

УДК 621.45.038

Численное моделирование пленочного охлаждения плоской поверхности при подаче охладителя в углубления различной формы

А.А. Халатов^{1,2}, Н.А. Панченко^{1,2}, С.Д. Северин¹

¹Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

²Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского

E-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua

Представлены результаты компьютерного моделирования пленочного охлаждения плоской поверхности для различных схем пленочного охлаждения с подачей охладителя в поверхностные углубления различной формы. Расчеты выполнены в диапазоне изменения параметра вдува от 0,5 до 2,0, для сравнения использованы данные для традиционной схемы с одним рядом дискретных цилиндрических наклонных отверстий. При малых значениях параметра вдува ($m = 0,5$) средняя эффективность пленочного охлаждения практически одинакова для всех исследованных схем. С увеличением параметра вдува наибольшую эффективность демонстрирует схема пленочного охлаждения с подачей охладителя в поперечную траншею.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, эффективность пленочного охлаждения, поверхностные углубления, траншея.

Введение

Учитывая тенденцию постоянного роста температуры газа перед газовой турбиной современных энергетических и транспортных газотурбинных двигателей и установок, на первый план выходит требование повышения эффективности систем охлаждения лопаток газовых турбин. Внешнее пленочное охлаждение остается одним из основных способов тепловой защиты лопаток современных высокотемпературных газовых турбин. Традиционная система пленочного охлаждения поверхностей с подачей охладителя через одиночный ряд круглых наклонных отверстий имеет ряд недостатков, главный из них — образование парного вихря в струе охладителя [1], которое приводит к интенсивному «подсосу» горячего потока к защищаемой поверхности. Особенно интенсивно вихревая пара снижает эффективность пленочного охлаждения при больших значениях параметра вдува ($m > 1,0$). Анализ результатов [2–5] показал, что в настоящее время основное внимание исследователей сосредоточено на следующих направлениях: изучение влияния профилированных отверстий, т.е. отверстий сложной формы — веерных («fan-shaped»), консольных и некоторых других; изучение антивихревых систем, для которых характерны парные отверстия и дополнительные антивихревые отверстия; изучение отверстий, выходы из которых размещены в углублениях различной формы — кратерах, траншее, полусферических углублениях.

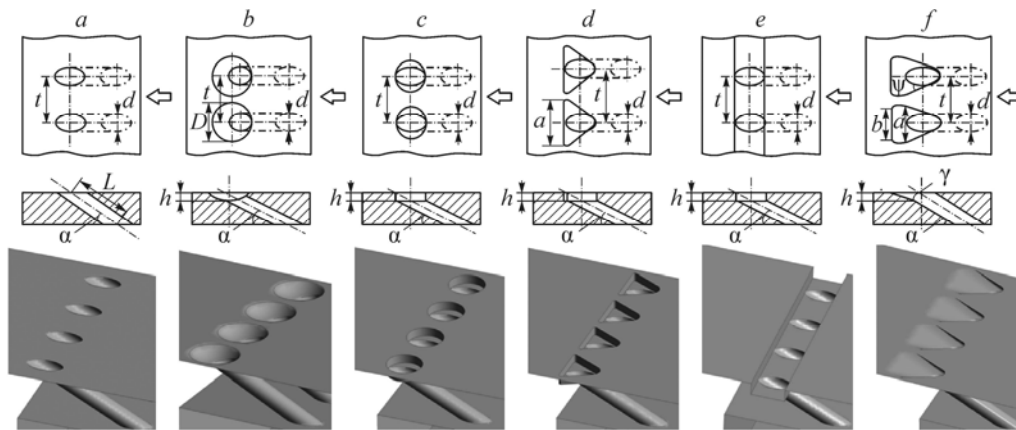


Рис. 1. Варианты исследованных схем пленочного охлаждения.

Схемы с традиционными круглыми наклонными отверстиями (а) и с подачей охладителя в полусферические углубления (b), в цилиндрические кратеры (c), в треугольные кратеры (d), в траншею (e) и через отверстия веерной формы (f).

В предположении высоких значений температуры газа перед турбиной современные лопатки газовых турбин покрываются термобарьерными покрытиями, выполненными из керамических материалов, например, из оксида иттрия (Y_2O_3) со стабилизированным диоксидом циркония (ZrO_2). Наносимые покрытия имеют достаточно малую толщину, которая составляет $0,5 \div 2$ мм. В этих условиях без снижения прочности лопаток могут быть эффективно использованы схемы плёночного охлаждения с подачей охлаждающего воздуха в углубления различной формы, выполненные в слое термобарьерного покрытия.

На рис. 1 представлены шесть вариантов инновационных схем пленочного охлаждения: традиционный, с рядом наклонных цилиндрических отверстий (рис. 1a); с подачей охладителя в полусферические углубления (рис. 1b); с использованием цилиндрических (рис. 1c) и треугольных кратеров (рис. 1d), с подачей охладителя в траншею (рис. 1e) и через отверстия веерной формы (рис. 1f). Схемы (рис. 1b, 1d) предложены и запатентованы в ИТТФ НАНУ [6, 7].

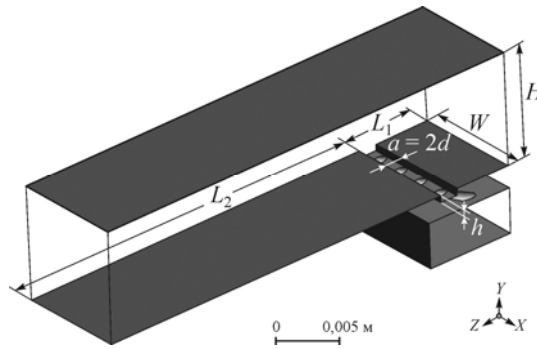
Цель настоящей работы — исследование и сравнение различных схем пленочного охлаждения с подачей охладителя в поверхностные углубления различной формы (рис. 1b–1f). В качестве базовой конфигурации использована традиционная схема круглых наклонных отверстий (рис. 1a). Исследование выполнено с помощью компьютерного моделирования в широком диапазоне изменения параметра вдува: $0,5 \leq m \leq 2,5$.

Компьютерное моделирование

В работе использовался коммерческий пакет ANSYS CFX 14, который широко применяется при решении различных задач термогазодинамики. Исследование выполнено для идентичных геометрических моделей системы пленочного охлаждения, отличающихся только формой поверхностных углублений, одна из которых, предназначенная для схемы с подачей охладителя в траншею (рис. 1a), представлена на рис. 2.

Трёхмерная геометрическая модель создана при помощи пакета ANSYS Design Manager. Основные параметры исследованных моделей канала с плёночным охлаждением (рис. 2) представлены в табл. 1. Геометрическая модель условно состоит из двух характерных участков: $L = L_1 + L_2$, где L_1 — длина предвключенного участка модели, L_2 — длина основного участка плёночного охлаждения. Основные характеристики рассматриваемых схем плёночного охлаждения представлены в табл. 2. Относительная глубина

Рис. 2. Геометрическая трехмерная модель и характерные размеры системы пленочного охлаждения плоской пластины.



поверхностных углублений в этих схемах, кроме схемы с выдувом в траншею, составляла $h/d = 0,5$. Для схемы, представленной на рис. 1е, использовано оптимальное значение относительной глубины траншеи — $h/d = 0,75$ [8].

Исследование выполнено с применением неструктурированных комбинированных расчетных сеток размерностью 450000÷760000 узлов. На поверхности пластины около отверстий и вблизи стенок пленума выполнено локальное сгущение расчетной сетки, состоящее из 20 ячеек. Количество ячеек и толщина области пристеночного сгущения расчетной сетки выбирались из условия обеспечения значения параметра $y^+ \approx 1$ во всем исследуемом диапазоне изменения граничных условий задачи.

В расчетах задавались граничные условия, соответствующие условиям модельных экспериментов, выполненных на экспериментальном стенде Отдела высокотемпературной термогазодинамики ИТТФ НАНУ. В работе [9] были представлены первые результаты экспериментального исследования эффективности пленочного охлаждения плоской пластины для схем с подачей охладителя в поверхностные углубления различной формы. Граничные условия на входе и выходе расчетной области соответствовали значениям параметра вдува, близким к $m = 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5$. Скорость основного потока составляла 37 м/с, температура — 20 °С, температура вдуваемого воздуха — 80 °С. В расчетах был принят низкий уровень интенсивности турбулентности основного потока ($Tu \approx 1,0\%$) и параметр плотности $DR = \rho_c/\rho_\infty = 0,83 \div 0,85$. На боковых поверхностях расчетной области были заданы условия симметрии, а на остальных стенках каналов задавалось условие адиабатности.

Настоящие расчеты выполнялись с использованием комбинированной SST-модели турбулентности, представляющей собой суперпозицию $k-\omega$ модели в пристеночной области и $k-\varepsilon$ модели вдали от стенки. Выбор SST-модели турбулентности связан с ее способностью достаточно точно моделировать газодинамику и теплообмен сложных пристеночных течений, что было показано ранее при выполнении тестовых расчетов с использованием различных моделей турбулентности [10].

Результаты CFD-моделирования и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты моделирования осредненной в поперечном направлении эффективности пленочного охлаждения для рассмотренных схем при различных параметрах вдува. При малых значениях ($m = 0,5$) исследуемые схемы сравнимы по эффективности пленочного охлаждения на основном участке (рис. 3а). Увеличение эффективности пленочного охлаждения по сравнению с традиционной схемой при малых

Таблица 1

Геометрические параметры моделей канала с пленочным охлаждением

L_1 , мм	L_2 , мм	W , мм	H , мм	δ , мм
10	32	10	10	2,0

Таблица 2

Геометрические характеристики исследованных систем

d , мм	D , мм	t , мм	α , град	h , мм	a , мм	b , мм	γ , град	ψ , град	l , мм
0,8	2,0	2,4	30	0,4 (0,6)	20	16	12	19,5	3,0

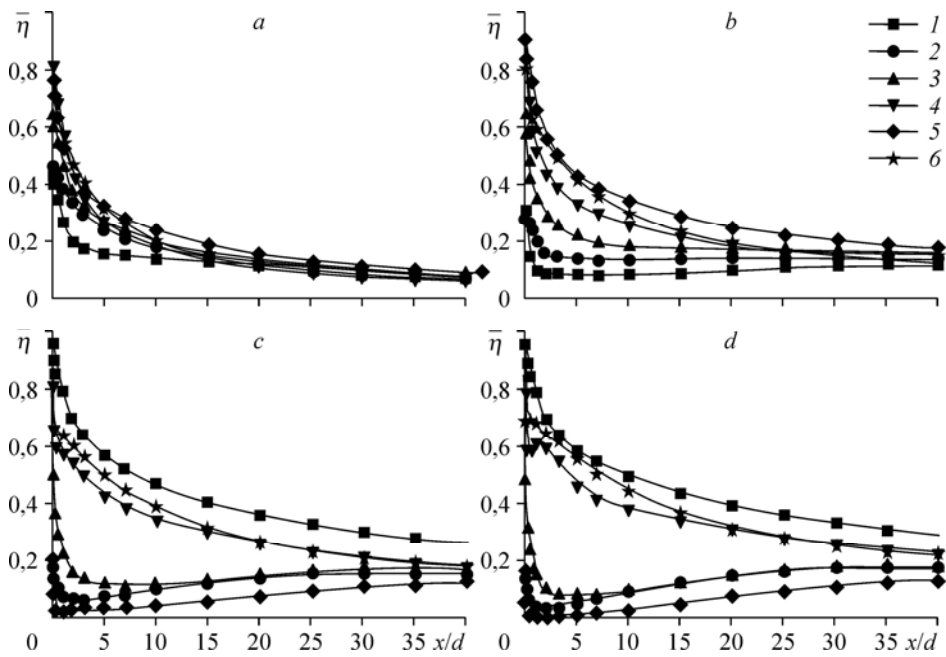


Рис. 3. Средняя эффективность пленочного охлаждения для исследованных схем.
 $m = 0,5$ (a), $1,0$ (b), $1,5$ (c), $2,0$ (d).

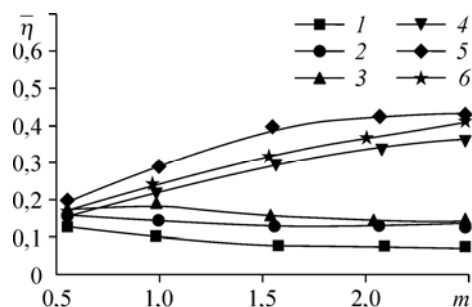
Схемы с традиционными круглыми наклонными отверстиями (1) и с подачей охладителя в полусферические углубления (2), в цилиндрические кратеры (3), в треугольные кратеры (4), в траншею (5) и через отверстия веерной формы (6).

значениях параметра вдува наблюдается как на начальном участке, так и участке стабилизации ($x/d = 0 \div 20$). При умеренных и высоких значениях параметра вдува ($m \geq 1,0$) различие в эффективности для рассмотренных схем пленочного охлаждения становится существенным (рис. 3b–3d), особенно оно заметно для схем с подачей охладителя в треугольные кратеры, в поперечную траншею и через отверстия веерной формы (рис. 1d–1f). Для этих трех схем средняя в поперечном направлении эффективность пленочного охлаждения возрастает с увеличением параметра вдува. Схема с подачей охладителя через ряд веерных отверстий при высоких и умеренных значениях параметра вдува имеет более высокую эффективность по сравнению со схемой с подачей охладителя в треугольные кратеры только на начальном и переходном участках (при $x/d = 0 \div 20$). На основном участке эти две схемы обеспечивают примерно одинаковую эффективность пленочного охлаждения. Эффективности пленочного охлаждения схем с подачей охладителя в полусферические углубления и цилиндрические кратеры являются достаточно близкими по своей эффективности.

Как показывают представленные результаты, наибольшую эффективность пленочного охлаждения обеспечивает схема с подачей охладителя в поперечную траншею. Помимо высокой эффективности пленочного охлаждения такая схема обеспечивает и самую высокую из всех рассмотренных схем поперечную равномерность охлаждения на начальном и основном участках. Учитывая тот факт, что выполненная по высоте лопатки траншея может существенно ослабить прочность лопатки, такой способ пленочного охлаждения целесообразно использовать для охлаждения сопловых лопаток газовых турбин и рабочих лопаток при условии достаточно большой толщины стенок или термобарьерного покрытия.

Рис. 4. Средняя по поверхности пластины эффективность пленочного охлаждения в зависимости от параметра вдува для исследованных схем.

Схемы с традиционными круглыми наклонными отверстиями (1) и с подачей охладителя в полусферические углубления (2), в цилиндрические кратеры (3), в треугольные кратеры (4), в траншею (5) и через отверстия веерной формы (6).



Из рис. 4 следует, что для схем охлаждения с подачей охладителя в траншею, треугольные кратеры и веерные отверстия средняя по поверхности пластины эффективность пленочного охлаждения растет с увеличением параметра вдува во всем исследованном диапазоне ($0,5 \leq m \leq 2,5$). Для традиционной схемы наклонных отверстий и при вдуве в цилиндрические кратеры и полусферические углубления наблюдается снижение средней по поверхности эффективности пленочного охлаждения.

На рис. 5а–5f представлены распределение локальной эффективности пленочного охлаждения в поперечном направлении и вихревая структура потока на выходе из отверстий ($x/d = 2,0$) для рассмотренных схем пленочного охлаждения при $m = 1,5$. Из рисунка видно, что наиболее равномерное в поперечном направлении охлаждение поверхности обеспечивает схема с подачей охладителя в траншею, что объясняется снижением фактора дискретности вдува (рис. 5е). Анализ вихревой структуры на выходе из ряда отверстий для различных схем пленочного охлаждения показывает, что парная вихревая структура (почкообразный вихрь) имеет наибольшую интенсивность для обычного ряда наклонных отверстий. Схема с подачей охладителя в цилиндрические кратеры (рис. 5с) обеспечивает некоторое снижение интенсивности почкообразных вихрей. Существенное снижение интенсивности и масштаба почкообразной вихревой структуры наблюдается также для схемы с подачей охладителя в треугольные кратеры (рис. 5d). Аналогичный эффект присутствует и для варианта схемы с подачей охладителя в траншею (рис. 5е). Однако в этом случае вихревая система характеризуется наличием дополнительных вихрей малой интенсивности, расположенных между почкообразными вихрями, которые генерируются струями, вытекающими из соседних отверстий пленочного охлаждения. Несмотря на наличие сложной вихревой системы на выходе из траншеи при таком способе организации пленочного охлаждения защитная пленка не отрывается от поверхности пластины из-за низкой интенсивности вихревого движения. При этом, поскольку вся поверхность достаточно равномерно покрывается пленкой охладителя, а вихревое движение происходит непосредственно в слое охладителя, подсоса основного потока к охлаждаемой поверхности не происходит.

При выдуве охладителя через ряд отверстий веерной формы, которая широко изучается в зарубежных исследованиях, вследствие расширения струй на выходе и малого угла выдува почкообразные вихревые структуры на выходе из отверстий отсутствуют (рис. 5f), что обуславливает достаточно высокие значения эффективности пленочного охлаждения и ее высокую равномерность в поперечном направлении.

Выводы

При малых значениях параметра вдува ($m = 0,5$) средняя эффективность пленочного охлаждения практически одинакова для всех исследованных схем с подачей охладителя

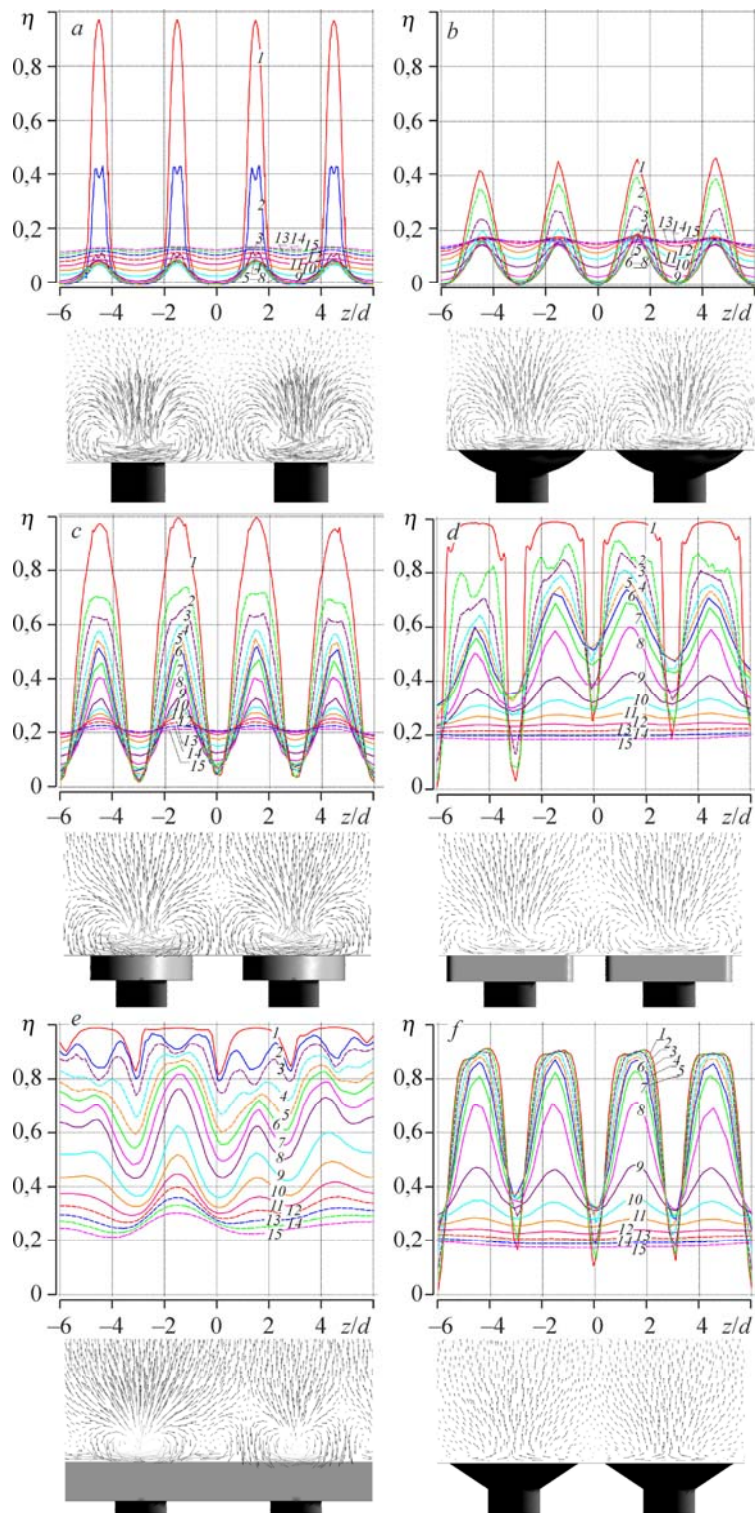


Рис. 5. Эффективность пленочного охлаждения в поперечном направлении и вихревая структура потока на расстоянии $x/d = 2,0$ от выдува при $m = 1,5$.

Схемы с традиционными круглыми наклонными отверстиями (a) и с подачей охладителя в полусферические углубления (b), в цилиндрические кратеры (c), в треугольные кратеры (d), в траншею (e), через отверстия веерной формы (f); 1–15: $x/d = 0, 0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 5,0, 10,0, 15,0, 20,0, 25,0, 30,0, 35,0$ и $40,0$ соответственно.

в поверхностные углубления. В этом случае целесообразно использовать простую, исходя из технологических соображений, схему пленочного охлаждения. При умеренных и высоких значениях параметра вдува m рассмотренные схемы пленочного охлаждения с подачей охладителя в поверхностные углубления разных форм позволяют повысить эффективность пленочного охлаждения. Из рассмотренных схем пленочного охлаждения наибольшей эффективностью обладает схема с подачей охладителя в поперечную траншею.

Обозначения

α — угол наклона отверстий пленочного охлаждения,	d — диаметр отверстий пленочного охлаждения,
γ — угол подрезки веерного отверстия,	H — высота модели канала пленочного охлаждения,
δ — толщина пластины,	h — глубина поверхностного углубления,
$\eta = (T_{aw} - T_{\infty}) / (T_c - T_{\infty})$ — эффективность пленочного охлаждения,	L — длина модели канала пленочного охлаждения,
$\bar{\eta}$ — средняя по ширине пластины эффективность охлаждения,	l — длина отверстия пленочного охлаждения,
ρ — плотность,	$m = (\rho_c w_c) / (\rho_{\infty} w_{\infty})$ — параметр вдува,
ψ — угол раскрытия веерного отверстия,	T — температура потока,
a — длина основания треугольного кратера, максимальная ширина веерного отверстия,	t — поперечный шаг отверстий пленочного охлаждения,
b — ширина подрезки веерного отверстия,	W — ширина модели канала пленочного охлаждения,
D — диаметр полусферического углубления,	w — осевая скорость потока,
	x, y, z — прямоугольные координаты.

Нижние индексы

aw — параметры на адиабатической стенке,	∞ — параметры основного потока.
c — параметры вдуваемого потока,	

Список литературы

1. Sgarzi O. Analysis of vortices in three-dimensional jets introduced in a cross-flow boundary-layer // Proc. of ASME Turbo Expo-97. GT-517. 11 p.
2. Colban W.F., Thole K.A., Bogard D.A. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface // ASME J. of Turbomachinery. 2011. Vol. 133, No. 1. P. 011002-1–011002-11.
3. Leedom D.H., Acharya S. Large eddy simulations of film cooling flow fields from cylindrical and shaped holes // ASME Proc. Heat Transfer. Paper No. GT2008-51009. P. 865–877.
4. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Панченко Н.А. Пленочное охлаждение плоской поверхности системой парных отверстий: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 5. С. 571–578.
5. 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, No. 5. P. 595–607.
6. Пат. 47749 Украина. Способ пленочного охлаждения и устройство для его осуществления // Халатов А.А., Варганов И.С., Коваленко Г.В.; заявитель и патентообладатель Институт технической теплофизики НАН Украины. № 2001096063; заявл. 03.09.01; опубл. 15.12.04, Бюл. № 12. 3 с.: ил.
7. Пат. 113452 Украина. Способ пленочного охлаждения // Халатов А.А., Северин С.Д., Безлюдная М.В., Новохатская И.В.; заявитель и патентообладатель Институт технической теплофизики НАН Украины. № 201504484; заявл. 07.05.2015; опубл. 04.01.2017, Бюл. № 1. 3 с.: ил.
8. 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 J. of Turbomachinery. 2007. Vol. 131, No. 1. P. 011003-1–011003-11.
9. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Коваленко А.С., Шевцов С.В. Пленочное охлаждение плоской поверхности однорядной системы наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 731–737.
10. Халатов А.А., Борисов И.И., Коваленко А.С., Дашевский Ю.Я., Северин С.Д., Шевцов С.В., Безлюдная М.В. Пленочное охлаждение плоской поверхности двухрядной системой отверстий в сферических углублениях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 57, № 3/10. С. 4–8.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2017 г.