

# ПЛЕНОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХРЯДНОЙ СИСТЕМОЙ ОТВЕРСТИЙ В СФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЯХ

**А. А. Халатов**

Доктор технических наук, профессор, член-корресподент НАН Украины, заведующий отделом\*  
Контактный тел.: (044) 456-93-02  
E-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua

**И. И. Борисов**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*  
Контактный тел.: (044) 453-28-53  
E-mail: borisov@vortex.org.ua

**А. С. Коваленко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*  
Контактный тел.: (044) 453-28-53  
E-mail: kas@vortex.org.ua

**Ю. Я. Дашевский**

Кандидат технических наук, заведующий сектором  
Отдел турбин  
ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект»  
пр. Октябрьский, 42-а, г. Николаев, Украина, 54018  
Контактный тел.: (0512) 49 76 53  
E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

**С. Д. Северин**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*  
Контактный тел.: (044) 453-28-53  
E-mail: ssd@vortex.org.ua

**С. В. Шевцов**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*  
Контактный тел.: (044) 453-28-53  
E-mail: serge@vortex.org.ua

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

**М. В. Безлюдная**

Аспирант  
Кафедра физики энергетических систем  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» Физико-технический институт  
пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056  
Контактный тел.: 068-493-15-26  
E-mail: bezludnaya@gmail.com

*Наведено результати експериментального дослідження та CFD моделювання плівкового охолодження плоскої поверхні двохранною системою похилих отворів, які розташовано у сферичних заглибинах*

*Ключові слова: плівкове охолодження, отвори в сферичних заглибинах*

*Представлены результаты экспериментального исследования и CFD моделирования пленочного охлаждения плоской поверхности двухрядной системой наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях*

*Ключевые слова: пленочное охлаждение, отверстия в сферических углублениях*

*The results of experiments and CFD modelling are given on a film cooling over a flat plate by means of two rows of inclined holes located in spherical dimples*

*Key words: film cooling, holes in spherical dimples*

## Введение

При модификации систем пленочного охлаждения в виде рядов наклонных отверстий стараются

снизить влияние вторичных структур («kidney vortex»), максимально распределить охладитель в поперечном направлении, уменьшить скорость его выхода на поверхность и перемешивание с основным

поток. Для этого предлагаются различные способы: расположение отверстий под сложным углом к основному потоку, изготовление отверстий профилированной формы, парных отверстий, дополнительных анти-вихревых отверстий и др. 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 таких отверстий в стенке лопатки газовой турбины связано с технологическими трудностями, поэтому в результате дальнейшего поиска был найден ряд более простых технических решений, а именно – выпуск охладителя в поверхностные углубления различной формы – «траншеи», «кратеры» [4] или сферические сегменты [5]. В последнем случае при выполнении некоторых режимных и геометрических условий возникает нестационарный («смерчеобразный») вихрь, который способствует осцилляции потока в угловом направлении и растеканию охладителя внутри углубления [6]. Это позволяет обеспечить более равномерное покрытие охлаждаемой поверхности, снизить потребный 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  $x/d = 10...15$  [5].

**Целью настоящей работы** является экспериментальное исследование и CFD моделирование эффективности пленочного охлаждения с выпуском охладителя из наклонного отверстия в сферическое углубление. Рассматривалась двухрядная система 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 и методика проведения измерений**

Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа. Основной поток воздуха от вентилятора ВВД-5 подается в рабочий участок через поворотный затвор, ресивер со спрямляющей сеткой и сопло Витошинского со степенью сужения 12:1. Вдуваемый (вторичный) воз-

дух подается в рабочий участок через отверстия вдува от компрессора через фильтр–регулятор, регулирующий вентиль, ротаметр, электронагреватель и ресивер. Электрический нагреватель запитан с помощью автотрансформатора и выпрямителя.

Рабочий участок представляет собой плоский канал, поперечное сечение которого идентично сечению канала за соплом Витошинского (294x34 мм<sup>2</sup>). Нижняя стенка рабочего участка включает пластину из оргстекла с отверстиями вдува и адиабатную пластину из асбоцемента ( $\lambda = 0,17$  Вт/м·К), в которую 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.

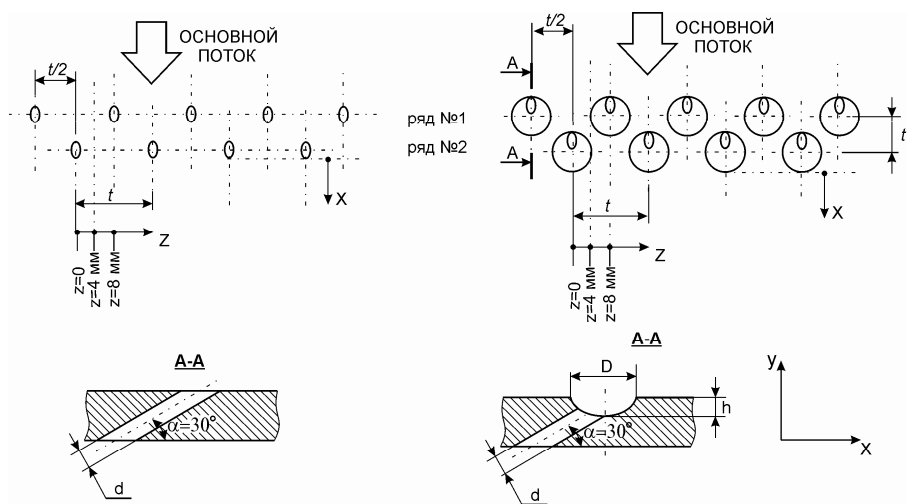


Рис. 1. Схема пленочного охлаждения с помощью двухрядной системы цилиндрических отверстий: а – традиционная схема, б – отверстия в сферических углублениях

Эксперименты выполнены с двухрядной системой традиционных наклонных отверстий и системой отверстий в сферических углублениях (рис. 1). 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  $\alpha$  наклона осей отверстий к поверхности пластины был постоянным и составлял 30°. Расстояние « $x$ » отсчитывалось от «среза» углубления второго ряда (для конфигурации с углублениями), либо от среза отверстия (для конфигурации отверстий без углублений).

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 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.

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока составляла 33...34 м/с, она выбиралась из расчета гарантированного обеспечения режима осциллирующего вихря в сферическом углублении [6]. Температура основного потока воздуха изменялась от 15 до 20<sup>0</sup>С, вдуваемого – от 50 до 70<sup>0</sup>С; отношение плотностей вдуваемого и основного потока составляло 0,85...0,9; параметр вдува  $m$  изменялся от 0,5 до 2,5; число Рейнольдса  $Re_d$  по эквивалентному диаметру канала и скорости основного потока 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  $H$  составляло величину около 1,4).

**CFD моделирование**

CFD – моделирование плёночного охлаждения плоской поверхности с подачей вторичного воздуха в сферические углубления проводилось с использованием коммерческого пакета ANSYS CFX 14.

Геометрическая 3D модель была выполнена в ANSYS De-sign Manager, причём все геометрические параметры исследованной модели соответствовали размерам рабочего участка экспериментальной установки.

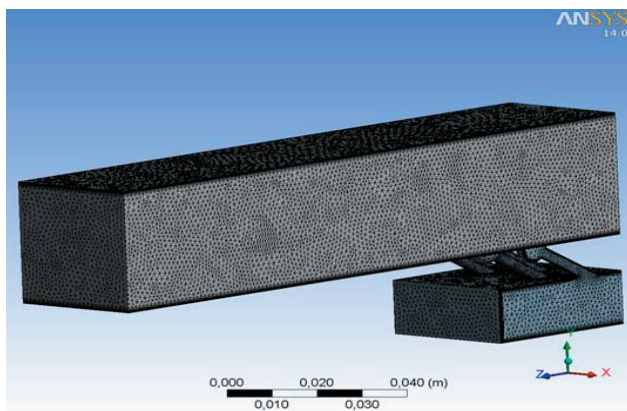


Рис. 2. Расчетная сетка

Была использована неструктурированная комбинированная расчетная сетка, построенная при помощи сеточного генератора ANSYS CFX Mesh 14 (рис. 2). Она представляет собой комбинацию тетраэдральных элементов в области основного потока с призматическими элементами в областях сгущения расчётной сетки возле твёрдых стенок, ограничивающих каналы расчётной модели. Количество тетраэдральных элементов составляло 812730, количество призматических элементов – 396330, количество узлов сетки – 353716, количество ячеек в области сгущения равнялось 15, всего было 1209060 элементов. Расчеты

проводились с использованием нескольких моделей турбулентности: двух моделей  $k-\epsilon$  группы (классическая  $k-\epsilon$  модель и RNG  $k-\epsilon$  модель), трех моделей  $k-\omega$  группы (классическая  $k-\omega$  модель, SST модель Ментера, и BSL модель базовой линии), а также более простой модели EVTE (Eddy Viscosity Transport Equation - уравнение переноса турбулентной вязкости) с одним дифференциальным уравнением в частных производных.

**Результаты экспериментов и сравнение с CFD моделированием**

На рис. 3 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.

По-видимому, основной причиной увеличения эффективности является то, 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.

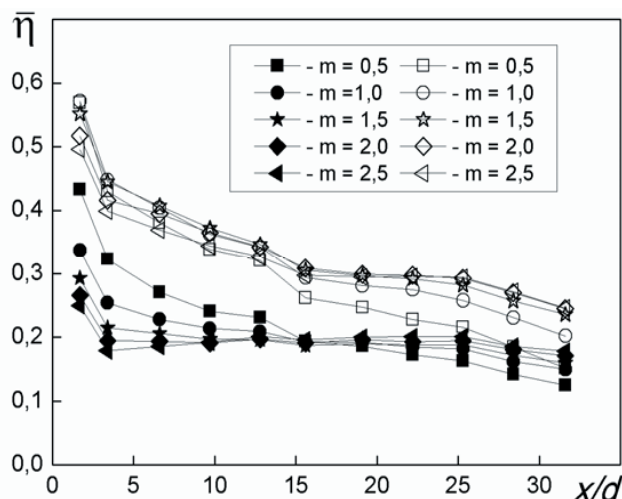


Рис. 3. Средняя по ширине эффективность пленочного охлаждения для двухрядной системы отверстий.

Закрытые символы – система наклонных отверстий; открытые символы – наклонные отверстия в сферических углублениях

Кроме того, для системы отверстий в углублениях поперечное распределение эффективности охлаждения оказалось значительно более равномерным, особенно на начальном участке. Это подтверждает тот факт, что в сферическом углублении происходит распределение охладителя по ширине осциллирующим вихрем, что обеспечивает лучшее покрытие поверхности.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по эффективности пленочного охлаждения для значения поперечной координаты  $z = 0$  (см. рис. 1) при значении параметра вдува  $m = 1$  и среднее по ширине при  $m = 2$  показано на рис. 4 и 5.

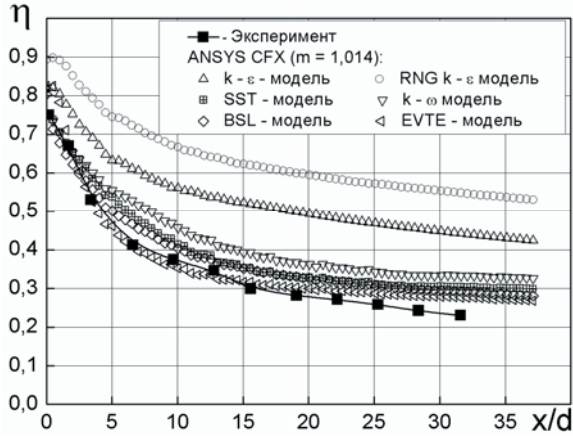


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по эффективности охлаждения при  $m = 1$  для линии, проходящей через центр отверстия второго ряда ( $z = 0$ )

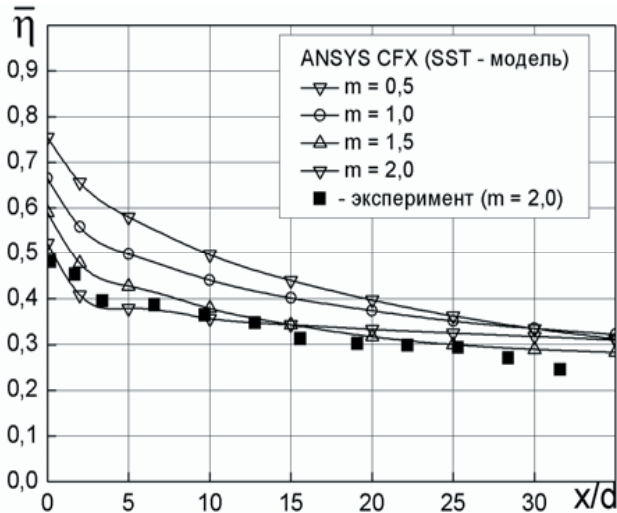


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных: средняя по ширине пластины эффективность охлаждения

Из рис. 4 и 5 видно, что наилучшее совпадение с результатами экспериментов обеспечивают классическая  $k-\omega$  – модель и SST – модель турбулентности Менгера. В диапазоне  $x/d = 2,5...25$  максимальное отклонение расчетных значений эффективности пленочного охлаждения от экспериментальных данных для этих двух моделей турбулентности не превышает 7...10%. По-видимому, согласование расчетов по SST– модели с экспериментом обусловлено тем, что данная модель учитывает перенос турбулентных напряжений трения и, как показывает опыт, обеспечивает более высокую точность при моделировании струйных и отрывных течений. Для всех выполненных расчетов пристеночное гущение расчетной сетки обеспечивало значение  $y^+ < 2$ .

Сравнение экспериментальных данных по эффективности охлаждения для системы отверстий в углублениях и без них показало (рис. 6), что наибольший эффект (порядка 2) достигается на начальном участке при  $m > 1,5$ ; при дальнейшем увеличении продольной координаты величина отношения  $\eta_L/\eta_{отв}$  изменяется слабо и при  $m > 1,5$  составляет 1,3...1,6.

На рис. 7 показано сравнение исследованных вариантов пленочного охлаждения с отверстиями в сферических углублениях с некоторыми перспективными способами пленочного охлаждения. Как видно из рисунка, двухрядная схема по величине эффективности близка к профилированным отверстиям «веерной» формы – наилучшей на сегодня схеме пленочного охлаждения с помощью наклонных отверстий.

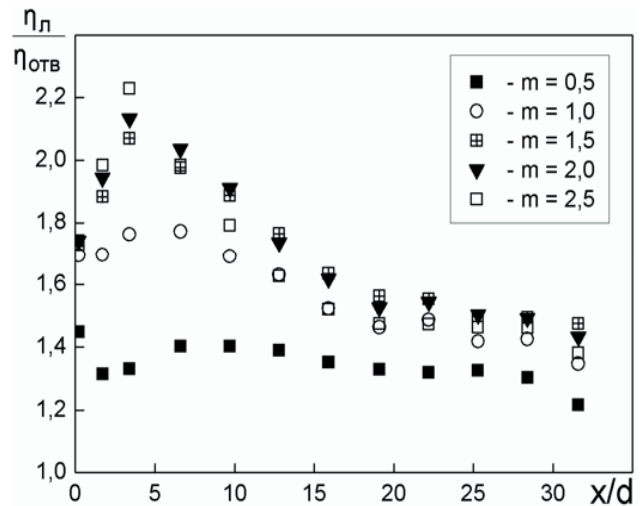


Рис. 6. Отношение эффективности пленочного охлаждения для отверстий в сферических углублениях и без них

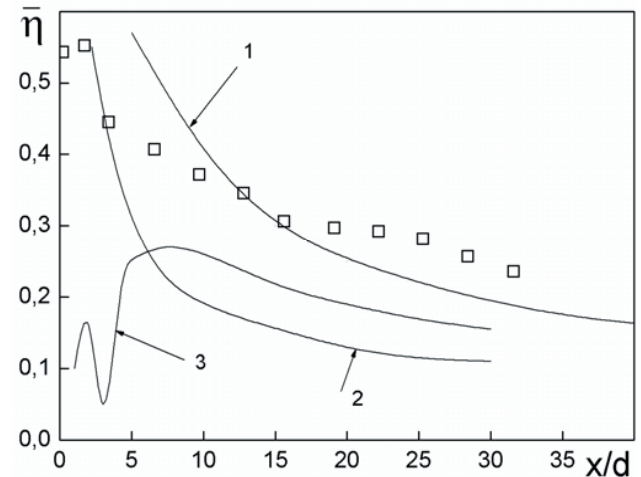


Рис. 7. Средняя по ширине эффективность пленочного охлаждения,  $m = 1,5$ . Символы – данные настоящей работы для системы отверстий в сферических углублениях. Линии: 1 – отверстия «веерной» формы с расширением в вертикальной плоскости [2].

2 – «траншейная» конфигурация цилиндрических отверстий, относительный поперечный шаг  $t/d = 3$  [7]; 3 – ряд парных отверстий, соответственно поперечный угол  $\beta = 35^\circ$  [7].

---

**Выводы**

---

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что 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. Исследованная схема пленочного охлаждения не уступает лучшим схемам с профилированными отверстиями, но характеризуется технологическими преимуществами. Ее можно рекомендовать

для использования в практике пленочного охлаждения лопаток газовых турбин и других приложений.

Результаты численного моделирования осциллирующего пленочного охлаждения хорошо согласуются с экспериментальными данными, как по локальным, так и по средним значениям адиабатной эффективности охлаждения. Наилучшее совпадение с результатами экспериментов обеспечивают классическая  $k-\omega$  – модель и SST – модель турбулентности Ментера. Полученные результаты подтверждают возможность получения адекватных результатов при использовании коммерческого пакета ANSYS CFX для моделирования задач пленочного охлаждения.

---

**Литература**

1. Goldstein R.J. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling / 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 /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/ D.H. Leedom, S. Acharya // ASME Paper GT2008–51009. – 13 p.
4. Dorrington J.R. Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions / J.R. Dorrington, D.G. Bogard, R.S. Bunker // ASME Paper GT2007–27992.– 10 p.
5. Особенности тепловой завесы вдувом воздуха из сферической выемки / А.В. Щукин, И.Ю. Буланов, А.В. Ильников, А.П. Козлов, А.А. Халатов // Изв. высш. учебн. заведений.– Сер. «Авиационная техника».– 2004.– № 4.– С. 28-31.
6. Коваленко Г.В. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов / Г.В. Коваленко, А.А. Халатов // Прикладная гидродинамика.–2008.–10 (82), №1.– С. 23–32.
7. Kusterer K. Film cooling effectiveness comparison between shaped- and double jet film cooling holes in a row arrangement / K. Kusterer, A. Elyas, D. Bohn, T. Sugimoto, R. Tanaka, M.Kazari // ASME paper GT2010-22604. – 13 p.