



УДК 621.45.038

Академик НАН Украины А. А. Халатов, И. И. Борисов,
Ю. Я. Дашевский, М. А. Пахомов, В. И. Терехов

Пленочное охлаждение с помощью однорядных систем наклонных отверстий в углублениях

Проведено сравнительное экспериментальное исследование пленочного охлаждения плоской поверхности однорядными системами наклонных отверстий, расположенных в углублениях в виде “кратеров” и траншеи. Показано, что данные способы позволяют существенно повысить эффективность охлаждения и снизить его поперечную неравномерность по сравнению с системой традиционных наклонных отверстий. Эти преимущества особенно заметно проявляются при больших параметрах вдува.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, наклонные отверстия, кратеры, траншея, эффективность охлаждения.

Газотурбостроение относится к технологически сложному и наукоемкому производству. Украина входит в число десяти наиболее развитых стран мира, которые обладают полным циклом проектирования и серийного производства газовых турбин. Особенностью инфраструктуры газотурбостроения Украины является широкий спектр выпускаемых газовых турбин — для авиации, военно-морского флота, энергетики и механического привода на магистральных газопроводах.

Основным направлением повышения эффективности газовых турбин является повышение температуры газа после камеры сгорания. Сегодня в лучших мощных энергетических газотурбинных установках (350 МВт и более) температура газа перед турбиной составляет 1500...1600 °С, в серийных авиационных ГТД — 1650...1750 °С и в наземных ГТД механического привода — 1350...1450 °С. Поскольку рост этой температуры ограничен допустимой температурой работоспособности материала лопаток, которая для лучших жаропрочных сплавов составляет 1000...1100 °С, то в современных лопатках газовых турбин широко применяются внутреннее и внешнее (пленочное) охлаждение.

Начиная с середины XX в., в мире выполнен большой объем исследований в области пленочного охлаждения, на основе которого разработаны надежные методы и программы расчета, способствовавшие прогрессу газотурбостроения. Большой вклад в развитие этой

© А. А. Халатов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, М. А. Пахомов, В. И. Терехов, 2015

проблемы внесли исследования, выполненные в США, Великобритании, Германии, Франции, Украине и России. К настоящему времени наиболее полно разработана теория пленочного охлаждения для вдува газа через пористые участки и тангенциальные щели [1–5]. Данные схемы, хотя и обеспечивают наиболее высокую эффективность и наилучшее поперечное распределение охладителя, из конструктивных соображений достаточно трудно организовать в лопатках турбин. Поэтому традиционно применяется выпуск охладителя из одного и более рядов цилиндрических отверстий, расположенных под углом 30–45° к поверхности. Вследствие дискретности и неравномерности подачи охладителя пленочное охлаждение из цилиндрических отверстий уступает по эффективности сплошной щели. Механизм снижения эффективности связан с возникновением во вдуваемой струе охладителя вихревой пары [1, 6], которая сохраняется вниз по потоку. За отверстием может формироваться зона отрыва, способствующая ускорению потока и снижающая эффективность пленочного охлаждения вследствие “подсоса” горячего потока к поверхности и уноса охладителя от поверхности.

Одним из основных научно-технических направлений на современном этапе стал поиск инновационных схем пленочного охлаждения с высокой теплофизической эффективностью и приемлемым расходом воздуха на охлаждение. Исследования, выполненные в ведущих мировых центрах, показали принципиальную возможность решения этой проблемы за счет более сложных конфигураций охлаждающих отверстий. Наилучшие результаты показали “фасонные” отверстия для подачи охладителя с изменяемым поперечным сечением по длине [7–9]. Однако выполнение таких отверстий в стенке лопатки толщиной около 1 мм сопряжено с большими технологическими трудностями и высокой стоимостью производства.

В результате дальнейшего поиска в ряде стран, в том числе и в Украине, были найдены инновационные решения, обладающие более простой технологией, высокой теплофизической эффективностью и приемлемым расходом воздуха на охлаждение. К ним, прежде всего, относится подача охладителя в поверхностные углубления различной формы — в сферические сегменты, треугольные и прямоугольные углубления, “кратеры” и траншею [10–14]. Исследования, выполненные в этом направлении, весьма ограничены, причем в ряде случаев представленные результаты противоречивы и не могут быть использованы в практике газотурбостроения.

Целью настоящей работы является сравнительное экспериментальное исследование эффективности пленочного охлаждения двух инновационных схем пленочного охлаждения лопаток газовых турбин при расположении отверстий для подачи охладителя в “кратеры” или поперечную траншею. Для сравнения использованы экспериментальные данные зарубежных авторов.

Экспериментальная установка и методика проведения измерений. Экспериментальная установка, созданная в ИТТФ НАН Украины, представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа, работающую от центробежного вентилятора ВВД-5. Атмосферный воздух (первичный поток) от вентилятора подавался в ресивер и далее поступал в рабочий участок. Равномерное по сечению поле скорости на входе в рабочий участок обеспечивалось установкой на выходе из ресивера спрямляющей сетки и прямоугольного сопла, спроектированного по профилю Витошинского. Входное сечение сопла составляет 400 × 300, а выходное — 294 × 34 мм² (соотношение входной и выходной площадей $F_{вх}/F_{вых} = 12$), длина сопла равна 350 мм. Интенсивность турбулентности потока на входе в рабочий участок не превышала 1%. После рабочего участка воздушный поток поступал в успокоительную емкость и далее выбрасывался в атмосферу. Для исследования эффективности пленочного

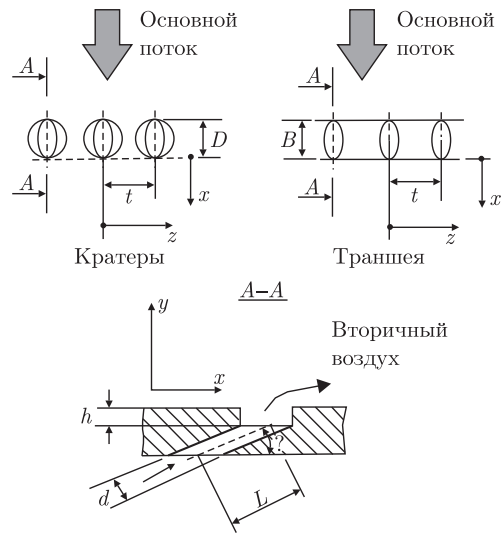


Рис. 1. Однорядная система наклонных отверстий в “кратерах” и траншее

охлаждения использовано обратное направление теплового потока: основной поток холодный, а вторичный — нагретый. Вдуваемый воздух (вторичный поток) от индивидуального компрессора через регулирующий вентиль, расходомер (ротаметр) и электронагреватель подавался в рабочий участок через систему парных отверстий.

Экспериментальный участок имеет прямоугольное сечение $294 \times 34 \text{ мм}^2$. Нижняя стенка канала содержит пластину из оргстекла с системой отверстий для подачи вторичного воздуха и адиабатную пластину из асбоцемента ($\lambda = 0,17 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), в которую заподлицо с поверхностью смонтированы 9 хромель-алюмелевых термопар, расположенных в продольном направлении на одной линии с постоянным по длине шагом (10 мм). В установке предусмотрена возможность трансверсального перемещения адиабатной пластины для определения локальных значений эффективности пленочного охлаждения в поперечном направлении.

Толщина пограничного слоя перед отверстиями первого ряда отверстий вдува вторичного воздуха составляла 3,6...3,9 мм, а формпараметр $H \approx 1,4$, так что пограничный слой был близок к турбулентному. Отношение толщины пограничного слоя к диаметру отверстия вдува составляло $\delta/d = 1,1 \div 1,2$.

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока 33...38 м/с, температура основного потока 20...33 °С, вторичного (вдуваемого) — 55...80 °С. Отношение плотности вдуваемого и основного потока составляло 0,85...0,88, параметр вдува m изменялся от 0,5 до 2,0, а число Рейнольдса по эквивалентному диаметру канала рабочего участка и скорости основного потока на входе равнялось $Re_d = 1,25 \cdot 10^5 \div 1,5 \cdot 10^5$.

Геометрические характеристики. Эксперименты выполнены с однорядной системой отверстий, расположенных в цилиндрических кавернах (в литературе по пленочному охлаждению называемых “кратерами”) или в траншее (рис. 1).

Относительные геометрические параметры выбирались с учетом ранее выполненных исследований [13, 14]. Диаметр отверстия d в обоих случаях составлял 3,2 мм, угол наклона осей отверстий к поверхности адиабатной пластины составлял 30°, поперечный шаг отверстий $t = 10 \text{ мм}$ ($t/d \approx 3,0$). Длина отверстий вдува L равнялась 20 мм, а относительная

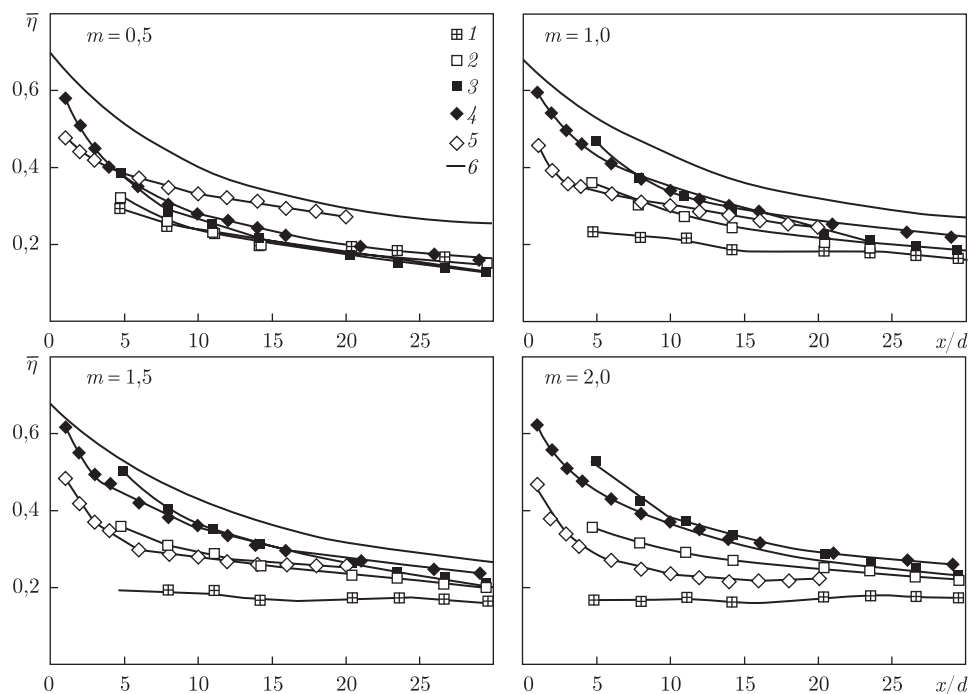


Рис. 2. Средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения при различных параметрах вдува, $t/d = 3,0$:

1, 2, 3 — данные настоящей работы, соответственно один ряд отверстий без углублений, отверстий в “кратерах” и отверстий в траншее; 4 — один ряд отверстий в “кратерах” [11]; 5 — один ряд отверстий в траншее [12]; 6 — один ряд профилированных отверстий [13]

длина — $L/d = 6,25$. Диаметр “кратеров” D и ширина траншеи B соответствовали размеру эллипса наклонного отверстия, т. е. были “вписаны” в “кратер” или в траншею.

Глубина “кратеров” и траншеи была одинаковой $h = 2,4$ мм ($h/d \approx 0,75$). Продольное расстояние x отсчитывалось от “среза” отверстия, поперечное расстояние Z — от центральной линии одного из отверстий. Для сравнения были проведены эксперименты с однорядной системой традиционных наклонных отверстий без углублений с аналогичной величиной поперечного шага. Во всех исследованных конфигурациях в ряду было семь отверстий.

Результаты экспериментов и их анализ. Эффективность пленочного охлаждения определялась по соотношению $\eta = (T_{aw} - T_{\infty}) / (T_2 - T_{\infty})$, где T_{aw} , T_{∞} и T_2 — соответственно температура адиабатической поверхности, основного и вдуваемого потоков.

На рис. 2 представлено продольное распределение средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения для однорядных систем традиционных наклонных отверстий, отверстий в “кратерах” и отверстий в траншее, полученное в экспериментах авторов. Здесь приведены данные работ [11, 12] для аналогичной системы “кратеров” и траншеи, а также однорядной системы профилированных отверстий с аналогичным шагом. Как следует из рис. 2, при $m \geq 1$ эффективность пленочного охлаждения для кратерной и траншейной конфигураций существенно превышает эффективность традиционной системы отверстий без углублений, а при малом параметре вдува ($m = 0,5$) различие незначительное, наблюдаемое в основном на начальном участке вдува ($x/d < 15$).

Результаты настоящего исследования хорошо согласуются с данными работ [11, 12] во всем диапазоне изменения параметра вдува, кроме области $m = 0,5$, где для “кратерной”

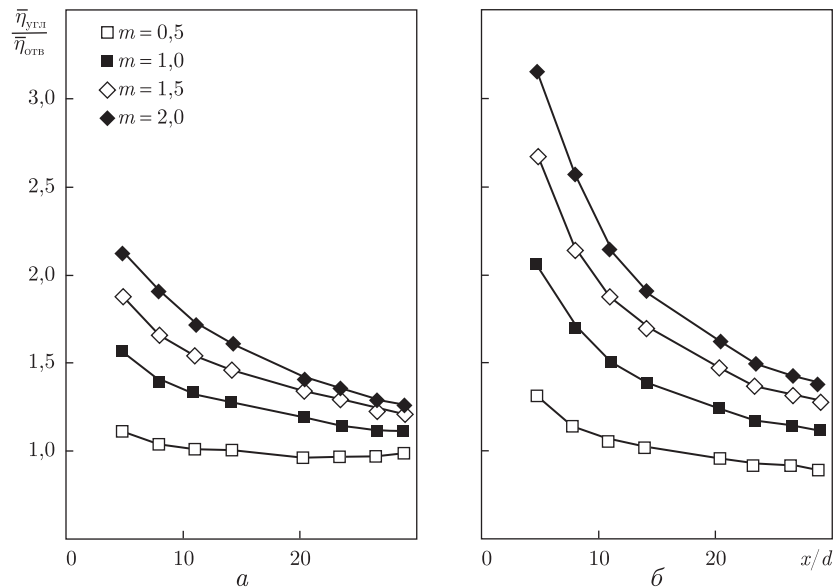


Рис. 3. Отношение средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения однорядной системы отверстий в углублениях и без углублений в продольном направлении при различных параметрах вдува: a — “кратеры”; b — траншея

схемы результаты [11] оказались сильно завышенными. При $m = 1,0$ и более эффективность пленочного охлаждения при использовании траншеи становится больше, чем при использовании системы “кратеров”. Система профилированных отверстий имеет преимущество при малых параметрах вдува, а при $m > 1,5$ ее эффективность становится сравнимой с траншейной конфигурацией.

На рис. 3 для различных параметров вдува приведено продольное распределение отношения средней по ширине пластины эффективности пленочного охлаждения для однорядной системы отверстий в углублениях (“кратерах” и траншее) к эффективности аналогичной системы отверстий без углублений. Как видно из рисунка, это отношение возрастает с увеличением параметра вдува во всем исследованном диапазоне. При больших параметрах вдува ($m \geq 1,0$) использование “кратеров” позволяет повысить эффективность пленочного охлаждения на начальном участке в 1,5–2,0 раза, а использование траншеи — в 2–3 раза. С увеличением параметра вдува преимущество схем с углублениями усиливается, однако темп роста отношения $\bar{\eta}_{\text{угл}}/\bar{\eta}_{\text{отв}}$ замедляется.

Кроме высокой эффективности пленочного охлаждения, использование системы отверстий в “кратерах” и траншее позволяет достичь более равномерного распределения эффективности охлаждения в поперечном направлении по сравнению с традиционной системой отверстий без углублений (рис. 4). Наилучшие результаты достигнуты для варианта отверстий в траншее: начиная от сечения вдува эффективность практически сохраняется постоянной по ширине пластины.

Авторы [14] предполагают, что кромки “кратеров” и траншеи блокируют выход охладителя в основной поток и способствуют его перераспределению в поперечном направлении. Причем в случае траншеи условия растекания вторичного воздуха более благоприятны — поток имеет возможность растекаться внутри нее и выходить на поверхность как равномерная пленка, а не система струй. При удалении от сечения вдува поперечное распределение

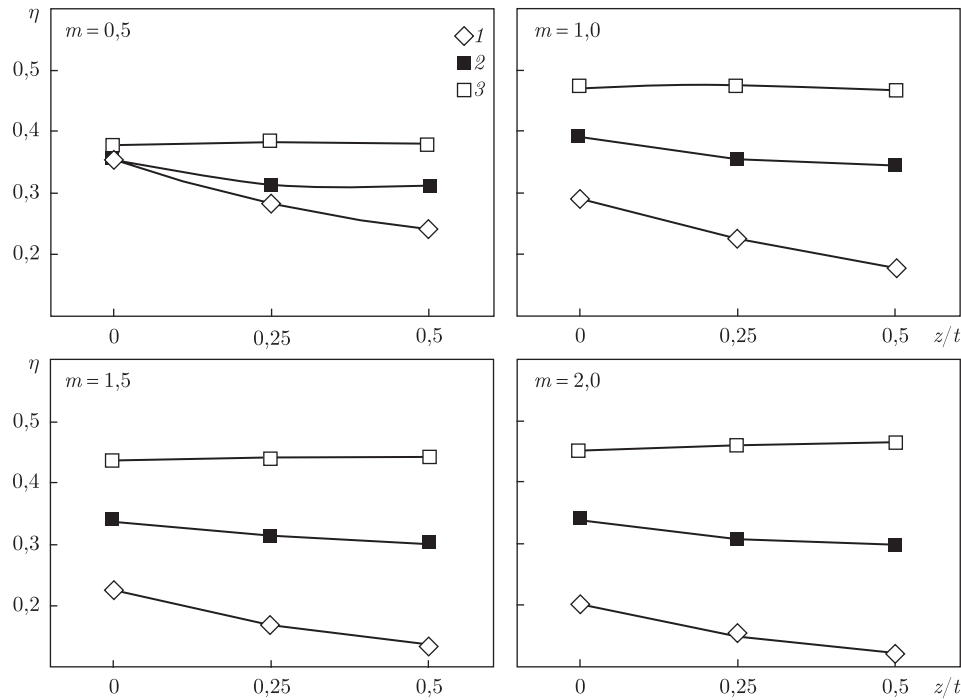


Рис. 4. Поперечное распределение эффективности пленочного охлаждения при $x/d = 4,84$ (первое измерительное сечение): 1, 2, 3 — соответственно однорядные системы цилиндрических отверстий без углублений в “кратерах” и в траншее

эффективности охлаждения выравнивается и в конце экспериментального участка оно становится практически равномерным для обеих исследованных конфигураций.

При обобщении результатов выполненных экспериментов проверялись различные формы зависимостей и в результате была выбрана следующая:

$$\bar{\eta} = \frac{C_1}{\frac{t}{d} + C_2 m^{C_3} \left(\frac{x}{sm}\right)^{C_4}}, \quad (1)$$

где m — параметр вдува; t — шаг расположения отверстий; $s = \pi d^2/4t$ — ширина эквивалентной щели. Данная форма была предложена в [8] применительно к фасонным отверстиям, однако, как оказалось, она также позволяет проводить с наименьшей погрешностью обобщение данных и по системам отверстий в “кратерах” и траншее.

Значения коэффициентов C_1 – C_4 в уравнении (1) для исследованных в работе схем пленочного охлаждения приведены в табл. 1. Полученные обобщенные уравнения описывают экспериментальные данные с погрешностью, не превышающей $\pm 4\%$.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Подача охладителя в “кратеры” и траншеею позволяет существенно повысить эффективность пленочного охлаждения и сни-

Таблица 1. Коэффициенты в уравнении (1)

Вариант	C_1	C_2	C_3	C_4
Отверстия в “кратерах”	1,18	0,031	0,416	1,04
Отверстия в траншее	2,33	0,176	0,352	0,88

зить поперечную неравномерность охлаждения по сравнению с системой традиционных наклонных отверстий. Эти преимущества особенно заметно проявляются при больших параметрах вдува.

При $m \geq 1$ эффективность пленочного охлаждения однорядной системы “кратеров” превышает эффективность системы стандартных наклонных цилиндрических отверстий в начальных сечениях в 1,5...2 раза, а в удаленных ($x/d \approx 30$) — в 1,1...1,3 раза.

Эффективность пленочного охлаждения с помощью однорядной системы наклонных отверстий в траншее на начальном участке превышает эффективность традиционной системы наклонных отверстий. При $m = 0,5$ это превышение составляет 30%, но увеличивается в 2...3,5 раза при больших параметрах вдува. По мере удаления от места вдува это различие уменьшается и при $x/d \approx 30$ становится незначительным.

Подача охладителя в углубления различной формы обладает высокой тепловой эффективностью и является перспективным направлением в газотурбостроении. Работы в этом направлении необходимо продолжить, прежде всего, в направлении поиска таких конфигураций углублений, которые обладают наиболее высокой эффективностью пленочного охлаждения при минимальном расходе вторичного воздуха (охладителя).

Работа выполнена в рамках совместного проекта НАН Украины — РФФИ.

Цитированная литература

1. Goldstein R. J. Film cooling // Advances in heat transfer, 1971. — 7. — P. 321–379.
2. Ренухов В. М. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа. — Киев: Наук. думка, 1980. — 216 с.
3. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы. — Новосибирск: Наука, 1983. — 240 с.
4. Кутамеладзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — Москва: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.
5. Волчков Э. П., Лебедев В. П., Терехов В. И. Теплообмен в турбулентных пристенных струйных течениях // Аэродинамика и теплофизика. — 1997. — 4, № 2. — С. 195–210.
6. Kampe T., Volker S., Samel T., Heneka C., Ladisch H., Shultz A., Bauer H.-J. Experimental and numerical investigation of flow field and downstream surface temperatures of cylindrical and diffuser shaped film cooling holes // ASME Paper GT2011. — 45106. — 10 p.
7. Goldstein R. J., Eckert E. R. G. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1974. — 17, No 5. — P. 595–607.
8. Colban W. F., Thole K. A., Bogard D. A. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface // Trans. of the ASME. J. Turbomachinery. — 2011. — 133, No 1. — 011002–11.
9. Leedom D. H., Acharya S. Large eddy simulations of film cooling flow fields from cylindrical and shaped holes // ASME Paper GT2008. — 51009. — 13 p.
10. Халатов А. А., Борисов И. И., Коваленко А. С., Дашевский Ю. Я., Шевцов С. В. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности системой наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях // Промышл. теплотехника. — 2012. — 34, № 3. — С. 5–12.
11. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., Bunker R. S. Film cooling measurements for cratered cylindrical inclined holes // ASME Paper 2007. — 27386. — 10 p.
12. Waje S. K., Bogard D. G. High resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations // ASME Paper GT2006. — 90226. — 9 p.
13. 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 // Trans. of the ASME. J. Turbomachinery. — 2009. — 131, No 1. — P. 011003–011013.
14. Dorrington J. R., Bogard D. G., Bunker R. S. Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions // ASME Paper GT2007. — 27992. — 10 p.

References

1. Goldstein R. J. Advances in heat transfer, 1971, **7**: 321–379.
2. Repuchov V. M. The theory of thermal protection of wall by gas injection, Kiev: Naukova Dumka, 1980 (in Russian).
3. Volchkov E. P. Near-wall gas screens, Novosibirsk: Nauka, 1983 (in Russian).
4. Kutateladze S. S., Leontiev A. I. Heat transfer, mass transfer, and friction in turbulent boundary layers, Ed. by Arthur E. Bergles, New York: Hemisphere Pub. Corp., 1990.
5. Volchkov E. P., Lebedev V. P., Terechov V. I. Thermophysics and Aeromechanics, 1997, **4**, No 2: 163–177.
6. Kampe T., Volker S., Samel T., Heneka C., Ladisch H., Shultz A., Bauer H.-J. ASME Paper GT2011, 45106: 10 p.
7. Goldstein R. J., Eckert E. R. G. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1974, **17**, No 5: 595–607.
8. Colban W. F., Thole K. A., Bogard D. A. Trans. of the ASME. J. of Turbomachinery, 2011, **133**, No 1, 011002: 11 p.
9. Leedom D. H., Acharya S. ASME Paper GT2008, 51009: 13 p.
10. Khalatov A. A., Borisov I. I., Kovalenko A. S., Dashevsky Y. Y., Shevtsov S. V. Promyshlennaya Teplotekhnika, 2012, **34**, No 3: 5–12 (in Russian).
11. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., Bunker R. S. ASME Paper 2007, 27386: 10 p.
12. Waye S. K., Bogard D. G. ASME Paper GT2006, 90226: 9 p.
13. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., Bunker R. S. Trans. of the ASME. J. of Turbomachinery, 2009, **131**, No 1: 011003–011013.
14. Dorrington J. R., Bogard D. G., Bunker R. S. ASME Paper GT2007, 27992: 10 p.

*Институт технической теплофизики
НАН Украины, Киев
НПКГ “Зоря”–“Машпроект”, Николаев
Институт теплофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия*

Поступило в редакцию 27.01.2015

**Академік НАН України А. А. Халатов, І. І. Борисов, Ю. Я. Дашевський,
М. А. Пахомов, В. І. Терехов**

Плівкове охолодження за допомогою однорядних систем похилих отворів у заглибинах

*Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ
НПКГ “Зоря”–“Машпроект”, Миколаїв
Інститут теплофізики СВ РАН, Новосибірськ, Росія*

Проведено порівняльне експериментальне дослідження плівкового охолодження плоскої поверхні однорядними системами похилих отворів, що розташовані у заглибинах у вигляді “кратерів” та траншеї. Показано, що зазначені способи дозволяють істотно підвищити ефективність охолодження та знизити його поперечну нерівномірність порівняно з системою традиційних похилих отворів. Ці переваги особливо помітно проявляються при великих параметрах дуву.

Ключові слова: плівкове охолодження, похилі отвори, кратери, траншея, ефективність охолодження.

Academician of the NAS of Ukraine **A. A. Khalatov, I. I. Borisov, Y. Y. Dashevsky, M. A. Pachomov, V. I. Terechov**

Film cooling by means of one-row inclined holes arranged in dimples

Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

Zorya-Mashproekt, Mykolaiv

Institute of Thermophysics of the SD RAN, Novosibirsk, Russia

The comparative experimental study of a flat plate film cooling by means of inclined holes arranged in dimples having the “crater” or trench shape is presented. As shown, these configurations enable one to increase significantly the cooling and to reduce its spanwise non-uniformity as compared to the traditional configuration of inclined holes. These advantages appear remarkably at the higher blowing parameters.

Keywords: film cooling, inclined holes, craters, trench, cooling efficiency.