

УДК 621.438-226.2 : 536.24

В. Ю. ПЕТЕЛЬЧИЦ, инж.-констр. ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев;
Д. Н. ПИСЬМЕННИЙ, канд. техн. наук; вед. инж.-констр. ГП НПКГ «Зоря»-
«Машпроект», Николаев;
Ю. Я. ДАШЕВСКИЙ, канд. техн. наук; нач. сектора отдела турбин ГП НПКГ
«Зоря»-«Машпроект», Николаев

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ РЯДОВ ОТВЕРСТИЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ ВХОДНОЙ КРОМКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Представлены результаты численного моделирования пленочного охлаждения пластины с трехрядной системой цилиндрических отверстий на входном цилиндрическом участке с радиальной системой отверстий с разными углами отклонения бокового отверстия и с системой параллельных отверстий. Рассмотрены три варианта систем радиальных отверстий с разными углами отклонения бокового отверстия от центральной линии (α): 15, 30 и 45°. Размеры расчётной модели и исходные данные были приняты характерными для рабочей лопатки турбины высокого давления. Сравнение всех вариантов моделирования производилось по эффективности пленочного охлаждения для параметров вдува от 0,5 до 2,0. Проведен сравнительный анализ эффективности пленочного охлаждения, как участка входной кромки, так и последующего плоского участка. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса *ANSYS CFX*.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, параметр вдува, входная кромка, система охлаждения, численное моделирование.

Введение

Входная кромка является наиболее термически нагруженным элементом профиля лопатки турбины современного высокотемпературного ГТД. Обеспечение достаточной глубины охлаждения входной кромки представляет собой весьма сложную задачу, что обусловлено, с одной стороны, высокой интенсивностью теплообмена со стороны газа в районе зоны торможения потока, а с другой – меньшей площадью теплообменной поверхности со стороны охлаждающего воздуха. Поэтому, несмотря на развитие схем конвективного охлаждения лопаток, единственным способом существенного повышения глубины охлаждения участка входной кромки является применение пленочного (заградительного) охлаждения. Структура потока при пленочном охлаждении входной кромки намного сложнее, что обусловлено наличием точки торможения потока, которая приводит к появлению градиентов скоростей и давлений в этой зоне. Выпуск охлаждающего воздуха на поверхность входной кромки обеспечивает пленочное охлаждение не только входной кромки, но и значительной части профиля лопатки.

В связи с этим вопрос о повышении эффективности пленочного охлаждения необходимо решать с учетом эффективности охлаждения профиля лопатки на удалении от отверстий.

Обзор литературы показал, что исследованию пленочного охлаждения лопаток турбин уделено большое внимание, но основная их часть выполнена для плоской пластины. Характеристики пленочного охлаждения на начальном цилиндрическом участке, моделирующем участок входной кромки лопаток газотурбинных двигателей при выпуске воздуха через многорядную систему отверстий, в литературе рассмотрены недостаточно.

Анализ реальных конструкций лопаток, описанных в литературе, показал самые разнообразные варианты схем расположения отверстий на входной кромке. Наиболее распространенными являются трехрядные схемы с радиальными или параллельными рядами цилиндрических отверстий, расположенными в шахматном порядке, как в работах [1–3]. В работе [4] исследованы варианты с углами отклонения боковых отверстий 15 и 50° от центральной линии. В работе [5] углы отклонения составляли 15 и 44°. В то же время, большинство работ посвящены исследованию эффективности лишь на участке в непосредственной близости от отверстий ($x/d < 10$), что не позволяет определить эффективность пленочного охлаждения для остальной части профиля. Кроме этого, в литературе отсутствуют практические рекомендации по применению исследованных конфигураций.

Целью настоящей работы является исследование влияния расположения рядов отверстий на эффективность пленочного охлаждения на начальном цилиндрическом и последующем плоском участке.

Обзор литературы показал, что наиболее перспективным для исследования пленочного охлаждения является применение *CFD*-моделирования, которое позволяет исследовать влияние большого количества газодинамических факторов и рассмотреть разные варианты конструктивного исполнения. Именно этот метод и был принят для решения поставленной цели.

Для выполнения исследования, предварительно были проведены верификационные расчеты, результаты которых сравнивались с экспериментальными данными. В результате выполнения этих работ для пленочного охлаждения плоской стенки [6] и участка входной кромки [7] было определено, что наиболее близкие к экспериментальным данным обеспечивает применение модели турбулентности *SST*.

Расчетная модель

Геометрические размеры расчётной модели и исходные данные были приняты характерными для рабочей лопатки турбины высокого давления.

Схема расположения отверстий пленочного охлаждения и геометрические параметры модели приведены на рис. 1а. Для моделирования была создана 3D модель, высотой равной двум шагам отверстий (диаметр отверстий $d = 0,5$ мм, относительный шаг отверстий $t/d = 4$). Таким образом, расчетная модель содержит по два отверстия в трех рядах. Для оценки влияния рассматриваемой системы отверстий на эффективность пленочного охлаждения не только на входной кромке, а на значительной части профиля, геометрическая модель выполнена с удлинённым плоским участком, обеспечивающим анализ результатов до $x/d \leq 107$ (x – расстояние от точки торможения).

Для этой модели с помощью *ANSYS ICEM CFD 14.5* была создана тетраэдрическая расчетная сетка с призматическим подслоем, с суммарным количеством элементов 21,5 млн. (рис. 1б).

Исходные данные для расчета:

- скорость основного потока на входе принята соответствующей числу Рейнольдса, определенному по диаметру входной кромки, равному 40 000;
- статическое давление основного потока на выходе 1,2 МПа;
- степень турбулентности основного потока на входе 5 %;
- температуры основного и вдуваемого потоков 1500 и 600 °С, соответственно.

Расход вдуваемого воздуха задавался в соответствии с рассматриваемым параметром вдува, определенным как отношение массовых скоростей вдуваемого и основного потоков. Моделирование выполнялось для четырех значений параметра вдува $m = 0,5; 1,0; 1,5$ и $2,0$, который в данном случае определялся как

$$m = \frac{G_B / (6F_{отв})}{\rho_r W_r}, \quad (1)$$

где G_B – суммарный расход выдуваемого воздуха через шесть отверстий; F_B – площадь поперечного сечения одного отверстия; ρ_r , W_r – соответственно плотность и скорость потока газа набегающего потока (на входе в расчетную модель).

Для анализа использована осредненная в поперечном направлении (для двух шагов) эффективность пленочного охлаждения

$$\eta = \frac{T_\infty - T_{aw}}{T_\infty - T_B}, \quad (2)$$

где T_∞ , T_B – полные температуры основного потока (газа) и охладителя (охлаждающего воздуха), соответственно, T_{aw} – адиабатическая температура стенки (защищаемой поверхности). На участке входной кромки осреднение эффективности производилось лишь на участках стенки между отверстиями.

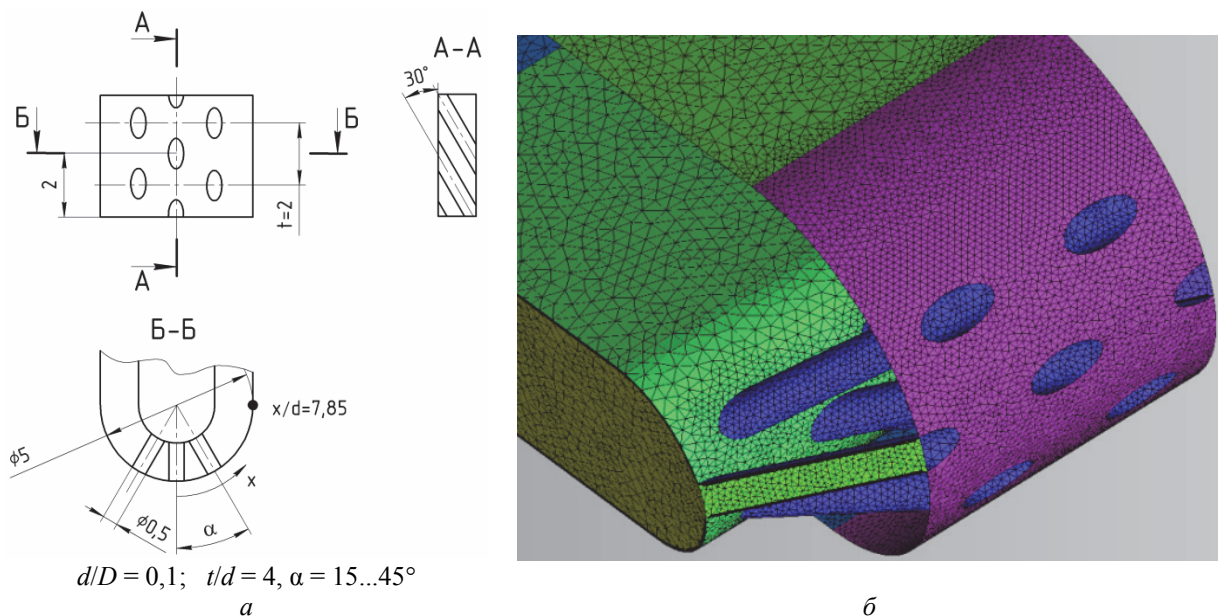


Рис. 1 – Входная кромка:
 а – геометрические параметры системы радиальных отверстий; б – фрагмент расчетной сетки

Система радиальных отверстий. Влияние угла отклонения бокового отверстия

В работе рассмотрено три варианта систем радиальных отверстий с разными углами отклонения бокового отверстия от центральной линии: $\alpha = 15^\circ$ ($x/d = 1,31$), $\alpha = 30^\circ$ ($x/d = 2,62$) и $\alpha = 45^\circ$ ($x/d = 3,93$).

Результаты расчета распределения эффективности пленочного охлаждения для трех вариантов угла α и для четырех параметров вдува $m = 0,5...2,0$ представлены на рис. 2.

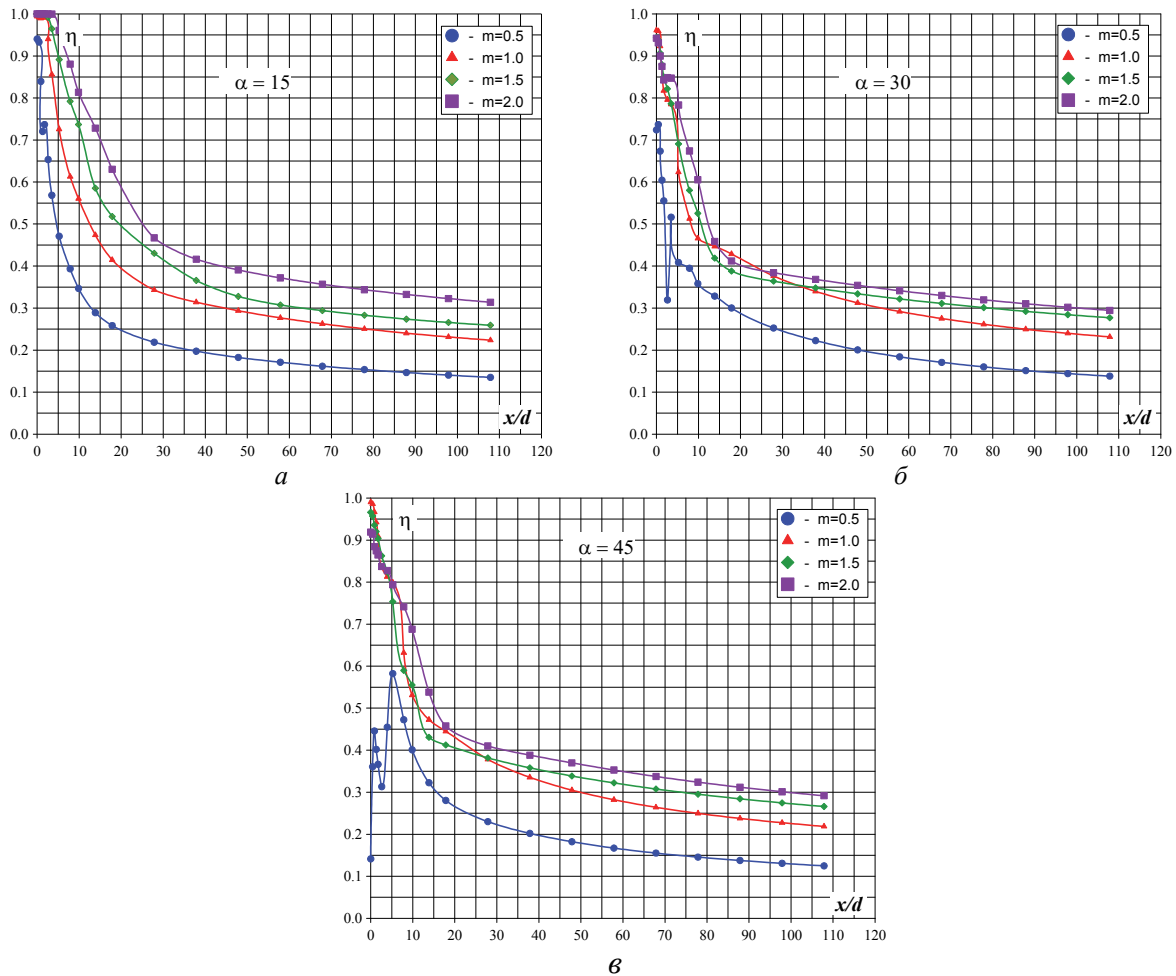


Рис. 2 – Распределение эффективности пленочного охлаждения системы радиальных отверстий для $m = 0,5 \dots 2,0$ при: $a - \alpha = 15^\circ$; $b - \alpha = 30^\circ$; $c - \alpha = 45^\circ$

На рис. 3 представлены изменения эффективности пленочного охлаждения, осредненной на характерных участках расчетной модели: цилиндрическом участке входной кромки ($x/d \leq 7,85$) и плоской стенке ($7,85 < x/d \leq 107$), для разных углов отклонения боковых отверстий при изменении параметра вдува.

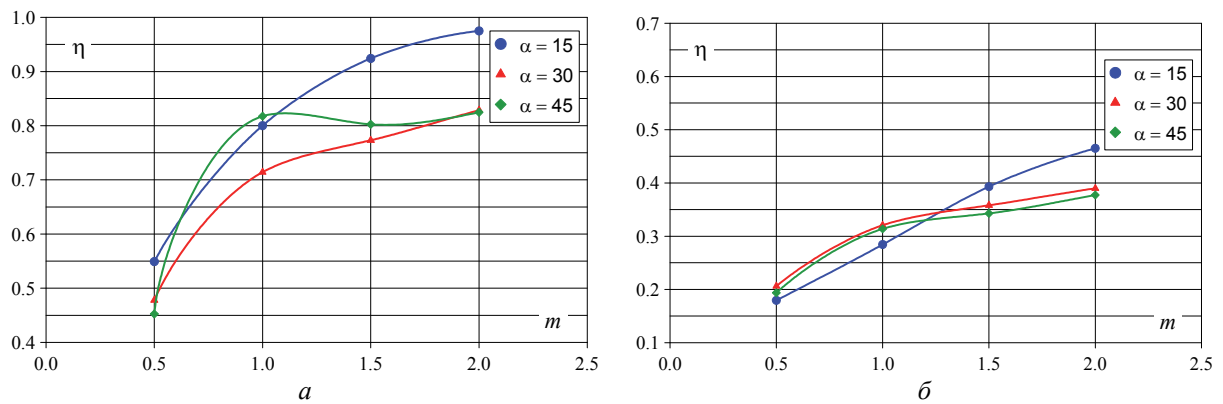


Рис. 3 – Осредненная эффективность пленочного охлаждения для параметров вдува $m = 0,5 \dots 2,0$ при $\alpha = 15 \dots 45^\circ$ для: a – входной кромки; b – плоского участка

По результатам моделирования получено, что для всех углов отклонения бокового отверстия, увеличение параметра вдува приводит к увеличению эффективности пленочного охлаждения. Наибольшее увеличение эффективности, особенно на участке входной кромки, имеет место при увеличении параметра вдува с 0,5 до 1,0 (рис. 2). По всей видимости, это вызвано перераспределением расхода воздуха между центральным и боковым отверстиями. Такое перераспределение обусловлено разным противодавлением на выходе из отверстий пленочного охлаждения центрального и боковых рядов. При малом параметре вдува основной расход воздуха выходит через боковые отверстия, где противодавление на выходе меньше. Особенно это проявляется при $\alpha = 45^\circ$ и $m = 0,5$, где эффективность пленочного охлаждения на линии торможения ($x/d = 0$) составляет 0,14, в то время как при $\alpha = 15^\circ - 0,94$. Увеличение параметра вдува приводит к увеличению расхода воздуха через отверстия центрального ряда и провал эффективности охлаждения непосредственно вблизи точки торможения, имевший место при $m = 0,5$, отсутствует.

Для участка входной кромки ($x/d \leq 7,85$) наиболее эффективным является расположение боковых отверстий под углом $\alpha = 15^\circ$, особенно при высоких параметрах вдува. При $m = 2,0$ эффективность пленочного охлаждения для $\alpha = 15^\circ$ достигает 0,973, при этом для углов 30° и 45° эффективность составляет 0,827 и 0,824 соответственно. Представляет практический интерес распределение эффективности пленочного охлаждения участка входной кромки при $m = 1,0$. В этом случае самая высокая эффективность пленочного охлаждения входной кромки получена для варианта $\alpha = 45^\circ$, при котором обеспечивается оптимальное распределение выдуваемого воздуха по поверхности входной кромки. При других параметрах вдува вариант $\alpha = 45^\circ$ близок к варианту $\alpha = 30^\circ$, и по эффективности охлаждения входной кромки существенно уступает варианту с $\alpha = 15^\circ$.

Для плоского участка (рис. 3б), при параметрах вдува 0,5 и 1,0, наибольшую эффективность обеспечивают углы отклонения боковых отверстий 30° и 45° , а при параметрах вдува 1,5 и 2,0 угол 15° .

Система параллельных отверстий

В дополнение к системе радиальных отверстий, в работе рассмотрена система параллельных отверстий, которая является более технологичной (рис. 4).

Шаг между рядами отверстий принят таким, чтобы расстояние на наружной поверхности между рядами параллельных отверстий соответствовало системе радиальных отверстий при $\alpha = 30^\circ$.

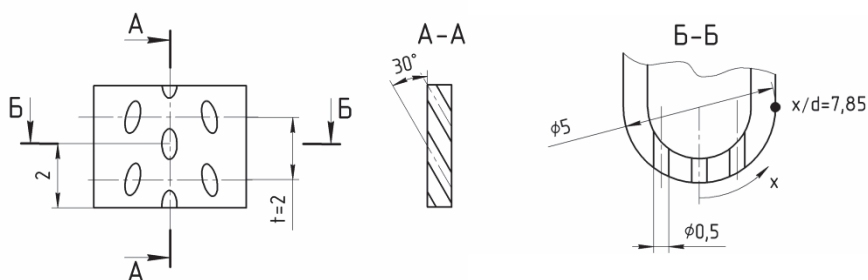


Рис. 4 – Геометрические параметры параллельной системы отверстий

В результате расчетов определено, что для варианта с параллельными отверстиями (см. рис. 4), как и в предыдущих вариантах, увеличение параметра вдува с 0,5 до 1,0 приводит к значительному росту средней эффективности с 0,214 до 0,364 (см. рис. 5а), в то время как для $m = 2,0$ средняя эффективность составляет 0,390. На рис. 5б представлено сравнение двух вариантов: параллельные отверстия и радиальные с $\alpha = 30^\circ$, для входной кромки, плоского участка.

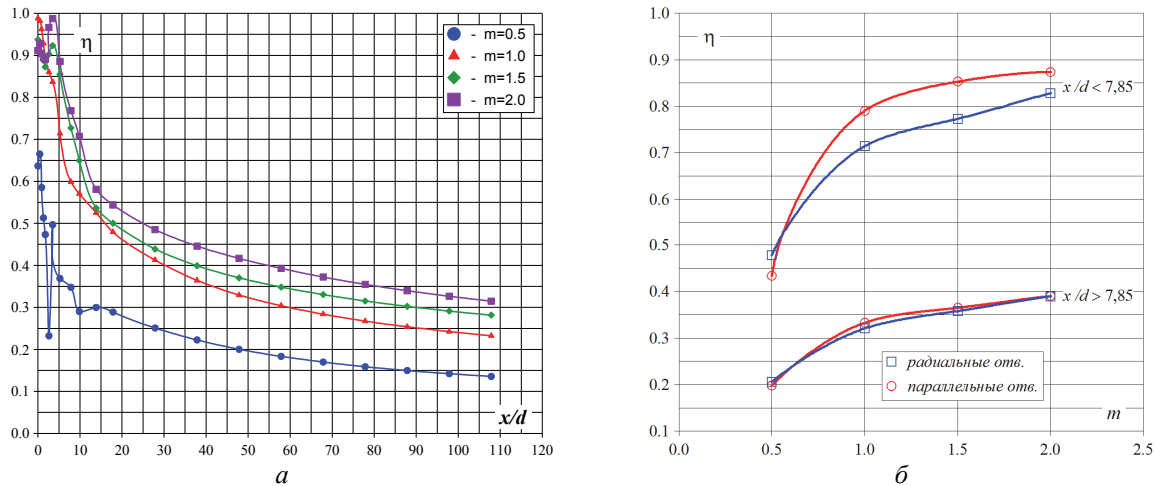


Рис.5 – Распределение эффективности пленочного охлаждения при $m = 0,5...2,0$:
 а – системы параллельных отверстий; б – сравнение двух вариантов отверстий

Для варианта с параллельными отверстиями при $m = 0,5$ эффективность пленочного охлаждения входной кромки составляет 0,434, что несколько ниже, чем для радиальных отверстий 0,478. Для плоского участка эти величины составляют 0,198 и 0,206, соответственно. Для всех остальных параметров вдува эффективность при параллельных отверстиях выше. Эффективность пленочного охлаждения участка входной кромки при $m = 1,0$ составляет 0,756 для параллельных отверстий и 0,714 для радиальных. Для плоского участка эффективность пленочного охлаждения параллельных отверстий при $m = 1,0$ составляет 0,333 а для радиальных 0,321.

Выводы

1) Результаты настоящей работы показали, что для трехрядной системы радиальных и параллельных отверстий наибольший прирост эффективности пленочного охлаждения на участке входной кромки происходит при увеличении параметра вдува (m), определенного по суммарному расходу воздуха через три ряда отверстий, от 0,5 до 1,0. Для $\alpha = 30^\circ$ увеличение параметра вдува с 0,5 до 1,0 приводит к росту эффективности пленочного охлаждения входной кромки с 0,478 до 0,714; дальнейшее его увеличение до 2,0 приводит к росту эффективности охлаждения до 0,829. Это обусловлено перераспределением расхода воздуха между центральным и боковыми рядами отверстий.

2) При использовании системы радиальных отверстий для участка входной кромки ($x/d \leq 7,85$) наиболее эффективным является расположение боковых отверстий под углом $\alpha = 15^\circ$, для которого при $m = 0,5$ эффективность пленочного охлаждения достигает 0,549, при $m = 1,0$ –0,800, а при $m = 2,0$ –0,975. Исключение составляет

вариант при $m = 1,0$, для которого самая высокая эффективность пленочного охлаждения входной кромки получена для $\alpha = 45^\circ$ и составляет 0,817.

Для плоского участка ($7,85 < x/d \leq 107$) для $m = 0,5$ и $m = 1,0$ наибольшую эффективность пленочного охлаждения обеспечивают углы 30° и 45° , а для $m = 1,5$ и $m = 2,0$ – угол 15° . Однако влияние параметра вдува на эффективность пленочного охлаждения этого участка не так значительно, как для входной кромки.

3) Для системы параллельных отверстий при $m = 0,5$ эффективность пленочного охлаждения входной кромки составляет 0,434, что ниже, чем для системы радиальных отверстий (при $\alpha = 30^\circ$) 0,478. Для всех остальных параметров вдува эффективность пленочного охлаждения при параллельных отверстиях выше. Так, при $m = 1,0$ эффективность пленочного охлаждения входной кромки для параллельных отверстий составляет 0,790, для радиальных – 0,714.

Список литературы: 1. Li, S. Effect of coolant density on leading edge showerhead film cooling using PSP measurement technique [Электронный ресурс] / S. Li, S. Yang, J. Han // ASME. – 2013. – Paper GT2013-94189. – 11 p. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 2. York, W. Leading-edge film-cooling physics: part I – adiabatic effectiveness [Электронный ресурс] / W. York, J. Leylek // ASME. – 2002. – Paper GT2002-30166. – 10 p. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 3. Liu, C. Experimental investigation on the leading edge film cooling of cylindrical and laid-back holes with different hole pitches [Электронный ресурс] / C. Liu, H. Zhu, Z. Zhang // ASME. – 2012. – Paper GT2012-68027. – 12 p. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 4. Sakai, E. Numerical study on flat plate and leading edge film cooling [Электронный ресурс] / E. Sakai, T. Takahashi, K. Funazaki, H. Salleh, K. Watanabe // ASME. – 2009. – Paper GT2009-59517. – 13 p. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 5. Мик. Завесное охлаждение и теплообмен на лобовой части затупленного тела (включая участок расположения отверстий вдува) [Текст] / Мик, Мейл // Современное машиностроение, серия А. – 1989. – № 1. – С. 71–80. 6. Петельчиц, В. Ю. К вопросу повышения точности RANS моделирования пленочного охлаждения [Текст] / В. Ю. Петельчиц, А. А. Халатов, Д. Н. Письменный, Ю. Я. Дашевский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8 (105). – С. 116–122. 7. Петельчиц, В. Ю. Моделирование пленочного охлаждения пластины с входным цилиндрическим участком [Текст] / В. Ю. Петельчиц // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 11(1054). – С. 82–89. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X.

Bibliography (transliterated): 1. Li, S., S. Yang and J. Han. "Effect of coolant density on leading edge showerhead film cooling using PSP measurement technique." *ASME*. Paper GT2013-94189. 2013. CD-ROM. 2. York, W., J. Leylek. "Leading-edge film-cooling physics: part I – adiabatic effectiveness." *ASME*. Paper GT2002-30166. 2002. CD-ROM. 3. Liu, C., H. Zhu and Z. Zhang. "Experimental investigation on the leading edge film cooling of cylindrical and laid-back holes with different hole pitches." *ASME*. Paper GT2012-68027. 2012. CD-ROM. 4. Sakai, E., et al. "Numerical study on flat plate and leading edge film cooling." *ASME*. Paper GT2009-59517. 2009. CD-ROM. 5. Mick, W. J., and R. E. Mayle. "Stagnation Film cooling and heat transfer, including its effect within the hole patten." *Sovremennoe mashinostroenie*. Serija A. No. 1. 1989. 71–80. Print. 6. Petelchyts, V. Yu., et al. "To film cooling RANS simulation accuracy improving approach." *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. No 8(105). 2013. 116–122. Print. 7. Petelchyts, V. Yu. "CFD-Modelling of Plate Film Cooling with Cylindrical Inlet Region." *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and heat engineering and equipment*. No 11(1054). Kharkov : NTU "KhPI", 2014. 82–89. ISSN 2078-774X. Print.

Поступила (received) 23.01.2015