УДК 621.45.038

А. А. ХАЛАТОВ, д-р техн. наук; проф., академик НАНУ; Институт технической теплофизики НАН Украины; НТТУ «КПИ», Киев;
Н. А. ПАНЧЕНКО, аспирант НТУУ «КПИ»; м.н.с. Института технической теплофизики НАН Украины, Киев;
И. И. БОРИСОВ, канд. техн. наук; ведущий н.с. Института технической теплофизики НАН Украины, Киев;
Ю. Я. ДАШЕВСКИЙ, канд. техн. наук; зав. сектором, отдел турбин ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», Николаев

ДВУХСТРУЙНОЕ ПЛЕНОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ: ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Представлены результаты экспериментального исследования двухструйного пленочного охлаждения плоской поверхности. При малых ($m = 0{,}50$) и умеренных ($m = 1{,}0$) значениях параметра вдува эффективность пленочного охлаждения пластины выше, чем для стандартной двухрядной системы цилиндрических отверстий и соответствует ей при $m = 1{,}50$. Внешняя турбулентность потока ($\approx 7\%$) практически не оказывает влияния на эффективность пленочного охлаждения пластины двухструйной системой отверстий.

Ключевые слова: двухструйное пленочное охлаждение, эффективность охлаждения, внешняя турбулентность.

Введение

Пленочное охлаждение является одним из основных способов тепловой защиты лопаток современных высокотемпературных газовых турбин. Традиционная система пленочного охлаждения поверхностей в виде совокупности дискретных наклонных отверстий цилиндрической формы, выполненных в охлаждаемой стенке, характеризуется рядом недостатков. Основной из них – низкая эффективность, особенно при $m > 1{,}0$ что обусловлено возникновением вторичных вихревых структур, разрушающих пленку охладителя и способствующих интенсивному «подсосу» горячего потока к защищаемой поверхности. Кроме того, при использовании традиционных схем подачи охладителя наблюдается высокая поперечная неравномерность поля температур. Поэтому поиск новых методов пленочного охлаждения, обладающих высокой эффективностью, пониженным расходом, равномерностью покрытия поверхности пленкой охладителя и несложной технологией изготовления представляет одну из актуальных проблем газотурбостроения.

В настоящее время этим вопросом активно занимаются ведущие научные центры и компании США, Японии, Германии, Швеции, России, Украины. Для снижения отрывных явлений и уменьшения пространственной неравномерности охлаждения предложены перспективные схемы охлаждения с отверстиями сложного (фасонного) профиля – веерной («*fan-shaped*»), консольной и других форм [1–3]. Однако, выполнение таких отверстий, имеющих размеры менее одного миллиметра, требует специального дорогостоящего оборудования и связано с определенными технологическими трудностями. Поэтому большой практический интерес представляют новые технические решения, не уступающие фасонным отверстиям по эффективности охлаждения, но имеющие более простую технологию изготовления.

© А.А. Халатов, Н.А. Панченко, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский, 2014

К таким решениям можно отнести двухструйную систему наклонных цилиндрических отверстий со сложными углами подачи охладителя («*double jet*»), в которой происходит сложное взаимодействие охлаждающих струй с подачей охладителя из отверстий первого ряда в переднюю часть отверстий второго ряда (рис. 1). Как следствие, можно ожидать и более равномерного покрытия поверхности пленкой охладителя [4].

Для реальных условий обтекания лопаток газовых турбин характерна турбулентность внешнего потока, поэтому исследованию этого фактора уделяется большое внимание. Это влияние в различных схемах пленочного охлаждения проявляется неоднозначно. Так например, при подаче охладителя через щель, пористую вставку или систему наклонных круглых отверстий [5] внешняя турбулентность снижает эффективность пленочного охлаждения, причем наиболее заметно при $Tu > 10\ \%$. Однако, для некоторых конфигураций внешняя турбулентность оказывает слабое влияние, а в ряде случаев, например при траншейной подаче охладителя, может даже повышать эффективность пленочного охлаждения [6]. Что касается двухструйной системы отверстий, то данные по эффективности пленочного охлаждения в условиях внешней турбулентности в литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффективности пленочного охлаждения с помощью двухструйной системы отверстий при обтекании плоской поверхности низкотурбулентным воздушным потоком ($Tu = 1\ \%$) и при наличии внешней турбулентности ($Tu \approx 7\ \%$). В качестве основного и вторичного потоков в работе использован атмосферный воздух. Исследование выполнено в диапазоне изменения параметра вдува m от 0,5 до 2,0.

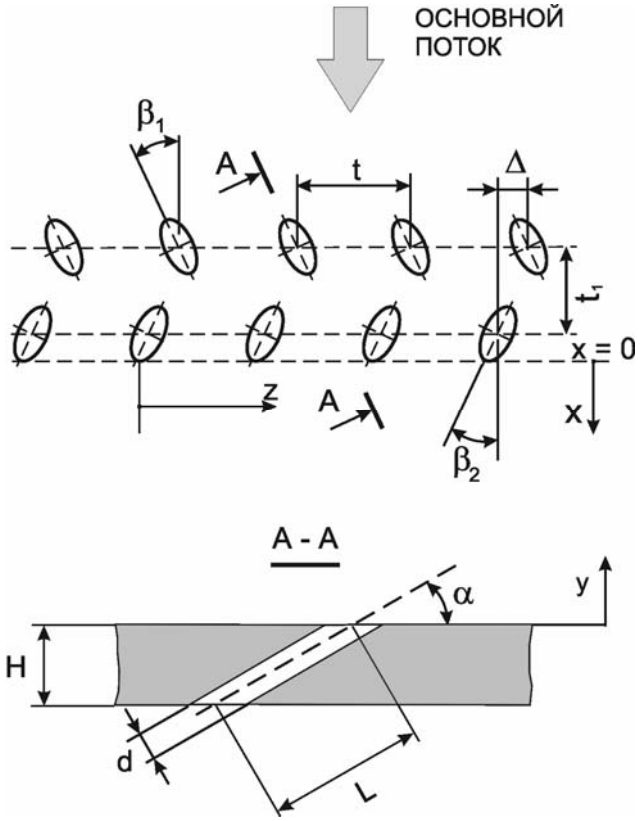

Рис. 1 – Схема исследованной двухструйной системы отверстий

Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе открытого типа, работающей 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 с соотношением входной и выходной площади около 20. В этом случае входная турбулентность потока составляла не более 1 %. После рабочего участка воздушный поток поступал в успокоительную емкость и далее выбрасывался в атмосферу. Для исследования эффективности пленочного 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 (рис. 1).

Рабочий участок представляет собой плоский канал с поперечным сечением (294×34 мм^2), соответствующим выходному сечению сопла Витошинского. Нижняя стенка рабочего участка содержит плоскую пластину длиной 70 мм, выполненную из оргстекла с двухструйной системой отверстий для подачи охладителя и адиабатную пластину из асбоцемента ($\lambda = 0{,}17$ Вт/(м·К)) длиной 130 мм. В адиабатную пластину вмонтированы 9 хромель-алюмелевых термопар, расположенных в продольном направлении на одной линии с постоянным по длине шагом (10 мм). В установке предусмотрена возможность перемещения адиабатной пластины в поперечном направлении для определения локальных значений эффективности пленочного охлаждения.

В экспериментах с внешней турбулентностью потока использовался тот же рабочий участок. Для генерации турбулентности на входе в сопло Витошинского устанавливалась турбулизирующая решетка (перфорированная пластина) с относительным проходным сечением 17,3 %. В этом случае на выходе из сопла обеспечивалась турбулентность с высоким уровнем изотропности. Уровень продольной составляющей турбулентности воздушного потока на выходе из сопла измерялся термоанемометром постоянной температуры и составлял около 7 %.

Основные геометрические параметры системы двухрядных отверстий (рис. 1) выбирались близкими к исследованным в работе [4]. Толщина пластины вдува H составляла 10 мм, длина отверстия вдува $L = 20$ мм, относительная длина отверстия $L/d = 6{,}25$. Диаметр цилиндрических отверстий d составлял 3,2 мм, угол наклона отверстий к плоскости пластины α равнялся 30°, который наиболее распространен в практике газотурбостроения. Поперечные углы наклона проекций осей отверстий на плоскость пластины β_1 и β_2 составляли 25°, поперечный шаг отверстий $t = 12{,}8$ мм ($t/d = 4{,}0$), продольный шаг между первым и вторым рядом $t_1 = 10$ мм ($t_1/d = 3{,}125$), зазор $\Delta = 3{,}2$ мм ($\Delta/d = 1{,}0$). При анализе и обобщении опытных данных расстояние «x» отсчитывалось от «среза» отверстия второго ряда (рис. 1).

В экспериментах измерялись скоростной напор основного потока на входе, статическое давление на верхней стенке канала, полная температура основного потока, температура вдуваемого потока, расход вдуваемого потока, температура адиабатной поверхности в девяти точках по длине пластины с шагом 10 мм. Скоростной напор определялся с помощью трубки Пито-Прандтля и системы дифманометров. Температура адиабатной поверхности, основного и вдуваемого воздуха регистрировалась хромель-алюмелевыми термопарами диаметром 0,1 мм. Для

определения температуры вдуваемого потока две термопары устанавливались в отверстиях вдува непосредственно перед выходом вторичного потока наружу. Показания этих термопар в процессе экспериментов были идентичными (отличие не превышало 1,5 %). При определении локальной эффективности пленочного охлаждения использованы 5 сечений между отверстиями второго ряда (рис. 1) с поперечным шагом $z/t = 0{,}25$.

Параметры экспериментов были следующими: скорость основного потока 35…38 м/с, температура основного потока изменялась от 23,5 до 26 °С, температура вдуваемого воздуха – от 64 до 79 °С. В этом случае отношение плотностей вдуваемого и основного потока составляло 0,85…0,88, параметр вдува m изменялся от 0,5 до 2,0, а число Рейнольдса Re_d по эквивалентному диаметру канала рабочего участка и скорости основного потока на входе составляло около $1{,}35 \cdot 10^5$. Проведенные ранее измерения профиля скорости потока в пограничном слое [7] показали, что для данных условий пограничный слой перед участком подачи вторичного потока является турбулентным.

Результаты исследования

Как указывалось выше, для определения пространственного распределения температуры адиабатной поверхности в установке предусмотрена возможность перемещения пластины в поперечном направлении (вдоль оси z) с постоянным шагом d, в пределах поперечного шага t (5 измерительных линий на одном шаге по ширине). Результаты измерения локальной эффективности двухструйного пленочного охлаждения показаны на рис. 2. Из представленных данных можно заключить, что для всех параметров вдува m наблюдается уменьшение эффективности охлаждения поверхности по длине пластины; причем с увеличением значения m эффективность охлаждения при $x/d = \mathrm{const}$ снижается. Наиболее высокие значения эффективности пленочного охлаждения наблюдаются на линиях $z/t = 0$ и $z/t = 1{,}0$, которые проходят через переднюю кромку второго ряда отверстий.

Для практики важное значение имеет осредненная по ширине пластины величина эффективности пленочного охлаждения. В настоящей работе осреднение проводилось методом трапеций

$$\overline{\eta} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{4} (\eta_i + \eta_{i+1}),$$

где $n = 4$ – количество участков разбиения.

На рис. 3 представлены осредненные значения эффективности пленочного охлаждения при изменении параметра вдува m от 0,5 до 2,0. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными работы [4], в которой использовалась двухструйная система отверстий с углом β (рис. 3), равным 29°. Как следует, результаты настоящих экспериментов удовлетворительно согласуются с данными работы [4], различие полученных результатов не превышает 20 %, что может быть обусловлено некоторым различием в величине угла β.

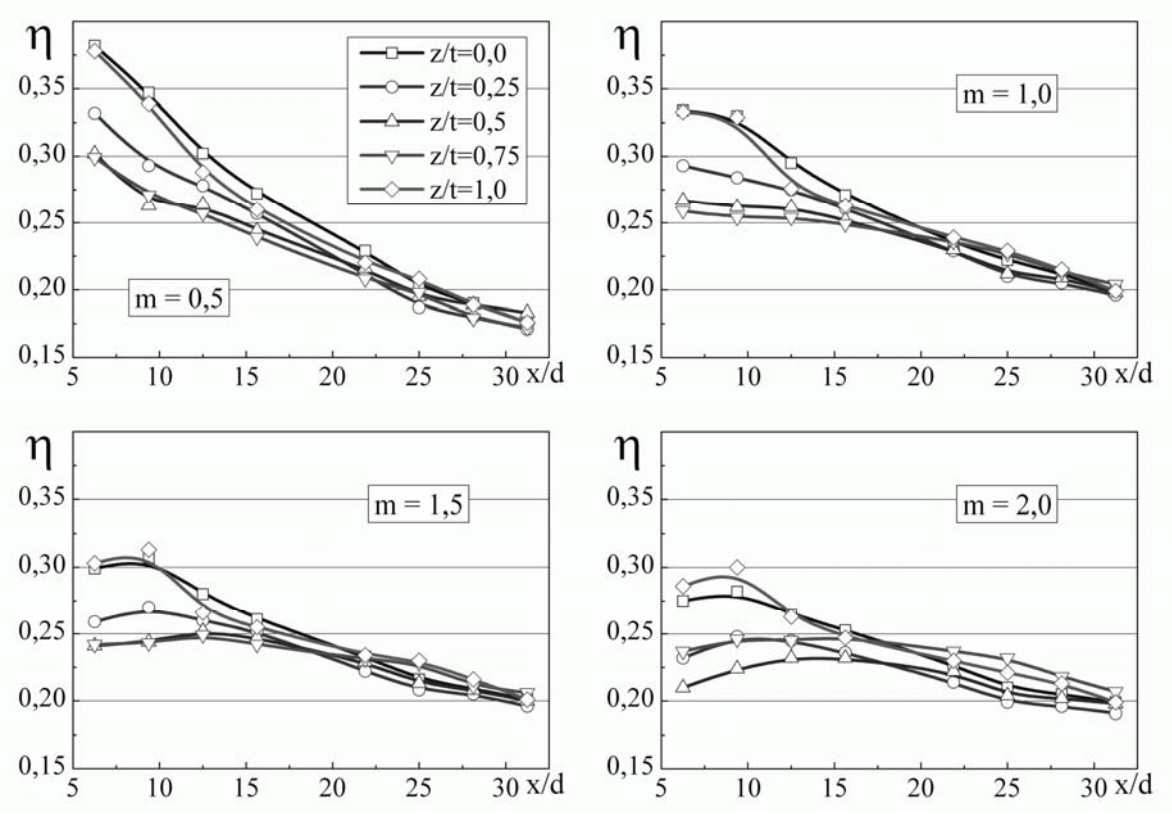

Рис. 2 – Локальная эффективность двухструйного пленочного охлаждения Tu = 1 %

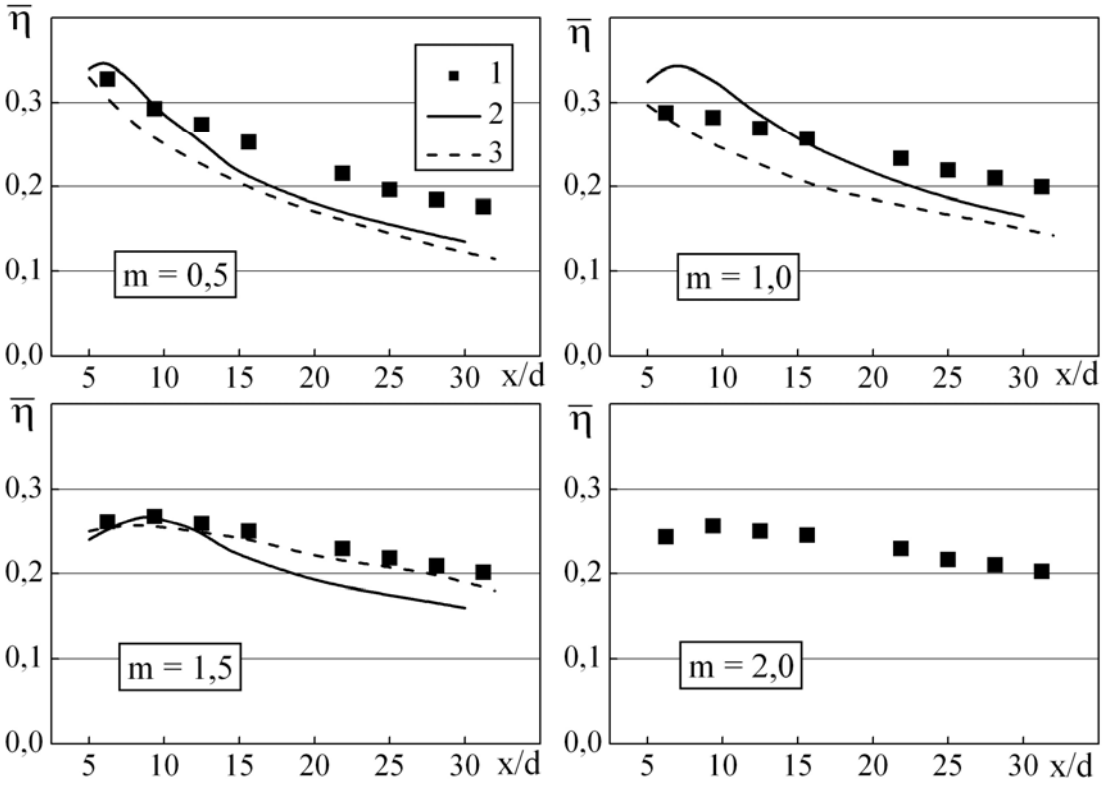

Рис. 3 – Сравнение средней по ширине эффективности двухструйного пленочного охлаждения с результатами работ [4] и [8]: нетурбулизированный поток: *1* – результаты настоящей работы; *2* – двухструйная система отверстий с аналогичной геометрией [4]; *3* – традиционная двухрядная система цилиндрических отверстий [8]

На рис. 4 для параметра вдува m = 1,5 представлены экспериментальные данные для турбулизированного (Tu ≈ 7 %) и нетурбулизированного (Tu = 1 %) воздушного потока для различных значений поперечной координаты. Как следует, в рассматриваемых условиях внешняя турбулентность слабо влияет на локальное значение эффективности охлаждения. Незначительное увеличение локальной эффективности под действием турбулентности отмечено на линиях z/t = 0,75 и 1,0.

На рис. 5 показана средняя по ширине пластины эффективность пленочного охлаждения в условиях внешней турбулентности при различных значениях параметра вдува. Как следует, для средней эффективности в широком диапазоне изменения параметра вдува влияние внешней турбулентности не превышает 5…10 %, аналогичное влияние турбулентности имеет место для профилированных отверстий [2].

Более наглядно влияние внешней турбулентности проявляется при анализе продольного распределения отношения средней эффективности пленочного охлаждения пластины для турбулизированного (Tu = 7 %) и нетурбулизированного (Tu ≈ 1 %) потоков при различных значениях параметра вдува (рис. 6). Как видно, для условий настоящих экспериментов заметное влияние внешней турбулентности на эффективность охлаждения проявляется только при x/d > 20 и для малых параметров вдува – здесь турбулентность повышает среднюю эффективность пленочного охлаждения на 7…8 %. При значениях m = 1,5 и 2,0 влияние внешней турбулентности практически не проявляется.

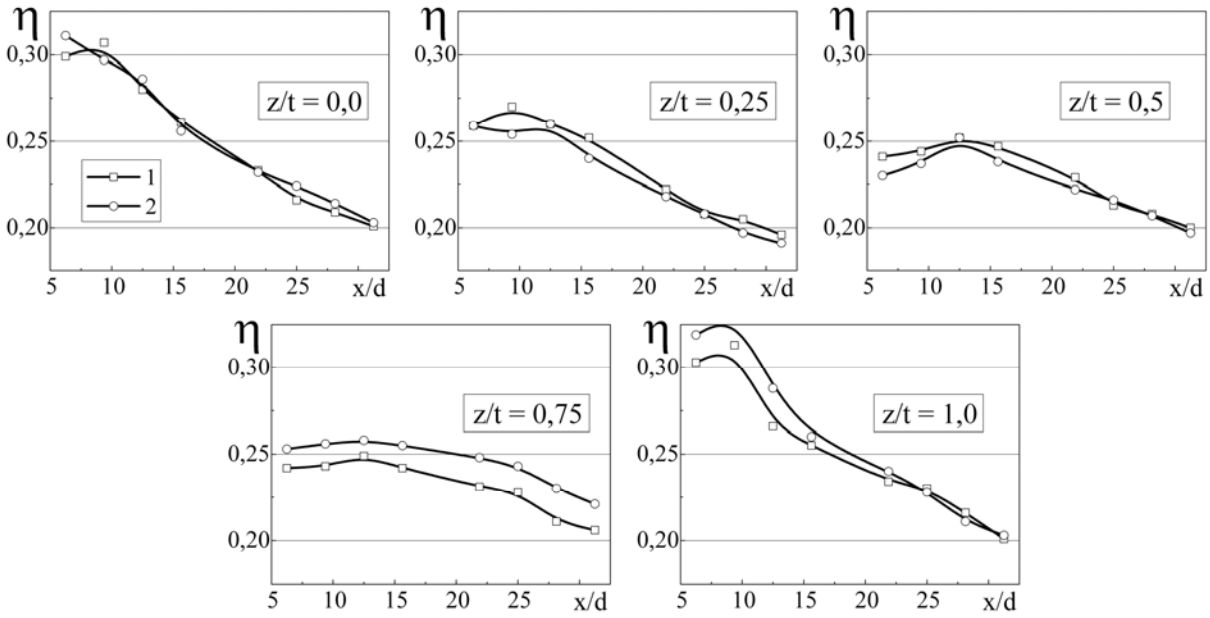

Рис. 4 – Влияние внешней турбулентности потока на локальную эффективность двухструйного пленочного охлаждения при m = 1,50: 1 – Tu = 1 %; 2 – Tu ≈ 7 %

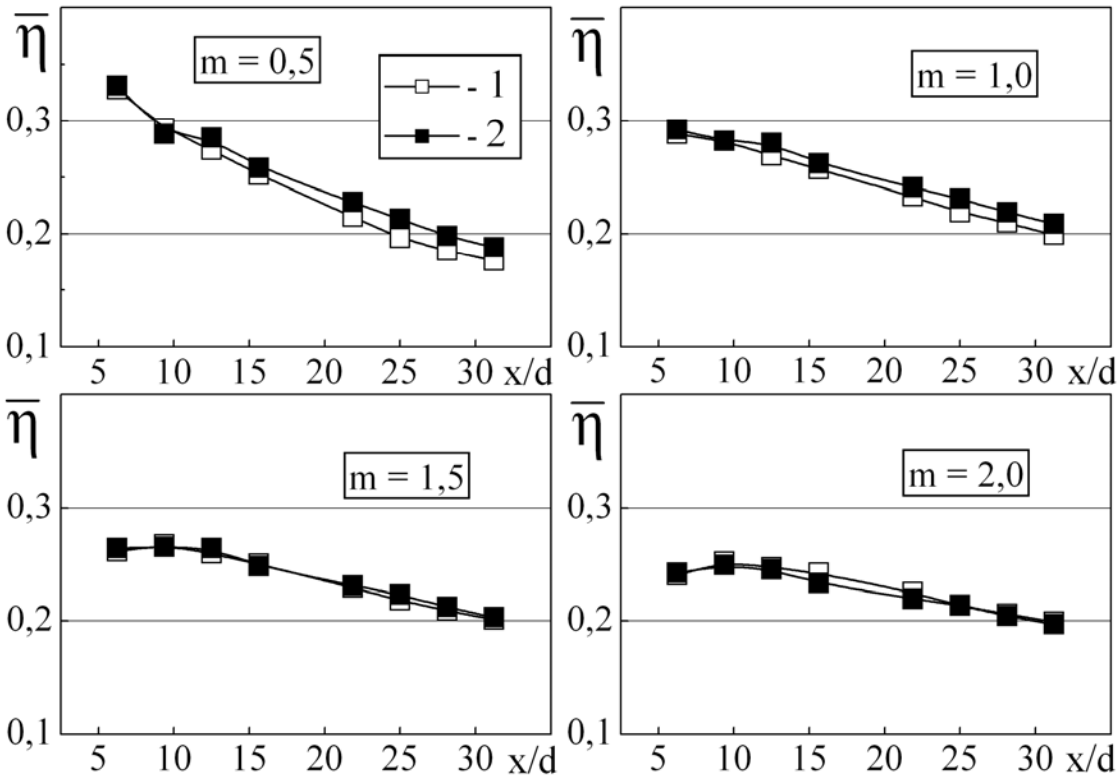

Рис. 5 – Средняя эффективность двухструйного пленочного охлаждения при наличии внешней турбулентности потока: *1* – Tu = 1 %; *2* – Tu ≈ 7 %

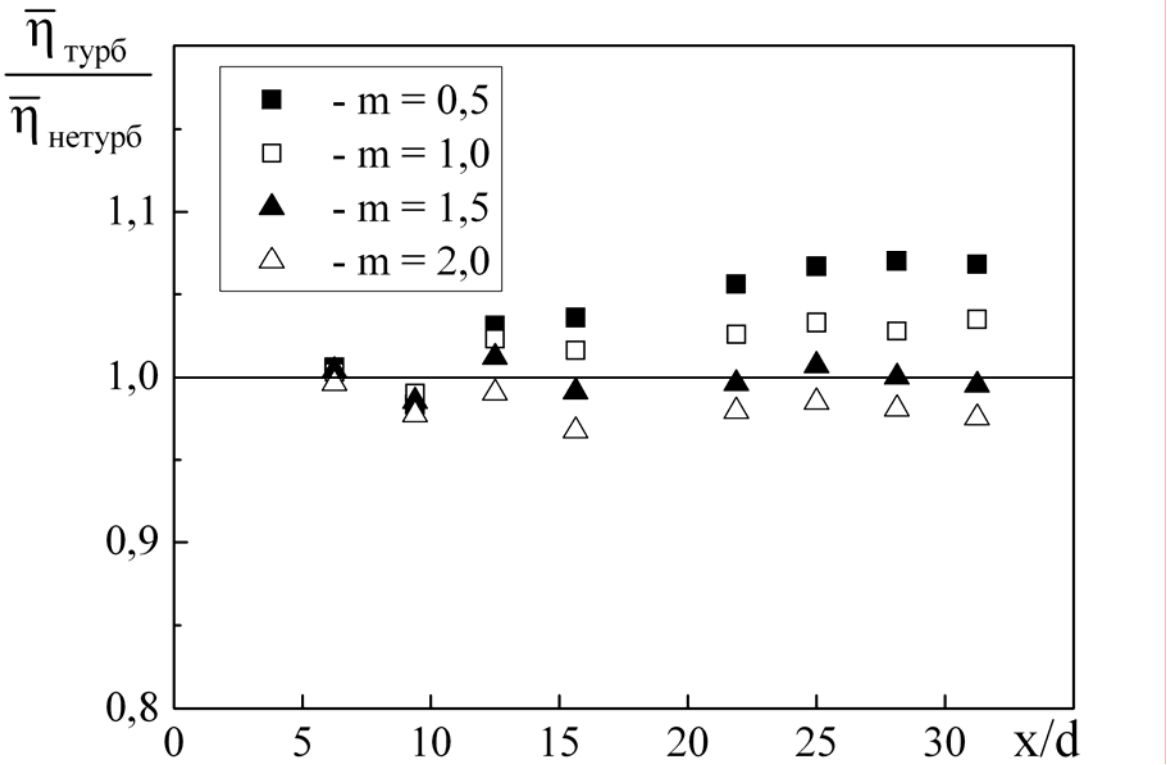

Рис. 6 – Влияние внешней турбулентности потока на среднюю эффективность двухструйного пленочного охлаждения

Таким образом, для условий настоящих экспериментов внешняя турбулентность слабо влияет на эффективность пленочного охлаждения. Это можно объяснить тем, что в результате смешения и взаимодействия соседних струй происходит генерация турбулентности и внешняя турбулентность, использованная в настоящих экспериментах, не оказывает существенного влияния на гидродинамику и тепловые характеристики защитной пленки.

Выводы

1) При идентичных условиях средняя эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности с помощью двухструйной системы отверстий при малых (m = 0,50) и умеренных (m = 1,0) значениях параметра вдува на 20 % выше, чем для стандартной двухрядной системы цилиндрических отверстий и соответствует ей при m = 1,5.

2) Внешняя турбулентность потока (≈ 7 %) оказывает слабое влияние на среднюю эффективность двухструйного пленочного охлаждения пластины.

Список литературы: 1. *Goldstein, R. J.* Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling [Text] / R. J. Goldstein, E. R. G. Eckert // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1974. – V. 17, № 5. – P. 595–607. **2.** *Colban, W. F.* A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface [Text] / W. F. Colban, K. A. Thole, D. Bogard // ASME Journal of Turbomachinery, – 2011. – Vol. 133, No. 1. – 011002 – 11 p. **3.** *Leedom, D. H.* Large eddy simulations of film cooling flow fields from cylindrical and shaped holes [Электронный ресурс] / D. H. Leedom, S. Acharya // ASME Paper. – Электрон. дан. (1 файл). – № GT-2008–51009. – 13 p. — 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. **4.** *Kusterer, K.* Film cooling effectiveness comparison between shaped- and double jet film cooling holes in a row arrangement [Электронный ресурс] / K. Kusterer, A. Elyas, D. Bohn, T. Sugimoto, R. Tanaka, M. Kazari // ASME Paper. – Электрон. дан (1 файл). – GT-2010-22604. – 13 p.– 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. **5.** *Волчков, Э. П.* Пристенные газовые завесы [Текст] / Э. П. Волчков. – Новосибирск: Наука, 1983. – 240 с. **6.** *Baheri, S.* The effect of turbulence intensity on film cooling of gas turbine blade from trenched shaped holes [Электронный ресурс] / S. Baheri, B. A. Jubran, S. P. Alavi Tabrizi // ASME Paper. – Электрон. дан (1 файл). GT-2008-50318. – 10 p. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. **7.** *Халатов, А. А.* Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности системой наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях [Текст] / А. А. Халатов, И. И. Борисов, А. С. Коваленко, Ю. Я. Дашевский, С. В. Шевцов // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 5–12. **8.** *Dittmar, J.* Assessment of various film cooling configurations including shaped and compound angle holes based on large scale experiments [Text] / J. Dittmar, A. Schulz, S. Wittig // ASME Journal of Turbomachinery. – 2003. – Vol. 125, No. 1. – P. 57–64.

Bibliography (transliterated): 1. Goldstein, R. J., and E. R. G. Eckert. "Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling." *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 17.5 (1974): 595–607. Print. **2.** Colban, W. F., K. A. Thole and D. Bogard. "A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface." *ASME Journal of Turbomachinery* 133.1 (011002) (2011): 11. Print. **3.** Leedom, D. H. "Large eddy simulations of film cooling flow fields from cylindrical and shaped holes." *ASME Paper*. No. GT-2008–51009. CD-ROM. **4.** Kusterer, K., et al. "Film cooling effectiveness comparison between shaped- and double jet film cooling holes in a row arrangement." *ASME Paper*. No. GT-2010-22604. CD-ROM. **5.** Volchkov, Je. P., B. A. Jubran and S. P. Alavi. *Near wall film cooling*. Novosibirsk: Nauka, 1983. Print. **6.** Baheri, S. "The effect of turbulence intensity on film cooling of gas turbine blade from trenched shaped holes." *ASME Paper*. No. GT-2008-50318. CD-ROM. **7.** Halatov, A. A., et al. "The film cooling effectiveness over a flat plate using inclined holes arranged in spherical dimples." *Promyshlennaja teplotehnika* 34.3 (2012): 5–12. **8.** Dittmar, J., A. Schulz and S. Wittig. "Assessment of various film cooling configurations including shaped and compound angle holes based on large scale experiments." *ASME Journal of Turbomachinery* 125.1 (2003): 57–64. Print.

Поступила (received) 10.02.14