

УДК 621.45.038

Халатов А.А.,¹ Борисов И.И.,¹ Коваленко А.С.,¹ Дашевский Ю.Я.,² Шевцов С.В.¹¹ Институт технической теплофизики НАН Украины² ГП НПКГ «Зоря» Машипроект»

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМОЙ НАКЛОННЫХ ОТВЕРСТИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЯХ

Наведено результати експериментального дослідження ефективності плівкового охолодження за допомогою похилих отворів, які розташовано в сферичних заглибинах.

Представлены результаты экспериментального исследования эффективности пленочного охлаждения с помощью наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях.

The results are given towards the experimental study of film cooling efficiency by means of inclined holes arranged in spherical indentations.

D – диаметр проекции сферического углубления на плоскость;

d – диаметр отверстия вдува;

d_e – эквивалентный диаметр канала;

h – высота сферического углубления,

$m = \rho_2 w_2 / (\rho_\infty w_\infty)$ – параметр вдува;

T – температура;

t – поперечный шаг расположения отверстий;

t_1 – продольный шаг расположения углублений;

w – скорость;

x – продольная координата;

y – координата по высоте канала, перпендикулярная поверхности охлаждения;

z – координата по ширине канала;

α – угол наклона отверстия к поверхности

охлаждения;

δ – толщина пограничного слоя;

$\eta = (T_{aw} - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$ – эффективность пленочного охлаждения;

ρ – плотность;

ν – кинематическая вязкость;

$Re_d = w_\infty d_e / \nu$ – число Рейнольдса.

Нижние индексы:

aw – параметры на адиабатической стенке;

d – параметр, определенный по эквивалентному диаметру канала;

∞ – параметры основного потока;

2 – параметры вдуваемого потока.

Верхние индексы:

– – среднее значение.

Введение

Пленочная система остается основным методом охлаждения внешних поверхностей лопаток газовых турбин и элементов высокотемпературных энергетических установок. В высокотемпературных газовых турбинах с ростом входной температуры потребный расход охладителя существенно возрастает, и при достижении определенной температуры термодинамические и газодинамические потери за счет охлаждения могут превысить его полезный эффект. В связи с этим в последние годы снижение расхода охладителя стало главной проблемой пленочного охлаждения.

Традиционная система пленочного охлаждения в форме системы дискретных наклонных отверстий цилиндрической формы, выполненных в охлаждаемой стенке, характеризуется отрывом охладителя при больших параметрах вдува (до 2,5...3), характерных для высокотемпературных условий, а также резким возрастанием негативной роли вторичных вихревых структур («kidney vortex»), снижающих эффективность пленочного охлаждения за счет переноса горячего потока к защищаемой поверхности.

В новых технических решениях для снижения отрывных явлений и улучшения про-

странственной равномерности охлаждения предложено использовать отверстия сложного профиля. Уже первые исследования показали, что отверстия конфузорного и конфузорно-диффузорного типа («double-fan-shaped») позволяют существенно повысить эффективность пленочного охлаждения поверхности и снизить его поперечную неравномерность. В дальнейшем было показано, что наилучший результат по эффективности пленочного охлаждения демонстрируют фасонные отверстия с поперечным расширением сечения в области выхода охладителя на поверхность («веерные», «консольные» [1–3]).

Однако выполнение отверстий сложного профиля в стенке лопатки связано с большими технологическими трудностями. В связи с этим большой интерес представляет поиск технических решений, не уступающих сложным (фасонным) отверстиям по эффективности охлаждения, но имеющих более простую технологию изготовления. Одним из таких решений является выпуск охладителя в поверхностные углубления в форме двумерной «траншеи» [4], «кратера» [5] или сферы [6, 7].

В сферическом углублении при выполнении некоторых режимных и геометрических условий возникает нестационарный («смерчеобразный») вихрь, который способствует осцилляции потока и охлаждающей струи в угловом направлении и ее растеканию внутри углубления [8]. Это позволяет обеспечить более равномерное покрытие охлаждаемой поверхности, снизить расход охладителя и ликвидировать отрыв потока при больших параметрах вдува. Концептуальные исследования однорядной системы наклонных отверстий в сферических углублениях показали, что при малых ($m \approx 0,5$) параметрах вдува эффективность осциллирующего пленочного охлаждения в 1,5...2 раза выше, чем для стандартной конфигурации пленочного охлаждения (один ряд наклонных отверстий), причем максимальный эффект наблюдается при $x/d = 10...15$ [7].

Целью настоящей работы является дальнейшее экспериментальное исследование эффективности пленочного охлаждения с выпус-

ком охладителя в сферическое углубление. В экспериментах использовалась плоская поверхность с одно- и двухрядной системой наклонных отверстий, расположенных перед адиабатной пластиной. Исследование выполнено в широком диапазоне изменения параметра вдува ($m = 0,5...2,5$) при безградиентном обтекании плоской поверхности внешним потоком.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа, которая работает от центробежного вентилятора ВВД-5 (поз. 1). Основной поток воздуха от вентилятора через поворотный затвор 3 подается в ресивер 5 и далее на вход в рабочий участок 8.

В газодинамическом контуре предусмотрен сброс части потока через дополнительную магистраль с поворотным затвором 2, для обеспечения возможности изменения расхода. Равномерное по сечению поле скорости обеспечивается установкой спрямляющей сетки 4 в ресивере, профилированием сужающего канала на выходе из ресивера в форме сопла Витошинского 6, а также применением участка стабилизации 7. Входное сечение сопла составляет 400x300 мм, а выходное – 294x34 мм. Соотношение входной и выходной площадей сопла – 12:1. После рабочего участка воздух через переходник поступает в успокоительную емкость 9 и далее выбрасывается в атмосферу.

Вдуваемый (вторичный) воздух от компрессора 18 через фильтр-регулятор 17, регулирующий вентиль 16, ротаметр 15 и электронагреватель 14 подается в ресивер 13 и далее через отверстия вдува (или двумерную щель при тестовых экспериментах) поступает в рабочий участок. Электрический нагреватель запитан с помощью автотрансформатора и выпрямителя 11.

Рабочий участок представляет собой плоский канал, поперечное сечение которого идентично сечению канала за соплом Витошинского и переходником (294x34 мм). Нижняя стенка рабочего участка включает сменный

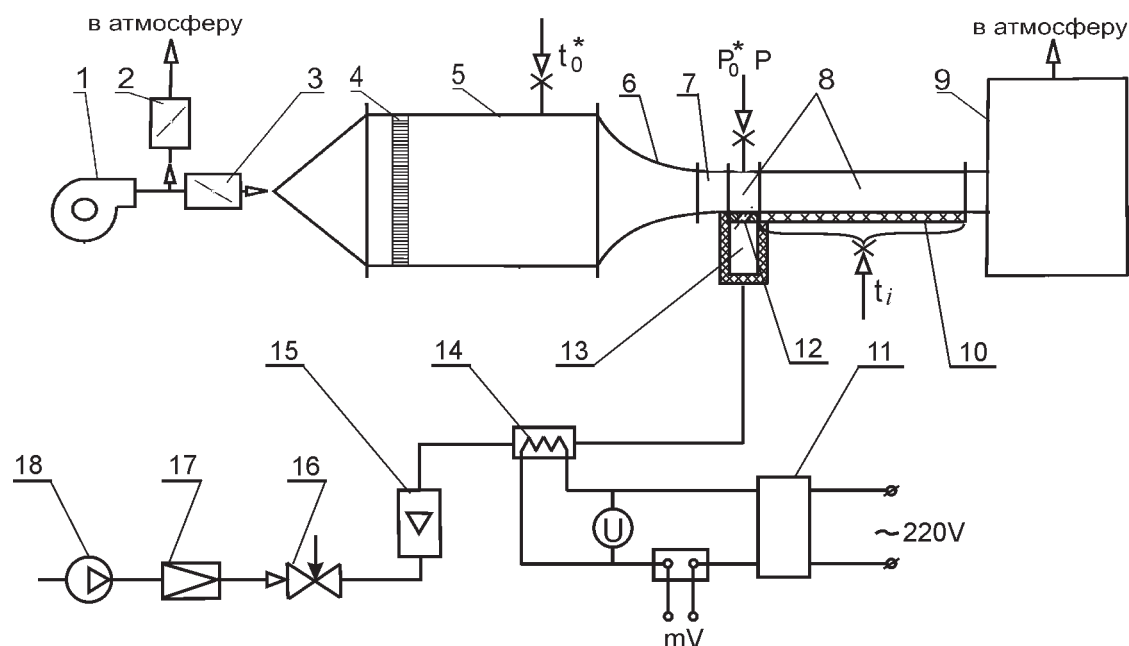


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор ВВД–5; 2, 3 – поворотные затворы; 4 – спрямляющая сетка; 5 – ресивер; 6 – сопло Витошинского; 7 – участок стабилизации; 8 – рабочий участок; 9 – успокоитель; 10 – адиабатическая пластина; 11 – источник питания; 12 – сменная пластина с отверстиями вдува; 13 – ресивер подачи вдуваемого воздуха; 14 – нагреватель; 15 – ротаметр; 16 – вентиль; 17 – фильтр-регулятор; 18 – компрессор.

участок 12, выполненный из оргстекла, с отверстиями вдува или щелью, и адиабатной пластины 10 из асбоцемента ($\lambda = 0,17$ Вт/м·К). В пластину вмонтирован ряд хромель-алюмелевых термопар, расположенных вдоль осевой линии с постоянным по длине шагом (10 мм). В установке предусмотрена возможность перемещения пластины в поперечном направлении, что позволяет определять пространственное распределение температуры адиабатной поверхности.

Основные эксперименты выполнены с двухрядной системой традиционных наклонных отверстий (рис. 2, а) и системой отверстий в сферических углублениях (рис. 2, б). Диаметр углубления D составлял 8 мм, высота h – 4 мм ($h/D = 0,5$), диаметр отверстий d – 3,2 мм, поперечный шаг углублений (отверстий) t – 16 мм ($t/d = 5$), а продольный t_1 – 8 мм ($t_1/d = 2,5$). Нижняя линия проекции отверстия на плоскость XU проходила через край углубления, угол α наклона осей отверстий к поверхности пластины

был постоянным и составлял 30° . Дополнительные эксперименты выполнены с однорядной системой, для этого отверстия и углубления первого ряда (вверх по потоку) замазывались акриловой шпаклевкой. Тестовые эксперименты проводились со сплошной щелью шириной 3 мм.

Расстояние « x » отсчитывалось от «среза» углубления второго ряда (для конфигурации с углублениями), либо от среза отверстия (для конфигурации отверстий без углублений).

Методика проведения измерений

Для исследования эффективности пленочного охлаждения выбрано обратное направление теплового потока: основной поток – холодный, а охладитель – горячий. В экспериментах измерялись скоростной напор основного потока, статическое давление на верхней стенке канала, температура основного потока, температура вдуваемого потока, расход вдуваемого потока, температура адиабатной

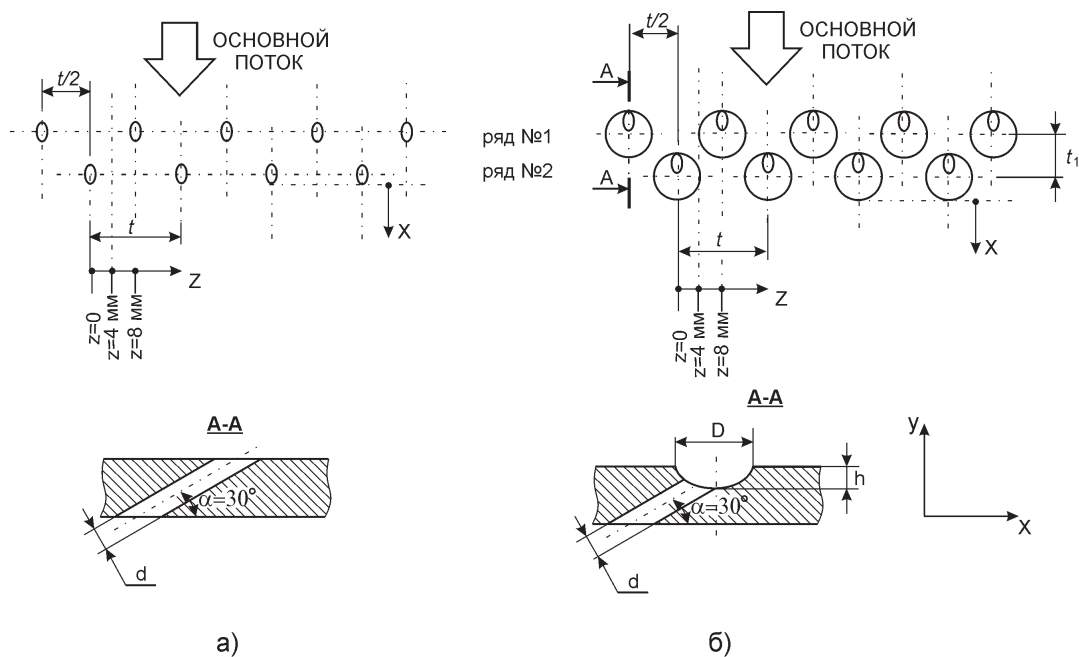


Рис. 2. Схема пленочного охлаждения с помощью двухрядной системы цилиндрических отверстий:
а – традиционная схема, б – отверстия в сферических углублениях.

поверхности в девяти точках по длине пластины с шагом 10 мм. Скоростной напор в основном потоке определялся с помощью трубки Пито-Прандтля и дифманометров. Для измерения статического давления также применялись водяные дифманометры.

Температура исследуемой поверхности, основного и вдуваемого потока определялась хромель-алюмелевыми термопарами. Для определения температуры вдуваемого потока термопара помещалась в отверстие вдува одного из отверстий непосредственно перед выходом вторичного потока наружу. Сигнал от термопар через коммутатор измерительных сигналов Ф799/1 подавался к цифровому вольтметру. Для определения профиля скорости в пристенном слое проводились измерения скоростного напора с помощью микрозонда, который перемещался микрометрическим винтом.

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока в тестовых экспериментах изменялась от 8 до 37 м/с, в основных экспериментах она составляла 33...34 м/с. Скорость основного потока в основных экспериментах выбиралась из расчета гаран-

тированного обеспечения режима осциллирующего вихря в сферическом углублении [8]. Температура основного потока воздуха изменялась от 15 до 20°C, вдуваемого – от 50 до 70°C; отношение плотностей вдуваемого и основного потока составляло 0,85...0,9; параметр вдува t изменялся от 0,5 до 2,5; число Рейнольдса Re_d по эквивалентному диаметру канала и скорости основного потока было постоянным и составляло $1,25 \cdot 10^5$.

Тестовые эксперименты

Для определения характера пограничного слоя на входе в рабочий участок проводились предварительные эксперименты по измерению профиля скорости основного потока в пристенном слое перед отверстиями подачи вторичного воздуха. Результаты измерения при скорости $w_\infty = 29,5$ м/с приведены на рис. 3. Для данных условий пограничный слой оказался близким к турбулентному (формпараметр пограничного слоя H около 1,5). Таким образом, основные эксперименты (скорость 33...34 м/с) выполнены при турбулентном режиме течения на входе в рабочий участок.

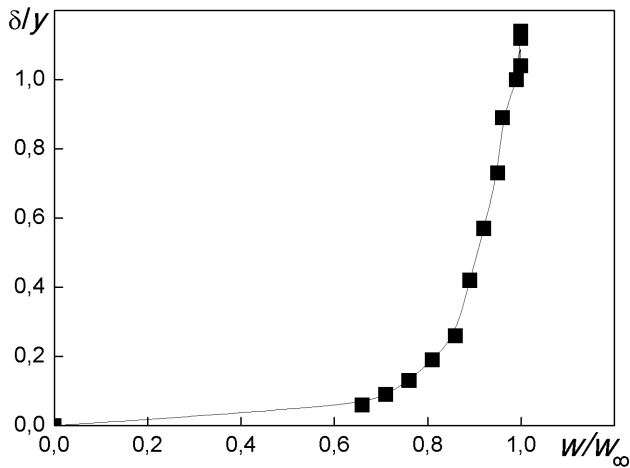


Рис. 3. Пограничный слой перед сечением подачи вторичного потока: $Re_a = 1,4 \cdot 10^5$.

Далее были проведены тестовые эксперименты по эффективности пленочного охлаждения при безградиентном обтекании плоской поверхности и подаче вторичного воздуха через нормальную щель шириной 3 мм. Полученные результаты сравнивались с данными, приведенными в работе [9] (рис. 4), которые характеризуются высокой надежностью. Как видно из рисунка, отличие полученных данных от расчетного уравнения [9] не превышает $\pm 20\%$, что является приемлемым результатом.

Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 5 показано продольное распределение средней по ширине адиабатической пластины эффективности пленочного охлаждения для двухрядной системы традиционных наклонных отверстий и отверстий в углублениях. Как видно из рисунка, эффективность охлаждения для схемы с отверстиями в углублениях существенно (при больших параметрах вдува на начальном участке в 2 раза) превышает эффективность для схемы наклонных отверстий без углублений. Это происходит потому, что сразу после выхода из отверстия вторичная струя «размывается», поперечное распределение охладителя в углублении снижает его скорость, и даже при больших параметрах вдува не происходит отрыва потока от поверхности. Аналогичная карти-

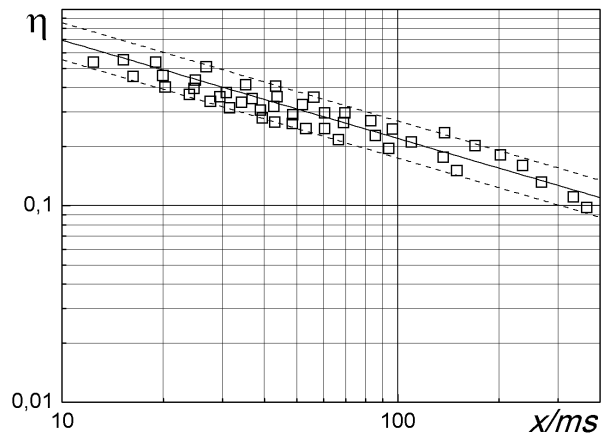


Рис. 4. Эффективность пленочного охлаждения плоской пластины (нормальная щель на входе). Точки – данные настоящей работы; линия – уравнение [9].

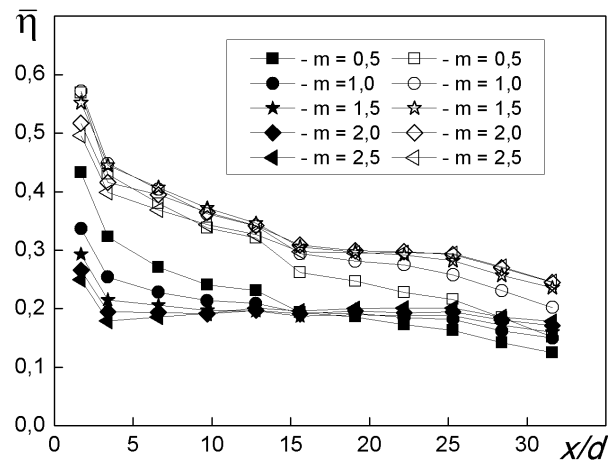


Рис. 5. Средняя по ширине эффективность пленочного охлаждения для двухрядной системы отверстий. Заполненные символы – система наклонных отверстий; пустые символы – наклонные отверстия в сферических углублениях.

на наблюдается и в однорядной системе углублений (рис. 6), однако в этом случае значение эффективности пленочного охлаждения существенно ниже, чем для двухрядной.

На рис. 7 показано распределение эффективности пленочного охлаждения поперек пластины при различных значениях x/d для двухрядной системы отверстий и системы отверстий в углублениях. Как видно из рисунка,

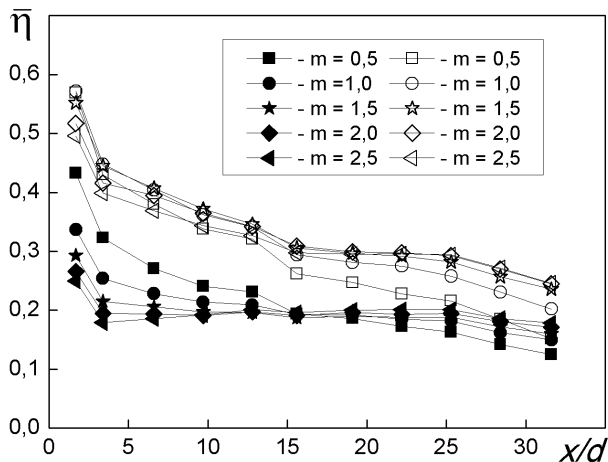


Рис. 6. Средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения пластины для однорядной системы отверстий. Заполненные символы – система наклонных отверстий; открытые пустые – наклонные отверстия в сферических углублениях.

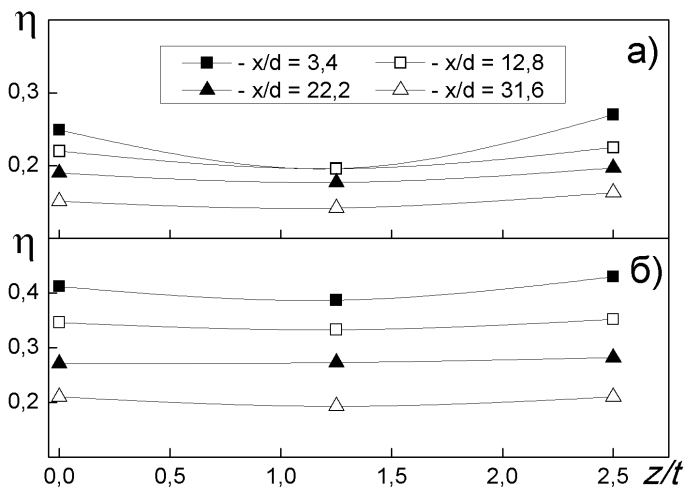


Рис. 7. Поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения пластины. Параметр вдува $m = 1,0$. Система двухрядных отверстий (а) и отверстий в сферических углублениях (б).

для системы отверстий в углублениях поперечное распределение эффективности охлаждения более равномерное, особенно на начальном участке ($x/d = 3,4$). Это подтверждает тот факт, что в сферическом углублении происходит распределение охладителя по ширине

осциллирующим вихрем, что обеспечивает лучшее покрытие поверхности.

На рис. 8 показана зависимость эффективности пленочного охлаждения на линии, проходящей через центр сферического углубления ($z = 0$, рис. 2), от параметра вдува для однорядной и двухрядной конфигураций углублений с отверстиями. Как видно из рисунка, для однорядной конфигурации при $x/d = 1,7$ зависимость имеет максимум при $m \approx 0,9$ и при дальнейшем увеличении продольной координаты эффективность слабо изменяется с ростом параметра вдува. Для двухрядной конфигурации углублений с отверстиями на начальном участке имеет место расслоение опытных данных (примерно на 30 %), что может свидетельствовать о неустойчивости, вызванной влиянием первого ряда, поскольку в однорядной системе этого расслоения нет. В дальнейшем это расслоение исчезает, и кривые становятся плавными, с максимумом при $m \approx 1,0 \dots 1,5$.

На рис. 9 показана зависимость средней по ширине эффективности пленочного охлаждения от параметра вдува для традиционной двухрядной системы отверстий и системы отверстий в сферических углублениях. Как

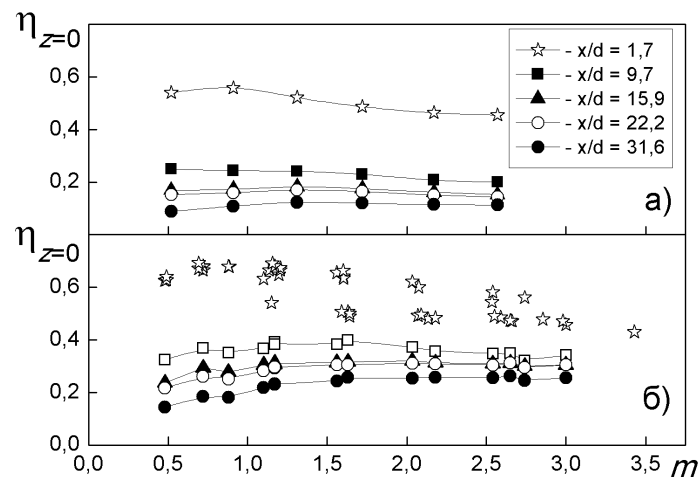


Рис. 8. Эффективность пленочного охлаждения на линии, проходящей через центр отверстия. Отверстия в сферическом углублении: однорядная (а) и двухрядная (б) схемы.

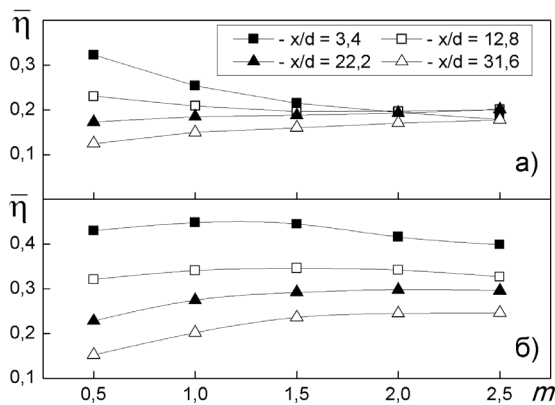


Рис. 9. Средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения пластины для системы двухрядных отверстий (а) и системы отверстий в углублениях (б).

видно из рисунка, для схемы без углублений по мере увеличения продольной координаты зависимость изменяется от возрастающей до убывающей, а для конфигурации с отверстиями в углублениях на начальном участке зависимость имеет максимум при $m \approx 1,5$, но затем она становится более полой и при дальнейшем увеличении координаты « x » имеет возрастающий характер.

На рис. 10 показано сравнение эффективности охлаждения для системы одно- и двухрядных отверстий в углублениях и без них. Как видно из рисунка, для однорядной конфигурации эффективность пленочного охлаждения возрастает по длине пластины при увеличении параметра вдува. Для двухрядной конфигурации наибольший эффект (порядка 2) достигается на начальном участке при $m > 1,5$; при дальнейшем увеличении продольной координаты величина отношения $\eta_{\text{л}}/\eta_{\text{отв}}$ изменяется слабо и при $m > 1,5$ составляет 1,3...1,6.

На рис. 11 показано сравнение исследованных вариантов пленочного охлаждения с отверстиями в сферических углублениях с рассмотренными выше перспективными способами пленочного охлаждения. Как видно из рисунка, однорядная схема по величине эффективности близка к траншейному способу охлаждения, а двухрядная – к профилирован-

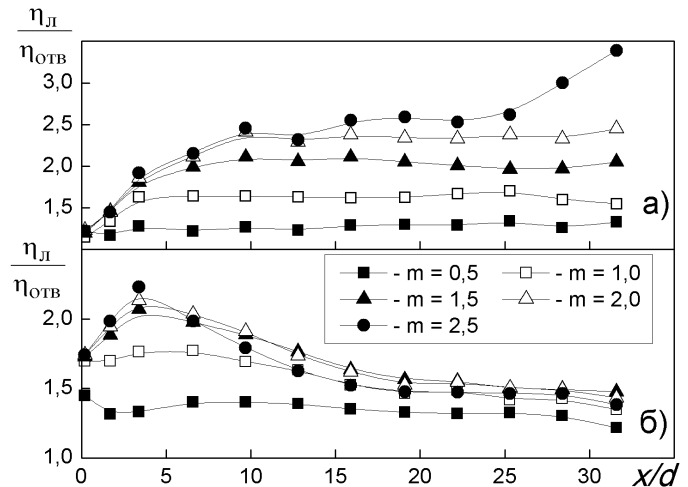


Рис. 10. Отношение эффективности пленочного охлаждения для отверстий в углублениях и без углублений. а, б – однорядная и двухрядная системы.

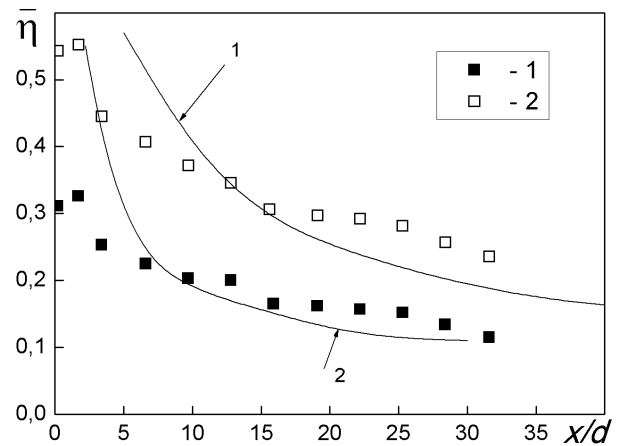


Рис. 11. Средняя по ширине эффективность пленочного охлаждения пластины при $m = 1,5$. Символы – данные настоящей работы для системы отверстий в углублениях: 1, 2 – соответственно однорядная и двухрядная конфигурации. Линии: 1 – отверстия «веерной» формы с расширением в вертикальной плоскости [2]; 2 – траншейная конфигурация цилиндрических отверстий, относительный поперечный шаг $t/d = 3$ [10].

ным отверстиями «веерной» формы – наилучшей на сегодня схеме пленочного охлаждения с помощью наклонных отверстий. Таким об-

разом, исследованную конфигурацию можно рекомендовать для использования в практике пленочного охлаждения лопаток газовых турбин.

Выводы

- Эффективность пленочного охлаждения двухрядной системы отверстий в сферических углублениях существенно (при больших параметрах вдува на начальном участке в 2 раза) превышает эффективность традиционной схемы охлаждения с помощью системы цилиндрических отверстий без углублений. Это происходит потому, что в сферическом углублении происходит перераспределение охладителя в поперечном направлении, которое снижает его скорость, и поэтому даже при больших параметрах вдува не происходит отрыва охладителя от поверхности

- Поперечное распределение для конфигурации отверстий в углублениях более равномерное, чем для отверстий без углублений, особенно на начальном участке, что обеспечивает лучшее покрытие защищаемой поверхности охладителем.

- Однорядная система отверстий в углублениях по величине эффективности охлаждения близка к траншейному способу охлаждения, а двухрядная – к системе профилированных отверстий «веерной» формы, которая считается наиболее перспективной в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goldstein R.J., Eckert E.R.G. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1974. – Vol. 17, № 5. – P. 595–607.

2. Colban W.F., Thole K.A., Bogard D. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface // ASME Paper GT2008–50121. – 15 p.

3. Leedom D.H., Acharya S. Large eddy simulations of film cooling flow fields from cylindrical and shaped holes // ASME Paper GT2008–51009. – 13 p.

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

5. Dorrington J.R., Bogard D.G., Bunker R.S. Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions // ASME Paper GT2007-27992.– 10 p.

6. Халатов А.А., Варганов И.С., Коваленко Г.В. Спосіб плівкового охолодження та пристрій для його здійснення. Патент України № 47749.– 2004.

7. Шукин А.В., Буланов И.Ю., Ильинков А.В., Козлов А.П., Халатов А.А. Особенности тепловой завесы вдувом воздуха из сферической выемки // Изв. высш. учебн. заведений.– Сер. «Авиационная техника».– 2004.– № 4.– С. 28-31.

8. Коваленко Г.В., Халатов А.А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладная гидродинамика.– 2008.–10 (82), № 1.– С. 23–32.

9. Seban R.A., Chan H.W., Scesa S. Heat transfer to a turbulent boundary layer downstream of an injection slot // ASME Paper 57-A-36. – 1957.

10. Kusterer K., Elyas A., Bohn D., Sugimoto T., Tanaka R., Kazari M. Film cooling effectiveness comparison between shaped- and double jet film cooling holes in a row arrangement // ASME Paper GT2010-22604. – 13 p.

Получено 30.01.2012 г.