

УДК 621.45.02:536.24

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

А.А. Кащенко, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования локального теплообмена на торцевых поверхностях решётки профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых менялась путём уменьшения высоты профилей. Получены данные, характеризующие распределение локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевой поверхности в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

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

ЛОКАЛЬНИЙ ТЕПЛООБМІН НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ РЕШІТКИ ПРОФІЛІВ СОПЛОВОГО АПАРАТА ТУРБІНИ ПРИ ІНТЕНСИВНИХ ВТОРИННИХ ТЕЧІЯХ

О.О. Кащенко, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Наведено результати експериментального дослідження локального теплообміну на торцевих поверхнях решітки профілів соплового апарата турбіни при вторинних течіях, інтенсивність яких змінювалась шляхом зменшення висоти профілів. Отримано дані, що характеризують розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі на торцевій поверхні в широкому діапазоні зміни визначальних параметрів.

Ключові слова: локальні коефіцієнти тепловіддачі, торцеві поверхні, решітка профілів соплового апарата турбіни, вторинні течії.

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

A. Kashchenko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),

Kharkov National Automobile Road University

Abstract. Results of experimental study of local heat transfer at the end surfaces of channel profiles of turbine nozzles in secondary currents, the intensity of which was varied by reducing the height of the profiles are presented. The thickness of the boundary layer on the inlet in the channel profiles was reduced to the minimum possible in the experiment. The data characterizing the distribution of local heat transfer coefficients on the end surface in a wide range of characteristic parameters change is obtained.

Key words: local heat transfer coefficients, end surface of channel profiles of turbine nozzles, secondary flow.

Введение

Одним из путей повышения тягово-экономической эффективности современных

авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является повышение температуры газа перед турбиной T_T^* . Однако повышение T_T^*

представляет собою непростую задачу, которая в настоящее время решается преимущественно путем повышения эффективности системы воздушного охлаждения деталей проточной части турбин. Материаловеды хотя и достигли 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 $T_r^* = (1500-1700)$ К относительная высота лопаток $\bar{h} = h/t$ становится ≤ 1 .

При этом в межлопаточных каналах сопловых аппаратов возникает сложная трехмерная вихревая структура течения, которая занимает практически всю проточную часть канала. Кроме того, уменьшение \bar{h} 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. 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 вторичных течений, например, при уменьшении высоты лопаток h и увеличении толщины $\delta_{вх}$ накопленного пограничного слоя на входе в турбинную решетку, какова степень раздельного влияния канального и П-образного вихрей на газодинамику и теплоотдачу торцевых стенок.

Анализ 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 $\delta_{вх}$ 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 малоприменимыми для разработки методики расчета локального теплообмена на торцевых поверхностях сопловых аппаратов турбин.

Цель и постановка задачи

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования локального теплообмена на торцевых поверхностях решетки профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых менялась путём уменьшения высоты профилей h при слитом пограничном слое на входе в решётку.

Результаты исследования

Измерения поля скоростей внешнего течения [5], проведенные на торцевых стенках решётки профилей соплового аппарата турбины, позволили определить степень влияния П-образного, канального и углового вихрей на гидродинамику потока. При этом интенсивность вторичных течений в проточной части решётки менялась путём уменьшения параметра h/t и увеличения толщины $\delta_{вх}$ 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 решётки профилей соплового аппарата турбины. Измерения были выполнены в среднем межпрофильном канале решётки, которая состояла из четырех профилей, образующих три межпрофильных канала. Схема рабочей части аэродинамической трубы и решетки профилей, а также основные геометрические данные профиля и решетки профилей приведены в [5]. Интенсивность вторичных течений в решётке менялась за счет изменения высоты её проточной части h . Исследования проведены при следующих значениях: $\delta_{вх} - 2 \text{ мм}; h/t - 1,0; 0,47; 0,24; 0,14; Re_1 - 1,8 \cdot 10^5; 2,2 \cdot 10^5; 3,3 \cdot 10^5$.

Локальные коэффициенты теплоотдачи измерялись на нижней торцевой стенке решётки электрометрическим методом с помощью устройства, которое состояло из датчиков температуры и ленточного электрического нагревателя. В качестве датчиков температуры использовались хромель-копелевые термодпары. Всего было установлено 60 термодпар, которые предварительно тарировались. Нагреватель был включен в электрическую цепь постоянного тока. Термодпары располагались так, чтобы координаты их установки соответствовали координатами установки приемников статического давления на верхней торцевой стенке. Локальные коэффициенты теплоотдачи α определялись в квази-изотермических условиях при постоянной плотности теплового потока q_w на стенке по формуле

$$\alpha = \frac{q_w - q_n}{T_w - T_1^*}, \quad (1)$$

где q_n – 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 учитывались по специально разработанной методике [6]. Достоверность определения величины α проверялась 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 соответственно.

Формула (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 межпрофильного канала решётки профилей – средней линии, выпуклой и вогнутой стенок профиля – при $h/t = 1,0$ и слитом пограничном слое на входе.

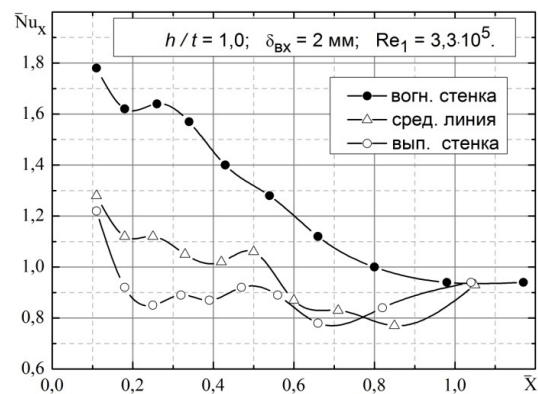


Рис. 1. Зависимость $\bar{Nu}_x = f(\bar{x})$

Здесь $\bar{Nu}_x = Nu_x / Nu_{ox}$ – относительный коэффициент теплоотдачи; $Nu_x = (\alpha \cdot x) / \lambda$ – локальное число Нуссельта, рассчитанное вдоль криволинейной координаты x ; α – локальный коэффициент теплоотдачи торцевой поверхности, определённый из опытов; Nu_{ox} – локальное число Нуссельта, определённое из уравнения (2) для того же режима течения, что и в опытах; $\bar{x} = x / b_o$; x – криволинейная координата, отсчитываемая от начала фор-

мирования теплового пограничного слоя; b_0 – хорда профиля; индекс x означает значения параметров на оси x . Поскольку численные значения Nu_{ox} определяют интенсивность теплоотдачи плоской пластины в «стандартных» условиях (гладкая поверхность, безградиентное квазиизотермическое течение низкотурбулентного потока воздуха), то отношение $\bar{Nu}_x = Nu_x / Nu_{ox}$ 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 $\approx 200\%$, как по длине, так и по ширине проточной части межпрофильного 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 $\bar{x} < 0,8$ теплоотдача выше, чем на пластине (максимальное отличие наблюдается на входе в решётку и достигает 80% при $\bar{x} = 0,11$), а при $\bar{x} > 0,8$ – ниже (при $\bar{x} = 1,1$ отличие достигает 5%). В области выпуклой стенки теплоотдача в основном ниже, чем на пластине. При этом максимальное отличие достигает 20% при $\bar{x} = 0,66$. В области средней линии до $\bar{x} < 0,55$ теплоотдача выше, а при $\bar{x} > 0,55$ – ниже, чем на пластине (отличие достигает $\approx \pm 20\%$).

Отношения \bar{Nu}_x при различных величинах h/t к соответствующим значениям \bar{Nu}_x при $h/t = 1,0$ и слитом пограничном слое на входе в решётку показаны на рис. 2.

Очевидно, что характер изменения коэффициентов теплоотдачи торцевых поверхностей как по ширине, так и по длине межпрофильного канала решётки профилей при уменьшении параметра h/t от 1,0 до 0,14 заметно меняется по сравнению с решёткой с $h/t = 1,0$. При этом во всех характерных областях межпрофильного канала уменьшение параметра h/t от 1,0 до 0,14 приводит к общему снижению интенсивности теплоотдачи торцевых поверхностей.

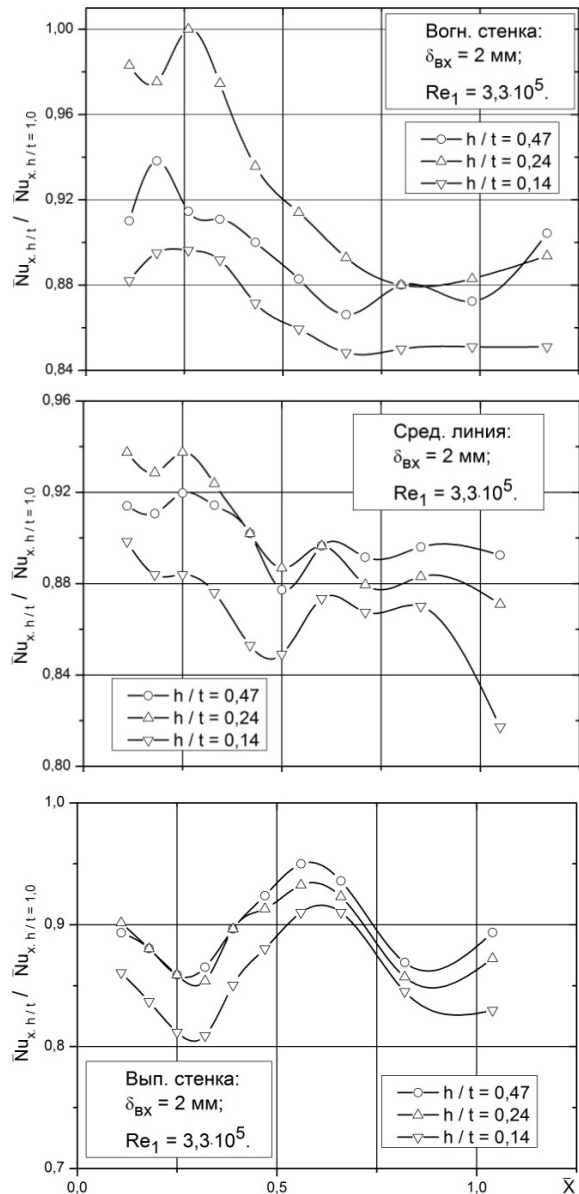


Рис. 2. Влияние параметра h/t на теплообмен торцевых поверхностей в решётке профилей

Например, в области вогнутой стенки профиля уменьшение параметра h/t от 1,0 до 0,47 приводит к заметному снижению интенсивности теплоотдачи, по сравнению с $h/t = 1,0$. Максимальное снижение $\approx (10-12)\%$ наблюдается в косом срезе решетки и в области горла. При дальнейшем уменьшении h/t от 0,47 до 0,24 наблюдается заметный рост интенсивности теплоотдачи. В области средней линии межпрофильного канала наблюдается такой же характер колебания интенсивности теплоотдачи при изменении h/t от 1,0 до 0,24, но в меньшей мере. В области выпуклой стенки профиля интенсивность теплоотдачи при уменьшении h/t от 0,47 до 0,24 незначительно, но уменьшается.

При дальнейшем уменьшении параметра h/t от 0,24 до 0,14 интенсивность теплоотдачи снижается во всех характерных областях межпрофильного канала. Например, в области вогнутой стенки профиля максимальные отличия \bar{Nu}_x при h/t , равных 0,24 и 0,14 ($\approx 10\%$), наблюдаются около входных кромок профилей, а минимальные – в косом срезе решетки и в области горла ($\approx 5\%$). Существенное увеличение \bar{Nu}_x , связанное с влиянием ветви П-образного вихря на стороне давления профиля, наблюдается в интервале $\bar{x} = 0,2-0,3$.

Характер изменения \bar{Nu}_x в области средней линии межпрофильного канала и выпуклой стенки профиля обусловлен характером развития и взаимодействия канального и ветви П-образного вихря на стороне давления профиля, которая, пересекая межпрофильный канал, является аэродинамической преградой для жидкости с низким импульсом движения, накопленной на входе в решетку профилей. Эта жидкость стекает вдоль ветви П-образного вихря в сторону выпуклой стенки лопатки. При этом толщина пограничного слоя нарастает как в области средней линии, так и в области выпуклой стенки. Ветвь П-образного вихря на стороне разрежения профиля также способствует этому процессу. В результате коэффициенты теплоотдачи уменьшаются: в области средней линии – до $\bar{x} = 0,5$; в области выпуклой стенки – до $\bar{x} = 0,25$. В области выпуклой стенки при $\bar{x} > 0,25$ происходит взаимодействие ветви П-образного вихря на стороне давления профиля, который сливается с канальным вихрем. В результате вытеснения ветви П-образного вихря на выпуклую сторону лопатки интенсивность теплоотдачи торцевой поверхности в этой области нарастает. При $0,25 < x \leq 0,6$ максимальные отличия значений α здесь достигают 15%. Очень четко выражена зона влияния канального вихря в области средней линии ($0,3 < x \leq 0,8$). Местное повышение α обусловлено уменьшением толщины пограничного слоя на той стороне вихря, где течение направлено к торцевой стенке.

При изменении режима течения на входе Re_1 от $1,8 \cdot 10^5$ до $3,3 \cdot 10^5$ коэффициенты теплоотдачи α монотонно возрастают во всей области течения.

Выводы

Экспериментальные исследования по изучению теплообмена на торцевых поверхностях решетки профилей соплового аппарата турбины при уменьшении высоты лопаток позволяют сделать следующие выводы:

- организация опытов в решетке профилей соплового аппарата турбины позволяет получить структуру вторичных течений в проточной части решетки с П-образным вихрем и определить степень его влияния на теплоотдачу торцевых поверхностей решетки путём сравнения с соответствующими теплофизическими экспериментами в канале идентичных профилей;

- распределение локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевых поверхностях решетки профилей при $h/t = 1,0$ и слитом пограничным слоем на входе в решетку характеризуется существенной неравномерностью как по ширине, так и по длине торцевых стенок;

- характер изменения локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевых поверхностях решетки профилей при уменьшении параметра h/t от 1,0 до 0,14 и слитом пограничным слоем на входе в решетку определяется преимущественно характером взаимодействия канального и П-образного вихрей в межпрофильном канале решетки и их интенсивностью;

- уменьшение параметра h/t от 1,0 до 0,14 приводит к общему снижению интенсивности теплоотдачи торцевых поверхностей во всех характерных областях межпрофильного канала решетки профилей.

Литература

1. Сивердинг С.Н. Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений в каналах турбинных решеток / С.Н. Сивердинг // Энергетические 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 // Энергетиче-

- ские 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. Авиационная техника. – 1986. – № 2. – С. 68–73.
 5. Кащенко А.А. Гидродинамика на торцевых поверхностях решетки профилей соплового аппарата турбины при интенсивных вторичных течениях / А.А. Кащенко // Системы озброєння і військова техніка. – 2013. – № 2(34). – С. 88–93.
 6. Кащенко А.А. Методика определения локальных коэффициентов теплоотдачи в турбинных решетках профилей / А.А. Кащенко, Л.В. Сысков // Летательные аппараты и авиационные двигатели: сб. статей. – 1988. – Вып. 5. – С. 33–35.
- References**
1. Siverding S.N. Sovremennyye dostizheniya v issledovanii osnovnykh osobennostey vtorichnykh techeniy v kanalah turbinnykh reshetok [Recent advances in the study of the main features of secondary flows in the channels of the turbine arrays]. *Energet. mashiny i ustanovki*, 1985, Vol. 2. pp. 1–15.
 2. Gratsiani R.A., Bler M.F., Teylor Zh. R., Meyl R.E. Eksperimentalnoe issledovanie teploobmena na tortsevykh poverhnostyakh i lopatkakh v krupnomasshtabnoy turbinnoy reshetke [Experimental study of heat transfer at the end faces and the turbine blades in a large-scale grid]. *Energet. mashiny i ustanovki*, 1980, Vol. 2. pp. 29–37.
 3. Beyli D.A. Issledovanie poley osrednennoy i turbulentnoy skorosti v krupnomasshtabnom kanale turbinnykh lopatok [Research fields averaged and turbulent velocity in large-scale channel turbine blades]. *Energet. mashiny i ustanovki*, 1980, Vol. 1. pp. 87–94.
 4. Halatov A.A., Kapitanchuk K.I., Kovalenko A.S., Trufanov A.N. Issledovanie lokalnogo teploobmena na tortsevoy poverhnosti modeli soplovogo apparata [A study of local heat transfer on the edge surfaces of the model nozzle unit]. *Izv. vuzov. Aviat. Tehnika*, 1986, Vol. 2. pp. 68–73.
 5. Kaschenko A.A. Hidrodinamika na tortsevykh poverhnostyakh reshetki profiley soplovogo apparata turbiny pri intensivnykh vtorichnykh techeniyakh [Hydrodynamics on the edge surfaces of the lattice profiles turbine nozzles in intensive secondary flows]. *Sistemy ozbroennya i viyskova tehnik*, 2013, – Vol. 2(34). pp. 88–93.
 6. Kaschenko A.A., Syiskov L.V. Metodika opredeleniya lokalnykh koeffitsientov teplootdachi v turbinnykh reshetkakh profiley [Method for determination of the local heat transfer coefficients in the lattice profiles turbine nozzle]. *Letatelnyye apparaty i aviatsionnyye dvigateli: sb. statey*, 1988. Vol. 5. pp. 33–35.
- Рецензент: В.Г. Солодов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 25 мая 2015 г.
-