

УДК 621.45.038

А. А. ХАЛАТОВ^{1,2}, Н. А. ПАНЧЕНКО^{2,1}, И. И. БОРИСОВ¹, Ю. Я. ДАШЕВСКИЙ³¹ *Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина*² *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина*³ *ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина*

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДВУХСТРУЙНОГО ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Пленочное охлаждение является одним из основных способов тепловой защиты лопаток современных высокотемпературных газовых турбин. В статье представлены результаты экспериментального исследования пленочного охлаждения плоской поверхности перспективной двухструйной системой отверстий на входе. Приводится сравнительный анализ исследованной и традиционной схемы с использованием наклонных цилиндрических отверстий. Рассматривается степень неравномерности пленочного охлаждения обеих схем. Показано, что эффективность исследованной схемы превышает эффективность традиционной схемы.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, двухструйная система отверстий, эффективность охлаждения, степень неравномерности.

Введение

Повышение температуры газа перед турбиной является главным направлением термодинамического совершенствования ГТД и ГТУ различного назначения. Поскольку эта температура всегда превышает температуру плавления материалов, из которых изготовлены лопатки газовой турбины, то для их охлаждения используются системы внутреннего и внешнего охлаждения, где в качестве охладителя используется воздух, отбираемый от ступени компрессора. Основным методом внешнего охлаждения лопаток является пленочное охлаждение, которое сохраняет перспективу до температуры газа перед турбиной порядка 1800°C.

Анализ показывает, что традиционная схема пленочного охлаждения в виде двухрядных дискретных отверстий, расположенных под некоторым углом к охлаждаемой поверхности, характеризуется рядом недостатков. Основным из них является низкая эффективность при параметрах вдува больших единицы, обусловленная возникновением вторичных вихревых структур, разрушающих пленку охладителя и способствующих «подсосу» горячего потока к защищаемой поверхности. Кроме того, при достаточно высокой температуре газа потребный расход охладителя становится настолько большим, что рост к.п.д. цикла за счет охлаждения может нивелироваться термодинамическими потерями за счет смешения охладителя и основного потока.

Изучаемые в настоящее время перспективные конфигурации (диффузорные и диффузорно-

конфузорные отверстия системы охлаждения) характеризуются сложной технологией и высокой стоимостью изготовления. Поэтому большой практический интерес представляют технические решения, позволяющие достичь высокой эффективности пленочного охлаждения при использовании относительно простой технологии изготовления. Анализ результатов работ [1–4] показал, что к таким решениям относится двухрядная система наклонных цилиндрических отверстий со сложными углами подачи охладителя («double jet», или двухструйная схема), в которой происходит сложное взаимодействие охлаждающих струй с подачей охладителя из отверстий первого ряда в переднюю область отверстий второго ряда (рис.1). Как следствие, следует ожидать и более равномерного покрытия поверхности пленкой охладителя [1, 4].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффективности и степени неравномерности двухструйного пленочного охлаждения и сравнительный анализ с традиционной схемой наклонных цилиндрических отверстий.

Экспериментальная установка

Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе открытого типа, работающей от центробежного вентилятора ВВД-5. Атмосферный воздух (первичный поток) от вентилятора подавался в ресивер и далее поступал в рабочий участок. Равномерное по сечению поле скорости на входе в рабочий участок обеспечивалось установкой на выходе из ресивера

спрямляющей сетки и прямоугольного сопла, спроектированного по профилю Витошинского.

Входное сечение сопла составляет $400 \times 300 \text{ мм}^2$, а выходное - $294 \times 34 \text{ мм}^2$ (соотношение входной и выходной площадей $F_{\text{вх}}/F_{\text{вых}}=12$), длина сопла равна 350 мм. Интенсивность турбулентности потока на входе в рабочий участок не превышала 1 %. После рабочего участка воздушный поток поступал в успокоительную емкость и далее выбрасывался в атмосферу.

Для исследования эффективности пленочного охлаждения использовано обратное направление теплового потока: основной поток холодный, а вторичный — нагретый. Вдуваемый воздух (вторичный поток) от индивидуального компрессора через регулирующий вентиль, расходомер (ротаметр) и электронагреватель подавался в рабочий участок через систему двухструйных отверстий (рис. 1).

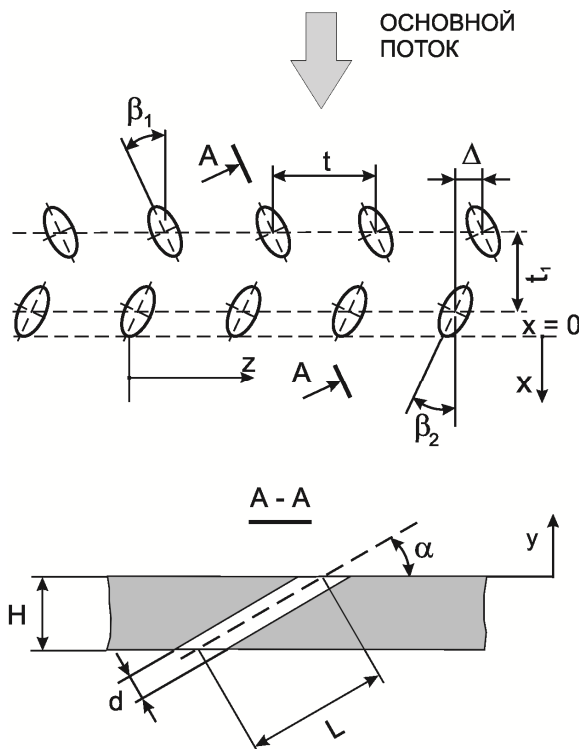


Рис. 1. Схема исследованной двухструйной системы отверстий

Рабочий участок представляет собой плоский канал с поперечным сечением ($294 \times 34 \text{ мм}^2$), соответствующим выходному сечению сопла Витошинского. Нижняя стенка рабочего участка содержит плоскую пластину длиной 70 мм, выполненную из оргстекла с двухструйной системой отверстий для подачи охладителя и адиабатную пластину из асбоцемента ($\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) длиной 130 мм. В адиабатную пластину вмонтированы 9 хромель-алюмелевых термопар, расположенных в продольном направлении на одной линии с постоянным по длине

шагом (10 мм). В установке предусмотрена возможность перемещения адиабатной пластины в поперечном направлении для определения локальных значений эффективности пленочного охлаждения.

Основные геометрические параметры двухструйной системы отверстий (рис. 1) выбирались близкими к исследованным в работе [4]. Толщина пластины вдува H составляла 10 мм, длина отверстия вдува $L = 20 \text{ мм}$, относительная длина отверстия $L/d = 6,25$. Диаметр цилиндрических отверстий d составлял 3,2 мм, угол наклона отверстий к плоскости пластины α равнялся 30° , который наиболее распространен в практике газотурбостроения.

Поперечные углы наклона проекций осей отверстий на плоскость пластины β_1 и β_2 составляли 25° , поперечный шаг отверстий $t = 12,8 \text{ мм}$ ($t/d = 4,0$), продольный шаг между первым и вторым рядом $t_1 = 10 \text{ мм}$ ($t_1/d = 3,125$), зазор $\Delta = 3,2 \text{ мм}$ ($\Delta/d = 1,0$). Отличительной особенностью исследованной двухрядной схемы парных отверстий является то, что охладитель первого ряда подается в область передней кромки отверстий второго ряда. Предварительные эксперименты показали, что подача охладителя первого ряда в область задней кромки второго ряда характеризуется низкой эффективностью охлаждения. При анализе и обобщении опытных данных расстояние « x » отсчитывалось от «среза» отверстия второго ряда.

Методика проведения измерений

Параметр вдува определяется по соотношению:

$$m = \frac{\rho_2 w_2}{\rho_\infty w_\infty}, \quad (1)$$

где ρ_2 и w_2 – плотность и скорость вдуваемого потока; ρ_∞ и w_∞ – плотность и скорость основного потока.

Эффективность пленочного охлаждения определяется по соотношению:

$$\eta = \frac{T_{\text{aw}} - T_\infty}{T_2 - T_\infty}, \quad (2)$$

где T_∞ – температура основного потока; T_{aw} – температура адиабатической поверхности; T_2 – температура вдуваемого потока.

В экспериментах измерялись скоростной напор основного потока на входе, статическое давление на верхней стенке канала, полная температура основного потока, температура вдуваемого потока, расход вдуваемого потока, температура адиабатной поверхности в девяти точках по длине пластины с шагом 10 мм. Скоростной напор определялся с помощью трубки Пито-Прандтля и системы дифманометра.

метров. Температура адиабатной поверхности, основного и вдуваемого воздуха регистрировалась хромель-алюмелевыми термопарами диаметром 0,1 мм. Для определения температуры вдуваемого потока две термопары устанавливались в отверстиях вдува непосредственно перед выходом вторичного потока наружу. Показания этих термопар в процессе экспериментов были идентичными (отличие не превышало 1,5 %). Для измерения распределения эффективности пленочного охлаждения по ширине пластины был выбран представительный интервал, равный одному поперечному шагу между отверстиями второго ряда в центральной зоне канала. По ширине одного поперечного шага ($t = 4d$) было 5 измерительных точек, т.е. интервал между ними Δz составлял 3,2 мм или $1d$. Среднее по ширине значение эффективности на одном поперечном шаге определялось методом трапеций по уравнению:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\eta_i + \eta_{i+1}), \quad (3)$$

где n – число измерительных точек.

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока 35...38 м/с, температура основного потока изменялась от 23,5 до 26 °С, температура вдуваемого воздуха – от 64 до 79 °С. В этом случае отношение плотностей вдуваемого и основного потока составляло 0,85...0,88, параметр вдува m изменялся от 0,5 до 2,5, а число Рейнольдса Re_d по эквивалентному диаметру канала рабочего участка и скорости основного потока на входе составляло около $1,35 \cdot 10^5$.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Как указывалось выше, для определения пространственного распределения температуры адиабатной поверхности в установке предусмотрена возможность перемещения пластины в поперечном направлении вдоль оси z с постоянным шагом d , в пределах поперечного шага t (5 измерительных линий на одном шаге по ширине).

Результаты измерения локальной эффективности двухструйного пленочного охлаждения показаны на рис. 2. Для всех параметров вдува m наблюдается уменьшение эффективности охлаждения поверхности по длине пластины, причем с увеличением значения m эффективность охлаждения при $x/d = \text{const}$ снижается. Наиболее высокие значения эффективности пленочного охлаждения наблюдаются на линиях $z/t = 0$ и $z/t = 1,0$, которые проходят через переднюю кромку второго ряда отверстий.

Для практики важное значение имеет осредненная по ширине пластины величина эффективности пленочного охлаждения. Осреднение результатов проводилось в соответствии с уравнением (3). На рис. 3 представлены осредненные значения эффективности пленочного охлаждения при изменении параметра вдува m от 0,5 до 2,5. Как следует, при $m = 0,5$ наблюдается очень быстрое уменьшение эффективности охлаждения по длине пластины. Для всех экспериментов при $m \geq 1,0$ с увеличением величины m эффективность охлаждения при $x/d = \text{const}$ уменьшается. При $x/d > 25$ происходит постепенное сближение кривых.

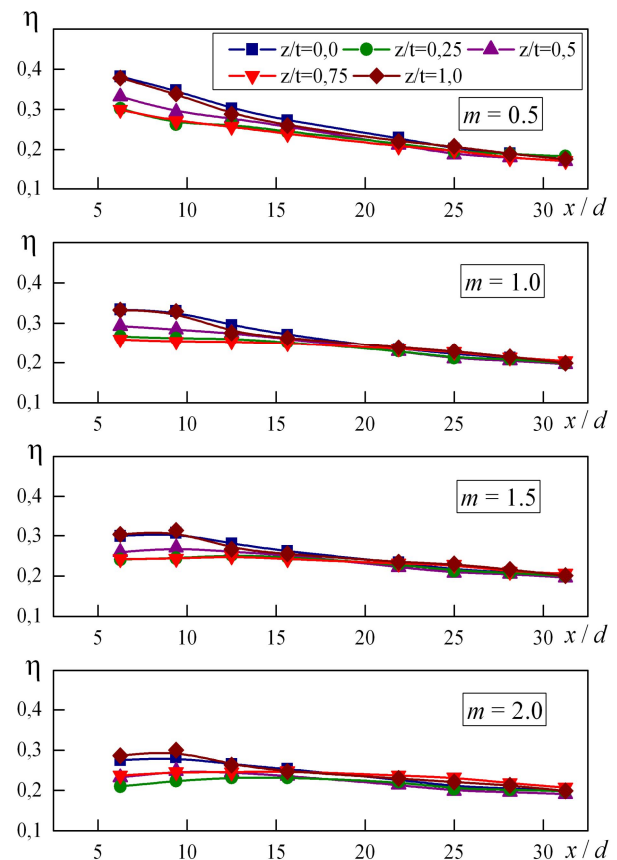


Рис. 2. Локальная эффективность двухструйного пленочного охлаждения.

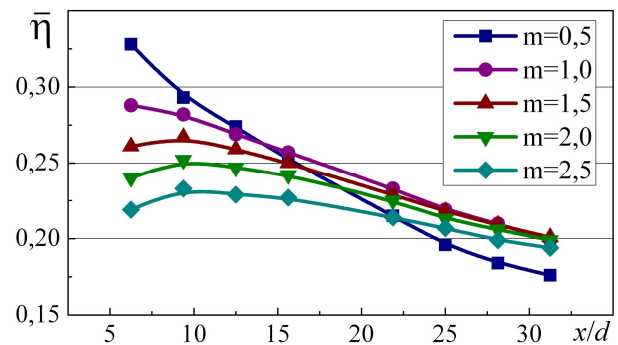


Рис. 3. Средняя по ширине эффективность двухструйного пленочного охлаждения

На рис. 4 представлены осредненные значения эффективности пленочного охлаждения при изменении параметра вдува m от 0,5 до 1,5. Также представлены экспериментальные данные для традиционной двухрядной системы цилиндрических отверстий (с таким же шагом $t/d = 4$) и углом выхода охладителя 30° [5]. Как следует при $m = 0,50$ и $m = 1,0$ опытные данные для исследованной двухструйной системы отверстий превышают данные для традиционной схемы, а при $m = 1,5$ они соответствуют друг другу.

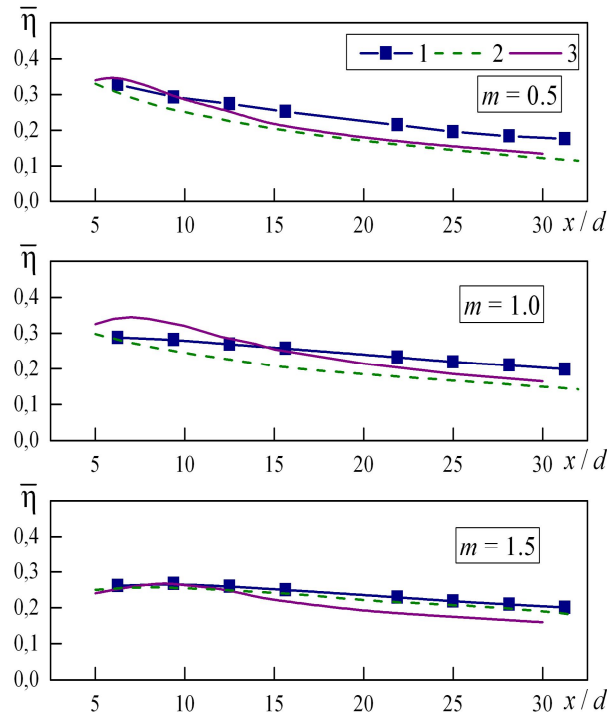


Рис. 4. Сравнение средней по ширине эффективности двухструйного пленочного охлаждения с результатами работ [5] и [1]:
 1 – результаты настоящей работы;
 2 – традиционная двухрядная система цилиндрических отверстий [5]; 3 – двухструйная система отверстий с аналогичной геометрией [1]

На рис. 4 полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными работы [1], в которой использовалась двухструйная система отверстий с углом β (рис. 3), равным 29° . Как следует, результаты настоящих экспериментов удовлетворительно согласуются с данными работы [1], различие полученных результатов не превышает 20%, что может быть обусловлено некоторым различием в величине угла β .

В работе [6] исследовалась традиционная конфигурация наклонных цилиндрических отверстий (рис. 5) с шагом $t = 5d$, углом $\alpha = 30^\circ$ и основными

геометрическими параметрами $d = 3,2$ мм, $t = 16$ мм, $t_1 = 8$ мм.

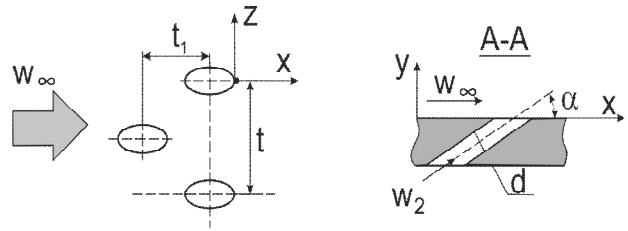


Рис. 5. Традиционная схема наклонных цилиндрических отверстий [6]

На рис. 6 показано поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения при значении параметра вдува $m = 1,0$ для традиционной схемы цилиндрических наклонных отверстий [6] (рис. 5 а) и для двухструйной системы отверстий (рис. 5 б).

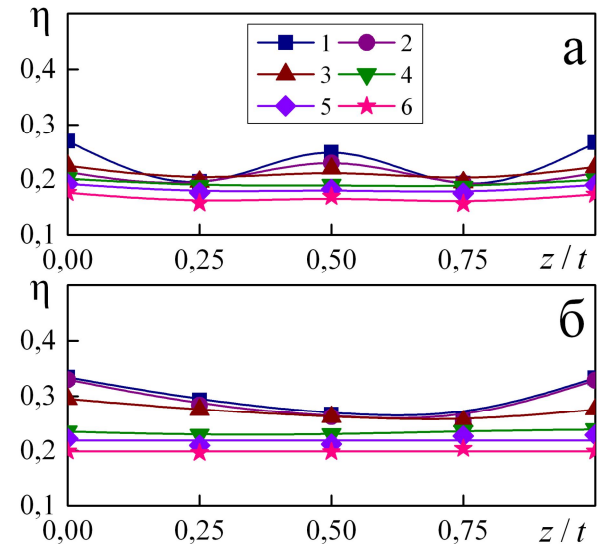


Рис. 6. Распределение локальной эффективности пленочного охлаждения при $m = 1,0$. Для цилиндрических наклонных отверстий (а) с шагом $t = 5d$ [6]: 1 – $x/d = 6,6$; 2 – $x/d = 9,7$; 3 – $x/d = 12,8$; 4 – $x/d = 19,1$; 5 – $x/d = 25,3$; 6 – $x/d = 31,6$; для двухструйных отверстий (б): 1 – $x/d = 6,25$; 2 – $x/d = 9,38$; 3 – $x/d = 12,5$; 4 – $x/d = 21,8$; 5 – $x/d = 25,0$; 6 – $x/d = 31,25$

Анализ данных рис. 6(а) для $m = 1,0$ показывает, что для традиционной схемы цилиндрических наклонных отверстий равномерность охлаждения достигается при $x/d = 19,1$. Как видно из рис. 6(б) для двухструйной схемы поперечное распределение эффективности охлаждения становится практически равномерным при $x/d = 15,63$. Двухструйная схема отверстий демонстрирует более высокую эффективность охлаждения, чем традиционная схема двухрядных наклонных отверстий.

Для определения неравномерности используем параметр, который характеризует степень поперечной неравномерности эффективности охлаждения [7]:

$$\varepsilon = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{ср}}$ – среднее значение эффективности пленочного охлаждения; η_{\max} , η_{\min} – её максимальное и минимально значение.

На рис. 7 приведены данные настоящего исследования для нескольких значений m . Здесь же представлены данные работы [6], где экспериментально исследовалась традиционная двухрядная схема отверстий с шагом $t/d = 5,0$.

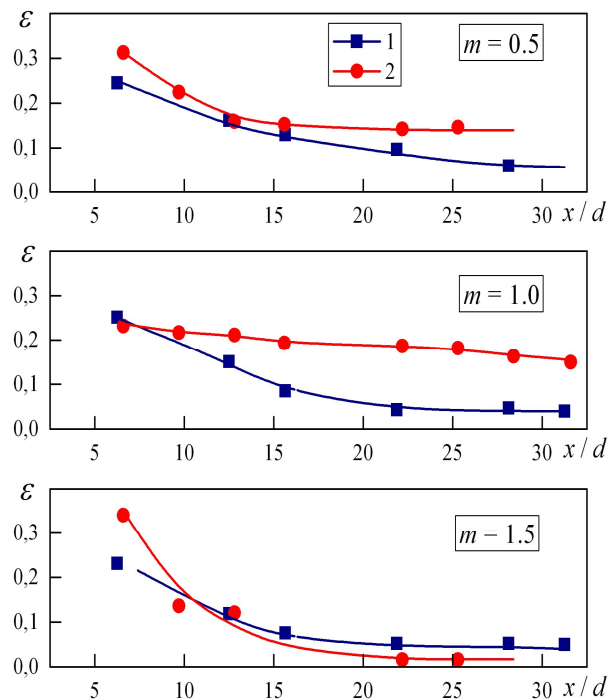


Рис. 7. Степень неравномерности пленочного охлаждения: 1 – данные настоящего исследования, двухструйная схема отверстий ($t/d=4,0$); 2 – данные работы [6], традиционная двухрядная схема ($t/d=5,0$)

Из представленных данных следует, что при $m=0,5$ и $m=1,0$ в двухструйной схеме степень неравномерности ниже, чем в традиционной двухрядной схеме. Это вполне объяснимо, т.к. при малых параметрах вдува отсутствует отрыв потока, и благодаря поперечному углу наклона, происходит быстрое перемешивание струй и равномерное покрытие пластины вторичным потоком. При $m=1,5$ степень неравномерности обеих схем примерно одинакова.

На рис. 8 показаны результаты обобщения опытных данных по степени неравномерности пленочного охлаждения.

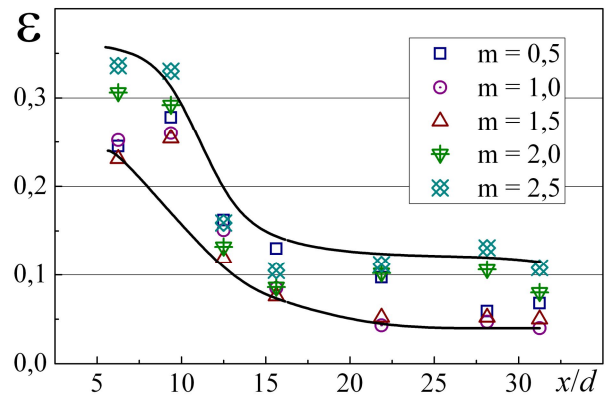


Рис. 8. Степень неравномерности двухструйного пленочного охлаждения

Наиболее высокая неравномерность охлаждения наблюдается в области $x/d < 15$. Для всех значений параметра вдува m равномерное «покрытие» поверхности пленкой со степенью неравномерности $\varepsilon < 0,1$ достигается в области $x/d > 20$.

Заключение

Исследована эффективность пленочного охлаждения двухструйной системы наклонных цилиндрических отверстий со сложными углами подачи охладителя.

Для определения неравномерности был введен параметр ε , который характеризует степень неравномерности эффективности охлаждения. На начальном участке наблюдается наиболее высокая неравномерность охлаждения, но с увеличением продольной координаты она уменьшается и при $x/d = 20$ поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения практически равномерно со степенью неравномерности $\varepsilon < 0,1$.

Дальнейшая программа исследований будет направлена на изучение эффектов ускорения и внешней турбулентности потока, которые играют важную роль в различных практических приложениях.

Литература

1. *Film cooling effectiveness comparison between shaped- and double jet film cooling holes in a row arrangement [CD-ROM] [Text] / K. Kusterer, A. Elyas, D.Bohn, T. Sugimoto, R. Tanaka, M. Kazari // ASME Paper GT2010-22604. – 13 p.*
2. *Colban, W. F. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface [Text] / W. F. Colban, K. A. Thole, D. Bogard // Trans. Of the ASME Journal of Turbomachinery. – 2011. – Vol. 133, No 1. – 011002. – 11 p.*
3. *Davidson, F. D. Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters and trenches [CD-ROM] [Text] / F. D. Davidson, D. Kistenmacher,*

D. Bogard // ASME Paper GT2012-70029. – 12 p.

4. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches [CD-ROM] [Text] / Y. Lu, A. Dhungel, V. Ekkad, R. S. Bunker // ASME Paper GT-2007-27388. – 11 p.

5. Dittmar, J. Assessment of various film cooling configurations including shaped and compound angle holes based on large scale experiments [Text] / J. Dittmar, A. Schulz, S. Wittig // ASME Journal of Turbomachinery. – 2003. – Vol. 125, No 1. – P. 57–64.

6. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности системой наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях [Текст] / А. А. Халатов, И. И. Борисов, А. С. Коваленко и др. // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 3 – С. 5-12.

7. Халатов, А. А. Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А. А. Халатов ; ред. А. А. Долинский, АН УССР. Ин-т технической теплофизики. – К. : Наук. думка, 1989. – 192 с.

Поступила в редакцию 30.05.2014, рассмотрена на редколлегии 14.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий лабораторией технологий комбинированного производства энергии Б. Д. Билека, Институт технической теплофизики НАН Украины.

НЕРІВНОМІРНІСТЬ ДВОСТРУМЕНЕВОГО ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

А. А. Халатов, Н. А. Панченко, І. І. Борисов, Ю. Я. Дашевський

Плівкове охолодження є одним з основних способів теплового захисту лопаток сучасних високотемпературних газових турбін. В статті наведено результати експериментального дослідження плівкового охолодження перспективної двоструменевої схеми отворів на вході. Наведено порівняльний аналіз досліджуваної і традиційної схеми з використанням похилих циліндричних отворів. Розглянуто ступінь нерівномірності плівкового охолодження обох схем. Показано, що ефективність дослідженої схеми перевищує ефективність традиційної схеми.

Ключові слова: плівкове охолодження, двоструменева система отворів, ефективність охолодження, ступінь нерівномірності.

UNEVENNESS OF DOUBLE JET FILM COOLING

A. A. Khalatov, N. A. Panchenko, I. I. Borisov, Yu. J. Dashevskyy

The film cooling is one of the main method of thermal protection of the blades of modern high-temperature gas turbines. This paper presents results of the film cooling experimental studies over a flat plate using double jet holes configuration at the inlet. A comparative analysis of the investigated and traditional cooling scheme using inclined cylindrical holes is given. The comparison of film cooling uniformness of both schemes is given. It is shown that the efficiency of investigated double jet cooling scheme exceeds the efficiency of conventional scheme.

Key words: film cooling, double jet, cooling efficiency, non-uniformness ratio.

Халатов Артем Артемович – д-р техн. наук, проф., академик НАНУ, зав. отделом «Высокотемпературной термогазодинамики», Институт технической теплофизики НАН Украины, зав. кафедры «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ» Физико-технический институт, Киев, Украина, e-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua.

Панченко Надежда Анатольевна - аспирант кафедры «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ» Физико-технический институт, мл. науч. сотр. отдела «Высокотемпературной термогазодинамики», Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: mynadezhda@i.ua.

Борисов Игорь Иванович – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. отдела «Высокотемпературной термогазодинамики», Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: bogisov@vortex.org.ua.

Дашевский Юрий Яковлевич - канд. техн. наук; зав. сектором тепловых и гидравлических расчётов, отдел турбин, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.