

**А. А. ХАЛАТОВ, Н. А. ПАНЧЕНКО, М. В. БЕЗЛЮДНАЯ**

### **ФАКТОРЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗА ДВУХРЯДНОЙ СИСТЕМОЙ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЯХ**

**АННОТАЦИЯ** Представлены результаты поверхностной визуализации и компьютерного моделирования пленочного охлаждения плоской поверхности при подаче воздуха через цилиндрические наклонные отверстия в полусферических углублениях и через традиционные цилиндрические наклонные отверстия. На основании анализа результатов сделаны выводы о структуре течения за отверстиями в сферических углублениях и о причинах повышения эффективности пленочного охлаждения за ней по сравнению с традиционной схемой.

**Ключевые слова:** пленочное охлаждение, сферические углубления, «почечный» вихрь, визуализация, компьютерное моделирование, поверхностные линии тока.

**A. KHALATOV, N. PANCHENKO, M. BEZLIUDNA**

### **AUGMENTATION FACTORS OF THE FILM COOLING CONFIGURATION USING TWO ROWS OF INCLINED CYLINDRICAL HOLES PLACED INSIDE HEMISPHERICAL DIMPLES**

**ABSTRACT** The modern high-performance gas turbine engines operate at the temperatures exceeding the melting temperature of construction materials, which require the blade cooling. Usually the gas turbine blades apply high-developed cooling system including the external film cooling promoting the higher operational durability and longer blade service life. Then film cooling efficiency depends strongly from the method of coolant supply onto the blade surface. Currently the published results contain some data, regarding the type of coolant supply. Analysis of this data has shown that coolant supply into hemispherical dimple is one of the perspective schemes, providing the high rate of film cooling efficiency. The interesting scientific task is investigation of physical structure near the cooled surface and identification of reasons influencing greater film cooling efficiency compared with traditional cooling technique. For this reason using the ink spot technique the surface streamline visualization was performed for the traditional cooling scheme, as well as the coolant supply into hemispherical dimples. The numerical simulation was made using ANSYS CFX 14 code along with  $k-\varepsilon$  turbulence model, the blowing factor was varied from 0.5 to 2.0. The analysis of results obtained has shown that scheme with a coolant supply into hemispherical dimples reduces the flow separation length and the intensity of pair ("kidney") vortex.

**Key words:** film cooling, spherical dimples, kidney vortex, visualization, numerical simulation, surface streamlines

#### **Введение**

Пленочное охлаждение широко используется для охлаждения лопаток первых ступеней высокотемпературных газовых турбин. При подаче охладителя на поверхность лопатки создается защитная пленка (завеса), таким образом, уменьшается контакт материала лопатки с горячим агрессивным газом. Важным фактором является создание равномерной в поперечном направлении пленки и ее как можно более длительное сохранение вниз по потоку. В традиционных схемах подачи охладителя через систему круглых наклонных отверстий при параметре вдува больше единицы эффективность пленочного охлаждения резко снижается, что обусловлено отрывом потока от поверхности охлаждения и возникновением вторичных вихревых структур («почечных» вихрей), разрушающих пленку охладителя и способствующих «подосу» горячего потока к защищаемой поверхности.

В настоящее время активно изучается возможность использования инновационных систем пленочного охлаждения, таких как подача охладителя в углубления различной формы [1, 2], отверстия сложной формы [3], а также создание «анти-

вихревых» систем [4–5]. Ведущие турбиностроительные компании уже используют инновационные схемы, однако сложная форма отверстий повышает стоимость их производства. В связи с этим важной проблемой является поиск и исследование систем пленочного охлаждения, которые обеспечивают высокую эффективность пленочного охлаждения, снижение расхода и равномерное распределение охладителя по поверхности.

#### **Цель работы**

Идея подачи охладителя в углубления сферической формы была предложена в ИТТФ НАНУ [6]. В работе [7] показано, что при изменении параметра вдува от 0,5 до 2,0 такая схема обеспечивает повышение эффективности пленочного охлаждения по сравнению с традиционной схемой от 22 до 120 %. В связи с этим значительный интерес представляет анализ структуры потока около охлаждаемой поверхности и исследование причин повышения эффективности пленочного охлаждения.

**Визуализация поверхностных линий тока и анализ результатов моделирования**

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе открытого типа, подробное описание экспериментальной установки представлено в [8]. В экспериментах использовалась пластина для подачи воздуха, схема которой, представлена на рис. 1. Геометрические параметры были следующими: диаметр сферических углублений  $D$  составлял 8 мм; относительная глубина  $h/D = 0,5$ ; диаметр цилиндрических отверстий  $d = 3,2$  мм; поперечный шаг отверстий  $t = 16$  мм ( $t/d = 5$ ), продольный шаг  $t_1 = 8$  мм ( $t_1/d = 2,5$ ), угол подачи охладителя к плоскости пластины  $\alpha = 30^\circ$ . Нижняя линия проекции цилиндрического отверстия на плоскость  $x$ - $y$  проходит через край углубления вниз по потоку. При визуализации вдуваемый (вторичный) воздух не нагревался, турбулизирующая решетка и профили для создания ускорения потока отсутствовали.

Для визуализации применялся метод масляных точек, в котором в растительное масло добавлялся черный краситель. На поверхности пластины помещался гладкий картон, на который наносились масляные точки. В первых четырех рядах точки располагались в коридорном порядке с продольным и поперечным шагом 2,5 мм. Следующие ряды точек располагались в шахматном порядке с поперечным шагом 5 мм и продольным — 10 мм.

Для проверки качества потока перед отверстиями вдува был проведен тестовый эксперимент. В этом случае отверстия вдува полностью заклеивались. Поверхностные следы за масляными точками растекались равномерно, не пересекаясь друг с другом, что свидетельствовало о равномерности профиля скорости в поперечном направлении.

Также в работе представлен анализ результатов компьютерного моделирования. Поскольку схема показала более высокие значения эффективности охлаждения при высоких параметрах вдува, то для компьютерного анализа выбран случай, соответствующий параметру вдува  $m = 1,5$ . Как и в экспериментах рассмотрена схема подачи нагретого охладителя в более холодный основной поток (температура вторичного воздуха  $50^\circ\text{C}$ , основного —  $20^\circ\text{C}$ ). При компьютерном моделировании использовалась  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, показавшая наилучшие результаты при сравнении с экспериментальными данными [9].

**Обсуждение результатов**

На рис. 2 представлено распределение поверхностных линий тока при вдуве охладителя в полусферические углубления (рис. 2а) и через традиционные наклонные цилиндрические отверстия (рис. 2б). В этом случае распределение линий тока

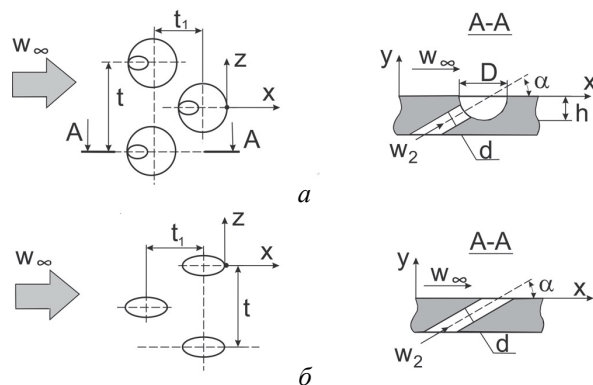


Рис. 1 – Схемы расположения отверстий:  
а – отверстия в полусферических углублениях,  
б – цилиндрические отверстия

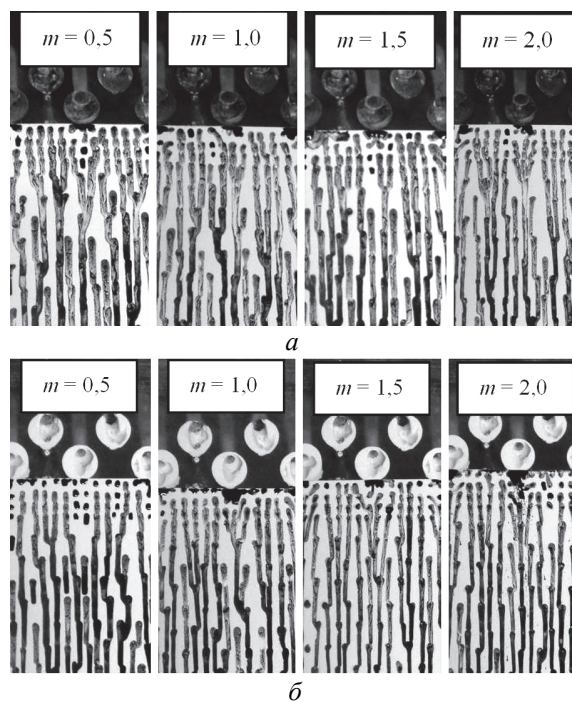


Рис. 2 – Поверхностные линии тока:  
а – отверстия в полусферических углублениях;  
б – цилиндрические отверстия

существенно отличается от данных полученных при тестовых экспериментах.

При  $m = 0,5$  сразу за вторым рядом отверстий в полусферических углублениях формируется область слабого обратного течения (обратное растекание масляных точек первого и второго рядов). Точки третьего и четвертого рядов практически не растекаются, что свидетельствует о застойных явлениях. Для системы цилиндрических отверстий при  $m = 0,5$  за отверстиями второго ряда масляные точки первых четырех рядов ( $x = 10$  мм) не растекаются (более широкая застойная зона). Аналогичная картина наблюдается в первом ряду масляных точек за отверстиями первого ряда отверстий.

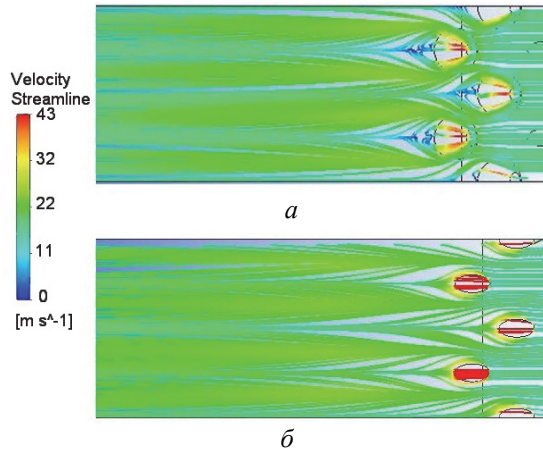


Рис. 3 – Поверхностные линии тока ( $m = 1,5$ ):  
 а – отверстия в полусферических углублениях;  
 б – цилиндрические отверстия

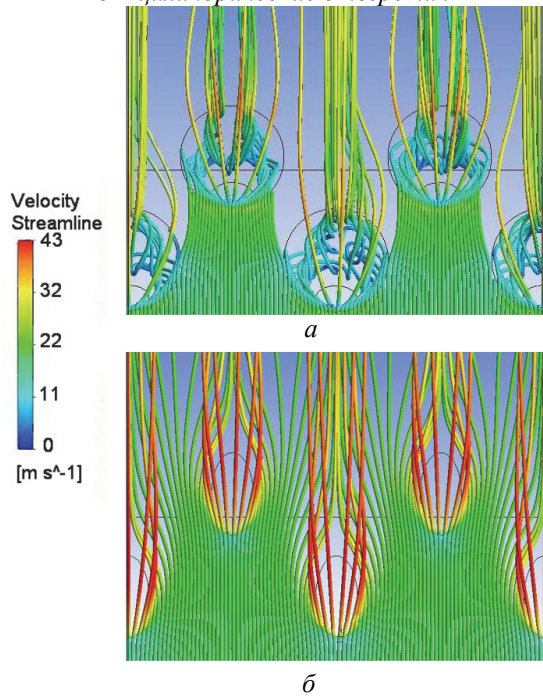


Рис. 4 – Линии тока основного потока около поверхности пластины ( $m = 1,5$ ):  
 а – отверстия в полусферических углублениях;  
 б – цилиндрические отверстия

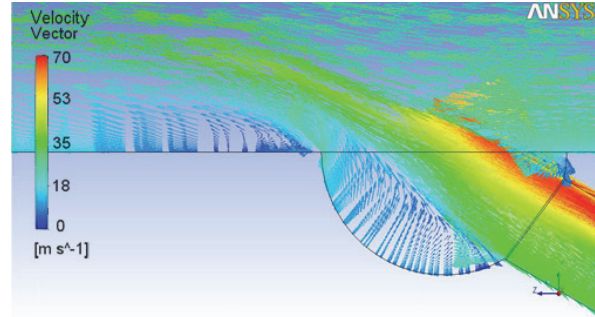


Рис. 5 – Структура потока в полусферическом углублении ( $m = 1,5$ )

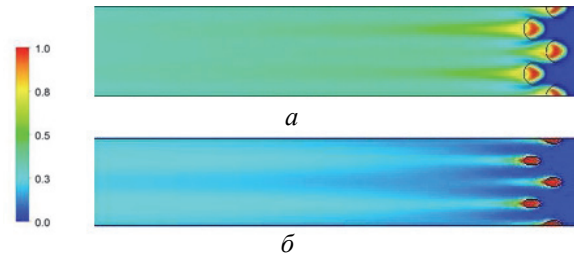


Рис. 6 – Поля адиабатной эффективности пленочного охлаждения;  $m = 1,5$ :  
 а – отверстия в полусферических углублениях,  
 б – цилиндрических отверстий

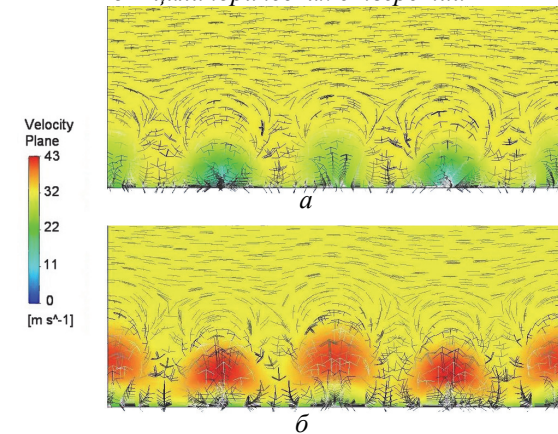


Рис. 7 – Векторы скорости при  $x/d = 3$  за вторым рядом отверстий;  $m = 1,5$ :  
 а – отверстия в полусферических углублениях;  
 б – цилиндрические отверстия в стенке

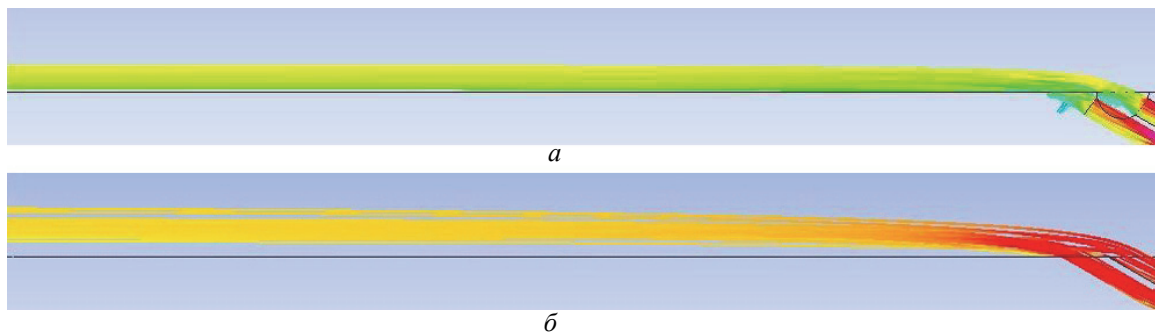


Рис. 8 – Линии тока охладителя при  $m = 1,5$ :  
 а – отверстия в полусферических углублениях; б – цилиндрические отверстия

При  $m = 1,0$  за системою отверстий в углублениях зона слабого обратного течения сохраняется, а точки третьего и четвертого рядов незначительно растекаются в направлении основного потока (после зоны отрыва). При вдуве охладителя через цилиндрические отверстия для  $m = 1,0$  область обратного растекания масляных точек сохраняется, причем, масляные точки третьего и четвертого рядов ( $x = 7,5 \dots 10$  мм) стекаются к центральной линии за отверстием (проявление парного вихря).

При параметре вдува  $m = 1,5$  картина поверхностных линий тока при вдуве через систему отверстий в углублениях аналогична случаю  $m = 1,0$ , с той лишь разницей, что область обратного течения масляных точек выражена сильнее. При подаче охладителя через систему цилиндрических отверстий при  $m = 1,5$  зона обратного течения расширяется и усиливается перетекание масляных точек в поперечном направлении к центральной линии до третьего ряда масляных точек (усиление вторичного вихря).

При повышении параметра вдува до  $m = 2,0$  и подаче охладителя через систему отверстий в углублениях поперечное перетекание масляных точек к центральной линии за отверстием появляется за вторым рядом отверстий. При вдуве через систему цилиндрических отверстий наблюдаются выраженная область обратного течения масляных точек за отверстиями и хорошо заметная область перетекания в поперечном направлении.

Поскольку визуализация не позволила сделать окончательный вывод о причинах увеличения эффективности охлаждения за двухрядно системой отверстий в полусферических углублениях, то для рассмотрения этого вопроса было выполнено компьютерное моделирование физической структуры потока.

На рис. 3 показаны линии тока около поверхности пластины для обоих случаев. При экспериментальной визуализации и  $m = 1,5$  за системой отверстий в полусферических углублениях была обнаружена небольшая зона обратного течения (рис. 2а). За цилиндрическими отверстиями наблюдалось значительное перетекание масляных точек к центральной линии (рис. 2б). Результаты расчета, представленные на рис. 3, подтверждают данные экспериментального исследования.

На рис. 4 представлены линии тока около поверхности пластины. Вследствие более низкого давления в углублении основной поток всасывается в углубление с боковых сторон (рис. 4а), а выходит наружу в виде узкой струи за первым рядом отверстий и более широкой струи – за вторым. Такая картина соответствует структуре потока в «мелких» сферических углублениях ( $h/d = 0,10$ ) в двухрядной системе [10]. При подаче охладителя через цилиндрические отверстия (рис. 4б) воздух основного потока обтекает струю и частично зате-

кает под нее к центральной линии, ухудшая условия охлаждения.

Анализ рис. 5 показывает, что «затекание» («подсос») потока в полусферическое углубление (рис. 4а), приводит к возникновению области циркуляции потока под струей охладителя, что приводит к отклонению угла его подачи от геометрического значения. Однако, это не приводит к значительному отрыву потока от поверхности охлаждения. За полусферическим углублением наблюдается только локальная зона отрыва потока, длина которой составляет около одного диаметра углубления  $D$ .

На рис. 6 представлены поля эффективности пленочного охлаждения. За отверстиями в полусферических углублениях наблюдается более равномерное распределение охладителя по поверхности, благодаря предварительному расширению струи в углублении. В то же время, за рядами цилиндрических отверстий поперечная неравномерность охлаждения наблюдается на большем расстоянии от места вдува.

На рис. 7 показаны векторы скорости в поперечной плоскости на расстоянии  $x/d = 3$  от задней кромки второго ряда. За рядами цилиндрических отверстий (рис. 7б) отчетливо видны характерные вихревые структуры в форме парного («почечного») вихря. При вдуве охладителя в полусферические углубления (рис. 7а) эти вихревые структуры имеют существенно меньшую интенсивность.

На рис. 8 представлены линии тока около плоской поверхности для обоих случаев. Данные рис. 8а подтверждают, что при подаче охладителя через полусферические углубления струя охладителя не отрывается от поверхности охлаждения по всей длине. Это в значительной степени обусловлено разворотом струи охладителя в углублении (рис. 5). При подаче потока через цилиндрические отверстия охладитель «уходит» в основной поток и поэтому наблюдается зона отрыва по всей длине пластины (рис. 8б), что существенно снижает эффективность охлаждения.

## Выводы

Поверхностная визуализация потока показала различную структуру потока за двумя рядами цилиндрических отверстий и отверстий в полусферических углублениях. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что подача вторичного потока в углубления способствует снижению длины области отрыва потока. Незначительные поперечные течения у поверхности пластины косвенно свидетельствуют о снижении интенсивности парного вихря сразу за двумя рядами отверстий в углублениях. В то же время существенные поперечные течения за двумя рядами цилиндрических отверстий подтверждают существ-

вание интенсивного парного вихря.

Совместный анализ результатов визуализации и моделирования позволяет сделать окончательный вывод о том, что более высокая эффективность пленочного охлаждения за двумя рядами отверстий в полусферических углублениях обусловлена несколькими факторами. Основными из них являются: снижение длины зоны отрыва охладителя от поверхности пластины и уменьшение интенсивности вторичных течений («почечного» вихря) в области подачи охладителя.

#### Список литературы

- 1 Davidson, F. D. Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters and trenches / F. D. Davidson, D. Kistenmacher, D. Bogard // *Journal of Turbomachinery*. – 2012. – Vol. 136, No.4. – P. 1757-1768. – doi:10.1115/GT2012-70029.
- 2 Lu, Y. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches / Y. Lu, A. Dhungel, V. Ekkad, R. S. Bunker // *Journal of Turbomachinery*. – 2009. – Vol. 131, No.1. – P. 011003–011013. doi:10.1115/1.2950057.
- 3 Colban W. F. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface / W. F. Colban, K. A. Thole, D. Bogard // *Journal of Turbomachinery*. – 2010. – Vol. 133, No.1. – P. 011002-1–11002-11. – doi:10.1115/1.4002064.
- 4 Khalatov, A. A. Flat plate film cooling from a double jet holes: influence of free-stream turbulence and flow acceleration / A. A. Khalatov, I. I. Borisov, N. A. Panchenko, Yu. J. Dashevskyy, A. S. Kovalenko // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2014. – Vol. 21, No 5. – P. 545–552. – ISSN 0869-8643. – doi: 10.1134/S0869864314050023.
- 5 Петельчиц, В. Ю. Влияние ориентации рядов отверстий на цилиндрическом участке входной кромки на эффективность пленочного охлаждения / В. Ю. Петельчиц, Д. Н. Письменный, Ю. Я. Дашевский // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 15(1124). – С. 69–75. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X.
- 6 Спосіб плівкового охолодження та пристрій для його здійснення : патент 47749: МПК: F01D5/00 / Халатов А. А., Варганов І. С., Коваленко Г. В. ; заявитель и патентообладатель Институт технической теплофизики. – №2001096063 ; заявл. 03.09.01 ; опубл. 15.12.04, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.
- 7 Халатов, А. А. Экспериментальное исследование двухрядных схем пленочного охлаждения [Электронный ресурс] / А. А. Халатов, И. И. Борисов, Н. А. Панченко, М. В. Безлюдная, Ю. Я. Дашевский // *Сборник трудов РНКТ-6*. – Россия, Москва, 27–31 октября 2014 г. – С. 297–300. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.
- 8 Халатов, А. А. Перспективные способы пленочного охлаждения: влияние ускорения основного потока / А. А. Халатов, И. И. Борисов, М. В. Безлюдная, Н. А. Панченко, Ю. Я. Дашевский // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 15(1124). – С. 56–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.

- 9 Халатов, А. А. Пленочное охлаждение плоской пластины при выдуве охладителя через круглые отверстия в двухрядной системе сферических углублений / А. А. Халатов, М. В. Безлюдная, Ю. Я. Дашевский, С. Д. Северин, И. И. Борисов // *Насосы. Турбины. Системы*. – 2013. – № 4(9). – С. 47–55. – ISSN 2226-177X.
- 10 Коваленко, Г. В. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов / Г. В. Коваленко, А. А. Халатов // *Прикладная гидромеханика*. – 2008. – Т. 10(82), №1. – С. 23–32. – ISSN 1561-9087.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 Davidson, F. D., Kistenmacher, D. and Bogard, D. (2012), "Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters and trenches", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 136 No. 4, pp. 1757–1768, doi:10.1115/GT2012-70029.
- 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 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.
- 4 Khalatov, A. A., Borisov, I. I., Panchenko, N. A., Dashevskyy, Yu. J. and Kovalenko, A. S. (2014), "Flat plate film cooling from a double jet holes: influence of free-stream turbulence and flow acceleration", *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 21 No. 5, pp. 545–552, ISSN 0869-8643, doi: 10.1134/S0869864314050023.
- 5 Petelchits, V. Yu., Pysmennyi, D. N. and Dashevskyy, Yu. Ya. (2015), "Vliyanie orientatsii ryadov otverstiy na tsilindricheskom uchastke vhodnoy kromki na effektivnost plenochnogo ohlazhdeniya [Influence Produced by the Orientation of Slot Rows in the Cylindrical Section of the Entrance Edge of the Film Deposition Efficiency]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 15(1124), pp. 69–75. ISSN 2078-774X
- 6 Khalatov, A. A., Varhanov, I. V. and Kovalenko, H. V., "Institute of engineering thermophysics (2004) "Sposib plivkovogo oholodzhennya ta pristryi dlya yogo zdiysnennya [Method of film cooling and appliance for its implementation]", *State Register of Patents of Ukraine*, Kiev, UA, Pat. No. 47749.
- 7 Khalatov, A. A., Borisov, I. I., Panchenko, N. A., Bezliudna, M. V. and Dashevskyy, Yu. J. (2014), "Eksperimentalnoe issledovanie dvuhryadnyih shem plenochnogo ohlazhdeniya [The experimental study of double row film cooling schemes]", *Reports of VI Russian National Conference on Heat Transfer, 27-31 Oct.* [Electronic], MEI Publishing House, Moscow, Russian.
- 8 Khalatov A. A., Borisov I. I., Bezliudna M. V., Panchenko N. A. and Dashevskyy Yu. J. (2015), "Perspektivnyie sposoby plenochnogo 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.

- 9 **Khalatov, A. A., Bezliudna, M. V., Dashevskyy, Yu. J., Severin, S. D. and Borisov, I. I.** (2013), "Plenochnoe ohlazhdenie ploskoy plastinyi pri vyiduve ohladitelya cherez kruglyie otverstiya v dvuhryadnoy sisteme sfericheskikh uglubleniy [Tape cooling of the flat plate of the cooler blow through round opening in two-row system of spherical deepenings]", *Pumps. Turbines. Systems*, No. 4(9), pp. 47–55, ISSN 2226-177X.
- 10 **Kovalenko, H. V. and Khalatov, A. A.** (2008), "Granitsyi rezhimov techeniya v uglubleniyah na ploskoy poverhnosti, imeyuschih formu sfericheskikh segmentov [The boundaries of flow regimes in the pits on a flat surface in the shape of spherical segments]", *Applied Hydromechanics*, Vol. 10(82) No 1, pp. 23–32, ISSN 1561-9087.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Халатов Артем Артемович** – доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины, Институт технической теплофизики НАН Украины, заведующий отделом высокотемпературной термогазодинамики; Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», заведующий кафедрой физики энергетических систем; г. Киев, Украина; e-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua, ORCID 0000-0002-7659-4234.

**Khalatov Artem** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Associated member of NAS of Ukraine, Head of department of high temperature thermogas dynamics, Institute of engineering thermophysics of NAS of Ukraine, 2a Zhelyabov str., 03057, Kiev, Ukraine; Head of department physics of energy systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy av. 03056, Kiev, Ukraine.

**Панченко Надежда Анатольевна** – кандидат технических наук, Институт технической теплофизики НАН Украины, научный сотрудник отдела высокотемпературной термогазодинамики; Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», старший преподаватель кафедры физики энергетических систем; г. Киев, Украина; e-mail: mynadezhda@i.ua, ORCID 0000-0003-1862-0534.

**Panchenko Nadiia** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Researcher at department of high temperature thermogas dynamics, Institute of engineering thermophysics of NAS of Ukraine, 2a Zhelyabov str., 03057, Kiev, Ukraine; Senior Lecturer of department physics of energy systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy av. 03056, Kiev, Ukraine.

**Безлюдная Мария Владимировна** – кандидат технических наук, Институт технической теплофизики НАН Украины, младший научный сотрудник отдела высокотемпературной термогазодинамики; г. Киев, Украина; e-mail: bezludnaya@gmail.com, ORCID 0000-0002-4733-3334.

**Bezliudna Mariia** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Junior Researcher at department of high temperature thermogas dynamics, Institute of engineering thermophysics of NAS of Ukraine, 2a Zhelyabov str., 03057, Kiev, Ukraine.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Халатов А. А.** Факторы увеличения эффективности пленочного охлаждения за двухрядной системой отверстий в полусферических углублениях / **А. А. Халатов, Н. А. Панченко, М. В. Безлюдная** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 34–40. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.05.

*Please cite this article as:*

**Khalatov, A., Panchenko, N. and Bezliudna, M.** (2017), "Augmentation Factors of the Film Cooling Configuration Using Two Rows of Inclined Cylindrical Holes Placed Inside Hemispherical Dimples", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 34–40, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.05.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Халатов А. А.** Фактори збільшення ефективності плівкового охолодження за дворядною системою отворів у напівсферичних поглибленнях / **А. А. Халатов, Н. А. Панченко, М. В. Безлюдная** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 34–40. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.05.

**АНОТАЦІЯ** Представлені результати поверхневої візуалізації та комп'ютерного моделювання плівкового охолодження плоскої поверхні при подачі повітря через циліндричні похилі отвори в напівсферичних поглибленнях і через традиційні циліндричні похилі отвори. На підставі аналізу результатів зроблені висновки про структуру течії за отворами в сферичних поглибленнях і про причини підвищення ефективності плівкового охолодження за нею в порівнянні з традиційною схемою.

**Ключові слова:** плівкове охолодження, сферичні поглиблення, «нирковий» вихор, візуалізація, комп'ютерне моделювання, поверхневі лінії течії.

*Поступила (received) 10.02.2017*