

УДК 621.45.02:536.24

А.А. Кашенко

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков*

## ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН НА ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КАНАЛА ПРОФИЛЕЙ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

*Приведены результаты экспериментального исследования локального теплообмена на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых менялась путём уменьшения высоты профилей  $h$  и увеличения толщины накопленного пограничного слоя  $\delta_{\text{вх}}$  на входе в объект исследования. Получены данные характеризующие распределение локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевой поверхности в широком диапазоне изменения определяющих параметров.*

**Ключевые слова:** *локальные коэффициенты теплоотдачи, торцевые поверхности, канал профилей соплового аппарата турбины, вторичные течения.*

### Вступление

**Постановка проблемы.** Одним из путей повышения тягово-экономической эффективности современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является путь повышения температуры газа перед турбиной  $T_r^*$ . Однако, повышение  $T_r^*$  представляет собою непростую задачу, которая в настоящее время решается преимущественно путем повышения эффективности системы воздушного охлаждения деталей проточной части турбин. Материаловеды хотя и достигают некоторых успехов в области создания жаростойких и жаропрочных материалов, но они недостаточны для того, чтобы полностью или хотя бы частично отказаться от системы воздушного охлаждения.

Известно, что применение охлаждения всегда приводит к дополнительным потерям. Поэтому система охлаждения должна быть спроектирована так, чтобы выигрыш в экономичности от повышения  $T_r^*$  преобладал над всеми затратами на охлаждение, которые обеспечивают соответствующее повышение начальной температуры газа. В противном случае повышение температуры газа становится нецелесообразным. Очевидно, что именно эффективность воздушного охлаждения горячих деталей турбин определяет темп возможного приращения  $T_r^*$ .

Опыт эксплуатации показывает, что одним из наиболее ответственных и нагруженных узлов авиационных ГТД является сопловой аппарат первой ступени турбины, который подвержен влиянию наибольших температур. При проектировании высокоперепадных и высокотемпературных газовых турбин отношение высоты лопаток соплового аппарата  $h$  к шагу их установки в лопаточных венцах  $t$  уменьшается и при температуре газа на входе в турбину  $T_r^* = (1500...1700) \text{ K}$  относительная высота

лопаток  $\bar{h} = h/t$  не превосходит 1. При этом в межлопаточных каналах сопловых аппаратов возникает сложная трехмерная вихревая структура течения, которая занимает практически всю проточную часть канала. Кроме того, уменьшение  $h/t$  ведет к росту относительной толщины пограничного слоя на входе в сопловой аппарат, что еще более интенсифицирует вторичные течения и вихревые структуры порождаемые ими. В настоящее время около 60% омываемой газом площади лопаточных венцов турбины приходится на торцевые поверхности межлопаточных каналов. Очевидно, что уменьшение  $\bar{h}$  ведет к увеличению доли площади торцевой поверхности лопаточных венцов, а стремление к увеличению  $T_r^*$  требует всё более эффективной её тепловой защиты. Интерес к торцевой поверхности обусловлен теми трудностями, которые она представляет при организации её тепловой защиты в сопловых аппаратах с малыми значениями  $h/t$ . При этом возникают серьезные затруднения в расчете локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевых поверхностях соплового аппарата при проектировании оптимальной системы его воздушного охлаждения. Внедрение альтернативных систем охлаждения, которые оказывают минимальное отрицательное воздействие на снижение КПД турбины, требует надежных методик расчета граничных условий теплоотдачи на торцевых поверхностях со стороны газа, которые должны учитывать структуру и интенсивность вторичных течений. По сравнению с количеством имеющихся в литературе газодинамических исследований, объём информации о влиянии вторичных течений на теплообмен в турбинных решетках значительно меньше. Из имеющихся данных не ясно как меняется теплоотдача торцевых поверхностей при изменении интенсивности вто-

ричных течений, например, при уменьшении высоты лопаток  $h$  и увеличении толщины  $\delta_{\text{вх}}$  накопленного пограничного слоя на входе в турбинную решетку, какова степень раздельного влияния канального и П-образного вихрей на газодинамику и теплоотдачу торцевых стенок.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1] приведен обзор данных по физической структуре течения в криволинейных каналах и сопловых аппаратах с отношением  $h/t$ , близким к единице. Отдельные аспекты теплообмена торцевой поверхности рассмотрены в работах [2 - 4]. Однако, в этих работах нет данных учитывающих степень влияния относительной высоты профилей  $h/t$  и толщины  $\delta_{\text{вх}}$  накопленного пограничного слоя на входе в турбинную решетку, а также раздельного влияния канального и П-образного вихрей на газодинамику и теплоотдачу торцевых стенок, что делает результаты этих работ малопригодными для разработки методики расчета локального теплообмена на торцевых поверхностях сопловых аппаратов турбин.

**Формулировка цели статьи.** В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования локального теплообмена на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых меняется путём уменьшения высоты профилей  $h$  и увеличения толщины накопленного пограничного слоя  $\delta_{\text{вх}}$  на входе в объект исследования.

### Изложение основного материала

Измерения поля скоростей внешнего течения [5] и предельных углов скоса потока в трехмерном турбулентном пограничном слое проведенные на торцевых стенках канала профилей соплового аппарата турбины, позволили определить степень влияния канального и углового вихрей на гидродинамику потока. При этом интенсивность вторичных течений в проточной части канала менялась путём уменьшения параметра  $h/t$  ( $h$  – высота профильной части канала,  $t$  – шаг установки профилей) и увеличения толщины  $\delta_{\text{вх}}$  накопленного пограничного слоя на входе в канал.

Для определения численных значений параметров входящих в критерии подобия изучаемого процесса, были проведены измерения локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевых стенках крупномасштабной модели канала профилей соплового аппарата турбины. В качестве модели канала был выбран средний межпрофильный канал решётки профилей соплового аппарата турбины (решетка состояла из четырех профилей образующих три межпрофильных канала). Канал формировался с помощью стенок выполненных в виде сопла Витшинского, ограничивающих подводный канал рабочей части аэродинамической трубы [5]. Схема

рабочей части аэродинамической трубы и решетки профилей, а также основные геометрические данные профиля и решетки профилей приведены в [5]. Интенсивность вторичных течений в канале менялась за счет изменения высоты его проточной части  $h$  и толщины накопленного пограничного слоя  $\delta_{\text{вх}}$  на входе в канал.

Исследования проведены при следующих значениях:

$$\delta_{\text{вх}} - 1 \text{ мм}; 5 \text{ мм};$$

$$h/t - 1,0; 0,47; 0,24; 0,14;$$

$$\text{Re}_1 - 3,7 \cdot 10^5; 4,4 \cdot 10^5; 5,0 \cdot 10^5.$$

Локальные коэффициенты теплоотдачи измерялись на нижней торцевой стенке канала электрометрическим методом с помощью устройства, которое состояло из датчиков температуры и ленточного электрического нагревателя. В качестве датчиков температуры использовались хромель-копелевые термопары, изготовленные из термоэлектродов диаметром 0,2 мм. Всего было установлено 60 термопар, которые предварительно тарировались. Ленточный электронагреватель состоял из 13 последовательно соединенных полосок шириной 10 мм и толщиной 0,030 мм, изготовленных из стали 0,8X18H9-ТИ, разделенных промежутками 0,2 мм и приклеенных к торцевой стенке эпоксидным клеем К4С. Особенностью нагревателя является то, что полоски изготовлены из сетчатого материала с ячейкой квадратного сечения размером 0,040 мм. Применения сетчатого материала позволило решить проблему надежного закрепления полосок на исследуемой поверхности. Нагреватель был включен в электрическую цепь постоянного тока. Термопары располагались так, чтобы координаты их установки соответствовали координатами установки приемников статического давления на верхней торцевой стенке. Локальные коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  определялись в квазиизотермических условиях при постоянной плотности теплового потока  $q_w$  на стенке по формуле

$$\alpha = \frac{q_w - q_{\text{п}}}{T_w - T_1^*}. \quad (1)$$

здесь  $q_{\text{п}}$  – потери плотности теплового потока;  $T_w$  – температура торцевой поверхности;  $T_1^*$  – полная температура потока на входе в объект исследования.

Отличия от условия  $q_w \approx \text{const}$  (не более 6%) имели место из-за потерь плотности потока теплопроводностью стенки, свободной конвекцией, излучением и за счёт перетоков тепла по полоскам нагревателя параллельно поверхности. Эти эффекты, а также локальные изменения электрического сопротивления полосок нагревателя из-за местных отличий температуры поверхности учитывались по специально разработанной методике [6]. Достоверность определения величины  $\alpha$  проверялись в процессе аппробационных опытов на пластине. Измеренные

коэффициенты теплоотдачи сравнивались с коэффициентами, рассчитанными по формуле

$$Nu = 0,0296 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (2)$$

где  $Nu, Re, Pr$  - числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля.

Зависимость (2) аппроксимирует опытные данные с максимальной относительной погрешностью  $\pm 10\%$ .

На рис. 1 приведена зависимость,  $\bar{Nu}_x = f(\bar{x})$  полученная для трёх характерных областей канала, - средней линии, выпуклой и вогнутой поверхностей профиля, - при  $h/t = 1,0$  и слитом пограничном слое на входе.

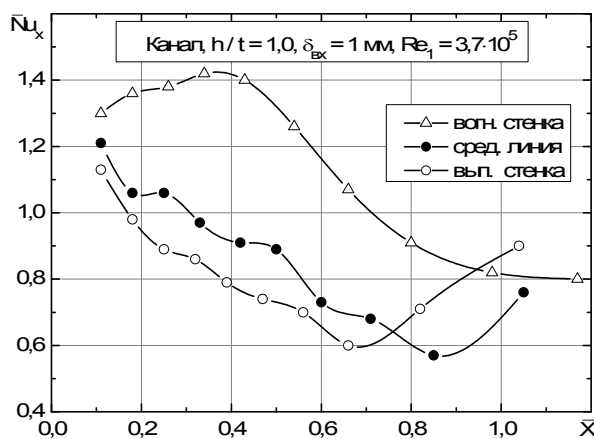


Рис. 1. Зависимость  $\bar{Nu}_x = f(\bar{x})$

Здесь  $\bar{Nu}_x = Nu_x / Nu_{0x}$  - относительный коэффициент теплоотдачи;  $Nu_x = (\alpha \cdot x) / \lambda$  - локальное число Нуссельта, рассчитанное вдоль криволинейной координаты  $x$ ;  $\alpha$  - локальный коэффициент теплоотдачи торцевой поверхности, определённый из опытов;  $Nu_{0x}$  - локальное число Нуссельта, определённое из уравнения (2) для того же режима течения, что и в опытах;  $\bar{x} = x / b_0$ ;  $x$  - криволинейная координата, отсчитываемая от начала формирования теплового пограничного слоя;  $b_0$  - хорда профиля; индекс  $x$  означает значения параметров на оси  $x$ .

Поскольку численные значения  $Nu_{0x}$  определяют интенсивность теплоотдачи плоской пластины в «стандартных» условиях (гладкая поверхность, безградиентное квазиизотермическое течение низкотурбулентного потока воздуха), то отношение  $\bar{Nu}_x = Nu_x / Nu_{0x}$  отражает степень совместного влияния факторов определяющих локальную теплоотдачу торцевой поверхности. Анализ зависимости  $\bar{Nu}_x = f(\bar{x})$  показывает, что торцевая поверхность в области средней линии, вогнутой и выпуклой стенок профиля имеет существенную неравномерность коэффициентов теплоотдачи. Отличия минимальных

значений  $\bar{Nu}_x$  от их максимальных значений достигают 60%, как по длине, так и по ширине проточной части канала. Причём, величина  $\bar{Nu}_x$  в области вогнутой стенки выше, чем в области выпуклой. Очевидно, что действие факторов, определяющих теплоотдачу торцевой поверхности по длине и ширине канала не однозначно. Так в области вогнутой стенки до  $\bar{x} < 0,7$  теплоотдача выше, чем на пластине (максимальное отличие достигает 40% при  $\bar{x} = 0,35$ ), а при  $\bar{x} > 0,7$  ниже (при  $\bar{x} = 1,1$  отличие достигает 20%). В области средней линии и выпуклой стенки теплоотдача в основном ниже, чем на пластине. При этом максимальное отличие достигает 40% в области средней линии при  $\bar{x} = 0,85$ , а в области выпуклой стенки при  $\bar{x} = 0,66$ . Величина локальных коэффициентов теплоотдачи зависит от местных значений толщины пограничного слоя и ускорения потока. Соотношение этих величин существенно различны в области вогнутой и выпуклой стенок канала. В области вогнутой стенки происходит «сворачивание» линий тока внешнего течения в сторону торцевой поверхности [5]. При этом имеет место эффект «вдува» потока из ядра в пограничный слой. Под действием конечного градиента давления «подторможенная» на торце жидкость стекает от вогнутой к выпуклой стенке канала, где происходит её постепенное накопление. Таким образом, толщина пограничного слоя в области вогнутой стенки, очевидно, значительно меньше, чем в области выпуклой. Минимальные значения  $\bar{Nu}_x$  вдоль характерных линий канала достигаются в области горла, т.е. в области максимальных значений отрицательного продольного градиента давления. В области диффузорных зон величина  $\bar{Nu}_x$  возрастает. Уменьшение высоты канала ведёт к изменению интенсивности вторичных течений. При этом существенно меняются и газодинамические параметры потока, и интенсивность теплоотдачи торцевых поверхностей. Развитие вторичных течений и степень их взаимодействия при уменьшении соотношении  $h/t$  значительно зависят от толщины накопленного пограничного слоя на входе в канал.

Отношения  $\bar{Nu}_x$  при различных значениях  $h/t$  к соответствующим  $\bar{Nu}_x$  при  $h/t = 1,0$  и слитом пограничном слое на входе в канал показано на рис. 2, а при накопленном пограничном слое на входе в канал на рис. 3.

При слитом пограничном слое на входе в канал относительные коэффициенты теплоотдачи  $\bar{Nu}_x$  увеличиваются вдоль всех характерных линий канала при уменьшении  $h/t$  от 1,0 до 0,14. Причем, наибольший рост наблюдается при уменьшении  $h/t$  от 0,24 до 0,14.

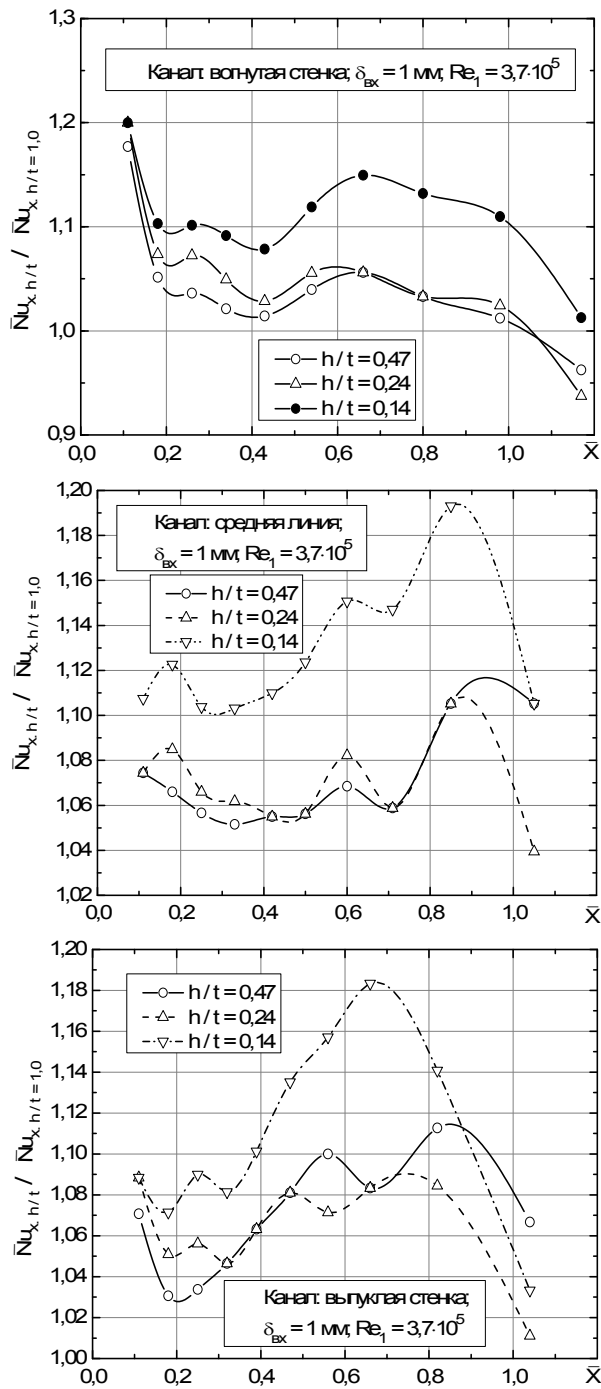


Рис. 2. Отношения  $\bar{Nu}_x$  при различных значениях  $h/t$  к соответствующим  $\bar{Nu}_x$  при  $h/t = 1,0$  и слитом пограничном слое на входе в канал

. При накопленном пограничном слое на входе в канал ( $\delta_{вх} = 5$  мм) уменьшение  $h/t$  от 1,0 до 0,14 ведет к уменьшению  $\bar{Nu}_x$  вдоль всех характерных линий проточной части канала.

Это можно объяснить тем, что с увеличением локальной толщины пограничного слоя коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  уменьшаются, но вместе с тем растет количество жидкости с низким импульсом движения, а, следовательно, интенсивность вторичных течений.

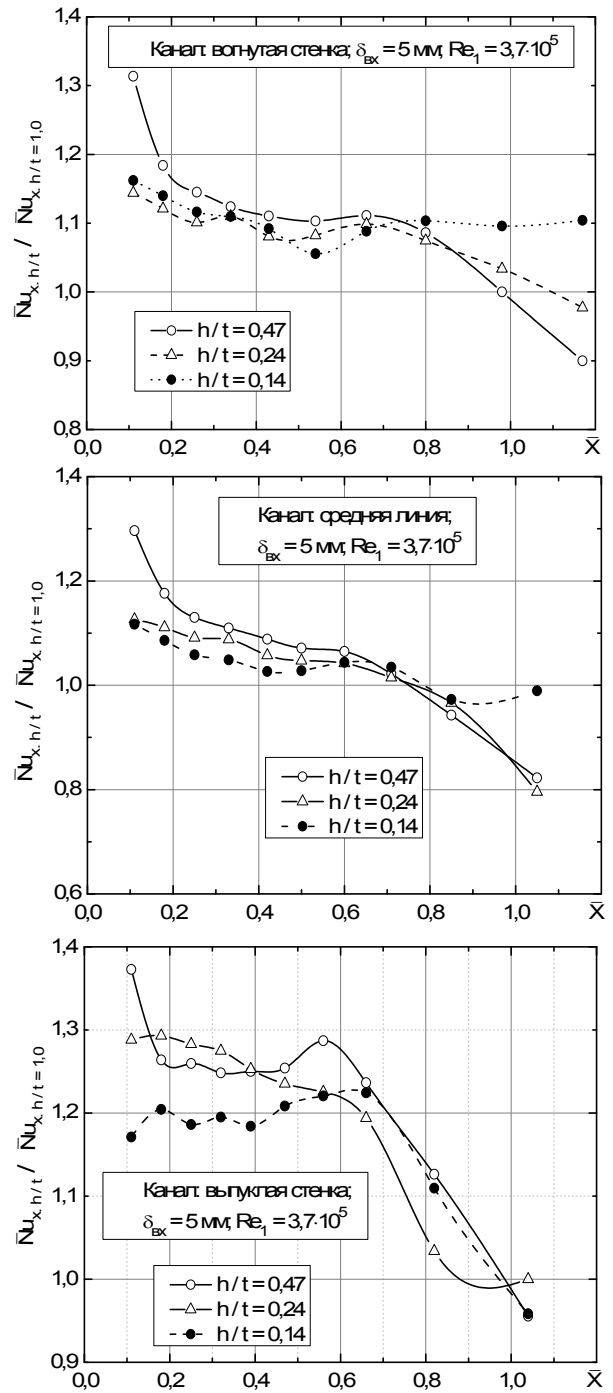


Рис. 3. Отношения  $\bar{Nu}_x$  при различных значениях  $h/t$  к соответствующим  $\bar{Nu}_x$  при  $h/t = 1,0$  и накопленном пограничном слое на входе в канал

При уменьшении высоты канала все большую часть жидкости, от общего её количества, занимает жидкость «подторможенная» на его торцевых стенках.

При достижении  $h/t = 0,14$  в результате взаимодействия (смыкания) вихревых структур, образующихся на торцевых поверхностях, относительные коэффициенты теплоотдачи  $\bar{Nu}_x$  заметно уменьшаются в области средней линии и выпуклой стенки, и увеличиваются в области вогнутой стенки.

При изменении режима течения на входе  $Re_1$  от  $3,7 \cdot 10^5$  до  $5,0 \cdot 10^5$  коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  монотонно возрастают во всей области течения.

## Выводы

Экспериментальные исследования по изучению теплообмена на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при увеличении толщины пограничного слоя на входе и уменьшении высоты профильной части канала, позволяют сделать следующие выводы:

- организация опытов в канале профилей соплового аппарата турбины, позволяет упростить структуру вторичных течений в проточной части канала путём исключения условий для образования П-образного вихря, и определить степень влияния канального вихря на теплоотдачу торцевой поверхности канала;

- распределение локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевой поверхности канала при  $h/t = 1,0$  и  $\delta_{вх} = 1$  мм, характеризуется существенной неравномерностью, как по ширине, так и по длине проточной части канала;

- характер изменения локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевой поверхности канала, определяется вихревой структурой потока и интенсивностью вторичных течений;

- увеличение толщины накопленного пограничного слоя на входе в канал заметно меняет характер распределения коэффициентов теплоотдачи на торцевой поверхности канала, за счёт интенсификации вихревой структуры потока и вторичных течений;

- уменьшение  $h/t$  до 0,14 при накопленном пограничном слое на входе в канал приводит к замет-

ному взаимодействию (смыканию) вихревых структур, образующихся на торцевых поверхностях канала. При этом коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  возрастают во всей области течения.

## Список литературы

1. Сивердинг С.Н. Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений в каналах турбинных решеток / С.Н. Сивердинг // Энергет. машины и установки. - 1985. - № 2. - С. 1 – 15.

2. Экспериментальное исследование теплообмена на торцевых поверхностях и лопатках в крупномасштабной турбинной решетке / Р.А. Грациани, М.Ф. Блэр, Ж.Р. Тэйлор, Р.Е. Мэйл // Энергет. машины и установки. - 1980. - № 2. - С. 29 – 37.

3. Бэйли Д.А. Исследование полей осредненной и турбулентной скорости в крупномасштабном канале турбинных лопаток / Д.А. Бэйли // Энергет. машины и установки. - 1980. - № 1. - С. 87 – 94.

4. Исследование локального теплообмена на торцевой поверхности модели соплового аппарата / А.А. Халатов, К.И. Капитанчук, А.С. Коваленко, А.Н. Труфанов // Изв. вузов. Авиат. техника. - 1986. - № 2. - С. 68 – 73.

5. Кащенко, А.А. Поле скоростей внешнего течения на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при интенсивных вторичных течениях [Текст] / А.А. Кащенко // Система обробки інформації: збір. наук. пр. Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Х., 2013. – Вып. 5 (112). – С. 38 – 42.

6. Кащенко А.А. Методика определения локальных коэффициентов теплоотдачи в турбинных решетках профилей / А.А. Кащенко, Л.В. Сысков // Сб. статей "Летательные аппараты и авиационные двигатели". – К.: КВВАИУ, 1988. – Вып. 5, – С. 33 – 35.

Поступила в редколлегию 1.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. С.А. Калкаманов, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков.

## ЛОКАЛЬНИЙ ТЕПЛОБІМІН НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ КАНАЛУ ПРОФІЛІВ СОПЛОВОГО АПАРАТА ТУРБІНИ ПРИ ІНТЕНСИВНИХ ВТОРИННИХ ПЛИНАХ

О.О. Кащенко

Наведено результати експериментального дослідження локального теплообміну на торцевих поверхнях каналу профілів соплового апарата турбіни при вторинних плинах, інтенсивність яких мінялася шляхом зменшення висоти профілів  $h$  і збільшення товщини накопленого прикордонного шару  $\delta_{вх}$  на вході в об'єкт дослідження. Отримано дані характеризуючі розподіл локальних коефіцієнтів теплоїддачі на торцевій поверхні в широкому діапазоні зміни визначальних параметрів.

**Ключові слова:** локальні коефіцієнти теплоїддачі, торцеві поверхні, канал профілів соплового апарата турбіни, вторинні плини.

## LOCAL HEAT TRANSFER AT THE END FACES CHANNEL PROFILES TURBINE NOZZLES FOR INTENSE SECONDARY FLOWS

A. A. Kaschenko

An experimental study of local heat transfer at the end surfaces of the channel profiles turbine nozzles in secondary currents, the intensity of which varied by reducing the height profiles ( $h$ ) and increasing the thickness of the boundary layer ( $\delta_{вх}$ ) accumulated at the entrance to the object of study. The data characterizing the distribution local heat transfer coefficients on the end surface in a wide range of characteristic parameters.

**Keywords:** local heat transfer coefficients, the end surface of the channel profiles turbine nozzles, secondary flow.