

УДК 629.735

А. А. ХАЛАТОВ^{1,2}, М. В. БЕЗЛЮДНАЯ^{1,2}, Ю. Я. ДАШЕВСКИЙ³, С. Д. СЕВЕРИН¹,
А. С. КОВАЛЕНКО¹¹ Отдел «Высокотемпературная термогазодинамика», Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев² Кафедра «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ» Физико-технический институт, Киев³ Сектор тепловых и гидравлических расчётов, Отдел турбин ГП НПКГ «Зоря»-«Машипроект», Николаев, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ВЫДУВЕ ОХЛАДИТЕЛЯ В СФЕРИЧЕСКИЕ УГЛУБЛЕНИЯ

Представлены сравнительные результаты компьютерного моделирования пленочного охлаждения при подаче охладителя через два ряда цилиндрических наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях и два ряда традиционных наклонных отверстий цилиндрической формы. В расчетах использованы три модели турбулентности и показано, что LRR модель напряжений Рейнольдса (RSM) показывает лучшие результаты при сравнении с экспериментальными данными. Выполнено сравнение средней эффективности пленочного охлаждения двух вышеуказанных схем, показано, что подача охладителя в сферические углубления существенно повышает эффективность пленочного охлаждения, уменьшает влияние парного вихря, формируемого в струе охладителя, и снижает неравномерность распределения охладителя в поперечном направлении.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, адиабатическая эффективность, сферические углубления, численное моделирование.

Введение

Тенденция роста температуры газа перед турбиной до 1700...1850 °С в современных авиационных газотурбинных двигателях приводит к необходимости использования внешнего плёночного охлаждения лопаток газовых турбин, поскольку при таких высоких температурах использование только внутреннего конвективного охлаждения не обеспечивает допустимый уровень температуры поверхности лопаток.

В качестве основного параметра для оценки пленочного охлаждения используется эффективность плёночного охлаждения адиабатной поверхности [1]:

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{aw}}{T_{\infty} - T_2},$$

где T_{∞} – температура основного потока, T_2 – температура вдуваемого потока в плоскости вдува; T_{aw} – температура адиабатной стенки. Как показывают эксперименты [2] эффективность пленочного охлаждения зависит от ряда параметров, но наиболее заметно от коэффициента (параметра) вдува:

$$m = \frac{W_2 \rho_2}{W_{\infty} \rho_{\infty}},$$

где W_{∞} , W_2 – скорость основного и вдуваемого потоков,

ρ_{∞} , ρ_2 – плотность основного и вдуваемого потоков.

При разработке систем охлаждения лопаток газовых турбин стремятся обеспечить высокие значения эффективности пленочного охлаждения при минимуме расхода охладителя. В традиционных системах плёночного охлаждения при вдуве охладителя через один или два ряда перфорации, максимальная эффективность плёночного охлаждения достигается при значении параметра вдува $m = 0,6...0,7$ [2]. При больших параметрах вдува вихревые пары (парные вихри) снижают эффективность пленочного охлаждения вследствие отделения охладителя от охлаждаемой поверхности и перемещения его с основным потоком. Кроме того, в области у отверстия формируется отрывная зона. Для обеспечения высоких значений эффективности плёночного охлаждения, при больших параметрах вдува, в настоящее время изучаются альтернативные способы плёночного охлаждения такие как, подача охладителя через фасонные отверстия, в кратеры или траншеи, использование противовихревых систем и др.

Для решения сложных задач и более глубокого понимания физических процессов широкое распространение в настоящее время получили методы вычислительной гидрогазодинамики. В данной работе

представлено численное компьютерное моделирование пленочного охлаждения плоской пластины при подаче охладителя через два ряда цилиндрических отверстий, расположенных в сферических углублениях и два ряда традиционных наклонных отверстий цилиндрической формы. На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных определена адекватная модель турбулентности, сделано сравнение эффективности пленочного охлаждения для обеих схем. При моделировании использован коммерческий пакет ANSYS CFX 14.

1. Компьютерная модель

Геометрическая 3D-модель пленочного охлаждения плоской поверхности со выдувом охладителя через два ряда цилиндрических отверстий в сферических углублениях была построена в ANSYS DesignManager. Она представляет собой канал, в который из большого объема (пленума) через два ряда цилиндрических отверстий, расположенных под углом 30° к поверхности пластины, подается охладитель в сферические углубления.

Схема расположения отверстий представлена на рис. 1 а. Диаметр сферического углубления D составлял 8 мм; относительная глубина $h/D - 0,5$; диаметр цилиндрических отверстий $d - 3,2$ мм; поперечный шаг $t - 16$ мм ($t/d = 5$), продольный шаг $t_1 - 8$ мм ($t_1/d = 2,5$). Нижняя линия проекции цилиндрического отверстия на плоскость XY проходит через край углубления, расположенный вниз по потоку (рис. 1 а, сечение А-А). Длина основного и предвключенного участков модели составляли, соответственно, $x/d = 25$ и $x/d = 70$.

Расчетная сетка состояла из 3233112 элементов и 894099 узлов. На поверхностях пластины, отвер-

стий в углублениях и стенках пленума было выполнено сгущение, где взято 20 ячеек. Значение y^+ во всех случаях находилось в пределах от 1 до 2.

Граничные условия на входе и выходе были заданы близкими к условиям экспериментов [3], при этом твердые границы расчетной области были заданы как адиабатные ($q = 0$). На боковых поверхностях расчетной модели были заданы условия симметрии. Температура основного потока на входе -15°C , вдуваемого воздуха -70°C . На входе в канал средняя скорость основного потока задавалась равной 30 м/с. Граничные условия, задаваемые при одновременной подаче вдуваемого воздуха через два ряда отверстий (расход охладителя), соответствовали значениям параметра вдува $m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$. Интенсивность турбулентности основного потока на входе составляла 1%. На выходе из канала среднее статическое давление задавалось равным 101300 Па. Области задания граничных условий представлены на рис. 1 б.

Для сравнения аналогичные расчеты эффективности пленочного охлаждения выполнены для традиционной двухрядной системы круглых наклонных отверстий с такими же геометрическими размерами и при тех же температурах и расходах основного потока и охладителя.

Для выбора адекватной модели турбулентности были протестированы стандартная $k-\epsilon$ модель, SST модель Ментера и LRR модель напряжений Рейнольдса (RSM). На рис. 2 представлены результаты тестовых расчетов по средней эффективности. Тестирование проводилось по экспериментальным данным [3]. Как следует, при $m = 0,5$ все модели турбулентности показывают хорошее согласование с экспериментальными данными – максимальное различие не превышает 5%.

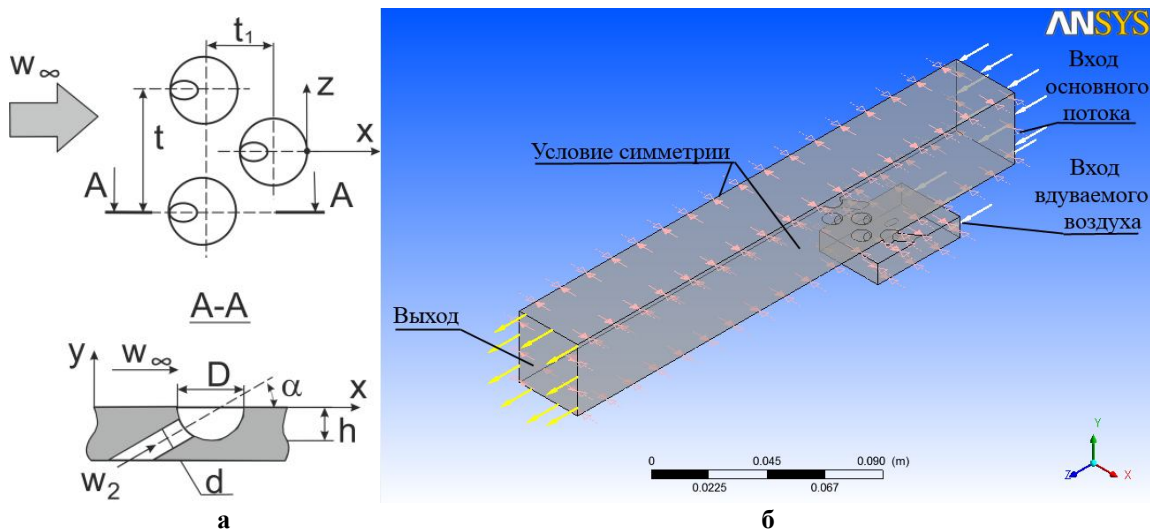


Рис. 1. Схема (а) и геометрическая 3D-модель (б) пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве охладителя через два ряда цилиндрических отверстий в сферических углублениях

С ростом параметра вдува расхождение результатов расчета и моделирования увеличивается. При $m = 1,5$ и $2,0$ наилучшее согласование расчета и моделирования получено при использовании LRR модели. Максимальное расхождение в этом случае не превышало 10%. По-видимому, это обусловлено тем, что эта модель учитывает анизотропию турбулентности и лучше моделирует сложную вихревую структуру в струе охладителя.

2. Анализ полученных результатов

На рис. 3 представлена средняя эффективность пленочного охлаждения за двумя рядами от-

верстий в сферических углублениях (линия 1) и за двумя рядами стандартных цилиндрических отверстий (линия 2). Видно, что при $m = 0,5$ обе схемы дают приблизительно одинаковые результаты, но на участке $x/d < 15$ эффективность отверстий в сферических углублениях несколько выше из-за растекания охладителя в углублении и отсутствия отрыва потока (рис. 4 а, д).

С ростом параметра вдува эффективность схемы отверстий в сферических углублениях увеличивается по всей длине, в то время как для стандартной схемы наклонных цилиндрических отверстий – снижется.

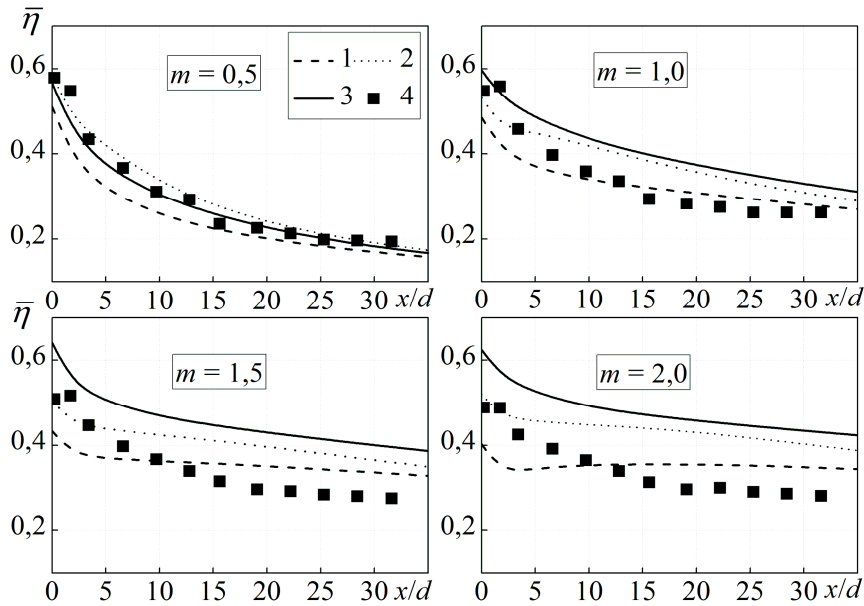


Рис. 2. Осредненная в поперечном направлении эффективность пленочного охлаждения при подаче охладителя в двухрядную систему отверстий в сферических углублениях: 1 – LRR модель турбулентности, 2 – k-ε модель турбулентности, 3 – SST модель турбулентности, 4 – экспериментальные данные [3]

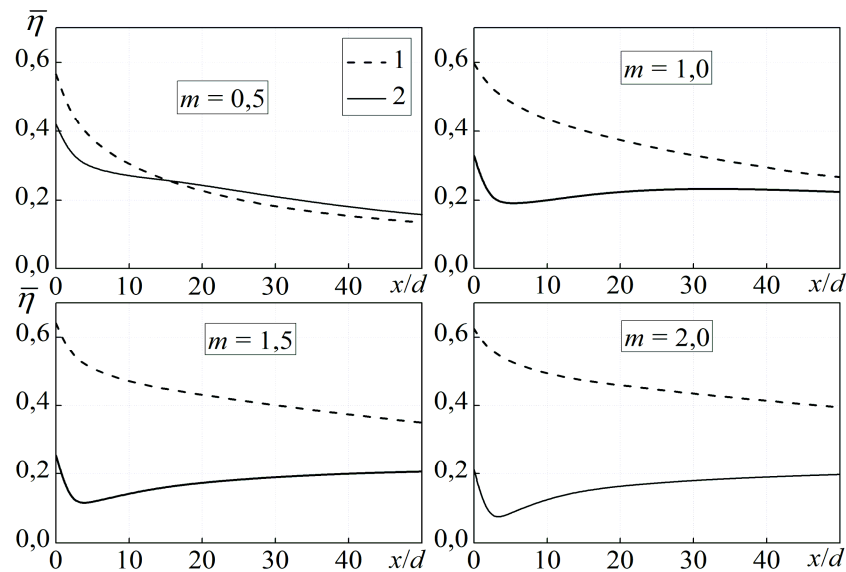


Рис. 3. Средняя эффективность пленочного охлаждения: 1 – отверстия в сферических углублениях; 2 – цилиндрические отверстия

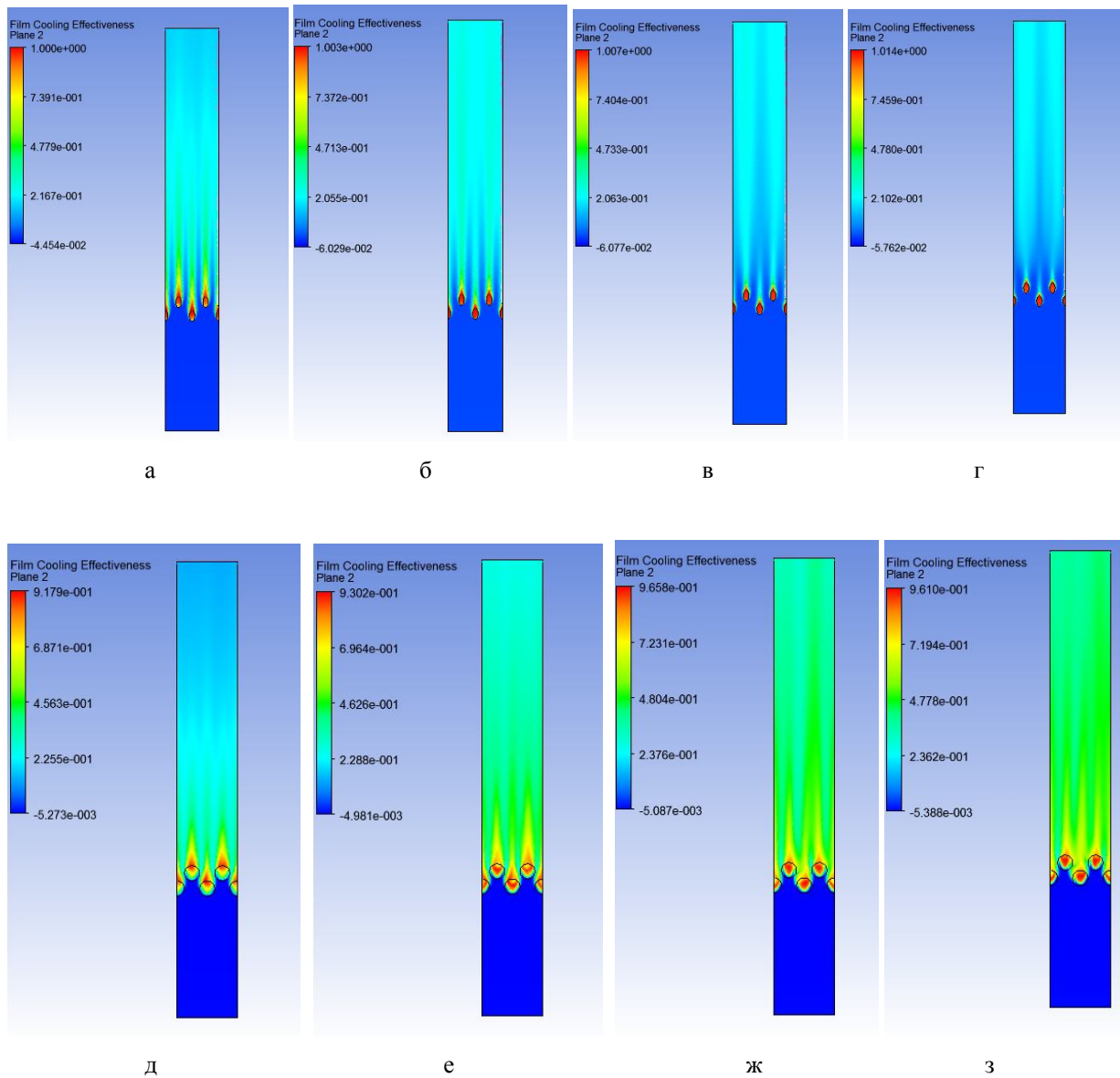


Рис. 4. Поля адиабатной эффективности пленочного охлаждения для системы цилиндрических отверстий (а-г) и отверстий в сферических углублениях (д-з): а, д - $m = 0,5$; б, е - $m = 1,0$; в, ж - $m = 1,5$; г, з - $m = 2,0$

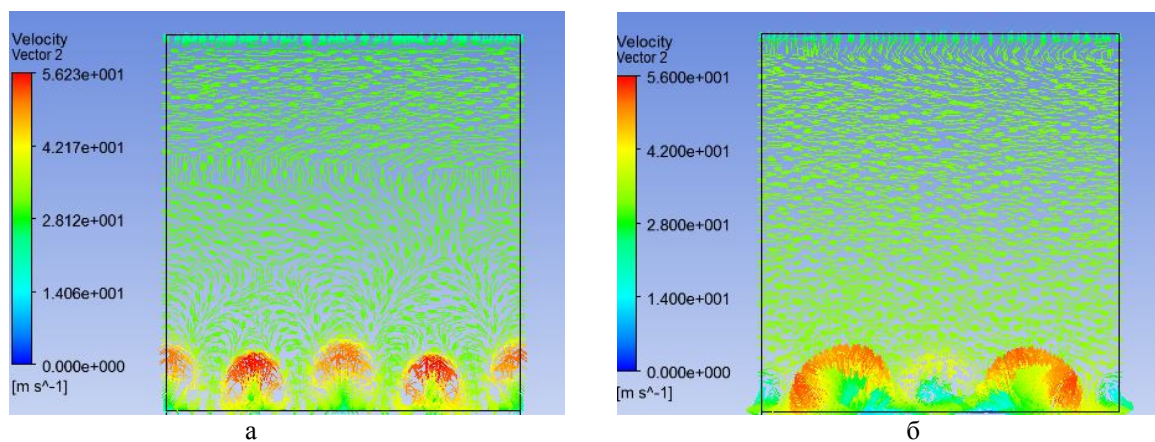


Рис. 5. Поля и векторы скорости в вертикальной плоскости за вторым рядом отверстий; $m = 1,5$: а – цилиндрические отверстия; б – отверстия в сферических углублениях

При подаче охладителя в сферические углубления с увеличением расхода при $m = 1,5, 2,0$ охладитель, попадая в углубление, распределяется в поперечном направлении, скорость его снижается и благодаря этому, по всей поверхности формируется более широкая защитная пленка (рис. 4 ж, з). При использовании стандартной схемы цилиндрических отверстий струя охладителя, вытекая из отверстия с большой скоростью, отрывается от поверхности, что снижает эффективность охлаждения (рис. 4 в, г).

На рис. 5 показаны поля скоростей в поперечной плоскости на расстоянии, соответствующем $x/d = 0$, т.е. непосредственно на выходе из отверстий. На рис. 5 а за рядами стандартных отверстий хорошо видны характерные вихревые структуры в форме парного вихря. При вдуве в сферические углубления (рис. 5 б) вихрь, формирующийся в отверстиях первого ряда, разрушается, а вихревая структура, образующаяся за вторым рядом отверстий, менее выражена и имеет меньшую интенсивность. Парный вихрь при этом практически отсутствует, что препятствует поступлению нагретого потока к стенке и увеличению эффективности охлаждения.

Такое благоприятное распределение охладителя приводит к тому, что даже при $m = 2,0$ средняя эффективность пленочного охлаждения системы отверстий в углублениях в 2–2,5 раза выше, чем при вдуве через систему стандартных цилиндрических отверстий.

Заключение

С ростом параметра вдува эффективность охлаждения схемы наклонных отверстий в сферических углублениях выше, чем для схемы стандартных наклонных отверстий. Это обусловлено предварительным растеканием охладителя в сферическом углублении и отсутствием отрыва потока.

При подаче охладителя в сферические углубления вихрь, формирующийся в первом ряду, полностью разрушается, а вихревая структура, образующаяся за вторым рядом отверстий, менее выражена и имеет меньшую интенсивность.

В целом, при $m = 2,0$ средняя эффективность пленочного охлаждения сферической системы охлаждения в 2–2,5 раза выше, чем при вдуве охладителя через систему наклонных цилиндрических отверстий, широко применяемых в настоящее время.

Литература

1. Репухов, В. М. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа [Текст] / В. М. Репухов. – К. : Наук. думка, 1980. – 296 с.
2. Bunker, R. S. A Review of Shaped Holes Turbine Film Cooling Technology [Text] / R. S. Bunker // ASME J. Heat Transfer. – 2005. – Vol. 127. – P. 441-453.
3. Плёночное охлаждение плоской поверхности двухрядной системой отверстий в сферических углублениях [Текст] / А. А. Халатов, И. И. Борисов, А. С. Коваленко и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3(10). – С. 4-8.

Поступила в редакцию 5.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б. Д. Билека, ИТТФ НАНУ, г. Киев, Украина

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ВИДУВІ ОХОЛОДЖУВАЧА У СФЕРИЧНЕ ПОГЛИБЛЕННЯ

А. А. Халатов, М. В. Безлюдна, Ю. Я. Дашевський, С. Д. Северин, О. С. Коваленко

Представлено порівняльні результати комп'ютерного моделювання плівкового охолодження при подачі охолоджувача через два ряди циліндричних похилих отворів, розташованих в сферичних поглибленнях і два ряди традиційних похилих отворів циліндричної форми. У розрахунках використано три моделі турбулентності і показано, що LRR модель напружень Рейнольдса (RSM) показує кращі результати при порівнянні з експериментальними даними. Виконано порівняння середньої ефективності плівкового охолодження двох вищевказаних схем, показано, що подача охолоджувача в сферичні поглиблення суттєво підвищує ефективність плівкового охолодження, зменшує вплив парного вихору, формованого в струмені охолоджувача, і знижує нерівномірність розподілу охолоджувача в поперечному напрямку.

Ключові слова: плівкове охолодження, адіабатична ефективність, сферичні поглиблення, чисельне моделювання.

**NUMERICAL SIMULATION OF FILM COOLING BEHINDS HOLES
ARRANGED IN SPHERICAL DIMPLES**

A. A. Khalatov, M. V. Bezliudna, Yu. J. Dashevskyy, S. D. Severin, A. S. Kovalenko

This paper presents results of comparative numerical simulation of film cooling with coolant supply through two rows of inclined cylindrical holes arranged in spherical dimples and two rows of traditional inclined cylindrical holes. Overall three turbulence models were tested, but only LRR Reynolds stress model (RSM) has demonstrated adequate results via comparison with experimental data. As shown, the coolant supply into spherical dimples increases significantly the average film cooling effectiveness, reduces influence of vortex pair, improves span-wise coolant distribution.

Key words: film cooling, adiabatic effectiveness, spherical dimples, numerical simulation.

Халатов Артем Артемович – д-р техн. наук, проф., академик НАНУ, зав. отделом «Высокотемпературная термогазодинамика», институт технической теплофизики НАН Украины; зав. кафедрой «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ», Физико-технический институт, Украина, e-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua.

Безлюдная Мария Владимировна – мл. науч. сотр. отдела «Высокотемпературная термогазодинамика», институт технической теплофизики НАН Украины; аспирант кафедры «Физика энергетических систем», НТУУ «КПИ», Физико-технический институт, Украина, e-mail: bezludnaya@gmail.com.

Дашевский Юрий Яковлевич – канд. техн. наук, нач. сектора тепловых и гидравлических расчётов, отдел турбин ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Украина, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.

Северин Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела «Высокотемпературная термогазодинамика», институт технической теплофизики НАН Украины, Украина, e-mail: ssd@vortex.org.ua.

Коваленко Александр Сергеевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела «Высокотемпературная термогазодинамика», институт технической теплофизики НАН Украины, Украина, e-mail: kovalenkoas@vortex.org.ua.