

А. А. ХАЛАТОВ, Н. А. ПАНЧЕНКО

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗА ОТВЕРСТИЯМИ В ТРАНШЕЕ

Представлены результаты компьютерного моделирования эффективности пленочного охлаждения за одним рядом отверстий в траншее в стационарных условиях и в условиях вращения в диапазоне изменения параметра вдува $0,5 \leq m \leq 2,0$. Показано, что вращение охлаждаемой поверхности вызывает смещение потока и пиков локальной эффективности пленочного охлаждения. Однако, для исследованной конфигурации влияние параметров вращения на среднюю эффективность пленочного охлаждения незначительно.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, эффективность, параметр вдува, отверстия в траншее, вращение, компьютерное моделирование.

А. А. ХАЛАТОВ, Н. А. ПАНЧЕНКО

ВПЛИВ ОБЕРТАННЯ ПОВЕРХНІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЗА ОТВОРАМИ В ТРАНШЕЇ

Представлені результати комп'ютерного моделювання ефективності плівкового охолодження за одним рядом отворів в траншеї в стаціонарних умовах і в умовах обертання в діапазоні зміни параметра вдуву $0,5 \leq m \leq 2,0$. Показано, що обертання поверхні, що охолоджується, викликає зміщення потоку і піків локальної ефективності плівкового охолодження. Однак, для дослідженої конфігурації вплив параметрів обертання на середню ефективність плівкового охолодження незначний.

Ключові слова: плівкове охолодження, ефективність, параметр вдуву, отвори в траншеї, обертання, комп'ютерне моделювання.

A. KHALATOV, N. PANCHENKO

INFLUENCE OF THE SURFACE ROTATION ON THE EFFICIENCY OF FILM COOLING BEHIND THE TRENCH HOLES

The film cooling is the primary technique of external cooling of the blades of high-temperature gas turbines. Investigations of the film cooling efficiency and physical structure at the coolant supply through a single array of inclined round holes in the trench at stationary conditions and rotation is of great interest of experts in the field of gas turbine building. The film cooling was simulated using the commercial software ANSYS CFX 14 that is widely used in solution of different problems related to gas turbine thermo-gas dynamics. All computations were carried out using SST turbulence model the adequacy of which was confirmed in previous investigations of the authors. The study was made in the range of blowing parameter m from 0.5 to 2.0. The influence of surface rotation on the film cooling efficiency was studied for rotational speed of the cooled surface n which is 0; 9500; 15000 rpm. The mainstream flow velocity was 400 m/s, the temperature of the mainstream flow and injected flow was 1100 °C and 500 °C, accordingly. The results of computer simulation of film cooling efficiency behind holes in trench are presented for stationary and rotation conditions. It was shown that the rotation of the cooled surface leads to displacement of flow lines and local peaks of the film cooling efficiency. However, for the given configuration influence of the investigated parameters on the average film cooling efficiency is insignificant in the range of blowing parameters studied.

Key words: film cooling, efficiency, blowing parameter, holes in trench, rotation, computer simulation.

Введение

В настоящее время пленочное охлаждение является основным способом внешнего охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин. С 60 г. XX в. в ведущих мировых центрах газотурбостроения выполнен большой объем исследований пленочного охлаждения. Имеющиеся результаты показывают, что при температуре газа более 1500 °C потребный расход охладителя составляет до 20 % от общего расхода воздуха через компрессор установки, поэтому в ряде случаев термодинамические потери от применения системы охлаждения могут превысить положительный эффект охлаждения. В связи с этим, поиск более интенсивных поверхностно-вихревых систем пленочного охлаждения лопаток с высокой теплофизической эффективностью и приемлемым по потерям расходом охладителя является актуальной научно-технической задачей, которая представляет большой интерес для газотурбостроения и других

высокотемпературных энергетических систем. Анализ результатов работ [1–3] показал, что к числу наиболее перспективных методов пленочного охлаждения, позволяющих достичь высокой эффективности пленочного охлаждения при низком расходе охладителя и использовании относительно простой технологии изготовления, можно отнести подачу охладителя через один ряд наклонных отверстий в траншее (рис. 1).

Основной характеристикой пленочного охлаждения является эффективность, которая определяется выражением:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_2 - T_{\infty}}, \quad (1)$$

где T_{∞} – температура основного потока;

T_2 – температура вдуваемого потока;

T_{aw} – температура адиабатной стенки.

Важным параметром, определяющим гидродинамические характеристики пленочного охлаждения, является параметр вдува:

$$m = \frac{\rho_2 w_2}{\rho_\infty w_\infty}, \quad (2)$$

где ρ_2 и w_2 – плотность и скорость двухамного потока; ρ_∞ и w_∞ – плотность и скорость основного потока.

Эффективность пленочного охлаждения зависит от большого количества факторов геометрического и газодинамического характера, к ним относятся: форма отверстий, угол наклона оси отверстия в направлении основного потока, турбулентность и ускорение потока, кривизна поверхности, относительная длина отверстия, вращение поверхности и другие. Многие из них уже подробно изучены, но условиям вращения на данный момент уделено мало внимания. Это связано с тем, что экспериментальные исследования в условиях вращения близких к реальным условиям в газовых турбинах требуют использования очень сложного и дорогостоящего оборудования, которое в настоящее время практически является недоступным для большинства исследователей. В этой связи всё большее значение для теоретических и практических целей приобретают методы численного моделирования с использованием современных коммерческих CFD – пакетов [4, 5].

Цель работы

Цель настоящей работы – исследование эффективности пленочного охлаждения и физической структуры при подаче охладителя через один ряд наклонных цилиндрических отверстий в траншее в стационарных (без вращения) условиях и при вращении охлаждаемой поверхности.

Компьютерная модель

Геометрическая 3D-модель пленочного охлаждения схемы с подачей охладителя в траншею (рис. 1) выполнена в среде *ANSYS Design Manager* и представлена на рис. 2. Она представляет собой канал прямоугольного сечения, в который охладитель подается из внешнего объема (плenums) через отверстия, расположенные в траншее. В работе [6] исследованы различные варианты расположения отверстий в траншее и даны рекомендации по оптимизации геометрических параметров.

Геометрические параметры схемы были приняты следующими (рис. 1): диаметр подающих цилиндрических отверстий $d = 0,8$ мм; поперечный шаг $t = 2,4$ мм ($t/d = 3,0$); высота траншеи $h = 0,6$ мм ($h/d = 0,75$), угол наклона отверстий к поверхности $\alpha = 30^\circ$.

Для выполнения расчетов с учётом вращения модель после её построения в базовой системе координат YOX была перемещена вдоль оси OX на расстояние, соответствующее радиусу вращения $r = 400$ мм при помощи функции *Body Operation*.

Для этого предварительно создана дополнительная плоскость параллельная базовой плоскости ZOY .

Исследование выполнено с применением неструктурированной комбинированной расчетной сети размерностью 1,1 млн. элементов и 65 тыс. узлов, построенная при помощи сеточного генератора *ANSYS CFX Mesh 14* (рис. 2). На поверхности пластины около отверстий и вблизи стенок плenums 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. Все расчёты выполнены с использованием комбинированной *SST* модели турбулентности, представляющей собой суперпозицию $k-\omega$ модели в пристеночной области и $k-\epsilon$ модели вдали от стенки. Выбор *SST* модели турбулентности связан с её способностью достаточно точно моделировать газодинамику и теплообмен сложных пристеночных течений, что было показано ранее при выполнении тестовых расчётах с использованием различных моделей турбулентности [7].

Твёрдые границы расчётной области были заданы как адиабатные стенки ($q = 0$). На боковых поверхностях расчетной модели были заданы условия симметрии. Расположение областей задания граничных условий представлено на рис. 3. Граничные условия на входе и выходе расчётной области были заданы близкими к реальным условиям, имеющим место в системах охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин. Температура основного потока на входе составляет 1100 °С, двухамного – 500 °С. На входе в канал средняя скорость основного потока задавалась равной 400 м/с. Граничные условия, задаваемые при одновременной подаче двухамного воздуха через отверстия (расход охладителя), соответствовали значениям параметра вдува $m = 0,5; 1,0; 1,5$ и $2,0$. Интенсивность турбулентности основного потока на входе задавалась равной 1% . На выходе из канала среднее статическое давление задавалось стандартным и равным 10^6 Па. Расчёты были выполнены для значений частоты вращения модели $n = 0; 9500; 15000$ об/мин.

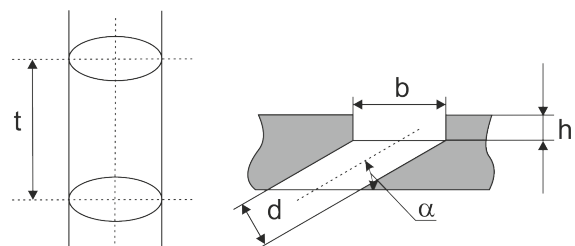


Рис. 1 – Схема подачи охладителя в траншею

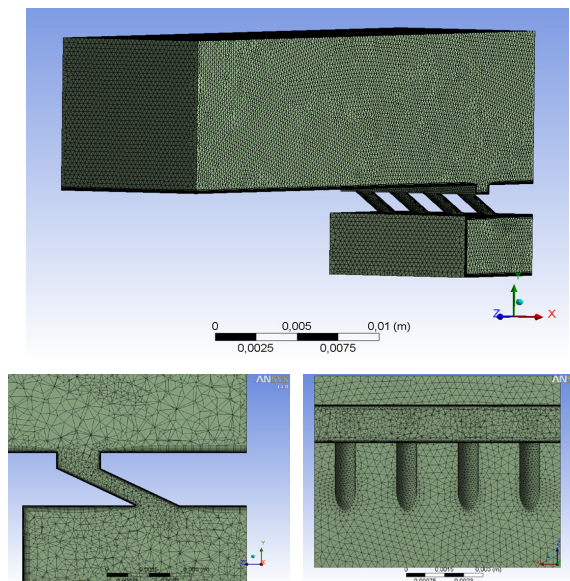


Рис. 2 – Расчетная сетка для модели выдува охладителя в траншею

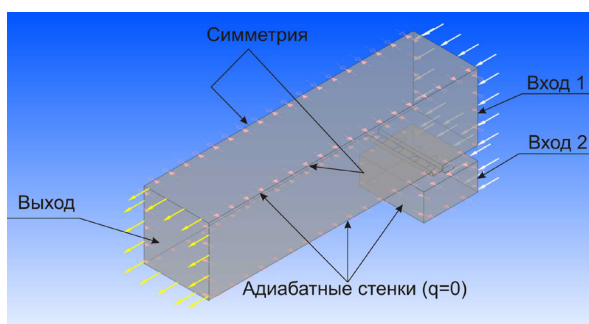


Рис. 3 – Расположение областей задания граничных условий

Обсуждение результатов

Ранее в работе [6] было показано, что по сравнению с традиционной схемой пленочного охлаждения (без траншеи), подача охладителя в траншею увеличивает среднюю эффективность пленочного охлаждения от 50 % ($m = 0,5$) до 150 % ($m = 2,0$). Основными причинами увеличения эффективности пленочного охлаждения при подаче через отверстия в траншею являются предварительное растекание охладителя в траншею, отсутствие отрыва струи от охлаждаемой поверхности, снижение интенсивности и масштаба парной вихревой структуры и более равномерное поперечное распределение пленки охладителя.

На рис. 4 представлена средняя по поверхности эффективность пленочного охлаждения исследованной схемы с выдувом в траншею для стационарных условиях и в условиях вращения (9500 и 15000 об/мин). Вращение поверхности в данном диапазоне не влияет на среднюю по поверхности эффективность пленочного охлаждения за отвер-

стями в траншее по сравнению со стационарным случаем.

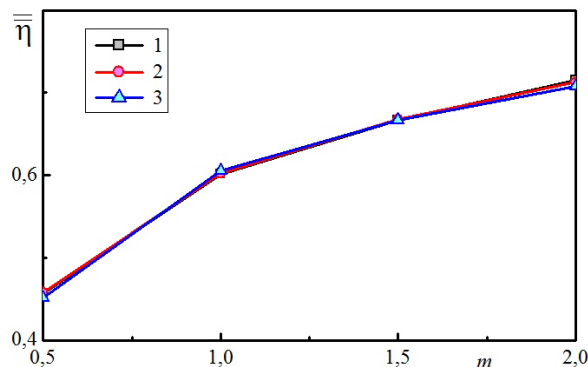


Рис. 4 – Средняя по поверхности эффективность пленочного охлаждения:

1 – $n = 0$ об/мин; 2 – $n = 9500$ об/мин;
3 – $n = 15000$ об/мин

Рассмотрим далее результаты компьютерного моделирования при одном значении параметра вдува $m = 1,0$.

На рис. 5 представлена средняя по ширине адиабатная эффективность пленочного охлаждения в зависимости от относительной длины охлаждаемой поверхности для исследованных частот вращения. Из рис. 5 следует, что на начальном и переходном участке ($x/d = 0 \dots 15$) вращение охлаждаемой поверхности повышает среднюю по ширине эффективность пленочного охлаждения до 5% при $n = 9500$ об/мин и до 10% - при $n = 15000$ об/мин.

На основном участке вращение охлаждаемой поверхности снижает среднюю по ширине эффективность пленочного охлаждения до 7% в обоих случаях. Необходимо напомнить, что существенного различия в средней по поверхности эффективности пленочного охлаждения для рассмотренных условий вращения не наблюдалось (рис.4).

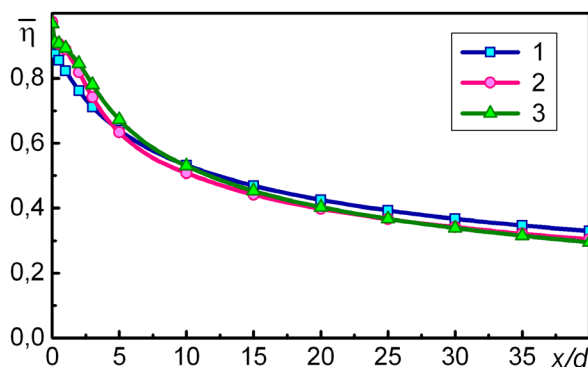


Рис. 5 – Средняя по ширине адиабатная эффективность пленочного охлаждения при $m = 1,0$:

1 – $n = 0$ об/мин; 2 – $n = 9500$ об/мин;
3 – $n = 15000$ об/мин

На рис. 6 показана локальная эффективность пленочного охлаждения в поперечном направлении для различных значений x/d при параметре вдува $m = 1,0$ для схемы с выдувом охлаждения в траншею при стационарных условиях (рис. 6а) и для условий вращения при $n = 9500$ об/мин (рис. 6б), $n = 15000$ об/мин (рис. 6в).

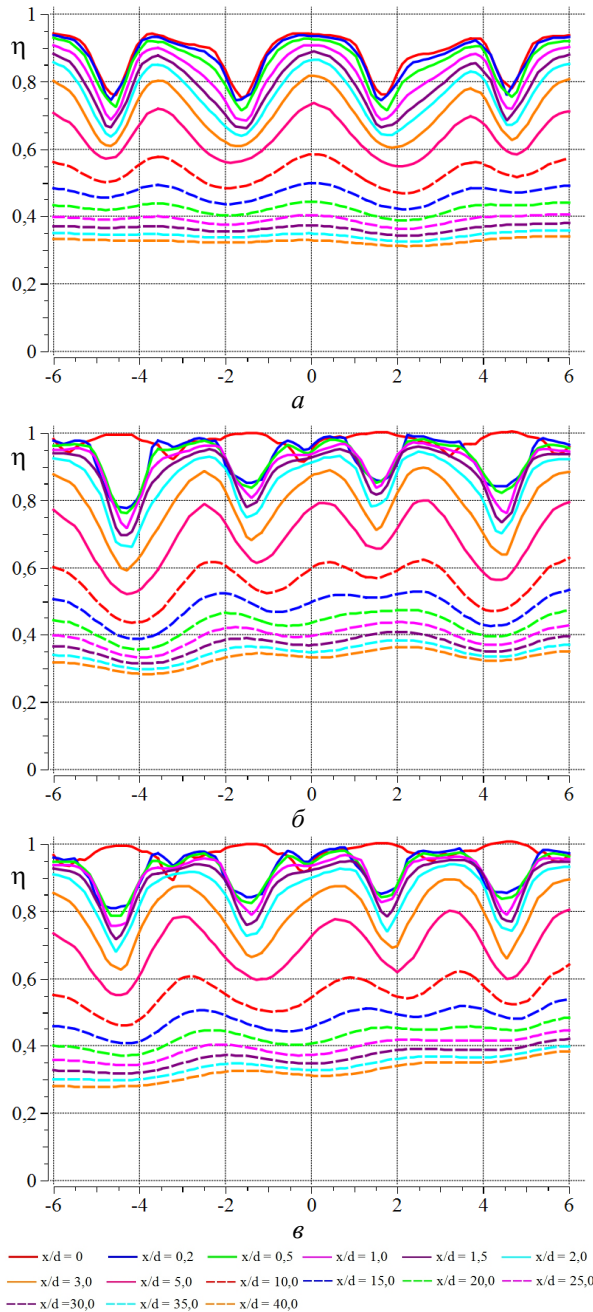


Рис. 6 – Локальная эффективность пленочного охлаждения в поперечном направлении:
 а – $n = 0$ об/мин; б – $n = 9500$ об/мин;
 в – $n = 15000$ об/мин

На графиках с влиянием вращения (рис. 6б, в) наблюдается смещение пиков поперечной эффективности пленочного охлаждения в ре-

зультате вращения охлаждаемой поверхности. Но это не вызывает существенного искажения или неравномерности поля эффективности пленочного охлаждения в слое охладителя. Как следует из рис. 3 на среднюю по поверхности эффективность пленочного охлаждения это не повлияло.

На рис. 7 показаны поля эффективности пленочного охлаждения для условий вдува через отверстия в траншее при параметре вдува $m = 1,0$ для стационарных условий (рис. 7а) и для условий вращения при $n = 9500$ об/мин (рис. 7б) $n = 15000$ об/мин (рис. 7в).

Вращение пластины приводит к смещению изолиний локальной эффективности пленочного охлаждения в поперечном направлении, что показано на рис. 7б, в. Это происходит вследствие отклонения течения охладителя от осевого направления под действием центробежных и кориолисовых сил.

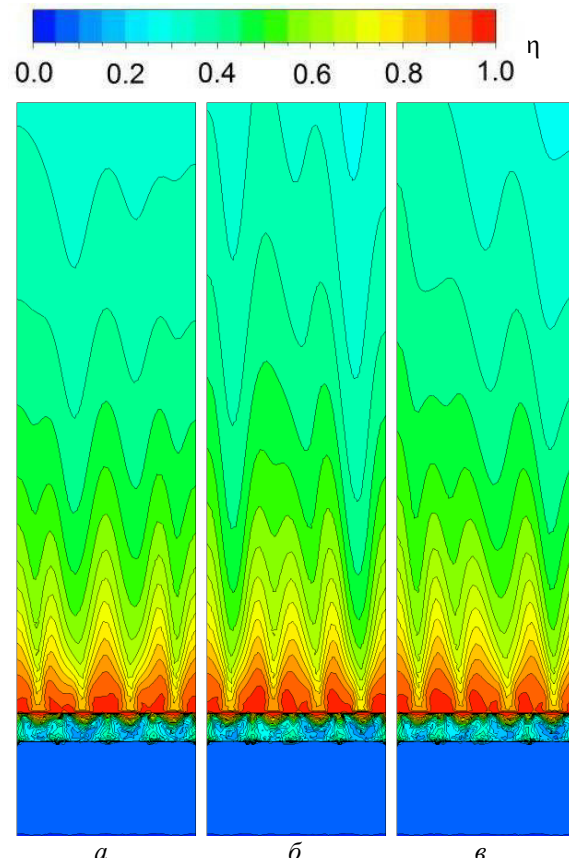


Рис. 7 – Поля адиабатной эффективности пленочного охлаждения для одного ряда отверстий в траншее при $m = 1,0$ на участке $0 \leq x/d \leq 30$:
 а – $n = 0$ об/мин; б – $n = 9500$ об/мин;
 в – $n = 15000$ об/мин

Таким образом, можно сделать вывод, что при исследованных параметрах вдува и угловой скорости вращения, влияние вращения на среднюю эффективность пленочного охлаждения для схемы вдува через отверстия в траншее незначительное.

Выводы

Выполнено сравнительное теоретическое исследование эффективности пленочного охлаждения и физической структуры потока за однорядной схемой пленочного охлаждения с подачей охладителя через отверстия в траншее в стационарных условиях и в условиях вращения.

Вращение охлаждаемой поверхности (9500 и 15000 об/мин) вызывает смещение потока и пиков локальной эффективности пленочного охлаждения. Несмотря на данный факт, для схемы пленочного охлаждения с выдувом охладителя в траншею влияние вращения на эффективность пленочного охлаждения при параметре вдува $0,5 \leq m \leq 2,0$ незначительно.

Список литературы

1. Colban W. F., Thole K. A., Bogard D. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface. *Journal of Turbomachinery*. 2010. Vol. 133. No.1. P. 011002-1–11002-11. doi: 10.1115/1.4002064.
2. Lu Y., Dhungel A., Ekkad V., Bunker R. S. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches. *Journal of Turbomachinery*. 2009. Vol. 131. No.1. P.011003–011013. doi: 10.1115/1.2950057.
3. Халатов А. А., Борисов И. И., Безлюдная М. В., Панченко Н. А., Дашевский Ю. Я. Перспективные способы пленочного охлаждения: влияние ускорения основного потока. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2015. № 15(1124). С. 56–62. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2078-774X.
4. Панченко Н. А. Компьютерное моделирование плёночного охлаждения при подаче охладителя через парные отверстия. *Вестник двигателестроения*. 2015. №2/2015. С. 47–51. ISSN 1727-0219.
5. Bunker Ronald S. Evolution of turbine cooling. *Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2017. Vol.1, Paper No. GT2017-63205, pp. V001T51A001; 26 p. doi:10.1115/GT2017-63205

6. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., Bunker R. S. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches. *J. of Turbomachinery*. 2008. Vol. 131, No. 1. P. 011003–011013. doi:10.1115/1.2950057.
7. Khalatov A. A., Panchenko N. A., Borisov I. I., Severina V. V. Numerical simulation of film cooling with a coolant supplied through holes in a trench. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. May 2017, Vol. 90, Issue 3, pp. 637–643. ISSN 0021-0285. doi: 10.1007/s10891-017-1610-1.

References (transliterated)

1. Colban, W. F., Thole, K. A. and Bogard D. (2010), "A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, pp. 011002-1–11002-11, doi: 10.1115/1.4002064
2. Lu, Y., Dhungel, A., Ekkad, V. and Bunker, R. S. (2009), "Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 131, No.1, pp. 011003–011013, doi: 10.1115/1.2950057.
3. Khalatov A. A., Borisov I. I., Bezludna M. V., Panchenko N. A. and Dashevskyy Yu. J. (2015), "Perspektivnyie sposobyi plenochного ohlazhdeniya: vliyanie uskoreniya osnovnogo potoka [Advanced Methods of the Film Deposition: Influence of the Acceleration of the Main Flow]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 15(1124), pp. 56–62. ISSN 2078-774X.
4. Panchenko, N. A. (2015), "Komp'juternoe modelirovanie plenochного ohlazhdeniya pri podache ohladitelja cherez parnye otverstija [Numerical simulation of double jet film cooling]", *Herald of aeroenginebuilding*, no. 2/2015, pp. 47–51, ISSN 1727-0219.
5. Bunker Ronald S. (2017) "Evolution of turbine cooling", *ASME Turbo Expo*, Vol.1, Paper No. GT2017-63205, pp. V001T51A001; 26 p. doi:10.1115/GT2017-63205
6. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., Bunker R. S. (2008) "Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches", *J. of Turbomachinery*. Vol. 131, No. 1. P. 011003–011013. doi:10.1115/1.2950057.
7. Khalatov, A. A., Panchenko, N. A., Borisov, I. I., Severina, V. V. (2017), "Numerical Simulation of Film Cooling with a Coolant Supplied Through Holes in a Trench", *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 90, No. 3, pp 637–643, doi: 10.1007/s10891-017-1610-1.

Посмунна (received) 18.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Халатов Артем Артемович (Халатов Артем Артемович, Artem Khalatov) – доктор технічних наук, професор, академік НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, завідувач відділом високотемпературної термогазодинаміки; Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», завідувач кафедри фізики енергетичних систем; м. Київ, Україна; e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>.

Панченко Надія Анатоліївна (Панченко Надежда Анатольевна, Nadiia Panchenko) – кандидат технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник відділу високотемпературної термогазодинаміки; Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри фізики енергетичних систем; м. Київ, Україна; e-mail: mynadezhda@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1862-0534>.