

Е.Ю. МАРЧУКОВ,

д-р техн. наук

(«ОКБ им. А. Люльки» – филиал ПАО «ОДК-УМПО», Москва),

А.В. ИЛЬИНКОВ,

канд. техн. наук,

А.В. ШУКИН,

д-р техн. наук,

В.В. ТАКМОВЦЕВ,

канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань),

К.В. КАХОВСКИЙ,

канд. техн. наук

(«ОКБ им. А. Люльки» –

ПАО «ОДК-УМПО», Москва)

a.v.shchukin@rambler.ru

Влияние подрезки задней кромки веерного отверстия на эффективность пленочного охлаждения при угле вдува 45°

На основании проведенных сравнительных экспериментов по оценке эффективности тепловой завесы, создаваемой вдувом через поясок веерных отверстий, установлен рациональный вариант схемы подрезки задней кромки веерного отверстия в вертикальной плоскости при заданной степени его диффузорности в поперечном направлении. В результате при вдуве под углом 45° в принятом диапазоне изменения параметров получены наиболее высокие значения эффективности тепловой завесы. Найденный рациональный вариант был сформулирован на основе сравнительного анализа результатов исследования модифицированных вариантов и базового образца.

Физический эксперимент, эффективность тепловой завесы, поясок отверстий, веерные отверстия, параметр вдува, угол вдува

Разработка и усовершенствование высокотемпературных газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от достижений в повышении эффективности их систем охлаждения [1–11], в частности, охлаждения сопловых и рабочих лопаток турбины высокого давления, расположенной непосредственно за камерой сгорания.

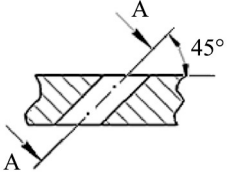
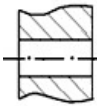

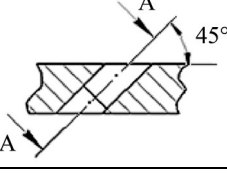
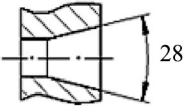

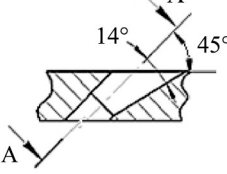
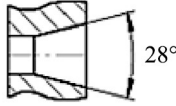

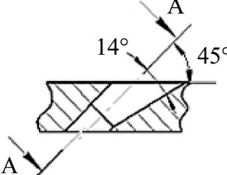
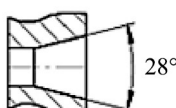

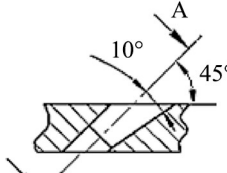


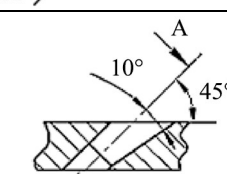


Проведенные в последние десятилетия исследования продемонстрировали значительные преимущества веерных отверстий в системах охлаждения тепловой завесой в сравнении с цилиндрическими отверстиями, несмотря на более высокую трудоемкость и стоимость изготовления. В связи с этим возникла необходимость научно обосновать области их использования. Например, согласно многочисленным исследованиям при низких значениях параметра вдува ($m < 0,4$) наибольшей эффективностью охлаждения характеризуются цилиндрические отверстия [12, 13].

Дальнейшее усовершенствование конструкции веерных отверстий предполагает разработку научно обоснованных рекомендаций по подрезке задней кромки веерных отверстий. В результате возможно дополнительное снижение гидравлических потерь, например, уменьшением интенсивности крупномасштабных вихревых структур.

Изучение специализированной литературы [14–16] позволяет заключить, что существует усовершенствованная версия веерного отверстия, предназначенная для дополнительного повышения эффективности тепловой завесы, реализующая изменения конструкции диффузорного участка веерного отверстия.

В результате сравнительных экспериментов [10] был сделан вывод о том, что при углах вдува $\alpha = 45^\circ; 75^\circ$ применение веерных отверстий высокоэффективно и рекомендуется во всех случаях, если это не связано с непреодолимыми технологическими трудностями. Поскольку угол вдува $\alpha = 75^\circ$ используется только на участке входной кромки турбинных лопаток, то с целью оценки предельных возможностей подрезки задней кромки веерных отверстий для сравнительного исследования был выбран более широко используемый угол вдува $\alpha = 45^\circ$.

Сравнительные эксперименты по исследованию эффективности тепловой завесы плоской поверхности вдувом через однорядные пояски отверстий под углом $\alpha = 45^\circ$ проводились на экспериментальном стенде [17]. Было исследовано шесть однорядных поясков, в каждом из которых размещалось пять отверстий вдува. Один поясок был выполнен с использованием цилиндрических отверстий диаметром $d = 5$ мм, а пять остальных – с использованием веерных отверстий различной формы (таблица). При этом диаметр цилиндрической части веерных отверстий также составлял 5 мм, а относительный шаг между отверстиями вдува во всех однорядных поясках – $t/d = 2$. Относительное расстояние от сечения вдува x/d изменялось в диапазоне 1...80 (x – расстояние от сечения вдува; d – входной диаметр отверстия вдува).

Форма отверстия вдува	Продольное сечение	Сечение А-А	Вид в плане	Обозначение эффективности пленочного охлаждения
Цилиндрическое (базовое)				$\eta_{\text{цил.б}}$
Веерное (базовое)				$\eta_{\text{веер.б}}$
Веерное (модифицированное М1)				$\eta_{\text{веер.М1}}$
Веерное (модифицированное М2)				$\eta_{\text{веер.М2}}$
Веерное (модифицированное М3)				$\eta_{\text{веер.М3}}$
Веерное (модифицированное М4)				$\eta_{\text{веер.М4}}$

Эффективность пленочного охлаждения η определялась по формуле

$$\eta = (T_{\text{осн}}^* - T_{\text{пл}}^*) / (T_{\text{осн}}^* - T_{\text{вт}}^*),$$

где $T_{\text{осн}}^*$, $T_{\text{вт}}^*$ – температуры основного газового и вторичного воздушного потоков в сечении вдува; $T_{\text{пл}}^*$ – температура пленки (адиабатическая температура теплоизолированной поверхности стенки). Все полученные в экспериментах значения η осреднялись по шагу отверстий вдува, расположенных в одном пояске.

Расход вдуваемого в основной поток вторичного воздуха задавался в соответствии с принятыми значениями параметра вдува в диапазоне $m = 0,5 \div 2,5$, причем $m = 0,5$ практически во всех исследованиях принимается за оптимальное для цилиндрических отверстий значение.

Параметр вдува:

$$m = (\rho W)_{\text{вт}} / (\rho W)_{\text{осн}},$$

где $(\rho W)_{\text{вт}}$ – массовая скорость вторичного (вдуваемого) потока; $(\rho W)_{\text{осн}}$ – массовая скорость основного потока.

Результаты сравнительных экспериментов представлены в виде зависимостей $\eta = f(x/d)$ при различных значениях m .

Исходными базовыми объектами исследования являлись пояски с традиционными цилиндрическими отверстиями и веерными отверстиями с поперечной диффузностью 28° и углом вдува $\alpha = 45^\circ$ (см. таблицу). Полученные значения эффективности пленочного охлаждения этими отверстиями, обозначенные $\eta_{\text{цил.б}}$ и $\eta_{\text{веер.б}}$, также использовались при дальнейшем сравнительном анализе схем охлаждения. Как видим (см. таблицу), все модифицированные веерные отверстия имели подрезку задней кромки.

Во всех модификациях веерных отверстий угол подрезки задней кромки составлял половину угла раскрытия диффузорной части в поперечном направлении.

Форма отверстий М1 и М3 показана на схеме (см. таблицу). Боковые и задняя поверхности их диффузорной части представляют собой поверхности конуса с углом при вершине 28 и 20° . Передняя поверхность спрямлена.

Отверстия М2 и М4 имеют те же углы раскрытия диффузорной части (28 и 20°) и отличаются тем, что их выходная кромка выполнена спрямленной, что увеличивает площадь выходного сечения и, следовательно, диффузность отверстия. Боковые и задняя поверхности их диффузорной части уже не являются единой конической поверхностью, хотя в их основе прямолинейная образующая.

Эффективность пленочного охлаждения модифицированных веерных отверстий формы М1 (см. таблицу) и ее отношение к эффективности охлаждения цилиндрическими и веерными отверстиями базовой формы иллюстрируют рис. 1–3.

В случае веерных отверстий формы М1 отрыва за сечением вдува не выявлено вплоть до максимальных значений параметра вдува m , так же, как и в случае веерных отверстий базовой формы (рис. 1). Однако наблюдается значительное расхождение линий, интерполирующих экспериментальные точки на графиках $\eta_{\text{веер.М1}}$ в зависимости от величины параметра вдува m .

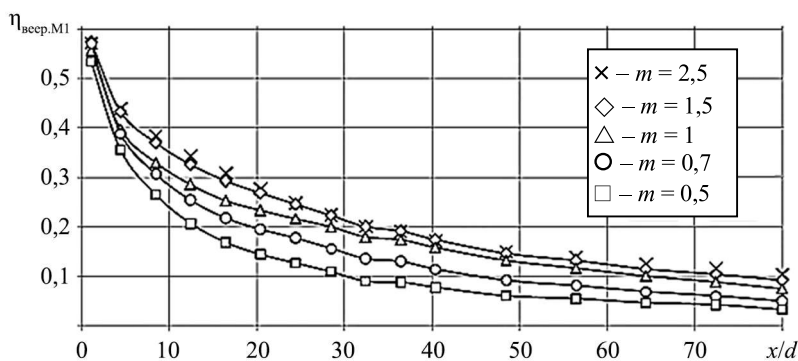


Рис. 1

В результате установлено, что эффективность веерных отверстий формы М1, за исключением области самых малых значений m , превышает эффективность базовых цилиндрических отверстий (см. таблицу), что показывает график (рис. 2).

Низкие значения $\frac{\eta_{\text{веер.М1}}}{\eta_{\text{цил.б}}}$ при $m = 0,5$ объясняются снижением защитных свойств воздушной завесы вследствие уменьшенных значений скорости вторичного воздуха в сечении вдува $W_{\text{вт}}$. Этот факт подтверждается и в других публикациях [18, 19].

Из графика (рис. 3) следует, что при $m \geq 1,0$ существуют протяженные в продольном направлении участки охлаждаемой поверхности, где эффективность модифицированных веерных отверстий

формы М1 выше, чем эффективность веерных отверстий базовой формы. В связи с этим рекомендуется использование отверстий формы М1 в последнем ряду перфораций при высоких значениях параметра вдува m .

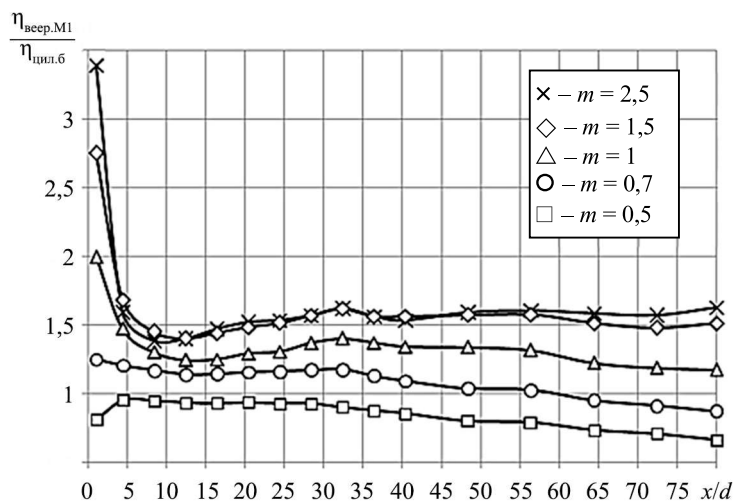


Рис. 2

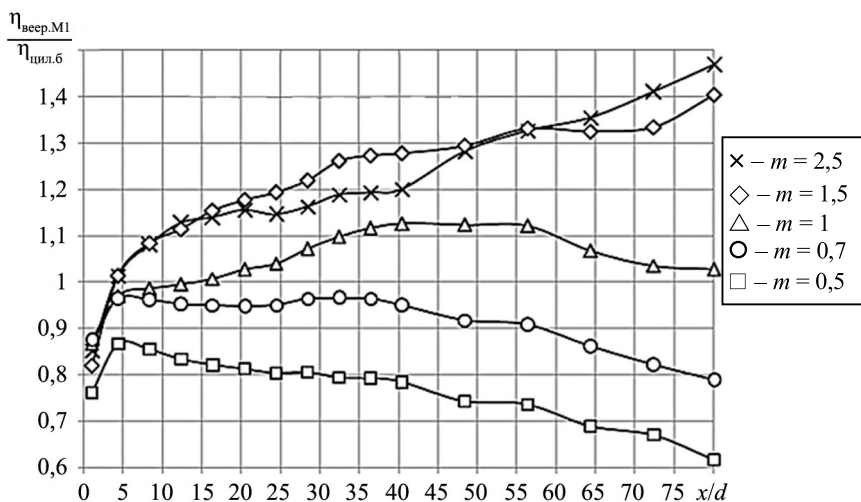


Рис. 3

Эффективность тепловой завесы, создаваемой веерными отверстиями формы М2 (см. таблицу), показана на рис. 4. Испытания проводились только для значений $m = 1,5; 2,5$, поскольку, как было установлено ранее, использование отверстий с двумерной диффузорностью эффективно именно при высоких значениях параметра вдува m .

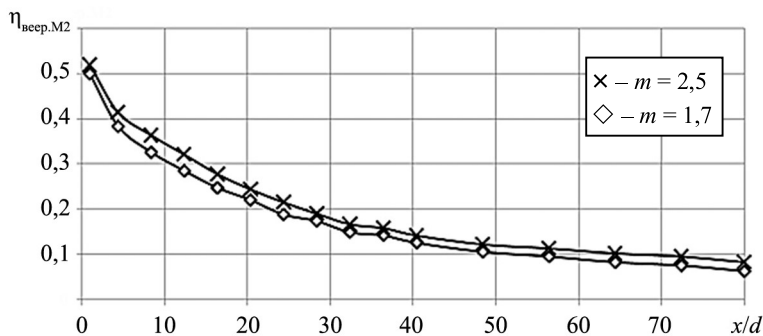


Рис. 4

Сопоставим значения эффективности тепловой завесы при вдуве через веерные отверстия формы М2 и формы М1, изначально имеющие одинаковую базовую форму.

Как следует из рис. 5, во всех случаях эффективность тепловой завесы с отверстиями формы М2 ниже, чем при использовании отверстий формы М1.

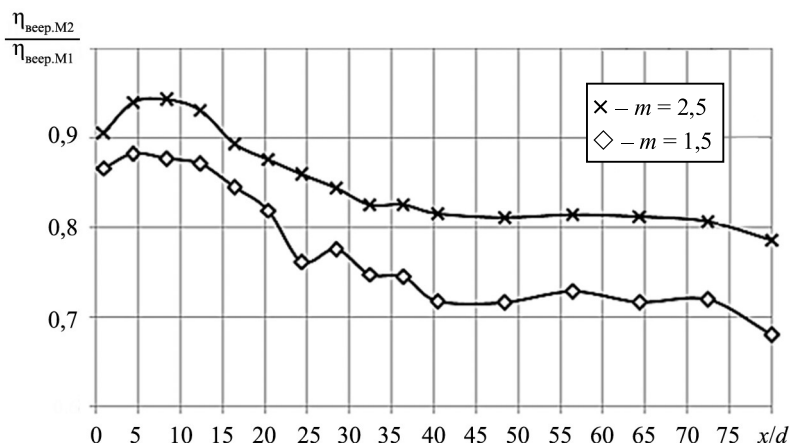


Рис. 5

Кроме этого, при сопоставлении значений $\eta_{\text{веер.М2}}$ при $m=2,5$ со значениями $\eta_{\text{веер.М1}}$ при $m=1,5$ также выявлена более низкая эффективность веерных отверстий формы М2. Это подтверждает известный факт уменьшения значений эффективности пленочного охлаждения веерными отверстиями при снижении скорости $W_{\text{вт}}$.

Отсюда следует, что веерные отверстия формы М2 (со спрямленной выходной кромкой) нецелесообразно применять вследствие существенных технологических трудностей производства и сниженной эффективности пленочного охлаждения по сравнению с веерными отверстиями формы М1.

Было сделано предположение, что снижение эффективности пленочного охлаждения обусловлено значительным уменьшением скорости вдуваемого воздушного потока $W_{\text{вт}}$. Для минимизации данного негативного эффекта была предложена форма М3 (см. таблицу), отличающаяся пониженной степенью диффузорности веерного отверстия как в продольном, так и в поперечном направлениях. Форма М3 отличается от прототипа лишь другим углом при вершине конуса, составляющим 20° вместо 28° . Отметим, что форма электрода, используемого для формирования отверстий заданной конфигурации, отличается простотой технологического процесса производства.

Результаты исследования эффективности пленочного охлаждения при вдуве через веерные отверстия формы М3 (см. таблицу) представлены на рис. 6.

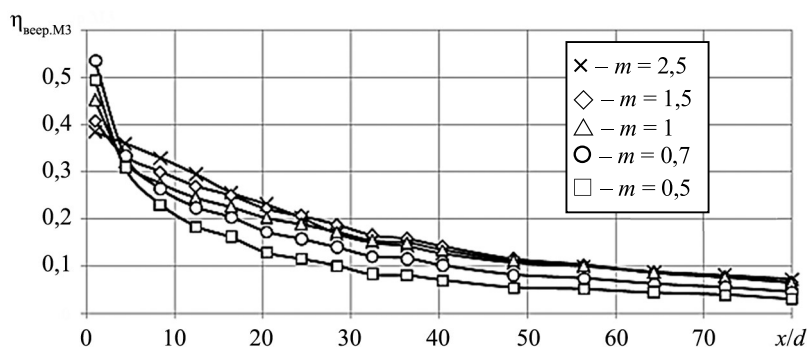


Рис. 6

Как видим (см. рис. 6), на участке $x/d < 4,4$ наблюдается пересечение аппроксимирующих линий, характерное для цилиндрических отверстий. Несмотря на монотонное снижение значения $\eta_{\text{веер.М3}}$ с уве-

личением x/d , что указывает на отсутствие явного отрыва пленки от обтекаемой стенки, можно сделать вывод о том, что снижение степени диффузорности веерных отверстий формы МЗ за счет уменьшения угла полураствора диффузорной части недостаточно для повышения эффективности охлаждения $\eta_{\text{веер.МЗ}}$ за счет увеличения скорости вдуваемого воздуха.

Сравнение эффективности пленочного охлаждения при вдуве через веерные отверстия формы МЗ и базовые цилиндрические отверстия показаны на рис. 7.

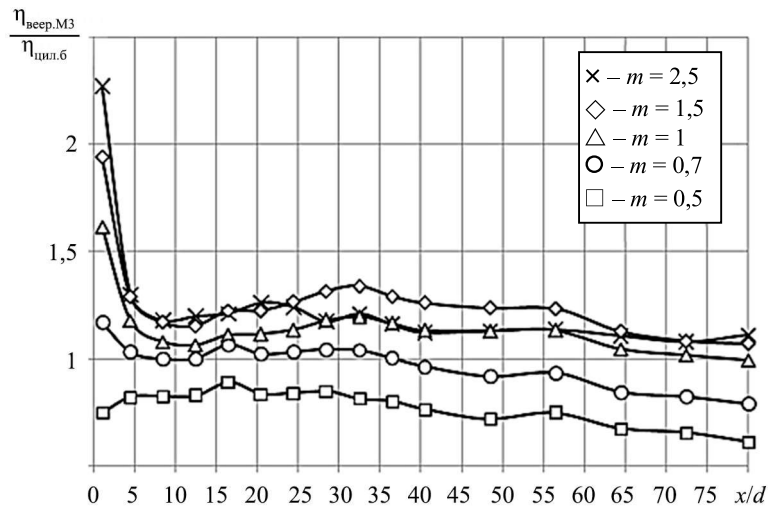


Рис. 7

Рис. 8 демонстрирует сравнение эффективности пленочного охлаждения при вдуве через веерные отверстия формы МЗ и базовые веерные отверстия.

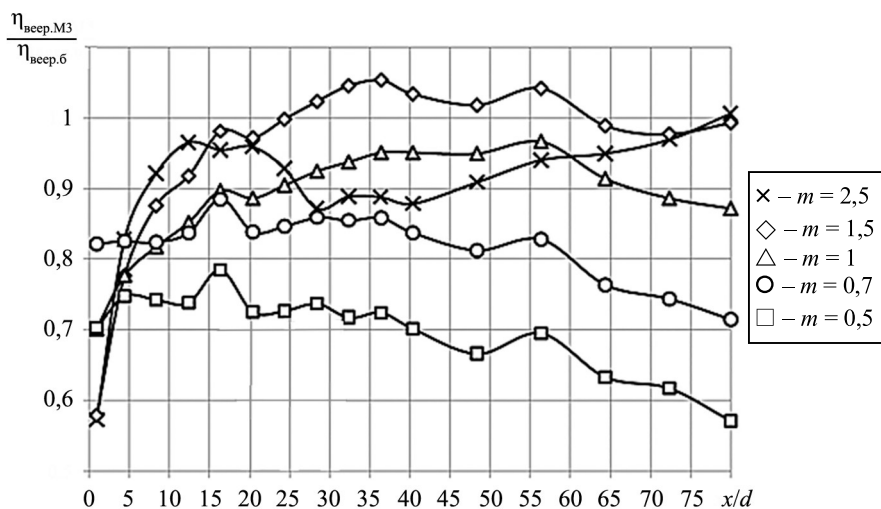


Рис. 8

Как видим (см. рис. 7, 8), точки значений эффективности веерных отверстий формы МЗ практически для всех случаев расположены выше значений эффективности цилиндрических отверстий, но ниже значений эффективности веерных отверстий базовой формы.

Другими словами, по своим характеристикам, включая тенденцию к отрыву потока вдуваемого воздуха, экспериментальные значения эффективности веерных отверстий формы МЗ занимают промежуточное положение между указанными вариантами. В связи с этим не представляется возможным рекомендовать их для пленочного охлаждения турбинных лопаток.

Для компенсации недостаточной степени диффузорности веерных отверстий формы МЗ за счет спрямления выходной кромки была разработана модифицированная форма – М4 (см. таблицу).

На рис. 9 показано сопоставление значений эффективности пленочного охлаждения с помощью веерных отверстий формы М4 и формы М3.

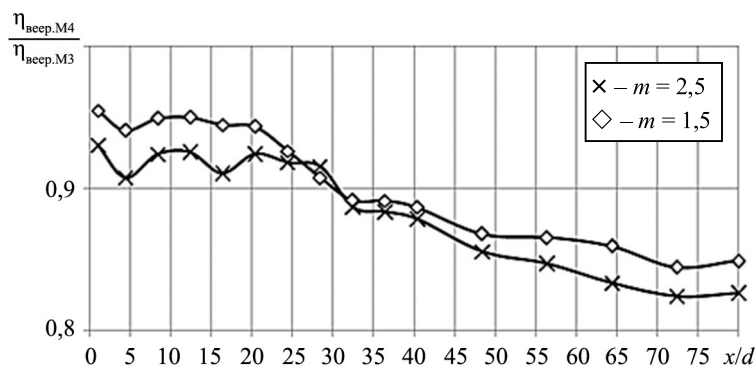


Рис. 9

Как видим (см. рис. 9), при спрямлении выходной кромки не наблюдается положительный эффект, поэтому веерные отверстия формы М4 также однозначно не рекомендуются для использования.

Таким образом, выполненные экспериментальные сравнительные исследования различных вариантов подрезки выходной кромки веерного отверстия подтверждают литературные данные о том, что такая модификация позволяет дополнительно повысить эффективность пленочного охлаждения веерными отверстиями, причем этот эффект усиливается при увеличении параметра вдува m .

Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить целесообразность выбора веерных отверстий формы М1 для использования в однорядном варианте, а также в последнем ряду многорядных перфораций при высоких значениях параметра вдува m .

Дальнейшая систематизация результатов исследований в данной области позволит сформулировать обобщенные рекомендации по подрезке задней кромки веерных отверстий для систем охлаждения турбинных лопаток газотурбинных двигателей с учетом требований, представленных, например, в работах [2, 5, 6, 20, 21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулев В.И. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: МАИ, 2003. 688 с.
2. Иноземцев А.А. и др. Газотурбинные двигатели. М.: Машиностроение, 2008. Т. 2. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. 368 с.
3. Терехов В.И. и др. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: НГТУ, 2016. 247 с.
4. Халатов А.А. и др. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Киев: НТУУ «КПИ», Изд-во «Политехника», 2016. Т. 10. 238 с.
5. Тихонов А.С., Самохвалов Н.Ю. Анализ использования профилированных отверстий перфорации для повышения качества пленочного охлаждения спинки сопловых лопаток турбин // Вестник УГАТУ. 2012. № 5 (50). С. 20–27.
6. Нестеренко В.Г., Матушкин А.А. Конструктивные методы совершенствования системы пленочного охлаждения рабочих лопаток турбин ВРД // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2010. № 39. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14813> (дата обращения 8.04.2025).
7. Пахомов М.А. и др. Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее // Теплофизика и аэромеханика. 2015. № 3. С. 343–352.
8. Виноградов К.А. Повышение эффективности газовой турбины путем структурно-параметрической оптимизации обводов переходного канала и формы отверстий пленочного охлаждения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2015. 16 с.
9. Щукин А.В. и др. Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2020. 392 с.
10. Ильинков А.В. и др. Эффективность пленочного охлаждения выпуклой и плоской поверхностей при пульсирующем вдуве через веерные и цилиндрические отверстия // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 3. С. 127–134.

11. Li H. et al. The Characteristics and Divergence of Fan-Shaped and Cylindrical Holes on the Suction Side of a Turbine Blade under Rotating Conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 139. P. 432–441.
12. Huang Y. et al. Multi Objective Optimization of Laidback Fan-Shaped Film Cooling Hole on Turbine Vane Suction Surface // Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 55. P. 1181–1194.
13. Wang H., Tao Z., Li H. A Tip Region Film Cooling Study of the Fan-Shaped Hole Using PSP // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 153. Article № 119378.
14. Wright L.M., McClain S.T., Clemenson M.D. PIV Investigation of the Effect of Freestream Turbulence Intensity on Film Cooling From Fanshaped Holes // Proc. of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, June 6–10, 2011, Vancouver, Canada. Vol. 5. P. 493–507.
15. Colban W.F., Thole K.A., Bogard D.A. Film Cooling Correlation for Shaped Holes on a Flat-Plate Surface // Journal of Turbomachinery. 2011. Vol. 133. Iss. 1. Article № 011002.
16. Kampe T. et al. Experimental and Numerical Investigation of Flow Field and Downstream Surface Temperatures of Cylindrical and Diffuser Shaped Film Cooling Holes // Proceeding of ASME Turbo Expo, June 6–10, 2011, Vancouver, Canada. Article № GT2011-45106.
17. Марчуков Е.Ю. и др. Сравнительный анализ эффективности тепловой завесы за поясками веерных и цилиндрических отверстий в широком диапазоне изменения угла и параметра вдува // Теплофизика и аэромеханика. 2021. № 5. С. 691–702.
18. Saumveber C., Schulz A., Wittig S. Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling with Shaped Holes // Journal of Turbomachinery. 2003. Vol. 125. Iss. 1. P. 65–73.
19. Bunker R.S. A Review of Turbine Shaped Film-Cooling Technology // Journal of Heat Transfer. 2005. Vol. 127. Iss. 4. P. 441–453.
20. Поletaев В.А. и др. Особенности аэродинамического и теплового совершенствования сопловых аппаратов турбин перспективных газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 81–86.
21. Горелов Ю.Г. 3D-исследование эффективности охлаждения трактовых полок соплового блока турбины высокого давления с «меридиональным поджатием» и веерными отверстиями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 3. С. 115–121.

Поступила в редакцию 8.05.25
После доработки 14.05.25
Принята к публикации 14.05.25

Cutback of Trailing Edge of a Fan-Shaped Hole Contributing to the Film Cooling Effectiveness at a Blowing Angle of 45 deg

E.YU. MARCHUKOV¹, A.V. IL'INKOV², A.V. SHCHUKIN²,
V.V. TAKMOVTSEV², AND K.V. KAKHOVSKII¹

¹ A. Lyul'ka Design Bureau, Moscow

² Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

Comparative experiments assessed the effectiveness of thermal shield generated by blowing through a band of fan-shaped holes. A feasible scheme for trailing edge cutback in the vertical plane of a fan-shaped hole was derived at a given divergence ratio in the transverse direction. The highest thermal shield effectiveness was observed at a blowing angle of 45 deg in the considered range of parameter variation. The feasible scheme was obtained from the comparative analysis of modified and basic versions.

Physical experiment, thermal shield effectiveness, band of holes, fan-shaped holes, blowing ratio, blowing angle