

УДК 621.45.038

## СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ: ВЛИЯНИЕ УСКОРЕНИЯ ПОТОКА

Халатов А.А.<sup>1</sup>, академик НАН Украины, Борисов И.И.<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Дашевский Ю.Я.<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина

<sup>2</sup> НПКГ «Зоря» – «Машпроект», просп. Богоявленский 42а, г. Николаев, 54018, Украина

Наведено результати аналізу впливу прискорення потоку на ефективність плівкового охолодження для різних варіантів вдува: щілинного, за допомогою циліндричних та фасонних отворів, за допомогою похилих отворів у заглибинах різної форми – кратерах, траншеї, напівсферичних сегментах. Наведено співвідношення для розрахунку ефективності.

Представлены результаты анализа влияния ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения для различных вариантов вдува: щелевого, с помощью цилиндрических и фасонных отверстий, с помощью наклонных отверстий, расположенных в углублениях различной формы – кратерах, траншее, полусферических сегментах. Приведены соотношения для расчета эффективности.

Results of the flow acceleration influence on the film cooling are given for a few variants of coolant supply through a slot, cylindrical or shaped holes, and holes in shallow indentations of different shape – craters, trench, semispherical segments. The correlations for film cooling efficiency prediction are presented.

Библ. 17, рис. 3.

**Ключевые слова:** пленочное охлаждение, адиабатная эффективность, ускорение внешнего потока.

$d$  – диаметр отверстия;

$K$  – параметр ускорения;

$m$  – параметр вдува;

$w$  – скорость внешнего потока;

### Введение

Пленочное охлаждение широко применяется для тепловой защиты сопловых и рабочих (вращающихся) лопаток газовых турбин. На его характеристики оказывает влияние множество факторов: параметр вдува, продольный градиент давления основного потока (ускорение / торможение), степень его турбулентности, отношение плотностей охладителя и основного потока, сжимаемость (число Маха). Для количественной оценки ускорения потока в межлопаточном канале используется параметр:

$$K = \frac{v_{\infty}}{w_{\infty}^2} \frac{dw_{\infty}}{dx}, \quad (1)$$

где  $w_{\infty}$  и  $v_{\infty}$  – скорость и кинематическая вязкость внешнего потока.

По данным ряда работ [1, 2], при  $K > 2 \dots 3 \cdot 10^{-6}$  начинается ламинаризация потока (обратный переход), при этом интенсивность теплообмена существенно падает. Для реальных условий эксплуатации лопаток газовых турбин характерный диапазон работы составляет  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ , т.е. явление ламинаризации можно не принимать во внимание.

Представление данных по эффективности пленочного охлаждения при воздействии различных факторов часто выполняют с использованием принципа супер-

позиции отдельных воздействий, т.е. результирующая (средняя по ширине поверхности) эффективность записывается в виде произведения отдельных факторов [3]:

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_0 \cdot \prod_i \varepsilon_i, \quad (2)$$

где  $\bar{\eta}_0$  – средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности при отсутствии влияния каких-либо факторов,  $\varepsilon_i$  – относительная функция, учитывающая влияние  $i$ -го фактора на эффективность охлаждения. В отдельных случаях принцип суперпозиции не выполняется, как, например, при совместном влиянии ускорения потока и вогнутой кривизны ([4]).

Как показывают расчетные и экспериментальные исследования физической структура течения, выполненные в [5–9], при ускорении внешнего потока пограничный слой становится более тонким, и струя охладителя прижимается к поверхности. Целью настоящей работы является сравнительный анализ влияния ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения как для традиционных, так и перспективных способов подачи охладителя.

### Тангенциальная щель

Тангенциальная щель является наиболее эффективным вариантом пленочного охлаждения. При тангенциальной подаче охладителя через сплошную щель вслед-

ствии отсутствия отрыва потока основным влияющим фактором является уменьшение толщины пограничного слоя, приводящее к интенсификации взаимодействия охладителя и основного потока и постепенному размыванию охладителя. Эксперименты, выполненные в [10], показали, что ускорение внешнего потока около плоской пластины снижает абсолютное значение эффективности охлаждения. Для описания фактора отрицательного продольного градиента давления в работе [10] предложено степенное соотношение:

$$\varepsilon_{dp} = \frac{\eta_{\text{уск}}(x)}{\eta_{\text{безгр}}(x)} = \left( \frac{w(x)}{w_{\text{вх}}} \right)^n, \quad (3)$$

где  $w_{\text{вх}}$  и  $w(x)$  – скорость основного потока на входе ( $x = 0$ ) и в произвольном сечении  $x$ ;  $\eta_{\text{безгр}}(x)$  и  $\eta_{\text{уск}}(x)$  – эффективность безградиентного и ускоренного потока в сечении  $x$ . При обобщении экспериментальных данных получено значение показателя степени  $n = -0,2$ .

Как показали дальнейшие исследования, такой вид соотношения оказался пригодным для описания влияния ускорения потока при других способах подачи охладителя. Эксперименты [11] при вдуве охладителя через наклонную тангенциальную щель ( $\alpha = 20^\circ$ ), выполненные при значении параметра ускорения  $K = 2,62 \cdot 10^{-6}$ , показали, что полученные данные могут быть обобщены зависимостью (3) с показателем степени  $n = -0,19$ .

### Цилиндрические наклонные отверстия

Цилиндрические наклонные отверстия широко используются при охлаждении лопаток газовых турбин. Влияние ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения за системой наклонных отверстий широко исследовано [4 – 9, 12, 13]. Для системы дискретных отверстий данные различных авторов по влиянию

ускорения на эффективность пленочного охлаждения существенно различаются. Причиной этого является сложная гидродинамика пристенного течения с системой парных вихрей, которая трансформируется под влиянием ускорения потока. Поэтому даже для однорядных схем расположения цилиндрических отверстий до настоящего времени не удалось разработать методики, позволяющие дать точную количественную оценку влияния ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения.

По данным работ [5 – 8, 12], на плоской поверхности ускорение потока повышает эффективность пленочного охлаждения на начальном участке газовой завесы (по различным данным до значения относительной продольной координаты  $x/d$  от 15 до 30). Выполненное в работе [5] исследование влияния ускорения потока ( $K = 2 \cdot 10^{-6}$ ) на начальном участке пленочного охлаждения из отверстий с углом наклона  $\alpha = 45^\circ$  и относительным поперечным шагом  $t/d = 8$  обнаружило в диапазоне изменения параметра вдува  $0,15 < m < 0,8$  увеличение эффективности пленочного охлаждения на центральной линии примерно на 25...40 %. Измерение структуры пограничного слоя показало, что в отличие от безградиентного течения, в ускоренном потоке переход пограничного слоя из ламинарного режима в турбулентный происходит значительно медленнее. Был также сделан вывод о том, что наличие отрицательного продольного градиента давления затрудняет распределение охладителя по ширине, а струя становится тоньше.

Эксперименты [6] со вдувом охладителя из ряда наклонных цилиндрических отверстий ( $\alpha = 30^\circ$ ) с относительным поперечным шагом  $t/d = 2,5$ , и значением параметра ускорения  $K = 2,62 \cdot 10^{-6}$  обнаружили, что ускорение потока по-разному влияет на эффективность охлаждения на начальном и основном участках (рис. 1).

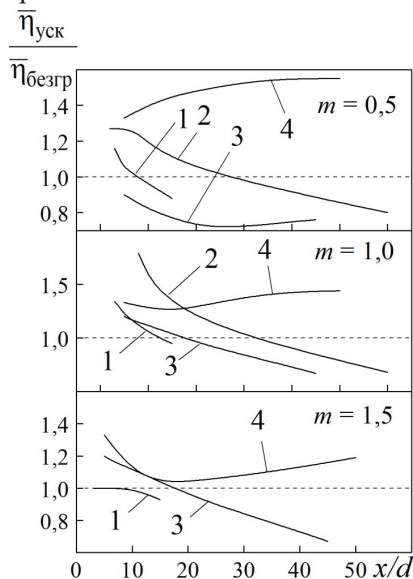


Рис. 1. Отношение эффективности пленочного охлаждения ускоренного и безградиентного потоков для однорядных схем с наклонными цилиндрическими отверстиями. 1, 2 – плоская поверхность по данным [12] и [6]; 3 – выпуклая поверхность [13]; 4 – вогнутая поверхность [4].

При  $0 < x/d < 30$  имеет место ее увеличение в диапазоне параметра вдува  $0,35 < m < 1,2$ . По мнению авторов, при  $m > 0,35$  градиент давления изменяет траекторию струй и уменьшает их отрыв от поверхности. Далее вниз по течению (измерения проводились до  $x/d = 62$ ) ускорение потока снижает эффективность пленочного охлаждения.

Аналогичные результаты получены в работе [12] для однорядной схемы наклонных отверстий с относительным поперечным шагом  $t/d = 3$  и углом наклона отверстий  $\alpha = 35^\circ$  при значении параметра ускорения  $K = 1,5 \cdot 10^{-6}$ , однако точка перехода от положительного влияния к отрицательному существенно ниже. С увеличением параметра вдува данное значение продольной координаты составляет  $x/d = 5$  при  $m = 0,4$  и  $x/d = 13$  при  $m = 1,0$  (рис. 1). Авторы [12] считают, что снижение эффективности на основном участке пленочного охлаждения является результатом роста степени турбулентности, т. е. увеличения скорости перемешивания охлаждающих струй с основным потоком.

В работе [8] выполнено математическое моделирование пленочного охлаждения с параметрами, соответствующими экспериментальной работе [12]. Расчеты показали, что при наличии отрицательного продольного градиента давления пограничный слой становится тоньше, охладитель прижимается к стенке и концентрируется вблизи центральной линии. Почкообразный вихрь растягивается в продольном направлении, его поперечный размер уменьшается, а интенсивность резко возрастает в соответствии с законом сохранения момента импульса. По сравнению с безградиентным течением эффективность пленочного охлаждения вдоль центральной линии существенно возрастает, причем максимальное увеличение обнаружено при  $m = 0,6$  (15...20 % при  $x/d = 20$ ). При  $m = 1,5$ , после присоединения потока, изменений в эффективности вдоль центральной линии не обнаружено.

Детальное экспериментальное исследование структуры потока при вдуве воды из одиночного цилиндрического отверстия в условиях отрицательного продольного градиента давления выполнено в работе [9] с соблюдением гидродинамического подобия по отношению к параметрам реального двигателя. Течение было развитым и турбулентным, толщина пограничного слоя перед отверстием составляла  $1,2d$  при нулевом продольном градиенте, и  $0,7d$  при ускорении потока. Параметр вдува равнялся единице, использовалось отверстие с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$  и относительной длиной  $L/d = 4,1$ . Применялось 3-D измерение скорости магнитно-резонансным методом, параметр ускорения потока  $K$  был высоким и составлял  $4,8 \cdot 10^{-6}$ . Поскольку исследовалось одиночное отверстие, исключалось взаимовлияние соседних струй. Эксперименты подтвердили выводы работ [5] и [8] о том, что продольный градиент давления изменяет траекторию струи, которая более резко поворачивается по направлению к стенке, а пограничный слой становится более тонким.

Кроме того, для ускоренного потока отсутствующая зона обратного течения, характерная для натекания

струи в поперечный поток. Эта зона усиливает смещение и создает область с нулевым значением скорости. При ускорении потока вихревая пара (почкообразный вихрь) начинает вращаться более интенсивно и сохраняется значительно дальше вниз по течению. При рассмотрении уравнения импульсов в данном случае значимыми остаются лишь изгибающие и растягивающие напряжения. При ускорении потока начинают превалировать растягивающие напряжения, усиливающие вихревую структуру, которая приближается ближе к поверхности. При вдуве из отверстия в условиях ускорения потока решающее влияние оказывают две противоположные тенденции: с одной стороны, поток прижимается к стенке и исчезает зона обратных токов вблизи отверстия вдува; с другой стороны – усиливается почкообразный вихрь. Результат влияния ускорения зависит от того, какая из этих тенденций превалирует, в зависимости от геометрических и режимных условий.

Экспериментальное и численное исследование влияния ускорения потока ( $K = 0,3 \cdot 10^{-6} \dots 0,7 \cdot 10^{-6}$ ) на характеристики пленочного охлаждения на начальном участке ( $x/d < 16$ ) при вдуве из одиночного наклонного ( $\alpha = 30^\circ$ ) отверстия на плоскую поверхность выполнено в работе [7]. В экспериментах использовалась тепломассообменная аналогия, параметр вдува изменялся в диапазоне  $0,25 \dots 1,2$ , отношение плотностей охладителя и основного потока  $DR$  составляло  $1,5$ . Исследования показали, что при малых параметрах вдува ( $m = 0,25$ ) усредненная по ширине эффективность пленочного охлаждения при ускорении потока незначительно снижается. При  $m > 0,75$  вблизи отверстия ( $x/d < 3$ ) вследствие уменьшения толщины пограничного слоя на выходе из отверстия и более заметного прижатия охладителя к поверхности эффективность охлаждения повышается на 30 % для течения с ускорением. В отличие от работ [6, 12], в работе [7] при  $x/d > 10$  продольный отрицательный градиент давления практически не оказывал влияния на эффективность пленочного охлаждения. Как и в работах [8] и [9], парный почкообразный вихрь прижимается к поверхности, становится более интенсивным, однако при этом ухудшается поперечное распределение охладителя.

Отдельно следует рассмотреть работы по влиянию ускорения потока при пленочном охлаждении криволинейных поверхностей.

В работах [4, 13] с использованием технологии жидких кристаллов исследовалась эффективность пленочного охлаждения при ускорении основного потока в широком диапазоне продольной координаты на выпуклой ( $r/d = 25$  и  $75$ ,  $5 < x/d < 45$ ) и вогнутой ( $r/d = 150$ ,  $5 < x/d < 100$ ) поверхностях. Исследован одиночный ряд наклонных ( $\alpha = 30^\circ$ ) цилиндрических отверстий с относительным поперечным шагом  $t/d = 3$ . Параметр вдува изменялся в диапазоне  $0,5 < m < 2$ , параметр ускорения потока был постоянным по длине и составлял для исследований с выпуклой поверхностью  $K \approx 0,8 \cdot 10^{-6}$ , а для вогнутой:  $K \approx 1,0 \cdot 10^{-6}$ . Как показали эксперименты (рис. 1), в случае выпуклой поверхности на начальном участке, вблизи отверстий вдува имеет место более вы-

сокая эффективность пленочного охлаждения. Авторы предполагают, что это связано с уменьшением отрыва выдуваемой струи при ускорении основного потока. На основном участке эффективность снижается. Обработка данных по соотношению (1), позволила получить для основного участка газовой завесы на выпуклой поверхности ( $5 < x/d < 45$ ) значение показателя степени:  $n = -0,24$ .

Особо следует выделить результаты, относящиеся к совместному влиянию ускорения потока и вогнутой кривизны поверхности [4]. В этих экспериментах обнаружено значительное (от 30 до 60 %) увеличение средней по ширине эффективности, вплоть до значения продольной координаты  $x/d = 100$  (рис. 1). Как отмечают авторы, столь значительное влияние ускорения потока в данном случае связано с тем, что продольный градиент давления оказывает стабилизирующее воздействие на поток, подавляя гидродинамическую неустойчивость, вызываемую вогнутой кривизной. С увеличением параметра вдува влияние ускорения потока снижается.

### Фасонные отверстия

Как отмечено в обзоре [14], в последние десятилетия большой прогресс в увеличении эффективности пленочного охлаждения с помощью рядов отверстий был достигнут с использованием фасонных отверстий (рис. 2), которые по своим характеристикам приближаются к щелевым конфигурациям, обеспечивающим

безотрывное обтекание при высоких параметрах вдува. Хотя выполнение фасонных отверстий малого (порядка 0,5 мм и менее) диаметра технологически значительно сложнее, чем цилиндрических, в последние годы, в связи с совершенствованием технологий (лазерных, электроэрозионных, водоструйных, 3D – печать) происходит повышение точности и удешевление их выполнения. По данным [13], для однорядных схем фасонных отверстий отрицательный продольный градиент давления снижает эффективность пленочного охлаждения, однако это снижение меньше, чем для цилиндрических наклонных отверстий. В результате обобщения данных с помощью соотношения (3) было получено, что показатель степени для фасонных отверстий составляет величину  $n = -0,15$ , т.е. по абсолютной величине он оказался меньше, чем для тангенциально-щелевого вдува.

### Наклонные цилиндрические отверстия в углублениях

Помимо фасонных отверстий в последние годы возникло новое направление в пленочном охлаждении с подачей охладителя в мелкие углубления (отношение глубины к диаметру 0,5...1,0) различной формы – в кратеры, траншею, сферические сегменты (рис. 2). Влияние ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения для таких систем исследовалось экспериментально в работах [15–17]. Результаты представлены на рис. 3.

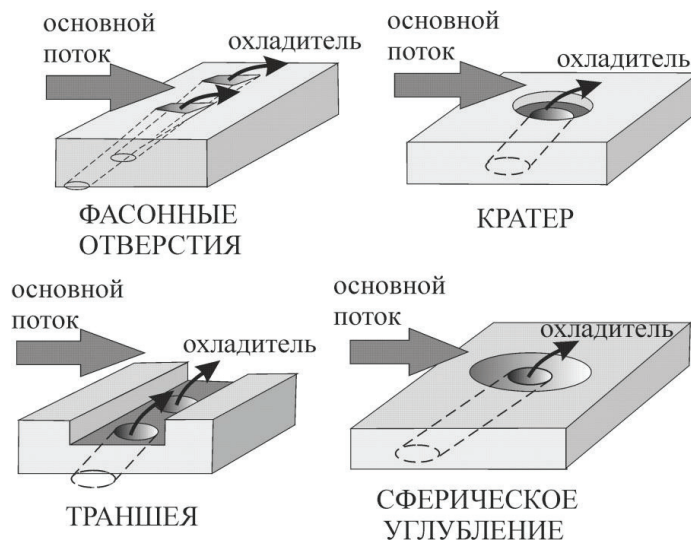


Рис. 2. Схемы фасонных отверстий и отверстий в углублениях.

Для однорядной системы отверстий в кратерах ([15]) получено, что данный фактор снижает значение до 10 % в конце измерительного участка (на расстоянии  $x/d = 30$ ). Сравнение отношения эффективности для ускоренного и безградиентного потоков (рис. 3, а) показывает, что при  $m = 0,5$  в диапазоне изменения параметра  $K$  от  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $2,0 \cdot 10^{-6}$  данный фактор слабо влияет на эффективность (в рамках погрешности измерений), а при  $K = (2,0 \dots 3,0) \cdot 10^{-6}$  средняя по ширине эффектив-

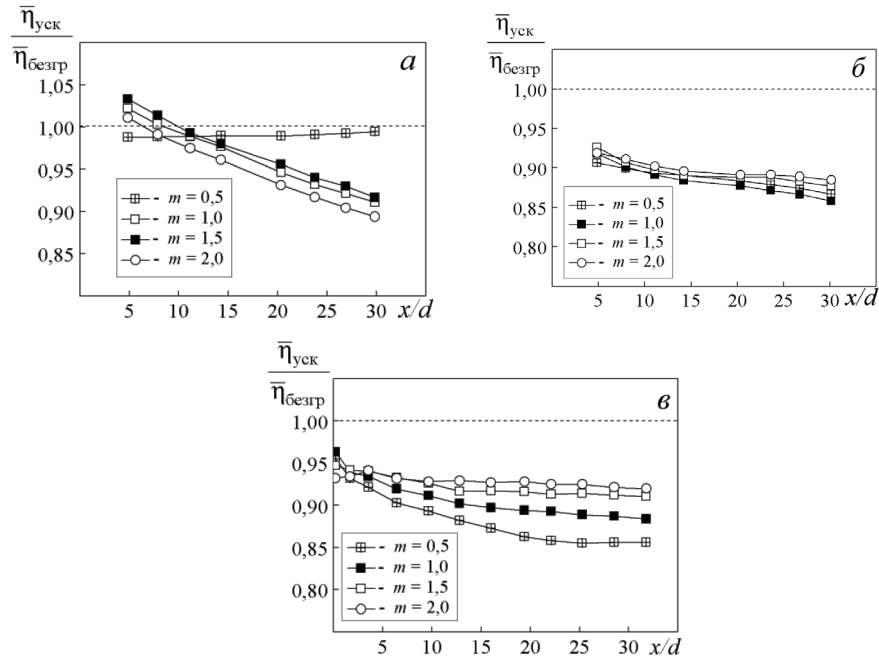
ность снижается примерно на 5...8 %. При высоких значениях параметра вдува на основном участке газовой завесы эффективность охлаждения снижается по длине пластины, а на начальном участке происходит незначительное увеличение эффективности. Подобный эффект также имеет место при пленочном охлаждении традиционными однорядными системами отверстий без углублений. Данные по эффективности охлаждения обобщаются с помощью уравнения (3) с погрешностью  $\pm 10 \%$



при значении показателя степени  $n = -0,25$ .

Влияние ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения при подаче охладителя в траншею экспериментально исследовано в [16] в диапазоне параметра ускорения  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 3,0 \cdot 10^{-6}$ . Результаты исследования показаны на рис. 3б. Как следует, отрицательный

продольный градиент давления примерно одинаково снижает эффективность пленочного охлаждения во всем диапазоне исследованных значений параметра вдува. Данные по эффективности обобщаются с помощью уравнения (3) с погрешностью  $\pm 10\%$  при значении показателя степени  $n = -0,18$ .



**Рис. 3. Влияние ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения:**  
*а* – однорядная система отверстий в кратерах;  
*б* – однорядная система отверстий в траншее;  
*в* – двухрядная система отверстий в сферических углублениях.

Эксперименты, выполненные в работе [17] по влиянию ускорения потока на эффективность охлаждения системой наклонных отверстий в полусферических углублениях (двухрядная схема) показали, что это влияние зависит от параметра вдува (рис. 3,в). При  $m = 0,5$  отрицательный продольный градиент давления существенно (до 15 %) снижает осредненную в поперечном направлении эффективность охлаждения. При увеличении параметра вдува влияние ускорения потока становится значительно слабее (5...8 %).

Обобщение данных в виде зависимости отношения осредненной в поперечном направлении эффективности пленочного охлаждения для ускоренного и безградиентного основного потока от его относительной скорости выполнено для значений параметра вдува  $m \geq 1$ . С точностью  $\pm 10\%$  эти данные могут быть аппроксимированы зависимостью (3) при значении показателя степени  $n = -0,16$ .

### Выводы

Выполненный анализ показал, что для различных схем подачи охладителя влияние ускорения внешнего потока на эффективность пленочного охлаждения проявляется по-разному. Для тангенциально-щелевого

вдува отрицательный продольный градиент давления снижает эффективность. Для вдува из однорядной системы наклонных отверстий ускорение потока повышает эффективность пленочного охлаждения на начальном участке газовой завесы, но снижает ее на основном. Для однорядной схемы фасонных отверстий отрицательный продольный градиент давления снижает эффективность пленочного охлаждения, однако это снижение меньше, чем для цилиндрических наклонных отверстий. Для рассмотренных вариантов вдува из наклонных отверстий, расположенных в углублениях ускорение потока снижает эффективность охлаждения. Наиболее слабое влияние данного фактора проявляется в системах отверстий в сферических углублениях и в траншее, а в системе отверстий в цилиндрических кратерах влияние ускорения потока проявляется более заметно. Для рассмотренных схем подачи охладителя представлены уравнения для расчета влияния ускорения потока на эффективность пленочного охлаждения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Back L.H., Cuffel R.F., Massier P.F. Laminarization of a turbulent boundary layer in nozzle flow – boundary layer and heat transfer measurements with wall cooling //

Journal of Heat Transfer. – 1970. – V.92, No3. – P.333–342.

2. Ковальногов Н.Н. Теплообмен в соплах в условиях ламинаризации потока // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т.4, №5. – С.59–64.

3. Локай В.И., Бодунов М.Н., Жуйков В.В., Щукин А.В. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.

4. Lutum E., von Wolfersdorf J., Semmler K., Naik S., Weigand B. Film cooling on a concave surface: influence of external pressure gradient on film cooling performance // Proc. of NATO/AGARD Symposium on Advanced Flow Management – Heat Transfer and Cooling in Propulsion and Power Systems. – Norway. – 2001. – 16 p. – Published in RTO-MP-069(I).

5. Launder B.E., York J. Discrete-hole cooling in the presence of free stream turbulence and strong favourable pressure gradient // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1974. – V.17, No 11. – P. 1403–1409.

6. Teekaram A.J.H., Forth C.J.P., Jones T.V. Film cooling in the presence of mainstream pressure gradients // Journal of Turbomachinery. – 1991. – V.113, №3. – P. 484–492.

7. Qin Y., Ren J., Jiang H. Effects of streamwise pressure gradient and convex curvature on film cooling effectiveness // Proceedings of ASME Turbo Expo2014. – Paper GT2014–25808. – P. V05BT13A027; 10 pages. doi: 10.1115 / GT2014–25808.

8. York W.D., J.H. Leylek. Numerical prediction of mainstream pressure gradient effects in film cooling // Proceedings of ASME Turbo Expo–1999. – Paper No 99–GT–166. – 9 p. P. V003T01A046; 9 pages, doi:10.1115/99-GT-166.

9. Coletti F. Elkins C.J., Eaton J.K. Three-dimensional velocity measurements of film cooling flow under favorable pressure gradient // Proceedings of ASME Turbo Expo–2012. – Paper No GT2012-69402. – V.4. – P.1627–1638. doi:10.1115/GT2012–69402.

10. Hartnett J.P., Birkebak R.G., Eckert E.R.G. Velocity distributions, temperature distributions effective-ness and heat transfer in cooling of a surface with a pressure gradient // International Development in Heat Transfer. – Trans. ASME, sec. A. – 1961. – Part 4. – P. 682–689.

11. Халатов А.А., Авраменко А.А., Борисов И.И. Газовая завеса на выпуклой поверхности с внешней турбулентностью и отрицательным градиентом давления // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29, №1. – С.101–107.

12. Schmidt D.L., Bogard D.G. Pressure gradient effects on film cooling // Proceedings of ASME Turbo Expo–1995. – V. 4. – Paper No 95–GT–018. – P. V004T09A018. 8 pages, doi:10.1115/95-GT-018.

13. Lutum E. Wolfersdorf J., Semmler K., Dittmar J., Weigand B. An experimental investigation of film cooling on a convex surface subjected to favorable pressure gradient flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2001. – V. 44. – P.939–951.

14. Bunker R.S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology // Journal of Heat Transfer. –2005.– V.127, No 4. – P.441–453.

15. Халатов А.А., Борисов И.И., Коваленко А.С., Дашевский Ю.Я. Шевцов С.В. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в кратерах при ускорении внешнего потока // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №3/12(63). – С.54–58.

16. Халатов А.А., Борисов И.И., Коваленко А.С., Дашевский Ю.Я. Шевцов С.В. Пленочное охлаждение плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т.20, №6. – С.731–737.

17. Халатов А.А., Борисов И.И., Безлюдная М.В., Панченко Н.А., Дашевский Ю.Я. Перспективные способы пленочного охлаждения: влияние ускорения внешнего потока // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – 15(1124). – С.56–62.

## ADVANCED FILM COOLING SCHEMES: EFFECT OF FLOW ACCELERATION

Khalatov A.A.<sup>1</sup>, Borisov I.I.<sup>1</sup>, Dashevskyy Y.J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, 2a Zhelyabov str., Kyiv, 03680, Ukraine

<sup>2</sup> Gas Turbine Research & Production Complex «Zorya» – «Mashproekt», 42a prosp, Bogoyavlensky, Mykolaiv City, 54018, Ukraine

A comparative analysis of the flow acceleration influence on the adiabatic efficiency of film cooling for different cooling techniques is carried out. Both conventional and perspective schemes are considered – with coolant supply into shallow indentations of different shape – cylindrical craters, span-wise trench, and semispherical segments. The analysis showed the different effect of flow acceleration on the efficiency for these schemes. For the tangential slot the flow acceleration decreases efficiency. For a coolant injection throw a single-row of inclined cylindrical holes, this factor increases the film cooling efficiency at the initial area of cooled surface, while reduces it on the main region. For the shaped holes, the flow acceleration reduces the film cooling efficiency, but less than for the inclined cylindrical holes. For a coolant injection through holes located in indentations, the flow acceleration reduces film cooling efficiency. The lowest influence of this factor occurs for schemes of holes in spherical dimples and in the trench. For holes in the cylindrical craters, the flow acceleration effect looks greater. For different film cooling schemes, the correlations are presented for prediction of the flow acceleration effect on film cooling efficiency.

References 17, figures. 3.

**Key words:** Film cooling, adiabatic efficiency, flow acceleration.

1. Back L.H., Cuffel R.F., Massier P.F. Laminarization of a turbulent boundary layer in nozzle flow – boundary layer and heat transfer measurements with wall cooling. *Journal of Heat Transfer*. 1970. V.92, No 3. P.333–342.

2. Kovalnogov N.N. Teploobmen v soplach v usloviyach laminarizatsii potoka. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 1982. V.4, №5. P.59–64. (Rus.)

3. Lokai V.I., Bodunov V.I., Zhuikov V.V., Schukin A.V. Teploperedacha v ochlazhdaemykh detalyakh gazoturbinnykh dvigateley letatelnykh apparatov. M.: Mashinostroyanie, 1985. 216 p. (Rus.)

4. Lutum E., von Wolfersdorf J., Semmler K., Naik S., Weigand B. Film cooling on a concave surface: influence of external pressure gradient on film cooling performance. *Proc. of NATO/AGARD Symposium on Advanced Flow Management. Heat Transfer and Cooling in Propulsion and Power Systems*. Norway. 2001. 16 p. Published in RTO-MP-069(I).

5. Launder B.E., York J. Discrete-hole cooling in the presence of free stream turbulence and strong favourable pressure gradient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974. V.17, No 11. P. 1403–1409.

6. Teekaram A.J.H., Forth C.J.P., Jones T.V. Film

cooling in the presence of mainstream pressure gradients. *Journal of Turbomachinery*. 1991. V.113, №3. P. 484–492.

7. Qin Y., Ren J., Jiang H. Effects of streamwise pressure gradient and convex curvature on film cooling effectiveness. *Proceedings of ASME Turbo Expo2014*. Paper GT2014–25808. P. V05BT13A027; 10 pages. doi: 10.1115 / GT2014–25808.

8. York W.D., J.H. Leylek. Numerical prediction of mainstream pressure gradient effects in film cooling. *Proceedings of ASME Turbo Expo-1999*. – Paper No 99–GT–166. 9 p. P. V003T01A046; 9 pages, doi:10.1115/99-GT-166.

9. Coletti F., Elkins C.J., Eaton J.K. Three-dimensional velocity measurements of film cooling flow under favorable pressure gradient. *Proceedings of ASME Turbo Expo-2012*. Paper No GT2012-69402. V.4. P.1627–1638. doi:10.1115/GT2012–69402.

10. Hartnett J.P., Birkebak R.G., Eckert E.R.G. Velocity distributions, temperature distributions effectiveness and heat transfer in cooling of a surface with a pressure gradient. *International Development in Heat Transfer*. Trans. ASME, sec. A. 1961. Part 4. P. 682–689.

11. Khalatov A., Avramenko A., Borisov I. Gas screen for a convex surface with external turbulence and a negative pressure gradient. *High temperature*. Vol. 29, No 1, P.96–102.

12. Schmidt D.L., Bogard D.G. Pressure gradient effects on film cooling. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 1995. V. 4. Paper No 95–GT–018. P. V004T09A018. 8 pages, doi:10.1115/95-GT-018.

13. Lutum E., Wolfersdorf J., Semmler K., Dittmar J., Weigand B. An experimental investigation of film cooling on a convex surface subjected to favorable pressure gradient flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. V. 44. P.939–951.

14. Bunker R.S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology. *Journal of Heat Transfer*. 2005. V.127, No 4. P.441–453.

15. Khalatov A.A., Borisov I.I., Dashevskyy Yu.Ya., Kovalenko A.S., Shevtsov S.V. Effektivnost plnochnogo ochlazhdeniya ploskoi poverchnosti odnoryadnoi sistemoi naklonnykh otverstiy v kraterach pri uskorenii vneshnego potoka. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. №3/12(63). P.54–58. (Rus.)

16. Khalatov A.A., Borisov I.I., Dashevskyy Yu.Ya., Kovalenko A.S., Shevtsov S.V. Flat plate film cooling from a single-row inclined holes embedded in a trench: effect of external turbulence and flow acceleration. *Thermophysics and aeromechanics*. 2013. V.20, №6. P.713–719.

17. Khalatov A.A., Borisov I.I., Bezludnaya M.V., Panchenko N.A., Dashevskyy Yu.Ya. Perspektivnyye sposoby plnochnogo ochlazhdeniya: vliyanie uskoreniya vneshnego potoka. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2015. 15(1124). P.56–62. (Ukr.)

Отримано 09.02.2018

Received 09.02.2018