

УДК 621.45.038

Наведено результати експериментального дослідження плівкового охолодження плоскої поверхні однорядною системою похилих отворів, які розташовано в кратерах. Показано, що ефективність охолодження за допомогою даної системи значно перевищує ефективність традиційної системи похилих циліндричних отворів. Забезпечується також більш рівномірне покриття поверхні плівкою охолоджувача. Прискорення потоку приводить до зниження ефективності охолодження на 5...10%

Ключові слова: плівкове охолодження, отвори в кратерах, ефективність, прискорення потоку

Представлены результаты экспериментального исследования пленочного охлаждения плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий, расположенных в кратерах. Показано, что эффективность охлаждения с помощью данной системы значительно превышает эффективность традиционной системы наклонных цилиндрических отверстий. Обеспечивается также более равномерное покрытие поверхности пленкой охладителя. Ускорение потока приводит к снижению эффективности охлаждения на 5...10%

Ключевые слова: пленочное охлаждение, отверстия в кратерах, эффективность, ускорение потока

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРЯДНОЙ СИСТЕМОЙ НАКЛОННЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРАТЕРАХ ПРИ УСКОРЕНИИ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

А. А. Халатов

Доктор технических наук, профессор, чл.—кор. НАН Украины,
заведующий отделом*
E-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua

И. И. Борисов

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

Ю. Я. Дашевский

Кандидат технических наук, заведующий сектором
Отдел турбин

ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект»

Пр. Октябрьский, 42-а, г. Николаев, Украина, 54018

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

А. С. Коваленко

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник *

С. В. Шевцов

*Отдел высокотемпературной термогазодинамики
Институт технической теплофизики НАН Украины
ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057

E-mail: borisov@vortex.org.ua

1. Введение

Пленочное охлаждение является одним из основных способов тепловой защиты лопаток современных высокотемпературных газовых турбин. Традиционная система пленочного охлаждения поверхностей в виде совокупности дискретных наклонных отверстий цилиндрической формы, выполненных в охлаждаемой стенке, характеризуется рядом недостатков, основной из которых — низкая эффективность, особенно при $m > 1$, из-за наличия вторичных вихревых структур, разрушающих пленку и способствующих «подсосу» горячего потока к защищаемой поверхности. Для снижения

отрывных явлений и улучшения пространственной равномерности охлаждения разработаны системы с отверстиями сложного профиля — веерной («fan-shaped»), консольной и других форм [1–3]. Однако, выполнение таких отверстий, имеющих размеры менее одного миллиметра, требует специального дорогостоящего оборудования, и связано с определенными технологическими трудностями. Поэтому представляют большой практический интерес новые технические решения, не уступающих сложным (фасонным) отверстиям по эффективности охлаждения, но имеющих более простую технологию изготовления. Одним из таких решений является выпуск охладителя в мелкие поверхностные углубления в

форме «кратера» [4]. В настоящее время в литературе отсутствуют экспериментальные данные по эффективности пленочного охлаждения для таких систем при наличии ускорения потока, характерно для реальных условий эксплуатации сопловых и рабочих лопаток.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффективности пленочного охлаждения с выпуском охладителя в однорядную систему «кратеров», расположенных перед адиабатной пластиной, при наличии продольного отрицательного градиента давления основного потока. В экспериментах использовалась однорядная система наклонных отверстий. Исследование выполнено в широком диапазоне изменения параметра вдува ($m=0,5...2,5$).

2. Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа, которая работает от центробежного вентилятора ВВД-5. Внешний (основной) поток воздуха от вентилятора подавался в ресивер и далее 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, с отношением входной и выходной площадей 12:1. После рабочего участка основной воздушный поток выходил в успокоительную емкость и далее – в атмосферу. Вдуваемый (вторичный) воздух от компрессора через регулирующий вентиль, расходомер (ротаметр) и электронагреватель подавался в рабочий участок через наклонные отверстия.

Рабочий участок представляет собой плоский канал с поперечным сечением 294x34 мм, соответствующим выходному сечению сопла Витошинского. Нижняя стенка рабочего участка включает пластину из оргстекла с отверстиями вдува и адиабатную пластину из асбестоцемента ($\lambda = 0,17 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). 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 использовались два сменных профиля для формирования ускоренного потока, которые устанавливались на верхнюю стенку канала (рис. 1). Профиль №1 обеспечивал сужение сечения канала к выходу 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

$$K = \frac{v_\infty}{w_\infty^2} \frac{dw_\infty}{dx}$$

соответствовал реальным условиям течения

в межлопаточном пространстве 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 $3,5 \cdot 10^{-6}$. При расчете эффективности

охлаждения координата « X » отсчитывалась от среза углубления.

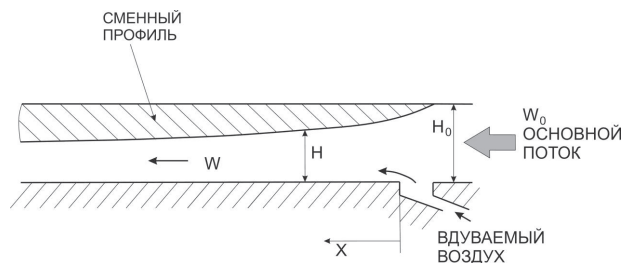


Рис. 1. Схема сужающегося экспериментального канала

Эксперименты выполнены с однорядной системой традиционных наклонных ($\alpha = 30^\circ$) цилиндрических отверстий и системой отверстий в кратерах (рис. 2). Диаметр отверстия d составлял 3,2 мм, диаметр кратера $D = 6,5 \text{ мм}$ ($\approx 2d$), поперечный шаг углублений (отверстий) $t = 10 \text{ мм}$ ($t/d \approx 3$), высота $h = 2,5 \text{ мм}$ ($h/d \approx 0,8$). Такое значение высоты было выбрано на основании данных работы [4], согласно которым значение $h/d \approx 0,75$ является оптимальным.

Для исследования эффективности пленочного охлаждения выбрано обратное направление теплового потока: основной поток – холодный, а охладитель – нагретый. В экспериментах измерялись скоростной напор основного потока, статическое давление на верхней стенке канала, температура основного потока, температура вдуваемого потока, расход вдуваемого потока, температура адиабатной поверхности в различных точках по длине пластины. Скоростной напор в основном потоке определялся с помощью трубки Пито-Прандтля и дифманометров. Для измерения статического давления применялись водяные дифманометры.

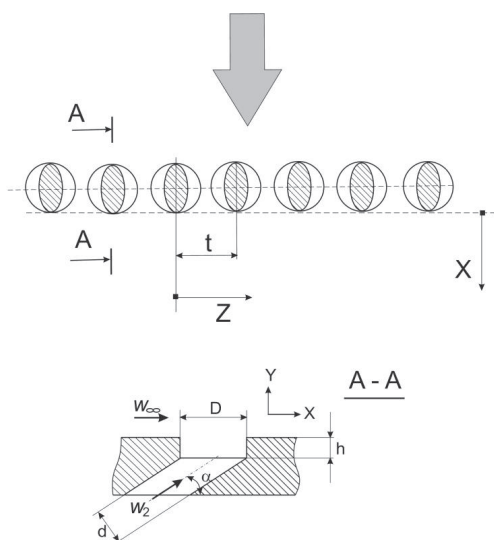


Рис. 2. Схема однорядной системы отверстий в кратерах

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока составляла 35...37 м/с, температура основного потока воздуха изменялась от 15 до 20 °С, вдуваемого – от 60 до 80 °С; отношение плотностей вдуваемого и основного потока составляло

0,85...0,9; 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 формпараметра пограничного слоя составляло величину около 1,4).

3. Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 3 показано продольное распределение эффективности пленочного охлаждения для однорядных систем отверстий и отверстий в кратерах, полученные в настоящих экспериментах, а также зависимости из работы [4] для аналогичной системы кратеров. Как видно из рисунка, данные настоящего исследования достаточно хорошо коррелируют с данными [4] при $1 < m < 2$, а при малом параметре вдува ($m = 0,5$) эффективность системы цилиндрических отверстий и системы отверстий в кратерах, по данным настоящего исследования, примерно совпадает, что не согласуется с данными работы [4].

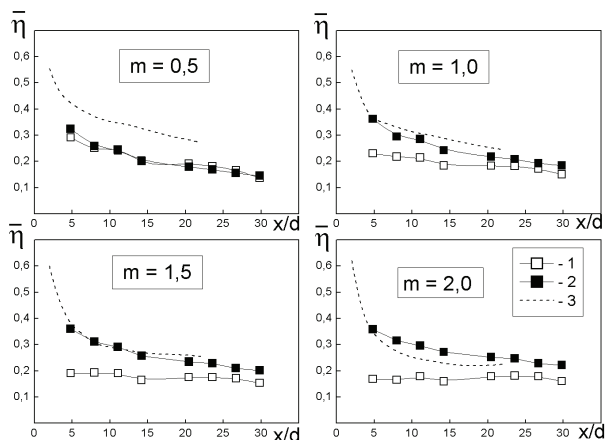


Рис. 3. Средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения при различных параметрах вдува, безградиентное течение, относительный шаг расположения отверстий $t/d = 3$. 1, 2 – данные настоящей работы, соответственно один ряд отверстий и один ряд отверстий в кратерах, $h/d = 0,8$; 3 – один ряд отверстий в кратерах [4], при $h/d = 0,5$

Можно отметить, что результаты [4] противоречат данным работы [5], в которой при малых значениях параметра вдува эффективность охлаждения для однорядных систем отверстий и отверстий в кратерах примерно одинакова.

На рис. 4 приведено продольное распределение отношения средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения однорядной системы цилиндрических отверстий в кратерах и без кратеров при различных параметрах вдува. Как видно из рисунка, по длине пластины данное отношение убывает. Использование кратеров позволяет повысить эффективность охлаждения на начальном участке в полтора –

два раза. С увеличением параметра вдува величина отношения $\frac{\bar{\eta}_{\text{крат}}}{\bar{\eta}_{\text{отв}}}$ возрастает, однако темп данного роста снижается по мере увеличения m .

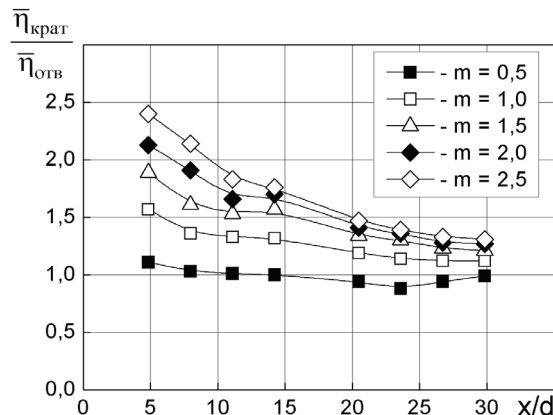


Рис. 4. Продольное распределение отношения средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения однорядной системы отверстий в кратерах и отверстий без кратеров при различных параметрах вдува

На рис. 5 показано поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения для $m = 1$ при $x/d = 4,84$ (первая измерительная точка) и $x/d = 20,47$. Как видно из рисунка, на начальном участке для системы отверстий в кратерах распределение значительно более равномерное, что объясняется ударом вдуваемого потока о кромку кратера и распространением охладителя поперек защищаемой поверхности [4]. При удалении от сечения вдува распределение становится практически равномерным для обеих исследованных конфигураций (системы отверстий и системы отверстий в кратерах).

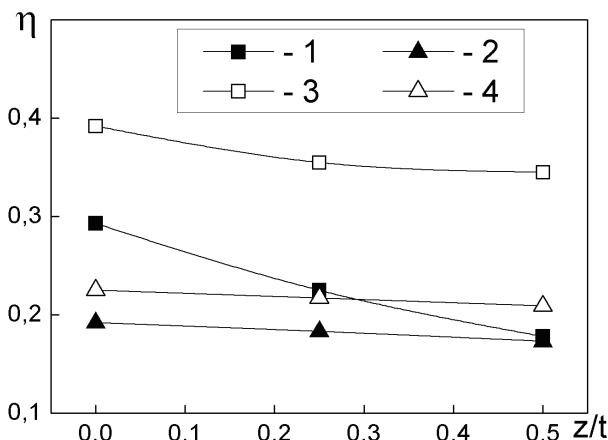


Рис. 5. Поперечное распределение эффективности охлаждения при $m = 1$. 1, 2 – однорядная система цилиндрических отверстий; 3, 4 – однорядная система отверстий в кратерах; 1, 3 – $x/d = 4,84$ (первая измерительная точка); 2, 4 – $x/d = 20,47$

На рис. 6 показано влияние продольного отрицательного градиента давления в виде отношения эффективности пленочного охлаждения для ускоренного и безградиентного потоков при различных параметрах вдува. Как видно из рисунка, при $m = 0,5$ установка профиля №1 практически не влияет на эффективность, а при использовании профиля №2 эффективность падает примерно на 5%. При больших параметрах вдува эффективность снижается до 10%, но на начальном участке продольный градиент давления незначительно повышает эффективность. Такое повышение эффективности авторы [6] объясняют изменением траектории струй, уменьшением их отделения от поверхности, что в результате улучшает поперечное распределение охладителя.

На рис. 7 представлена зависимость отношения средней по ширине пластины эффективности для ускоренного и безградиентного течений от относительной скорости основного потока для различных параметров вдува ($0,5 < m < 2$). С точностью $\pm 10\%$ эту зависимость можно представить в виде степенного соотношения:

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{w}{w_0} \right)^{-0,25} \quad (1)$$

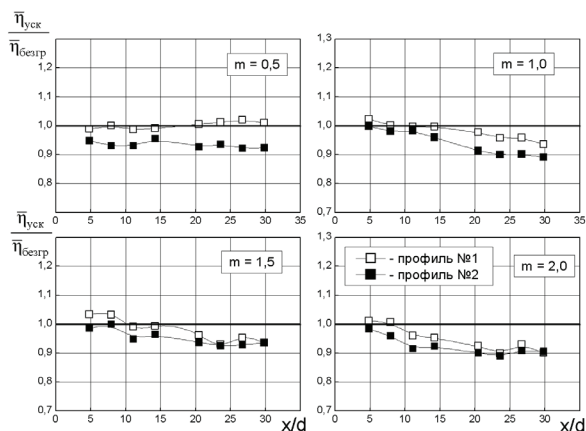


Рис. 6. Отношение эффективности пленочного охлаждения для ускоренного и безградиентного потоков для однорядной системы отверстий в кратерах при различных параметрах вдува

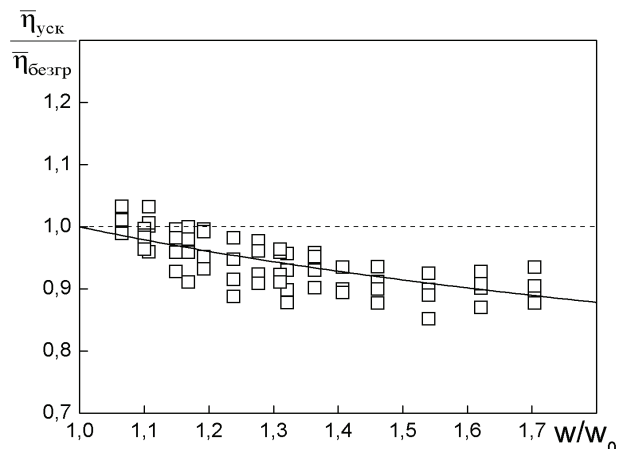


Рис. 7. Отношение средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения ускоренного и безградиентного потоков от относительной скорости основного потока. Линия – зависимость (1)

4. Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что эффективность пленочного охлаждения однорядной системы кратеров превышает эффективность системы стандартных наклонных цилиндрических отверстий при параметре вдува $m \geq 1$, причем при

$x/d \approx 5$ значение $\frac{\eta_{\text{крат}}}{\eta_{\text{отв}}}$ составляет 1,5...2, а при удалении

от сечения вдува снижается до 1,1...1,3 при $x/d \approx 30$. Поперечное распределение охладителя для системы отверстий в кратерах более равномерное, чем для системы отверстий без кратеров.

Отрицательный продольный градиент давления в диапазоне изменения параметра ускорения $0,5 \cdot 10^{-6} < K < 3,5 \cdot 10^{-6}$ для однорядной системы отверстий в кратерах снижает эффективность пленочного охлаждения до 10% в зависимости от приведенной скорости потока.

Литература

1. Goldstein, R.J. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling [Текст]/ R.J. Goldstein, E.R.G. Eckert // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1974. – v.17, №5. – P.595–607.
2. Colban, W.F. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface [Текст]/W.F. Colban, K.A. Thole, D.A. Bogard // ASME Paper GT2008–50121. – 15 p.
3. Leedom, D.H. Large eddy simulations of film cooling flow fields from cylindrical and shaped holes [Текст]/ D.H. Leedom, S. Acharya // ASME Paper GT2008–51009. – 13 p.
4. Lu, Y. Film Cooling Measurements for Cratered Cylindrical Inclined Holes [Текст]/ Y. Lu, A. Dhungel, S.V. Ekkad, R.S. Bunker // ASME Paper GT2007–27386. – 10 p.
5. Dorrington, J.R. Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions [Текст]/ J.R. Dorrington, D.G. Bogard, R.S. Bunker// ASME Paper GT2007–27992. – 10 p.
6. Lutum, E. Weigand B. An experimental investigation of fillm cooling on a convex surface subjected to favourable pressure gradient flow [Текст]/ E. Lutum, J. Wolfersdorf, K. Semmler, J. Dittmar, B. Weigand// Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2001. – vol. 44. – pp. 939–951.