

УДК 621.45.038

## Пленочное охлаждение плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока

А.А. Халатов<sup>1,2</sup>, И.И. Борисов<sup>1</sup>, Ю.Я. Дашевский<sup>3</sup>, А.С.Коваленко<sup>1</sup>,  
С.В.Шевцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

<sup>3</sup>ГП НПКГ «Зоря»-Машипроект», Николаев, Украина

E-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua

Представлены результаты экспериментального исследования пленочного охлаждения плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий, расположенных в «мелкой» траншее. Показано, что эффективность охлаждения рассматриваемой системы значительно превышает эффективность традиционной системы наклонных цилиндрических отверстий. При этом обеспечивается более равномерное покрытие поверхности пленкой охладителя. Внешняя турбулентность повышает эффективность охлаждения на 5...8 %, ускорение потока приводит к ее снижению на 10...15 %.

**Ключевые слова:** пленочное охлаждение, отверстия в траншее, эффективность, ускорение потока, внешняя турбулентность.

### Введение

Совершенствование систем пленочного охлаждения лопаток современных газовых турбин по-прежнему остается актуальной проблемой. Традиционная схема в виде совокупности дискретных наклонных отверстий цилиндрической формы, выполненных в охлаждаемой стенке, характеризуется низкой эффективностью при больших параметрах вдува ( $m > 1$ ) из-за наличия вторичных вихревых структур, разрушающих пленку охладителя и способствующих подосу горячего потока к защищаемой поверхности. Среди различных способов повышения эффективности охлаждения с одновременным улучшением равномерности покрытия поверхности наибольший положительный эффект обеспечивается при использовании фасонных отверстий. Однако изготовление таких отверстий, имеющих размеры менее одного миллиметра, требует специального дорогостоящего оборудования и связано с определенными технологическими трудностями. Поэтому большой практический интерес представляют новые технические решения, не уступающие способу охлаждения сложными (фасонными) отверстиями по эффективности, но имеющие более простую технологию изготовления. Одним из таких решений является выпуск охладителя в наклонные отверстия, расположенные в «мелкой» траншее [1, 2].

Для реальных условий обтекания лопаток газовых турбин характерны турбулентность и ускорение внешнего потока, поэтому учету их влияния посвящено большое количество работ. Данный вопрос для вариантов подачи охладителя через щель, пористую вставку и систему отверстий детально проанализирован в работе [3]. Показано, что как турбулентность, так и отрицательный продольный градиент давления приводят к снижению эффективности охлаждения, особенно при высоком уровне турбулентности. Что касается системы наклонных отверстий в траншее, то экспериментальные данные по эффективности для них крайне ограничены, а влияние ускорения потока вообще не исследовалось. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности с выпуском охладителя в однорядную систему отверстий в «мелкой» траншее при наличии внешней турбулентности и продольного отрицательного градиента давления потока, что характерно для реальных условий эксплуатации сопловых и рабочих лопаток газовых турбин. Исследование выполнено в широком диапазоне изменения параметра вдува,  $m = 0,5 \div 2,5$ .

### Экспериментальная установка и методика проведения изменений

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе открытого типа, работающей от центробежного вентилятора ВВД-5. Внешний (основной) поток воздуха 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 сопла, спроектированного по профилю Витошинского. Входная турбулентность потока составляла около 1 %. После рабочего участка воздушный поток выходил в успокоительную емкость и далее — в атмосферу. Для исследования эффективности пленочного охлаждения было выбрано обратное направление теплового потока: основной поток — холодный, а вторичный — нагретый. Вдуваемый (вторичный) воздух подавался от индивидуального компрессора через регулирующий вентиль, расходомер (ротаметр) и электронагреватель в рабочий участок через один ряд наклонных отверстий.

Рабочий участок представляет собой плоский канал с поперечным сечением  $294 \times 34$  мм, соответствующим выходному сечению сопла Витошинского. Нижняя стенка рабочего участка включает пластину из оргстекла с отверстиями вдува и адиабатную пластину из асбоцемента ( $\lambda = 0,17$  Вт/м·К). В пластину вмонтирован ряд хромель-алюмелевых термопар, расположенных в продольном направлении на одной линии с постоянным по длине шагом (10 мм). В установке предусмотрена возможность перемещения пластины в поперечном направлении.

В экспериментах с внешней турбулентностью потока канал был плоским, а на входе в сопло устанавливалась турбулизирующая решетка (перфорированная пластина) с относительным проходным сечением 17,3 %. Решетку располагали на входе в сопло Витошинского, поскольку в этом случае на выходе из сопла обеспечивается изотропная турбулентность [4]. Уровень турбулентности потока на выходе из сопла измерялся термоанемометром постоянной температуры и в настоящих экспериментах составлял около 7 %.

В экспериментах с ускорением потока использовались два сменных профиля, которые устанавливались на верхнюю стенку канала (рис. 1). Профиль № 1 обеспечивал уменьшение поперечного сечения канала на выходе примерно в полтора раза, а профиль № 2 — примерно в два раза, т. е. до условий «обратного» перехода потока. Высота канала на входе  $H_0$  составляла 34 мм. Профили проектировались таким образом, чтобы параметр ускорения  $K$  соответствовал реальным условиям течения в межлопаточном канале газовой турбины. В настоящих экспериментах профиль № 1 обеспечивал изменение величины  $K$  от  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $2,0 \cdot 10^{-6}$ , а профиль № 2 — от  $1,0 \cdot 10^{-6}$  до  $3,5 \cdot 10^{-6}$ .

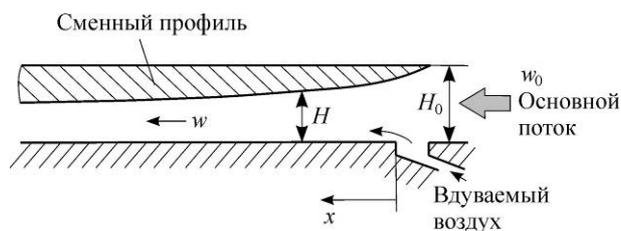


Рис. 1. Схема сужающегося экспериментального канала в экспериментах с ускорением потока.

Относительные геометрические параметры траншеи и расположение отверстий в ней выбирались исходя из рекомендаций работ [1, 2]. Эксперименты выполнены с однорядной системой цилиндрических наклонных отверстий ( $\alpha = 30^\circ$ ) в «мелкой» траншее (рис. 2). Высота траншеи  $h$  составляла 2,4 мм, ее ширина  $B$  — 6,4 мм ( $h/B = 0,75$ ), что позволяет ее классифицировать как «мелкую» траншею. Диаметр отверстий  $d$  составлял 3,2 мм ( $h/d = 0,75$ ), размер выходного эллипса ( $2d$ ) отверстия соответствовал ширине траншеи. Поперечный шаг углублений (отверстий)  $t$  равнялся 10 мм ( $t/d \approx 3$ ). Длина отверстия вдува  $L$  равнялась 20 мм, его относительная длина  $L/d$  составляла 6,25. В соответствии с рекомендациями работы [5], при  $L/d > 5$  влияние длины отверстия на эффективность пленочного охлаждения можно не учитывать. Расстояние  $x$  отсчитывалось от среза отверстия (траншеи), а поперечное расстояние  $z$  — от центральной линии среднего отверстия. Для сравнения были также проведены эксперименты с однорядной системой отверстий без траншеи при использовании аналогичных геометрических параметров.

В экспериментах измерялись скоростной напор основного потока, статическое давление на верхней стенке канала, температура основного потока, температура и расход вдуваемого потока, температура адиабатной поверхности в различных точках по длине пластины. По координате  $z$  исследовались три положения:  $z = 0, 2,5$  и 5 мм. Скоростной напор в основном потоке перед экспериментальным участком определялся с помощью трубки Прандтля и дифманометров. Для измерения статического давления применялись водяные дифманометры.

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока воздуха 35...37 м/с, его температура — 25...33 °С, температура вдуваемого воздуха — от 65 до 80 °С, отношение плотностей вдуваемого и основного потока — 0,84...0,87, параметр вдува  $m$  изменялся от 0,5 до 2,5, число Рейнольдса  $Re_d$  на входе, определенное по эквивалентному диаметру основного канала и скорости потока в нем, было постоянным и составляло  $1,25 \cdot 10^5$ . Тестовые эксперименты по измерению профиля скорости основного потока в пристеночном слое перед отверстиями подачи вторичного воздуха показали, что для данных условий пограничный слой близок к турбулентному (значение измеренного формпараметра пограничного слоя составляло величину около 1,4).

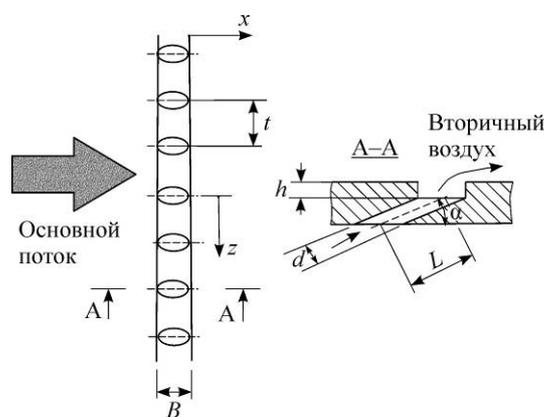


Рис. 2. Схема исследованной однорядной системы отверстий в мелкой траншее.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по эффективности охлаждения в безградиентном и низкотурбулентном течении ( $Tu = 1\%$ ) в сравнении с опытными данными работ [1] и [2] для аналогичной конфигурации наклонных отверстий в траншее ( $\bar{\eta}$  — средняя по ширине пластины эффективность охлаждения).

Как видно из рисунка, в отличие от традиционной системы наклонных отверстий, для которых максимум эффективности достигается при  $m \approx 0,5$ , для отверстий в траншее эффективность охлаждения возрастает с увеличением параметра вдува. Данные настоящих исследований хорошо согласуются с результатами работы [2], но несколько отличаются от данных работы [1]. Максимальное различие наблюдается на начальном участке канала (до 30%), а на основном участке оно составляет 10...15%. Однако в целом согласование данных можно считать удовлетворительным, поскольку эффективность рассматриваемой системы весьма чувствительна к изменению геометрических и режимных параметров, причем их влияние в различных работах неоднозначно. Так, например, наличие площадки между выходной кромкой отверстия и торцом траншеи, согласно данным работы [1], довольно существенно (примерно в 1,2...1,5 раза) повышает эффективность, а по данным работы [2] — действует в обратную сторону. Как видно из рисунка, в отличие от традиционного варианта отверстий без траншеи эффективность охлаждения для конфигурации отверстий в траншее возрастает с увеличением параметра вдува.

Сравнение средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения для вариантов отверстий в траншее и без траншеи (рис. 4) показало, что отношение  $\bar{\eta}_{\text{транш}} / \bar{\eta}_{\text{отв}}$  возрастает с увеличением параметра вдува во всем исследованном диапазоне его изменения параметра вдува. На начальном участке оно изменяется от 1,3 при  $m = 0,5$  до 3,5 при  $m = 2,5$ . По мере удаления от места вдува это различие уменьшается, а при  $x/d \approx 30$  становится незначительным.

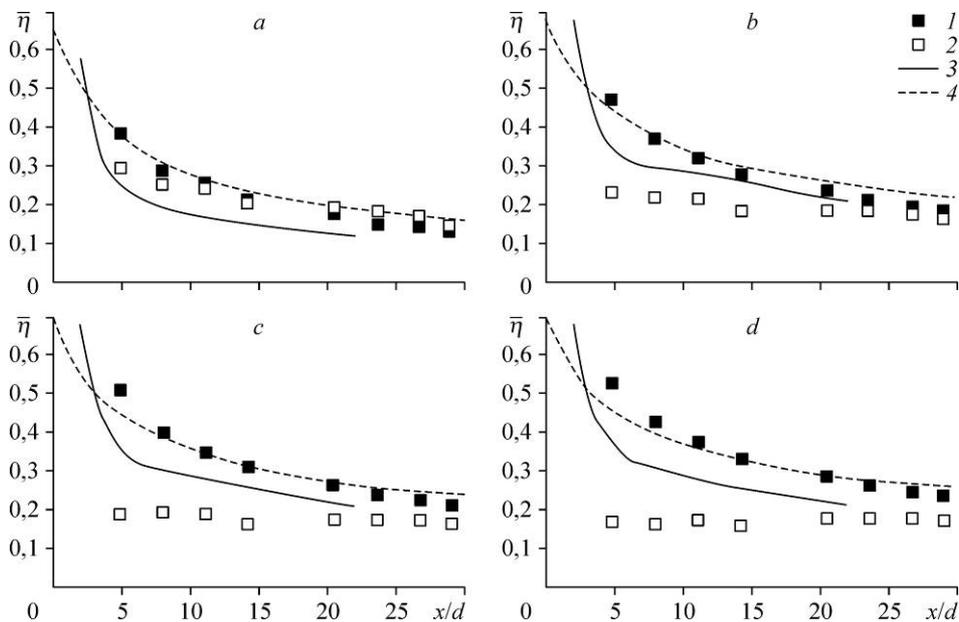
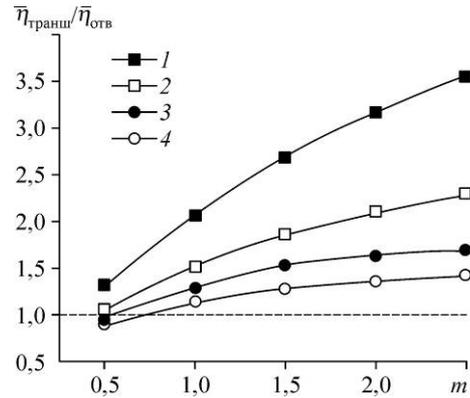


Рис. 3. Продольное распределение средней по ширине пластины эффективности охлаждения: безградиентное течение и низкая турбулентность потока (1%).

$m = 0,5$  (a), 1 (b), 1,5 (c), 2 (d); результаты настоящей работы: 1 — отверстия в траншее, 2 — отверстия без траншеи; 3, 4 — отверстия в траншее, соответствующие данным работ [1] и [2].

Рис. 4. Отношение эффективности пленочного охлаждения для вариантов отверстий в траншее и без траншеи в зависимости от параметра вдува при различных значениях продольной координаты.

$x/d = 4,84$  (1), 11,09 (2), 20,47 (3), 29,84 (4).



Поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения на начальном участке вдува показано на рис. 5. Для системы отверстий в траншее в отличие от системы отверстий без траншеи оно практически равномерное. При удалении от центра отверстия в поперечном направлении (по оси  $z$ ) эффективность охлаждения даже несколько возрастает, что может быть связано с ударом струи о кромку траншеи. Как предполагают авторы работы [2], кромка траншеи блокирует непосредственный выход охладителя в основной поток, который распределяется вдоль щели и выходит на поверхность скорее как пленка, чем как струя. Внешняя турбулентность потока несколько усиливает этот эффект, в то время как продольный градиент давления незначительно снижает равномерность распределения вдуваемого потока. При удалении от сечения вдува распределение эффективности охлаждения становится практически равномерным для обеих исследованных конфигураций — системы отверстий на плоской поверхности и системы отверстий в траншее.

На рис. 6 показано влияние внешней турбулентности и ускорения потока на среднюю по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения системой отверстий в траншее. Как видно из рисунка, внешняя турбулентность при использовании траншейной

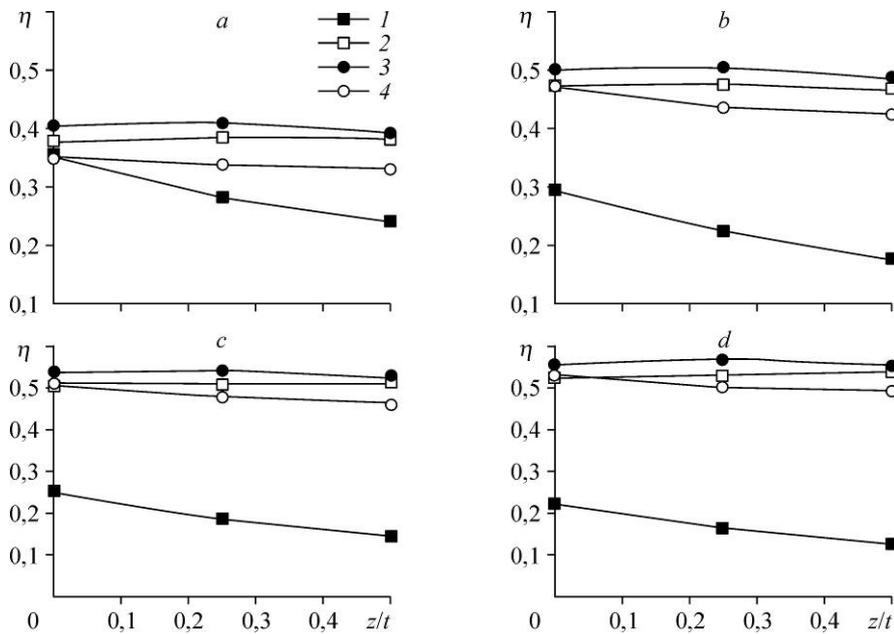


Рис. 5. Поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения на начальном участке вдува,  $x/d = 4,84$ .

$m = 0,5$  (a), 1 (b), 1,5 (c), 2 (d); 1 — однорядная система цилиндрических отверстий на плоской поверхности (без траншеи), 2, 3, 4 — однорядная система отверстий в траншее: 2 — нетурбулизованный безградиентный основной поток, 3 — турбулизованный поток, 4 — ускорение внешнего потока (профиль № 1).

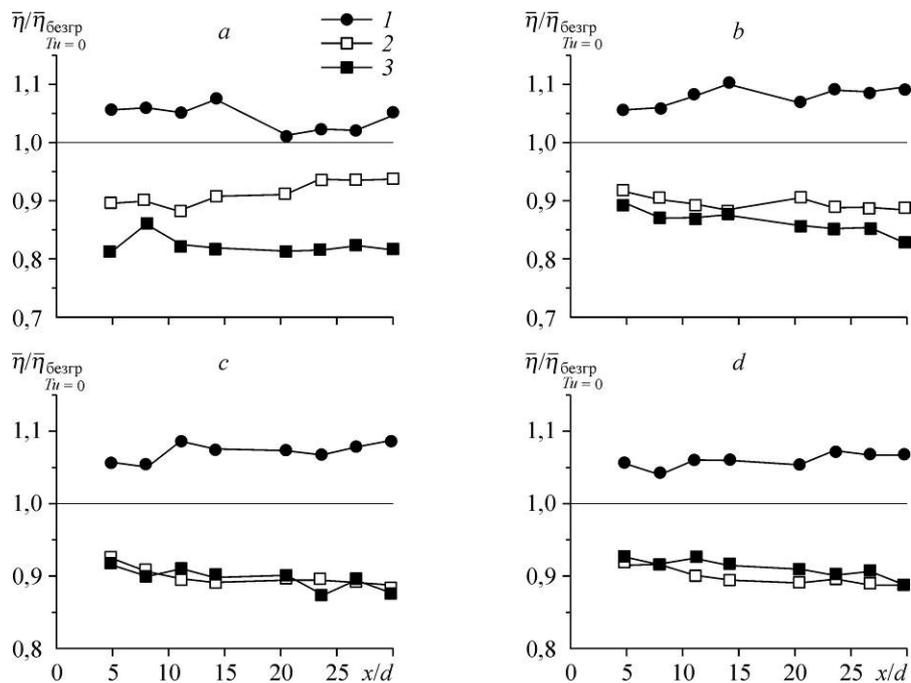


Рис. 6. Влияние внешней турбулентности и ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения системой отверстий в траншее.

$m = 0,5$  (a), 1 (b), 1,5 (c), 2 (d); 1 — турбулизированный поток ( $dp/dx = 0$ ), 2 — ускоренный поток (профиль № 1,  $Tu = 0$ ), 3 — ускоренный поток (профиль № 2,  $Tu = 0$ );

конфигурации несколько увеличивает эффективность охлаждения (на 5...8%), в отличие от большинства других схем пленочного охлаждения (например, тангенциальной щели, традиционной системы цилиндрических отверстий, фасонных отверстий), для которых турбулизация потока приводит к снижению эффективности [3, 6, 7]. Повышение эффективности для траншейной конфигурации получено также в работе [8]. По мнению авторов, внешняя турбулентность, вследствие дополнительной дисперсии струй, способствует прижатию охладителя к поверхности.

Ускорение потока приводит к снижению эффективности охлаждения. Наиболее сильно это влияние проявляется при малом параметре вдува ( $m = 0,5$ ), особенно для профиля № 2 (снижение  $\eta$  на 18%). При параметрах вдува  $m = 1, 1,5$  и 2 имеет место монотонное уменьшение по длине пластины отношения эффективности для случаев ускоренного и безградиентного потоков.

### Выводы

В результате проведенных экспериментов показано, что на начальном участке вдува ( $x/d \approx 5$ ) средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения с помощью однорядной системы наклонных отверстий в «мелкой» траншее существенно превышает эффективность традиционной системы наклонных отверстий: на 30% при значении параметра вдува  $m = 0,5$ , и в 2...3,5 раза при больших параметрах вдува. По мере удаления от места вдува это различие уменьшается, а при  $x/d \approx 30$  становится незначительным. Внешняя турбулентность (7%) повышает эффективность охлаждения на 5...8%. Отрицательный продольный градиент давления в диапазоне параметра ускорения  $0,5 \cdot 10^{-6} < K < 3,5 \cdot 10^{-6}$  снижает эффективность пленочного охлаждения однорядной системой отверстий в «мелкой» траншее на 10...15%.

### Обозначения

$x$ — продольная координата,	$\eta = (T_{aw} - T_{\infty}) / (T_2 - T_{\infty})$ — эффективность пленочного охлаждения,
$z$ — поперечная координата,	$\bar{\eta}$ — средняя по ширине пластины эффективность охлаждения,
$w$ — скорость,	$K = (v_{\infty} / w_{\infty}^2) (dw_{\infty} / dx)$ — параметр ускорения.
$T$ — температура,	
$\rho$ — плотность,	
$\nu$ — кинематическая вязкость,	
$m = (\rho_2 w_2) / (\rho_{\infty} w_{\infty})$ — параметр вдува,	

### Нижние индексы

$aw$ — параметры на адиабатической стенке,	транш — отверстие в траншее,
2 — параметры вдуваемого потока,	безгр — безградиентный поток,
$\infty$ — параметры основного потока,	$Ti = 0$ — нетурбулизованный поток.

### Список литературы

1. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // Trans. of the ASME. J. of Turbomachinery. 2009. Vol. 131, No. 1. P. 011003-1–011003-13.
2. Waye S.K., Bogard D.G. High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations // ASME Paper GT-2006-90226. 9 p. [CD-ROM].
3. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
4. Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизованных потоков. Киев: Наукова думка, 1985. 294 с.
5. Colban W.F., Thole K.A., Bogard D. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface // Trans. of the ASME. J. of Turbomachinery. 2011. Vol. 133, No. 1. P. 011002-1–011002-11.
6. Lebedev V.P., Lemanov V.V., Misyura Y.A., Terekhov V.I. Effects of flow turbulence on film cooling efficiency // Int. J. of Heat Mass Transfer. 1995. Vol. 38, No. 11. P. 2117–2125.
7. Saumveber C., Schulz A. Free-stream effects on the cooling performance of cylindrical and fan-shaped cooling holes // ASME paper GT2008–51030. 13 p. [CD-ROM].
8. Baheri S., Jubran B.A., Alavi Tabrizi S.P. The effect of turbulence intensity on film cooling of gas turbine blade from trenched shaped holes // ASME Paper GT-2008-50318. 10 p. [CD-ROM].

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.