

А. А. ХАЛАТОВ, Н. А. ПАНЧЕНКО

## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОТВЕРСТИЯМИ $\Delta$ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗА ПАРНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

**АННОТАЦИЯ** Представлены результаты численного моделирования пленочного охлаждения плоской поверхности при подаче охладителя через систему парных отверстий на поверхность пластины. Приводится сравнительный анализ результатов численного моделирования по влиянию параметра  $\Delta$  на эффективность пленочного охлаждения пластины для парных отверстий. Выполнен анализ физической структуры потока и дано объяснение увеличения эффективности пленочного охлаждения. Для CFD моделирования был использован коммерческий пакет ANSYS CFX 14.

**Ключевые слова:** плёночное охлаждение, парные отверстия, адиабатная эффективность плёночного охлаждения, поперечное расстояние  $\Delta$  между отверстиями, численное моделирование.

A. KHALATOV, N. PANCHENKO

## INFLUENCE OF THE SPANWISE DISTANCE $\Delta$ BETWEEN HOLES ON THE FILM COOLING EFFICIENCY BEYOND DOUBLE JET HOLES

**ABSTRACT** The improvement of thermal efficiency of modern gas turbines can be achieved through increase in the cooling efficiency. Traditional technology of the cooling jets supply through inclined cylindrical holes leads to the formation of the «kidney vortices», which transport hot gas under cooling jets. For all novel film cooling technologies is very important (i) to reduce the influence of secondary flows, (ii) to distribute coolant more uniformly in the spanwise direction, (iii) to minimize the coolant mixing with main hot flow. One of the promising technologies is the double jet film cooling configuration. The results are given on the numerical film cooling simulation at the coolant supply through the double jet holes at the flat plate inlet. Comparison of numerical simulation and experimental results is considered in terms of the spanwise distance  $\Delta$  between holes of first and second row influence on the flat plate film cooling. The flow physical structure is analyzed and explanations are given of the film cooling efficiency growth. As found, at the constant  $\beta_1$  and  $\beta_2$  angle values the spanwise distance  $\Delta$  demonstrates significant influence on the film cooling efficiency, which has the maximum at certain  $\Delta/d$  ratio. The commercial software ANSYS CFX 14 was used for the numerical simulation.

**Key words:** film cooling, double jet holes, adiabatic film cooling efficiency, spanwise distance  $\Delta$  between holes, numerical simulation

### Введение

Плёночное охлаждение в виде системы одно- двух- и многорядных дискретных наклонных отверстий цилиндрической формы, выполненных в охлаждаемой стенке, является одним из основных способов тепловой защиты лопаток современных высокотемпературных газовых турбин. Традиционные схемы пленочного охлаждения характеризуется рядом недостатков. Основной из них – возникновение системы вторичных вихревых структур, основными из которых являются «почечные» вихри, которые приводят к снижению эффективности плёночного охлаждения. Разработкой и исследованием альтернативных схем занимаются учёные и конструктора ведущих мировых производителей ГТУ в США, Японии, Германии, России и Украине. Основными требованиями для новых технических решений является равномерность покрытия поверхности пленкой охладителя при минимальном повышении его расхода, технологичность производства. К таким перспективным решениям, разработанным в последние годы, относится выпуск охладителя в парные отверстия (рис. 1). Данная схема является дальнейшим развитием технологии изготовления отверстий под сложным углом, которая используется в серийных

изделиях при изготовлении отверстий входной кромки рабочих лопаток и сопловых аппаратов. Технологичность и существенное снижение стоимости изготовления парных отверстий является главным фактором в пользу использования этой технологии в практике.

### Цель работы

Идея такой схемы была предложена в патенте [1] и заключается в создании антипочечной вихревой структуры, которая преобразует «почечные» вихри и прижимает охладитель к поверхности. В схеме парных отверстий (рис. 1) отверстия располагаются под углом  $\alpha$  к поверхности и развернуты в плоскости охлаждаемой пластины под углами  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . На рис. 2 представлена предполагаемая схема движения и взаимодействия следов струй охладителя, выходящих из отверстий 1-го и 2-го ряда. Начальная вихревая структура (в первом сечении А–А) содержит классические «почечные» вихри. При наложении струй друг на друга (сечение Б–Б) в области между отверстиями создается зона повышенного давления и происходит постепенное преобразование вихревой структуры с возникновением симметричной пары вихрей (сечение

В–В), вращающихся в противоположных направлениях и обеспечивающих движение охладителя к поверхности с последующим его поперечным растеканием.

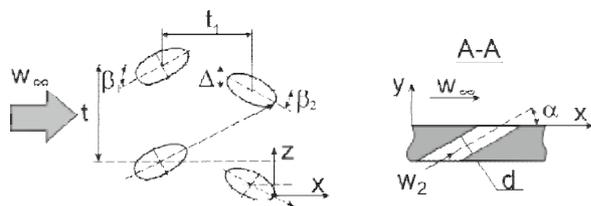


Рис. 1 – Схема парных отверстий

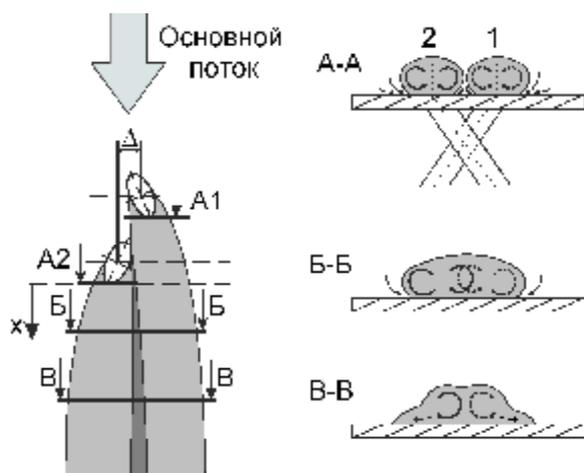


Рис. 2 – Предполагаемая структура вихревого течения за парными отверстиями

Исследования различных авторов были направлены на поиск конфигураций расположения отверстий, которые улучшают равномерность поперечного распределения охладителя и имеют более высокую эффективность пленочного охлаждения. Как показали расчеты [2], при малых параметрах вдува данная цель достигается при расстояниях между отверстиями в поперечном направлении порядка  $d$ . В этом случае вихревая пара становится более симметричной.

В работе [3] исследовался широкий диапазон углов вдува  $\alpha = 10, 15, 20, 30, 40, 45^\circ$  и  $\beta_1 = \beta_2 = 5, 15, 35, 45, 55^\circ$ . В результате даны рекомендации по оптимизации значений углов вдува, согласно которым при  $\alpha = 30^\circ$  оптимальный поперечный угол  $\beta$  равен  $35^\circ$ . В работе [4] исследовались поперечные углы  $\beta = 11^\circ, 23^\circ, 29^\circ$  и  $35^\circ$  ( $\alpha = 30^\circ$ ). Отмечено, что экспериментальные данные по эффективности располагаются ниже расчетных, однако характер распределения эффективности аналогичен. Авторы показали, что целесообразно уменьшить поперечный угол с  $35^\circ$  до  $23...29^\circ$ , т.к. при такой геометрии струи не отклоняются друг от друга и основной поток не транспортируется к поверхности. При малых углах ограничивается поперечное распределение охладителя.

Важную роль в формировании рассматриваемого эффекта играет поперечное расстояние между отверстиями  $\Delta$ , величина которого должна быть положительной [2]. Отрицательное значение  $\Delta$  приводит к отрыву потока и значительному снижению эффективности пленочного охлаждения. Очевидно, что при заданных значениях углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  существует оптимальное значение параметра  $\Delta$ , обеспечивающее максимальное значение эффективности пленочного охлаждения.

Таким образом, с учётом рекомендаций работ [1–4] могут быть выбраны основные геометрические параметры, необходимые для формирования антипочечной вихревой структуры. Согласно предыдущим исследованиям и технологическим особенностям изготовления отверстий, оптимальный угол наклона отверстий к поверхности  $\alpha$  выбран равным  $30^\circ$ , так же как и поперечные углы наклона  $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ . Поперечный шаг расположения отверстий  $t/d = 4$ , продольный шаг между первым и вторым рядом порядка  $\sim 3d$ , где  $d$  – диаметр отверстий. Влияние поперечного расстояния  $\Delta$  между отверстиями первого и второго ряда, имеющее важную роль в формировании антипочечной вихревой структуры, практически не исследовано. Поэтому целью настоящей работы является изучение влияния поперечного расстояния  $\Delta$  между отверстиями первого и второго ряда (при заданных углах  $\alpha = 30^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ ) на эффективность плёночного охлаждения за парными отверстиями.

### Компьютерное моделирование

В последние годы CFD-моделирование получило широкое распространение при решении различных задач термогазодинамики. Сегодня достижения вычислительной техники и вычислительной математики позволяют решать достаточно сложные задачи. В работе [5] протестировано шесть моделей турбулентности ( $k$ – $\epsilon$ ,  $RNG$   $k$ – $\epsilon$ ,  $k$ – $w$ ,  $SST$   $k$ – $w$ ,  $LLR$   $RSM$ ,  $SSG$   $RSM$ ) для расчета эффективности пленочного охлаждения за парными отверстиями. Для сравнения использовались собственные экспериментальные данные. Показано, что лучшие результаты демонстрирует  $k$ – $\epsilon$  модель турбулентности.

*Компьютерная модель.* Исследуемая геометрическая 3D-модель плёночного охлаждения плоской поверхности с вдувом охладителя через парные наклонные цилиндрические отверстия была построена в *ANSYS Design Manager*. Она представляет собой канал прямоугольного сечения, в который охладитель подается из внешнего объема (плёнума) через парные отверстия (рис. 3). Длина основного и предвключенного участков модели составляли  $x/d = 25$  и  $x/d = 50$  соответственно. Диаметр подающих цилиндрических отверстий  $d = 3,2$  мм, поперечный шаг расположения отвер-

стей  $t = 12,8$  мм ( $t/d = 4$ ), продольный шаг между осями первого и второго ряда  $t_1 = 10$  мм ( $t_1/d = 3,125d$ ). Угол наклона отверстий к поверхности  $\alpha = 30^\circ$ , поперечные углы наклона  $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ . За основу была взята схема с относительным расстоянием между отверстиями  $\Delta/d = 1,0$  [5]. Далее отверстия смещались с шагом  $0,5d$ , в диапазоне изменения  $\Delta/d$  от  $-2,0$  до  $2,0$ .

*Расчётная сетка.* При численном моделировании использовалась неструктурированная комбинированная расчетная сетка, которая состояла из 3,8 млн. элементов и 990 тыс. узлов. У поверхности пластины, около отверстий и вблизи стенок пленума выполнено сгущение сетки размерностью в 20 ячеек. Значение параметра  $y^+$  во всех расчетах применялось в диапазоне от 0,5 до 1,1, что удовлетворяет условиям моделирования с применением RANS моделей турбулентности.

*Граничные условия.* Расположение областей задания граничных условий представлено на рис. 3. Температура основного потока на входе составляла  $25^\circ\text{C}$ , вдуваемого  $-72^\circ\text{C}$ . На входе в канал средняя скорость основного потока задавалась равной  $37,8$  м/с. Граничные условия для потока, вдуваемого через два ряда отверстий, соответствовали значениям параметра вдува  $m = 0,5; 1,0; 1,5$  и  $2,0$ . Интенсивность турбулентности основного потока на входе принималась равной 1%. На выходе из модели среднее статическое давление задавалось атмосферным и равным  $101300$  Па. Расчеты проводились при числах Рейнольдса  $Re_d$ , определенных по эквивалентному диаметру канала и скорости основного потока, в диапазоне  $(0,9 \dots 1,25) \cdot 10^5$ . При компьютерном моделировании использовалась  $k-\epsilon$  модель турбулентности, показавшая наилучшие результаты в работе [5].

### Результаты и их обсуждение

Влияние отношения  $\Delta/d$  на осредненную по поверхности эффективность пленочного охлаждения представлено на рис. 4. Как следует, в зависимости от величины  $\Delta/d$  средняя эффективность пленочного охлаждения изменяется по кривой с максимумом, причем значение  $(\Delta/d)_{\text{опт}}$ , соответствующее максимуму эффективности, изменяется от 1,5 до 0,5 при увеличении параметра вдува от 0,5 до 2,0. При  $\Delta/d < 0$  наблюдается значительное снижение эффективности пленочного охлаждения.

Обработка данных моделирования (рис. 4) в диапазоне изменения  $\Delta/d$  от 0,5 до 1,5 для углов  $\alpha = \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$  при  $m = 0,5-2,0$  позволила впервые получить уравнение для осредненной по поверхности эффективности пленочного охлаждения

$$\bar{\eta} = 0,28 + 0,58(D/d) - 0,39(D/d)^2. \quad (1)$$

Также, для величины  $(\Delta/d)_{\text{опт}}$  впервые в диапазоне изменения  $m$  от 0,5 до 2,0 для углов  $\alpha = \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$  получена следующая зависимость

$$(\Delta/d)_{\text{опт}} = -0,125 + 1,41m - 0,3m^2. \quad (2)$$

Для анализа физической структуры потока за парными отверстиями при различных значениях  $\Delta/d$  рассмотрим поля температур и проекции векторов скорости в поперечной плоскости на расстояниях  $x/d = 10$  от задней кромки второго ряда при  $m = 1,0$  (рис. 5). При анализе рис. 5 можно выделить пять групп потоков. Для  $\Delta/d = 2,0; -1,5; -1,0$  (первая группа) за парой отверстий формируются классические интенсивные симметричные «почечные» вихри, приводящие к подосу воздуха из основного потока к поверхности, что приводит к снижению эффективности пленочного охлаждения.

Для  $\Delta/d = -0,5$  и  $\Delta/d = 0$  (вторая группа) за парой отверстий формируются несимметричные «почечные» вихри с наклоном вихревой структуры в правую сторону (в плоскости рисунка). При  $\Delta/d = 0,5$  и  $1,0$  (третья группа) наблюдается сложная вихревая структура с единичным несимметричным вихрем, который препятствует поступлению воздуха из основного потока к поверхности пластины.

При  $\Delta/d = 1,3$  (четвертая группа) формируется несимметричная вихревая структура с наклоном в левую сторону, формируется антипочечная вихревая структура с растеканием охладителя в поперечном направлении, что препятствует поступлению основного потока к стенке. Как следует из рис. 4, в этом случае эффективность пленочного охлаждения максимальна и вихревая структура обеспечивает лучшие теплозащитные свойства.

При дальнейшем увеличении  $\Delta/d$  до 1,5 и 2,0 (пятая группа) сформированная вихревая структура становится симметричной и нормальной к поверхности. Существенное снижение эффективности пленочного охлаждения (рис. 5) может быть обусловлено отрывом потока при увеличении интенсивности вихрей.

Анализ физической структуры потока за парными отверстиями при различных значениях  $\Delta/d$  (рис. 5) показал, что для рассматриваемого случая ( $\alpha = \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ ) наилучшими теплозащитными свойствами обладает антипочечная несимметричная вихревая структура с наклоном соседних вихрей в правую сторону (рис. 5,  $\Delta/d = 1,3$ ).

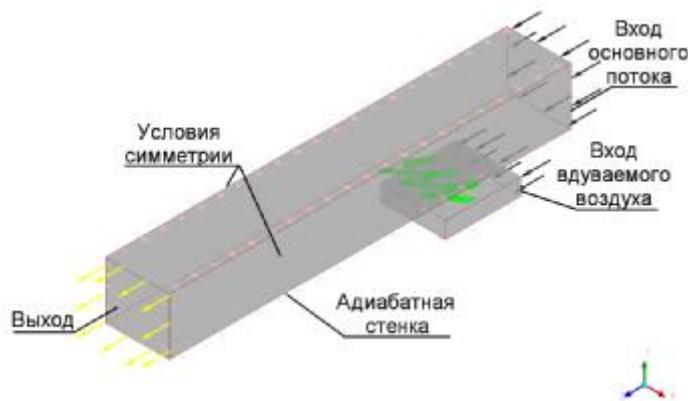


Рис. 3 – Геометрическая 3D-модель плёночного охлаждения плоской поверхности при вдуве охладителя через парные отверстия

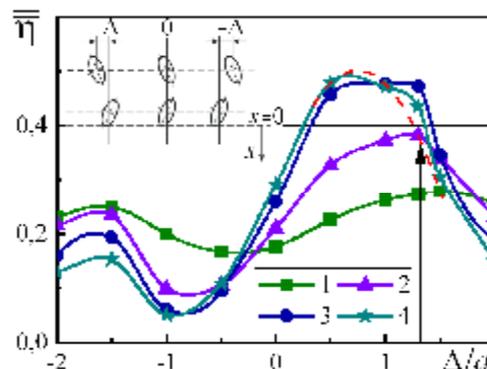


Рис. 4 – Влияние отношения  $\Delta/d$  на величину  $\bar{\eta}$ : 1 –  $m = 0,5$ ; 2 –  $m = 1,0$ ; 3 –  $m = 1,5$ ; 4 –  $m = 2,0$

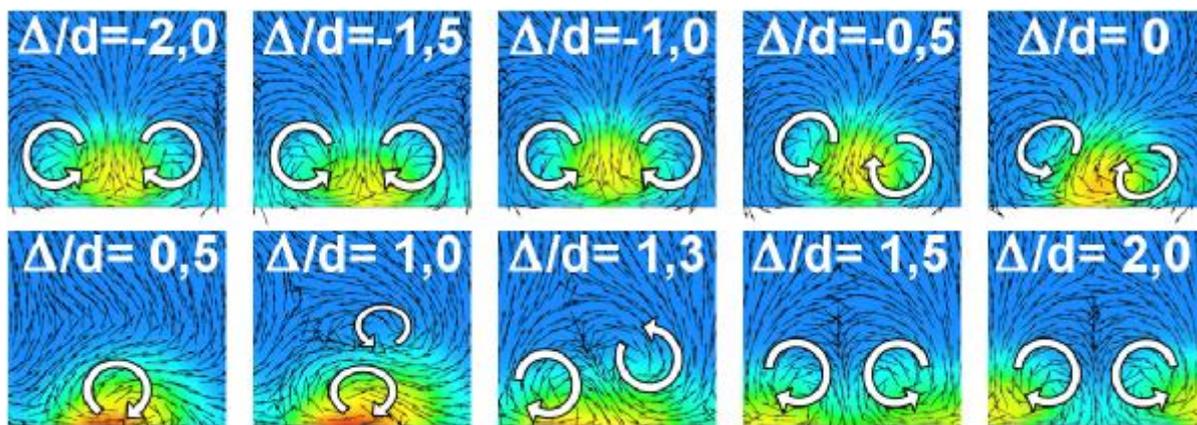


Рис. 5 – Температурные поля и проекции векторов скорости за парными отверстиями в зависимости от отношения  $\Delta/d$  при  $m = 1,0$  на расстоянии  $x/d = 10$

### Выводы

При заданных значениях углов подачи охладителя  $\beta_1$  и  $\beta_2$  поперечное расстояние между отверстиями первого и второго ряда  $\Delta$  оказывает значительное влияние на эффективность плёночного охлаждения, которая изменяется по кривой с максимумом. Впервые получено уравнение для оптимального значения параметра  $\Delta/d$ , обеспечивающего максимальную эффективность охлаждения.

### Список литературы

- 1 US Pat. Application. Double jet film cooling structure [Text] / Sugimoto T., Tanaka R., Tsuji K., Bohn D., Kusterer K. – № US 2007/0109743A1. – 17.05.2007. – 8 p., based on Japanese Patent Application № 2005 – 332530, 17.11.2005.
- 2 Kusterer, K. Experimental and numerical investigations of the double-jet film cooling technology [Text] / K. Kusterer, A. Elyas, D. Bohn et al. // J. of Energy and Power Engng. – 2010. – Vol. 4, No. 9. – P. 16–25. – ISSN 2327-588X.

- 3 Lee Ki-Don. Optimization of ejection angles of double-jet film-cooling holes using RBNN model [Text] / Ki-Don Lee, Dae-Woong Choi, Kwang-Yong Kim // International Journal of Thermal Sciences. – 2013. – № 73. – P 69–78. – ISSN 1290-0729.
- 4 Kusterer, K. A parametric study on the influence of the lateral ejection angle of double-jet holes on the film cooling effectiveness for high blowing ratios [Electronic resource] / K. Kusterer, A. Elyas, D. Bohn et al // Proceedings of ASME Turbo Expo–2009. – GT2009-59321. – 13 p. – 1 CD-ROM. – Title from the screen.
- 5 Панченко, Н. А. Компьютерное моделирование плёночного охлаждения при подаче охладителя через парные отверстия [Текст] / Н. А. Панченко // Вестник двигателестроения. – 2015. – №2/2015. – С. 47–51. – ISSN 1727-0219.

### Bibliography (transliterated)

- 1 Sugimoto T., Tanaka R., Tsuji K., Bohn D. and Kusterer K. (2007), Application. Double jet film cooling structure, US Pat. US 2007/0109743A1.
- 2 Kusterer, K., Elyas, A., D. Bohn, et al. (2010), Experimental and numerical investigations of the double-jet film cooling technology<sup>2</sup>, J. of Energy and Power Engng, vol. 4, no. 9, pp. 16–25, ISSN 2327-588X.

- 3 **Lee, Ki-Don, Choi, Dae-Woong and Kim, Kwang-Yong** (2013), <sup>2</sup>Optimization of ejection angles of double-jet film-cooling holes using RBNN model<sup>2</sup>, *International Journal of Thermal Sciences*, no. 73, pp. 69–78, ISSN 1290-0729.
- 4 **Kusterer, K., Elyas, A. and Bohn, D.** et al. (2009), <sup>2</sup>A parametric study on the influence of the lateral ejection angle of double-jet holes on the film cooling effectiveness for high blowing ratios<sup>2</sup>, *Proceedings of ASME Turbo Expo–2009*, no. GT2009-59321.
- 5 **Panchenko, N. A.** (2015), <sup>2</sup>Komp'juternoe modelirovanie plenochного ohlazhdenija pri podache ohladitelja cherez parnye otverstija [Numerical simulation of double jet film cooling]<sup>2</sup>, *Herald of aeroenginebuilding*, no. 2/2015, pp. 47–51, ISSN 1727-0219.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Халатов Артём Артёмович** – доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины, заведующий отделом Института технической теплофизики НАН Украины, Национальный технический институт Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; тел. +38(044) 456-93-02, e-mail: [artem.khalatov@vortex.org.ua](mailto:artem.khalatov@vortex.org.ua); ORCID 0000-0002-7659-4234.

**Khalatov Artem** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the NAS of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics, Ukrainian National Academy of Science, National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; tel. +38(044) 456-93-02, e-mail: [artem.khalatov@vortex.org.ua](mailto:artem.khalatov@vortex.org.ua); ORCID 0000-0002-7659-4234.

**Панченко Надежда Анатольевна** – младший научный сотрудник Института технической теплофизики НАН Украины, ассистент Национального технического института Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; тел. +38(097) 193-90-43, e-mail: [mynadezhda@i.ua](mailto:mynadezhda@i.ua); ORCID 0000-0003-1862-0534.

**Panchenko Nadiia** – Junior Research Fellow, Institute of Engineering Thermophysics, Ukrainian National Academy of Science, asst., National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; tel. +38(097) 193-90-43, e-mail: [mynadezhda@i.ua](mailto:mynadezhda@i.ua); ORCID 0000-0003-1862-0534.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Халатов, А. А.** Влияние поперечного расстояния между отверстиями  $\Delta$  на эффективность плёночного охлаждения за парными отверстиями [Текст] / **А. А. Халатов, Н. А. Панченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 26–30. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.03.

*Please cite this article as:*

**Khalatov, A. and Panchenko, N.** (2016), <sup>2</sup>Influence of the Spanwise Distance  $\Delta$  Between Holes on the Film Cooling Efficiency Beyond Double Jet Holes<sup>2</sup>. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 26–30, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.03.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Халатов, А. А.** Вплив поперечної відстані між отворами  $\Delta$  на ефективність плівкового охолодження за парними отворами [Текст] / **А. А. Халатов, Н. А. Панченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 26–30. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.03.

**АНОТАЦІЯ** Представлені результати чисельного моделювання плівкового охолодження плоскої поверхні при подачі охолоджувача через систему парних отворів на поверхню пластини. Наводиться порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання щодо впливу параметра  $\Delta$  на ефективність плівкового охолодження пластини для парних отворів. Виконано аналіз фізичної структури потоку і дано пояснення збільшення ефективності плівкового охолодження. Для CFD моделювання був використаний комерційний пакет ANSYS CFX 14.

**Ключові слова:** плівкове охолодження, парні отвори, адіабатна ефективність плівкового охолодження, поперечне відстань  $\Delta$  між отворами, чисельне моделювання.

Поступила (received) 10.01.2016