверхности и предотвращение формирования «почкообразного» вихря. В настоящее время эти исследования проводятся, в основном, по следующим направлениям:

- исследования фасонных отверстий, т.е. отверстий сложной формы (“fan-shaped holes”), расширяющихся к выходу на защищаемую поверхность;
- исследования отверстий, выходы из которых заглублены относительно защищаемой поверхности в пазы, расположенные перпендикулярно к направлению газового потока (“trenched holes”);
- исследования парных отверстий (“double-jet holes”), оси которых являются скрещивающимися прямыми.

2. Фасонные отверстия пленочного охлаждения

Публикации по применению фасонных отверстий для повышения эффективности пленочного охлаждения появились в открытой печати за рубежом во второй половине 90-х годов.

В качестве примера, на рис. 1 показана геометрия фасонных отверстий, исследованных в работах [5,6], а на рис. 2 и 3 - некоторые результаты экспериментов по определению эффективности пленочного охлаждения. Все измерения были проведены методом инфракрасной термографии при степени турбулентности основного потока $Tu \approx 3\%$. Следует отметить, что углы расширения фасонной части отверстий в боковом направлении 10° на сторону и 10° в продольном являются средним, по сравнению с другими исследованиями. В других работах рассмотрены также углы расширения в боковом направлении от 5° до 15° и от 0° до 15° в продольном.

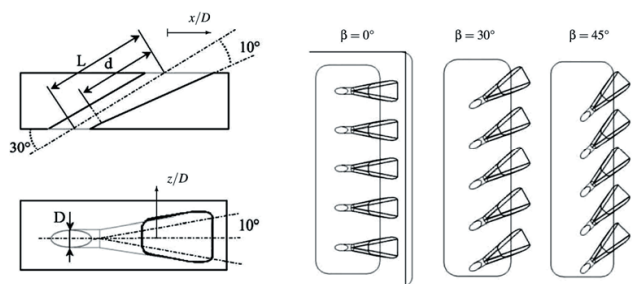
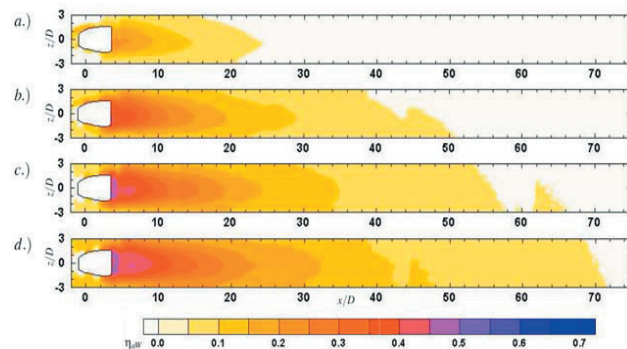


Рис. 1. Исследуемая геометрия отверстий с отклонением поверхности со стороны выхода воздуха (длина $d = 4D$, шаг отверстий $t = 6D$)

Как видно из рис. 2, с ростом M наблюдается повышение эффективности пленочного охлаждения, причем, даже при $M=2$ в зоне вдува η , в отличие от цилиндрических отверстий, не снижается. Необходимо отметить, что в фасонных отверстиях M определяется по скорости в цилиндрической части. Результаты численных исследований фасонных отверстий похожей конфигурации, в частности, приведенные в [7] при $M=2$, показали, что из-за уменьшения импульса струи в фасонной части отверстия уменьшается ин-

тенсивность ее взаимодействия с основным потоком. Это приводит к резкому ослаблению, прежде всего, «почкообразного» вихря и других вихревых структур, которые наблюдаются только вблизи сечения вдува $X/D \leq 5$. Более того, охладитель после выхода из отверстий растекается в поперечном направлении, уменьшая, таким образом, перетекание газа между отверстиями.



$M = 0,5$ (a), $M = 1,0$ (b), $M = 1,5$ (c), $M = 2,0$ (d)
Рис. 2. Эффективность пленочного охлаждения при использовании фасонных отверстий пленочного охлаждения при разных коэффициентах вдува

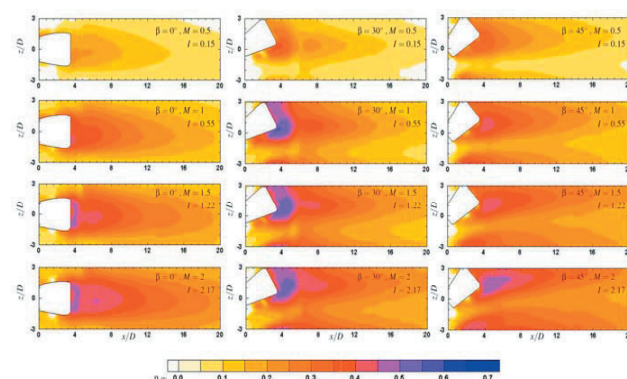


Рис. 3. Эффективность пленочного охлаждения при использовании фасонных отверстий пленочного охлаждения, расположенных под разными углами к основному потоку и при разных коэффициентах вдува

По данным [5], в сечении вдува ($X/D=0$) при $M=2$ $\eta_{av} \approx 0,37$, $\eta_{cl} \approx 0,65$, а в сечении $X/D=20$ $\eta_{av} \approx 0,21$. При $M=1,5$ в сечении $X/D=0$ $\eta_{av} \approx 0,35$, а в сечении $X/D=20$ - $\eta_{av} \approx 0,18$. Следует отметить, что приведенные в этой работе данные по η гораздо выше, чем для цилиндрических отверстий, но ниже, чем в ряде других исследований фасонных отверстий, например [8]. Это можно объяснить большим шагом между отверстиями $t/D=6$. По данным работы [8] при $t/D=3$ и несколько большем значении $M=2,5$ при применении отверстий подобной конфигурации с углом расширения в боковом направлении 14° , а в продольном 15° в сечении $X/D=0$ достигаются значения $\eta_{av} \geq 0,52$, а на расстоянии $X/D=20$ - $\eta_{av} \approx 0,35$. Это примерно в два раза выше, чем при использовании цилиндрических отверстий при том же соотношении t/D . В этой же работе показано, что повышение степени турбулентности основного потока с 3,6% до 11% для фасонных отверстий приводит к очень

незначительному снижению η при $M=2,5$. При $M=0,5$ снижение η в ряде сечений может достигать 30%, но это гораздо меньше, чем в варианте с цилиндрическими отверстиями, который также приведен в этой работе.

В работе [6], которая является продолжением работы [5], исследовалась эффективность пленочного охлаждения при повороте осей отверстий той же геометрии к направлению основного потока, чем моделировалось наличие бокового сносящего потока. Как видно из рис. 3, поворот осей отверстий на $\beta=30^\circ$ и $\beta=45^\circ$ приводит к заметному перераспределению η в поперечном направлении. В то же время, наличие этого угла практически не сказывается на η_{av} во всех исследованных сечениях, вплоть до $X/D=60$. Так, при $M=2,0$ в сечении $X/D=0$ при $\beta=30^\circ$ η_{av} увеличивается с $\eta_{av}=0,37$ при $\beta=0^\circ$ примерно до 0,41, а при $\beta=45^\circ$ - примерно до 0,39. В сечении $X/D=20$ значения η_{av} при $\beta=0^\circ$ и $\beta=45^\circ$ практически одинаковы, а при $\beta=30^\circ$ снижаются примерно на 0,03. Аналогичная картина наблюдается и при $M=1$. При $M=2$ и при $\beta=45^\circ$ было отмечено весьма существенное увеличение коэффициентов теплоотдачи со стороны основного потока, что крайне нежелательно. При $M=1$ такого явления не наблюдается.

В работе [9] было рассмотрено применение фасонных отверстий на входной кромке лопатки. В экспериментах, проведенных методом инфракрасной термографии на модели входной кромки лопатки с тремя рядами отверстий, исследовались отверстия с углом расширения фасонной части в боковом направлении 5° на сторону, в продольном - 0° . Оси всех отверстий были направлены под углом 30° в направлении высоты лопатки, отношение диаметров отверстий к диаметру входной кромки - 0,067. Отверстия среднего ряда для всех вариантов цилиндрические, оси исследованных фасонных отверстий во фронтальной плоскости были развернуты на 30° и 45° от вертикальной оси лопатки, шаг отверстий в направлении высоты $t/D=4$. Во всех экспериментах степень турбулентности основного потока составляла $Tu=9\%$.

В результате экспериментов было установлено, что в исследованном диапазоне $0,5 \leq M \leq 1,5$ значения η при применении фасонных отверстий гораздо выше, чем при использовании цилиндрических. Наибольшие значения η достигнуты в варианте с отверстиями, развернутыми под углом 45° от вертикальной оси лопатки. Так, в сечении вдува для ряда фасонных отверстий при $M=1,5$ достигнуты значения $\eta_{av} \approx 0,57$, а в аналогичном по углам поворота варианте с цилиндрическими отверстиями - $\eta_{av} \approx 0,38$. В сечении $X/D=20$ в варианте с фасонными отверстиями $\eta_{av} \approx 0,18$, с цилиндрическими отверстиями - $\eta_{av} \approx 0,07$.

Таким образом, из представленных данных следует, что эффективность пленочного охлаждения как на плоской поверхности, так и на поверхности с высокой кривизной может быть существенно повышена за счет применения фасонных отверстий вместо цилиндрических при том же расходе охладителя. Также очень важно, что ни в одних исследованиях не зафиксировано снижения η в зоне вдува даже при $M > 2$. В качестве недостатка систем пленочного охлаждения, в которых применяются фасонные отверстия, необходимо отметить, что технология их изготовления гораздо сложнее и дороже, чем цилиндрических. Тем не менее, есть данные о том, что в последних разработках охлаждаемых лопаток за-

рубежных высокотемпературных ГТД фасонные отверстия применяются, как на профильных частях лопаток, так и на торцевых поверхностях (полках).

3. Выпуск воздуха в пазы малой глубины, расположенные перпендикулярно к направлению газового потока

Другим направлением совершенствования систем пленочного охлаждения является выпуск воздуха из цилиндрических отверстий не непосредственно на защищаемую поверхность, а в пазы малой глубины, расположенные перпендикулярно к направлению газового потока. В открытой литературе имеются данные по исследованию эффективности пленочного охлаждения для пазов глубиной h от 0,4 до 1,2 диаметров отверстий D .

В работе [10] показан механизм повышения эффективности пленочного охлаждения при применении поперечных пазов. Как видно из рис. 4 из этой работы, наличие паза предотвращает непосредственное проникновение струи охладителя в основной поток и взаимодействие с ним. В этом аспекте важно, чтобы передняя в направлении основного потока кромка паза располагалась вблизи к кромке отверстия. Задняя кромка паза работает как дополнительное сопротивление (препятствие) для поступающего из отверстия охладителя, которое заставляет часть его растекаться в поперечном направлении еще до выхода на наружную поверхность и также должна располагаться вблизи задней кромки отверстия. Это препятствие может также уменьшать или нарушать обычное вихреобразование, приводящее к подосу газа под струей воздуха. Так, в работе [11] показано, что в щели с $h/D=0,5$ и шириной $2D$ происходит полное разрушение «почкообразного» вихря в струе. В этой работе (рис. 5) также экспериментально показано, что в щели с $h/D=0,5$ при $\gamma=30^\circ$ $t/d=2,775$, $Tu=3,9\%$ в сечении $x/D=0$ достигается $0,64 \leq \eta_{av} \leq 0,67$ в диапазоне $0,6 \leq M \leq 1,4$, в сечении $x/D=20$ при $M=1,0$ — $\eta_{av} \approx 0,26$, что гораздо выше, чем в базовом варианте. За базу приняты результаты исследований цилиндрических отверстий той же геометрии с выпуском воздуха непосредственно на защищаемую поверхность. В то же время, при использовании более широкой щели, шириной $4D$, при $M=1,0$ и $Tu=3,9\%$ в сечении $x/D=0$ $\eta_{av} \approx 0,35$, а в сечении $x/D=20$ $\eta_{av} \approx 0,19$ (рис. 6). Таким образом, в этой работе показано, что ширина щели оказывает очень сильное влияние на величины η_{av} , особенно в зоне вдува.



Рис. 4. Схема взаимодействия течения в пазах малой глубины

Как и для фасонных отверстий, для отверстий, заделанных в поперечные пазы, с ростом M снижение η в зоне вдува из-за отрыва струи от поверхности не наблюдается. Сравнение результатов измерений при $Tu=1,0\%$ и $Tu=3,9\%$ основного потока показало, что влияние степени турбулентности в этих пределах на величины η_{av} пренебрежительно мало.

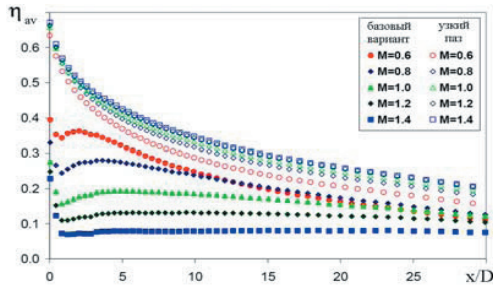


Рис. 5. Сравнение эффективности пленочного охлаждения для узкого паза ($S=2D$) с базовым вариантом (паз отсутствует, выпуск воздуха непосредственно на поверхность)

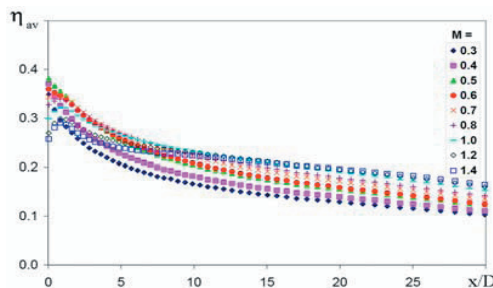


Рис. 6. Усредненная в поперечном направлении эффективность пленочного охлаждения при использовании широкого паза ($S=4D$)

Все эксперименты в работе [11] были проведены на модели профиля плоской решетки сопловых лопаток, увеличенной в 9 раз. При этом исследования влияния заделки отверстия в паз проводились для ряда отверстий пленочного охлаждения, размещенного на спинке, за участком максимальной кривизны профиля.

В работе [12] исследования эффективности пленочного охлаждения были проведены для поперечных пазов различных конфигураций, которые показаны на рис. 7, при $h/D=0,75$ и с шагом отверстий $t/D=3$. Все исследования были проведены на плоской пластине методом инфракрасной термографии.

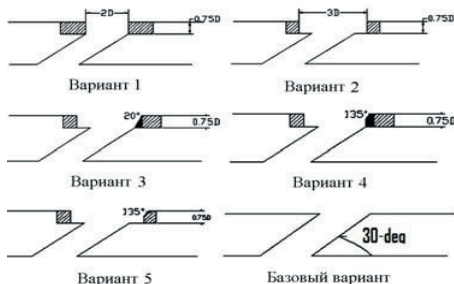


Рис. 7. Исследованные варианты геометрии поперечных пазов

Результаты измерений для паза шириной $S=2D$ (вариант 1) в зоне вдува хорошо совпали с данными [11] при соответствующих значениях M , но оказались значительно ниже их при $X/D>5$. Данное различие, возможно, объясняется большей глубиной щели, равной $0,75D$, а не $0,5D$ в [11]. В то же время, увеличение ширины до $3D$ (вариант 2) в сечениях $X/D>5$ приводит к значительному повышению η_{av} . В частности, при $M=1$ в сечении $X/D=5$ η_{av} повышается с $0,34$ до $0,46$, а в сечении $X/D=20$ - с $0,21$ до $0,28$. При $M=2$ в сечении $X/D=5$ η_{av} повышается с $0,36$ до $0,44$, в сечении $X/D=20$ - с $0,22$ до $0,26$. Таким образом, данные по η_{av} для такой щели приближаются к данным [11], представленным на рис. 5. Из этого можно сделать вывод о том, что существует некоторое соотношение между глубиной и шириной щели, при котором достигаются наиболее высокие значения η .

В этой работе также отмечено, что сглаживание задней кромки паза за отверстием (варианты 3 и 4) приводит к некоторому снижению η_{av} в зоне вдува, но в диапазоне $5<X/D<20$ приводит к повышению η_{av} , хоть и к незначительному. Исключение составляет только вариант 5, в котором отмечено существенное снижение η_{av} при всех значениях X/D и M . Некоторые результаты из этой работы в виде визуализации исследований η представлены на рис. 8. Из этих данных хорошо видно, что наибольшее повышение эффективности пленочного охлаждения по сравнению с базовым вариантом достигнуто в варианте 2, которому незначительно уступает вариант 3.

Интересны также результаты исследования влияния t/D на η_{av} для паза в варианте 1. Результаты экспериментов показали, что при $M=1$, увеличение t/D с 3 до $t/D=4$ и $t/D=5$ приводит к снижению η_{av} , усредненного по площади, примерно пропорционально снижению расхода воздуха, обусловленного увеличением шага. При $M=2$ данные по η_{av} для $t/D=4$ и $t/D=5$ совпадают, и всего на 18% ниже, чем при $t/D=3$.

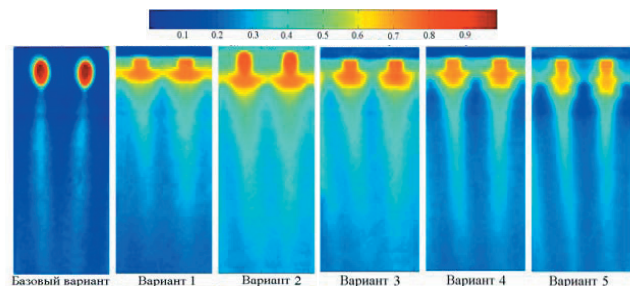


Рис. 8. Распределение эффективности пленочного охлаждения при $M=1,0$

Из результатов исследований работ [11,12] следует, что несмотря на значительное влияние конфигурации паза на η_{av} , все без исключения исследованные варианты показали повышение эффективности пленочного охлаждения по сравнению с базовым вариантом.

Одной из наиболее сложных зон в плане организации охлаждения является поверхность полки в районе сечения точки торможения. В основном это объясняется формированием в межлопаточном канале подковообразного вихря, «отрывающего» охладитель от поверхности. Рядом исследований, проведенных в последние годы, было показано, что заглубление от-

верстий в пазы позволяет повысить эффективность пленочного охлаждения и на торцевых поверхностях лопаток.

В работе [13] проведены сравнительные исследования пленочного охлаждения в районе входных кромок сопловых лопаток для отверстий, выходящих непосредственно на торцевую поверхность и в паз. Исследования эффективности пленочного охлаждения производились с помощью инфракрасного тепловизора на увеличенной модели сектора сопловых лопаток. На рис. 9 схематично показана исследуемая геометрия, при этом шаг между отверстиями $t/D=3$, относительная глубина паза $h/D=0,4$, ширина паза – $S=2D$, расстояние от задней кромки паза до входной кромки лопатки – $S=4D$.

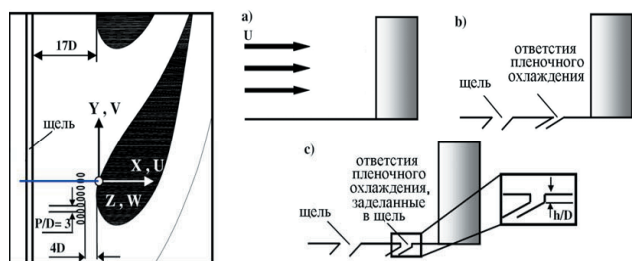
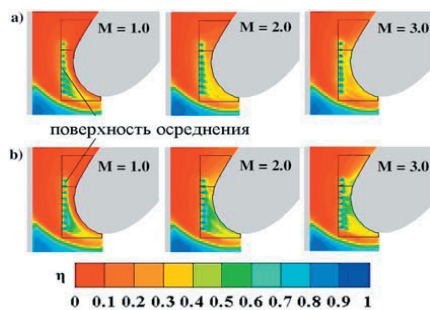


Рис. 9. Расположение отверстий пленочного охлаждения на полке соплового аппарата первой ступени



а – без паза, б – с пазом

Рис. 10. Адиабатическая эффективность пленочного охлаждения

Результаты исследований эффективности пленочного охлаждения, представленные на рис. 10, показали, что заделка отверстий в пазы позволяет существенно повысить эффективности пленочного охлаждения при любых значениях M , в том числе и весьма высоких. Так, при $2,0 < M < 2,5$, характерных для этой зоны, η_{av} увеличивается с $\eta_{av}=0,30$ до $\eta_{av}=0,37$, что существенно, хотя и достигнутый эффект ниже, чем в других исследованиях. Из представленных в этой работе данных следует, что положительный эффект достигнут за счет резкого уменьшения отрыва струи от поверхности и уменьшения вихреобразования за пазом, что иллюстрируется данными измерения поля скоростей, выполненных с помощью Доплеровского лазерного измерителя скоростей.

Таким образом, представленные исследования показали, что заделка цилиндрических отверстий в пазы малой глубины, расположенные перпендикулярно к направлению основного потока также позволяет существенно повысить эффективность пленочного

охлаждения, по сравнению с выпуском воздуха непосредственно на защищаемую поверхность при любых значениях M . При этом положительный эффект от заделки пазов сопоставим с эффектом от перехода на фасонные отверстия, однако необходимо учитывать, что геометрия паза, а также расположение выхода отверстия относительно паза оказывает значительное влияние на величины η_{av} .

4. Парные отверстия

В последние годы был проведен ряд исследований, направленных на повышение эффективности пленочного охлаждения за счет применения, так называемых, «парных отверстий». В этом случае, оси каждого из двух цилиндрических отверстий развернуты под определенным углом к направлению основного потока. При разработке системы охлаждения с помощью парных отверстий учитывалось, что при высоких коэффициентах вдува при выпуске воздуха под углом к направлению основного газового потока несколько уменьшается отрыв потока от поверхности. Однако, основной смысл данного метода заключается в том, что парные струи позволяют сформировать над защищаемой поверхностью новую вихревую систему – «антипочкообразную» пару вихрей (anti-kidney vortex pair), условно показанную на рис. 11 из [14].

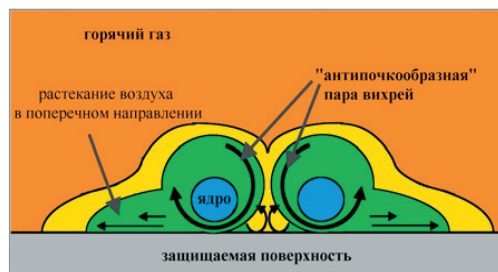


Рис. 11. Идеализированная схема симметричной пары «антипочкообразных» вихрей

Метод охлаждения с помощью парных отверстий предусматривает некоторое смещение второго отверстия в направлении основного потока относительно первого. Второе отверстие создает вторую струю с доминирующим вихрем, вращающимся в противоположном направлении по отношению к первому, затем обе струи объединяются в пару, формируя более-менее симметричную «антипочкообразную» пару вихрей. Это предотвращает отрыв струй от защищаемой поверхности, «подсос» газа под струи и способствует растеканию газа в поперечном направлении.

Несомненным преимуществом системы парных цилиндрических отверстий по сравнению с фасонными отверстиями является технологичность.

Исследованная в [14] геометрия и схемы размещения парных отверстий показаны на рис. 12. Результаты CFD-расчетов эффективности пленочного охлаждения при использовании показанных на этом рисунке парных отверстий при постоянных углах выпуска воздуха, но при разных величинах смещения осей отверстий в поперечном направлении представлены на рис. 13.

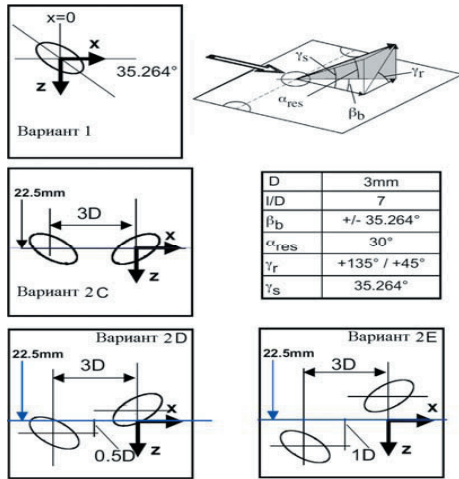


Рис. 12. Геометрические размеры систем парных отверстий

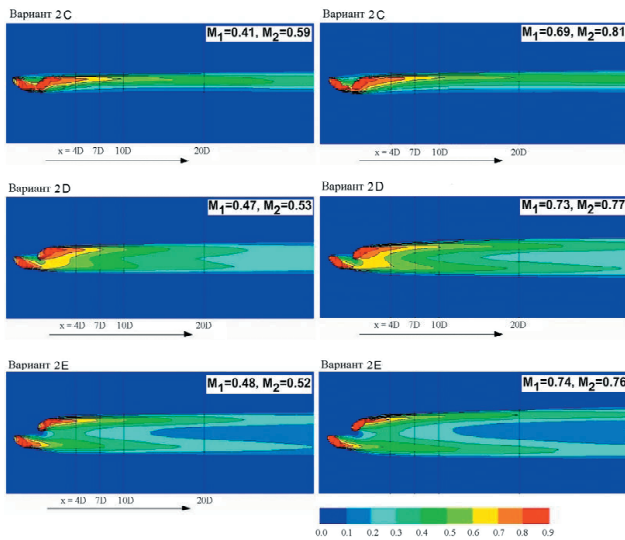


Рис. 13. Расчетная адиабатическая эффективность пленочного охлаждения системы парных отверстий

На этом рисунке M_1 и M_2 коэффициенты вдува для первого и второго по ходу газа отверстий. Согласно результатам этой работы, вариант «D» (в поперечном направлении отверстия смещены на один диаметр) при всех M дает наиболее высокие значения как η_{av} , так и η_{cl} . Количественное сравнение эффективности этой геометрии с ранее рассмотренными крайне затруднено, как по η_{av} , так и по η_{cl} , ввиду того, что данные по эффективности пленочного охлаждения усреднены по ширине защищаемого участка поверхности, равной 45мм при $D=3$ мм. Кроме того, струи воздуха направлены в этом случае под углом к направлению основного потока. Если, в сечении $X/D=0$ (здесь и далее за $X/D=0$ принято сечение выпуска воздуха второго отверстия) $\eta_{av} \approx 0,17$ для всех вариантов, то в сечении $X/D=20$ при $M=0,5$ для вариантов «D» и «E» $\eta_{av} \approx 0,085$, а в варианте «C» $\eta_{av} \approx 0,06$. С повышением M до 1,5 в сечении $X/D=20$ для варианта «D» $\eta_{av} \approx 0,13$; «E» - $\eta_{av} \approx 0,11$; «C» - $\eta_{av} \approx 0,08$. При $M \approx 0,5$ в варианте «D» в сечении $X/D=20$ $\eta_{cl} \approx 0,4$, что является очень хорошим показателем. Увеличение смещения отверстий в поперечном направлении приводит к резкому снижению η_{cl} вследствие разделения струй.

В работе [15] (геометрия отверстий и защищаемой поверхности соответствует [14]) представлены исследования влияния угла β между осями отверстий и основным потоком при смещении осей отверстий в поперечном направлении на один диаметр (аналог варианта «D» из работы [14]), но при более высоких M . На рис. 14 и рис. 15, соответственно, показаны исследованные конфигурации схем отверстий и результаты исследований эффективности пленочного охлаждения.

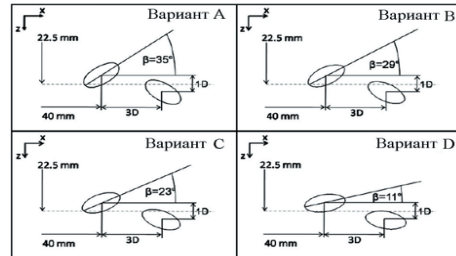


Рис. 14. Исследованные углы поворота осей парных отверстий к направлению основного потока

В отличие от других вариантов, максимальные значения η_{av} наблюдаются на удалении от зоны вдува. При $\beta=11^\circ$ при всех M наблюдаются самые низкие значения η_{av} . Как и в работе [14], при $\beta=35^\circ$ и $M=1$ имеет место разделение струй. При $\beta=29^\circ$, в варианте «B», при числе вдува $M=1,5$ имеет место рост η_{av} до $X/D=14$, а при $M=2,0$ - почти до $X/D=20$. При $M=2,0$ и $\beta=29^\circ$ $\eta_{av} \approx 0,3$ в диапазоне $15 < X/D < 25$, что несколько выше, чем при $\beta=23^\circ$, а при $M=1,5$ для этих вариантов η_{av} почти одинаковы и составляют в том же диапазоне X/D $\eta_{av} \approx 0,28$. Следует также отметить, что указанные значения η_{av} гораздо выше, приведенных в [14]. При $\beta=23^\circ$ и $\beta=29^\circ$ высокие значения до $\eta_{cl} \approx 0,7$ наблюдаются даже при $X/D > 30$, что примерно вдвое выше, чем при использовании двух рядов цилиндрических отверстий расположенных в шахматном порядке с осями, направленными по потоку [16].

В [14] указывается, что данный способ охлаждения успешно применяется для охлаждения лопаток двигателя «Kawasaki L20A».

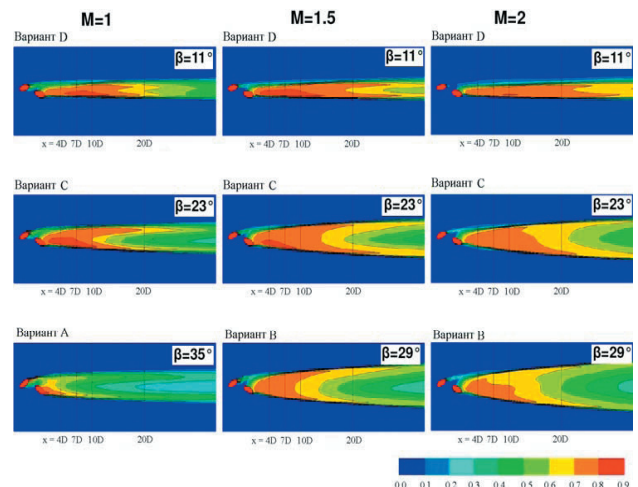


Рис. 15. Адиабатическая эффективность пленочного охлаждения системы парных отверстий при различных углах поворота

5. Выводы

Проведенные в последние годы исследования показали большие потенциальные возможности пленочного охлаждения, реализовать которые можно за счет применения фасонных отверстий, цилиндрических отверстий, заделанных в пазы малой глубины, расположенные перпендикулярно к направлению потока, а также систем парных отверстий. Из представленных данных можно сделать вывод, что эффективность пленочного охлаждения, усредненная в поперечном направлении, за счет применения этих методов на профильных по-

верхностях лопаток может быть повышена не менее, чем в 1,5 раза, а в ряде случаев в два и более раза, при том же расходе воздуха на охлаждение. В условиях, характерных для сопловой лопатки первой ступени современного высокотемпературного энергетического ГТД это эквивалентно повышению температуры газа перед турбиной не менее, чем на 150°C. Уменьшение глубины проникновения струй воздуха в газовый поток и ослабление интенсивности их взаимодействия, обеспечивает также снижение профильных потерь, обусловленных внедрением пленочного охлаждения, и повышение КПД турбины и двигателя в целом.

Литература

1. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я. " Системы охлаждения лопаток современных ГТД " – Восточно-Европейский журнал передовых технологий // 2009 - №4/4 - т.40, ISSN1729-3774.
2. Халатов А.А., Романов В.В., Дашевский Ю.Я., Письменный Д.Н. " Тенденции развития систем охлаждения лопаток высокотемпературных энергетических ГТД " – Промышленная теплотехника // 2010 -№1,№2 - т.32, ISSN0204-3602.
3. Lutum E., et al., "Influence of the Hole Length-to diameter Ratio on Film Cooling with Cylindrical Holes", ASME Paper 98-GT-10.
4. Sgarzi O., et al "Analysis of Vortices in Three-Dimensional Jets Introduced in a Cross-Flow Boundary-Layer", ASME Paper 97-GT-517.
5. Brauckmann D., et al., "Application of Steady and Transient IR-thermography Measurements to Film Cooling Experiments for a Row of Shaped Holes", ASME Paper GT2005-68035.
6. Brauckmann D., et al., "Influence of Compound Angle on Adiabatic Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient for a Row of Shaped Film Cooling Holes", ASME Paper GT2005-68036.
7. Bohn D., et al., "Conjugate Heat Transfer Analysis for Film Cooling Configurations with Different Hole Geometries", ASME Paper GT2003-38369.
8. Saumweber C., et al., "Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling with Shaped Holes", ASME Paper GT-2002-30170.
9. Lu Y. et al., "Influence of Hole Angle on Leading Edge Showerhead Film Cooling", ASME Paper GT2006-90370.
10. Bunker R.S., "Film Cooling Effectiveness due to Discrete Holes within a Transverse Surface Slot", ASME Paper GT2002-30178.
11. Waye S.C. et al., "High Resolution Film Cooling Effectiveness Measurements of Axial Holes Embedded in a Transverse Trench with Various Trench Configuration", ASME Paper GT2006-90226.
12. Lu Y. et al., "Trench Film Cooling – Effect of Trench Downstream Edge and Hole Spacing", ASME Paper GT2008-50606.
13. Sundaram N. et al., "Film-Cooling Flowfields with Trenched Holes on an Endwall", ASME Paper GT2008-50149.
14. Kusterer K. et al., "Double-Jet Film-Cooling for Highly Efficient Film-Cooling with Low Blowing Ratios", ASME Paper GT2008-50073.
15. Kusterer K. et al., "A Parametric Study on the Influence of the Lateral Ejection Angle of Double-Jet Holes on the Film-Cooling Effectiveness for High Blowing Ratios", ASME Paper GT2009-59321.
16. Копелев С.З. "Охлаждаемые лопатки газовых турбин. Тепловой расчет и профилирование" М.: Наука, 1983, с.145.