

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КРИТЕРИЯХ БИО

© 2014 Е.Г. Колесова¹, С.В. Веретенников², М.Н. Жорник¹

¹Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

²Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в плоском канале, изготовленном методом лазерной стереолитографии. Исследуемая теплообменная поверхность представляет собой тонкую металлическую пластину, образующую одну из боковых стенок канала. Исследования проведены при различных критериях Био и в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Для определения коэффициентов теплоотдачи используется инфракрасная тепловая диагностика, в основу которой положен метод регулярного теплового режима первого рода. Металлическая пластина сначала нагревалась, затем через внутренний канал включалась продувка холодного воздуха. Температура пластины измерялась с помощью инфракрасного термографа. При обработке результатов строились графики логарифма избыточной температуры от времени. Тангенс угла наклона данных кривых является темпом охлаждения пластины. Экспериментально определены границы применения данного метода от критерия Био. Полученные экспериментальные результаты хорошо совпадают с известной критериальной зависимостью $Nu=0,018Re^{0,8}$. Разработанная экспериментальная установка и методика проведения нестационарного эксперимента позволяют определять коэффициенты теплоотдачи при вынужденном течении ограниченных потоков при реализации регулярного теплового режима первого рода.

Регулярный тепловой режим, теплообмен, турбина.

При проектировании систем охлаждения лопаток газовых турбин основной задачей является обеспечение требуемого температурного состояния материала лопатки. Современные программные комплексы позволяют определить температурное поле в лопатке при условии правильного задания граничных условий теплообмена, как со стороны газового потока, так и со стороны каналов системы охлаждения. Достигнутые успехи в численном моделировании процессов теплообмена в проточной части турбины в сочетании с экспериментальными данными по исследованию течений в решётках профилей дают возможность с приемлемой точностью задавать граничные условия на внешней поверхности пера лопатки. Однако сложность процессов, протекающих при течении теплоносителя в каналах систем охлаждения лопаток турбин, не позволяет с достаточной точностью численными методами определять граничные условия теплообмена на внутренней поверхности лопатки и требует получения надёжных экспериментальных данных.

Одним из наиболее перспективных методов определения параметров внутреннего теплообмена в каналах систем охлаждения лопаток турбин является инфракрасная тепловая диагностика, в основу которой положен метод регулярного теплового режима первого рода.

Суть метода заключается в том, что при охлаждении тела в среде с постоянной температурой изменение его избыточной температуры в любой точке с течением времени описывается уравнением [1]:

$$t_i - t_0 = (t_{i0} - t_0) \cdot e^{-m(\tau_i - \tau_0)}, \quad (1)$$

где t_i - текущее значение температуры тела в i -той точке, °С;

t_{i0} - начальная температура тела в i -той точке, °С;

t_0 - температура охлаждающего воздуха, °С;

$\tau_i - \tau_0$ - интервал времени охлаждения между начальной температурой t_{i0} и температурой t_i , с.

Такой тип нестационарного теплообмена носит название регулярного теплового режима первого рода [1]. Входя-

щий в показатель экспоненты коэффициент m носит название темпа охлаждения и связан с коэффициентом теплоотдачи соотношением [1]:

$$m = \frac{\alpha F \Psi}{\rho c V}, \quad (2)$$

где α – локальный коэффициент теплоотдачи на выделенном элементе теплообменной поверхности, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности элемента, м²; ρ – плотность материала лопатки, кг/м³; c – удельная теплоёмкость материала лопатки, Дж/(кг·К); V – объём выделенного элемента, м³; Ψ – коэффициент неравномерности, равный отношению средней избыточной температуры на теплообменной поверхности элемента лопатки к средней избыточной температуре по объёму элемента.

Для тел постоянной геометрической формы темп охлаждения m зависит от Ψ и α . Коэффициент неравномерности Ψ для заданной формы тела является функцией числа Био:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала тела, Вт/(м·К); l – характерный размер, м.

При значении числа Bi близком к нулю коэффициент неравномерности Ψ стремится к 1. Тогда коэффициент теплоотдачи можно определить по значению темпа регулярного режима.

$$\alpha = \frac{m \rho c V}{F}. \quad (4)$$

На стендах научно-производственного объединения «Сатурн» с использованием описанного метода проведены испытания рабочих лопаток турбины. Исследуемая лопатка сначала нагревалась до 250°С, затем через её внутренние каналы прокачивался охлаждающий воздух, температура, давление и расход которого измерялись. Температурное поле на наружной поверхности лопатки фиксировалось с помощью инфракрасного термографа.

При проведении испытаний выявлено, что регулярный тепловой режим первого рода достигается лишь при испыта-

нии лопаток с расходом охлаждающего воздуха менее 30% от номинального. При рабочих расходах охлаждающего воздуха регулярный режим наступает лишь в периферийных сечениях лопатки, где толщина стенки мала.

В современных лопатках величины коэффициентов теплоотдачи во внутренних каналах системы охлаждения достигают величин 2000 Вт/м²К, а теплопроводность жаропрочных и жаростойких материалов используемых в производстве лопаток достаточно мала. Толщина стенки лопатки варьируется от 2,5-3 мм в корневом сечении до 0,5 мм в периферийном. Соответственно, число Био изменяется от 0,08...0,15 для периферийных сечений до 0,4...0,6 мм для корневых. Согласно [2] температурное поле тела нельзя считать однородным при значении Bi , превышающем 0,1.

Для выявления границ применения данного метода определения коэффициента теплоотдачи проведены испытания плоского канала, закономерности теплообмена в котором хорошо изучены. Экспериментальный участок представляет собой плоский канал, изготовленный методом лазерной стереолитографии (рис. 1). Исследуемая теплообменная поверхность представляет собой тонкую металлическую пластину, образующую одну из боковых стенок канала. Сжатый воздух поступает в канал из ресивера, в котором измеряются входные значения температуры и давления. Таким образом, при прокачке воздуха через каналы стереомодели формируется течение, определяющее граничные условия теплообмена на внутренней поверхности пластины.

Задачей исследования теплообмена в канале экспериментального участка, показанного на рис. 1, является определение коэффициентов теплоотдачи от прокачиваемого через канал воздуха к внутренней теплообменной поверхности пластины. В данной методике измерение тепловых потоков производится в нестационарном режиме.

В опытах, проведённых для отработки представленной экспериментальной

методики, использовалась модель с плоским каналом шириной 28 мм, высотой 3 мм и длиной 65 мм.



Рис. 1. Экспериментальный участок для исследования теплообмена в плоском канале с установленной пластиной

Расход прокачиваемого через канал воздуха измерялся высокоточным кориолисовым расходомером «Micro Motion», давление воздуха на входе в канал – датчиком давления «Метран», температура воздуха на входе в канал – хромель - алюмелевым приёмником. Регистрация параметров опыта производилась измерительно-вычислительным комплексом «СИТП-М». Перед началом опыта модель продувалась сжатым воздухом для настройки режима, затем подача воздуха перекрывалась с помощью отсечного клапана. После включения записи параметров пластина с помощью тепловой воздуходувки нагревалась до 120...130°C. После достижения указанной температуры открывается отсечной клапан и весь расход воздуха поступает в рабочий участок охлаждающий пластину. Температура пластины измерялась термографом Flir T440.

Основным недостатком бесконтактного способа измерения температуры является его зависимость от коэффициента излучения (степени черноты) исследуемого объекта [3]. На поверхность пластины перед проведением испытаний была нанесена матовая грунтовая краска и установлена термопара. На первом этапе после нагрева пластина охлаждалась естественной конвекцией. При этом фиксировалось изменение температуры поверхности пластины термографом и термопарой. На термографе был установлен коэффициент излучения, равный 0,94, как указано в рекомендации [3]. Разница между показа-

ниями термопары и термографа составила не более 0,5°C, что лежит в границах погрешности измерения хромель – алюмелевой термопары 1-го класса точности ($\pm 1,5$ °C) [4] и термографа (± 2 °C по абсолютно чёрному телу).

При продувке воздуха через канал модели пластина охлаждается в десятки раз быстрее, чем при естественном остывании на воздухе. Следовательно, основной отвод тепла от пластины осуществляется через внутреннюю поверхность, и внешним теплообменом при расчёте коэффициента теплоотдачи можно пренебречь.

Для расчёта коэффициентов теплоотдачи по полученным экспериментальным данным строилась зависимость логарифма избыточной температуры $\ln(t_i - t_0)$ от времени τ . Из всего диапазона полученных значений выбирался линейный участок зависимости, тангенс угла наклона которого представляет собой темп охлаждения m , по которому определяется коэффициент теплоотдачи α (рис. 2).

Испытания по определению коэффициентов теплоотдачи проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от $1,7 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^5$ и при различных толщинах стенки канала (для стальной пластины толщина варьируется от 0,5 до 5 мм, для медной пластины толщиной 0,3 мм), а следовательно, и при различных значениях критерия Bi . Полученные экспериментальные данные по исследованию теплообмена внутри плоского канала при различных толщинах пластины хорошо согласуются с известной критериальной зависимостью $Nu = 0,018 Re^{0,8}$ (рис. 3) [5].

Отклонение экспериментальных данных от расчётной зависимости начинается при толщине стальной пластины 5 мм и числах Рейнольдса выше $6 \cdot 10^4$, что соответствует числу Bi большему 0,2 (рис. 4). Следовательно, при дальнейшем увеличении числа Bi необходимо вводить поправку- коэффициент неравномерности Ψ , равный отношению средней избыточной температуры на поверхности элемента лопатки к средней избыточной температуре по объёму элемента лопатки.

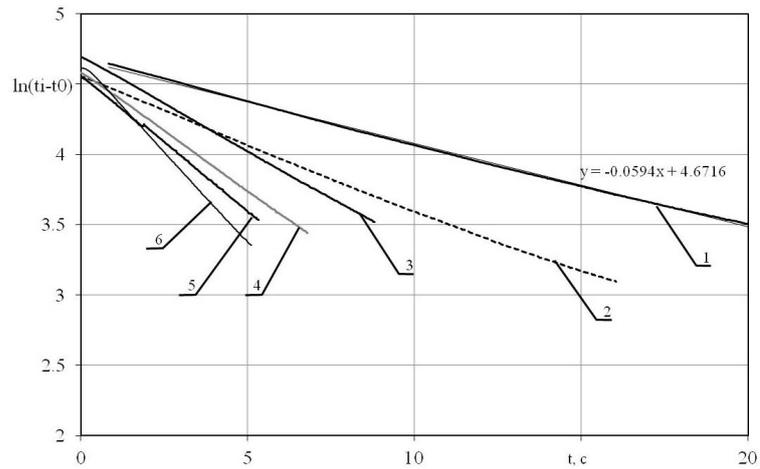


Рис. 2. Зависимость логарифма избыточной температуры от времени τ при вынужденной конвекции в плоском канале со стенкой толщиной 1мм:

1 – $Re=1,7 \cdot 10^4$; 2 – $Re=3,4 \cdot 10^4$; 3 – $Re=5,2 \cdot 10^4$; 4 – $Re=6,9 \cdot 10^4$; 5 – $Re=8,6 \cdot 10^4$; 6 – $Re=1,04 \cdot 10^5$

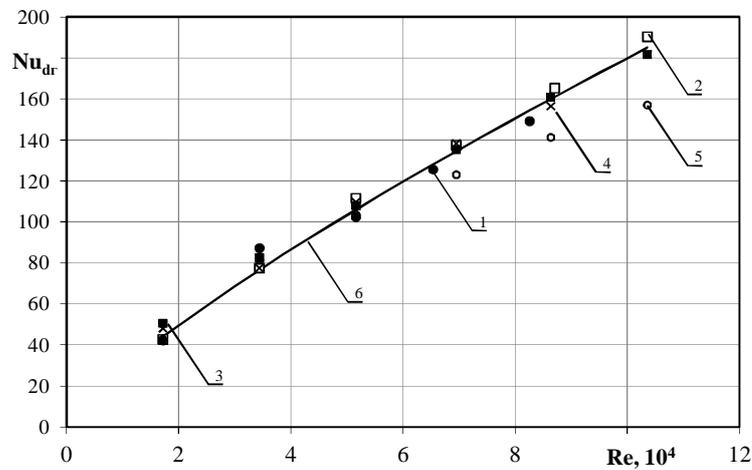


Рис. 3. Расчётная и экспериментальная зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса при различных толщинах пластины

1 – $\delta=0,3$ мм (медь); 2 – $\delta=0,5$ мм (сталь), 3 – $\delta=1$ мм (сталь); 4 – $\delta=3$ мм (сталь); 5 – 5 мм (сталь), 6- теоретическая зависимость

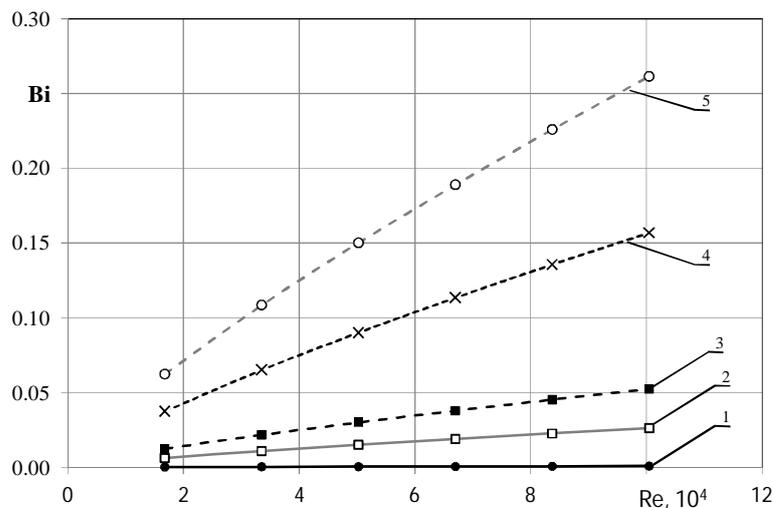


Рис. 4. Расчётная и экспериментальная зависимости числа Био от числа Рейнольдса при различных толщинах пластины

1 – $\delta=0,3$ мм (медь); 2 – $\delta=0,5$ мм (сталь), 3 – $\delta=1$ мм (сталь); 4 – $\delta=3$ мм (сталь); 5 – 5 мм (сталь)

Разработаны экспериментальная установка и методика проведения нестационарного эксперимента, позволяющие определять коэффициенты теплоотдачи при вынужденном течении ограниченных потоков при реализации регулярного теплового режима первого рода.

Разработанная методика позволяет определять коэффициенты теплоотдачи во всём практически значимом диапазоне чисел Рейнольдса при $Bi < 0.2$. Данные испытания целесообразно проводить на плоских каналах, изготовленных методом лазерной стереолитографии, имеющих в качестве одной из стенок стальную пластину с толщиной от 0,5 до 3 мм. Проводить данные испытания с использо-

ванием медной пластины нецелесообразно из-за низкой теплоёмкости меди и очень быстрого охлаждения пластины, что накладывает соответствующие требования к регистрирующей аппаратуре. При этом канал может содержать различные интенсификаторы теплообмена: компланарные рёбра, штырьки-турбулизаторы и т.д. При использовании в качестве объекта испытаний натуральных лопаток возникают сложности с соблюдением условия $Bi < 0.2$ из-за низкой теплопроводности материалов современных лопаток газовых турбин и влияния поперечной теплопроводности на различных интенсификаторах теплообмена в каналах лопаток.

Библиографический список

1. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гос. изд-во технической литературы, 1954. 408 с.
2. Авдучевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А., Данилов Ю.И. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно – космической технике. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.
3. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М.: Энергопрогресс, Энергетик, 2003. 76 с.
4. ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики. М.: Изд-во стандартов, 2002. 78 с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.

Информация об авторах

Колесова Елена Геннадиевна, ведущий специалист отдела турбин, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: kolesova_eg@mail.ru. Область научных интересов: тепло-массообмен в турбомашинах.

Веретенников Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры общей и технической физики, Рыбинский государственный авиационный технический университет. E-mail:

serveret@yahdex.ru. Область научных интересов: тепло-массообмен в турбомашинах.

Жорник Максим Николаевич, кандидат технических наук, ведущий специалист экспериментально – исследовательского отдела, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: mn.zhornik@yandex.ru. Область научных интересов: тепло-массообмен в турбомашинах.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT EXCHANGE IN A PLANE CHANNEL USING THE REGULAR THERMAL REGIME METHOD WITH DIFFERENT BIOT NUMBERS

© 2014 E.G. Kolesova¹, S.V. Veretennikov², M.N. Zhornik¹

¹Joint-Stock Company “NPO Saturn”, Rybinsk, Russian Federation

²P.A. Solovyov Rybinsk Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation

The results of the experimental study of heat exchange in flat channel, executed by method laser stereolithography, is presented. The studied heatexchange surface represents the thin metal plate forming one of channel sidewalls. Researches were performed under different criterion Bi in broad range criterion Re. For determination of heat-transfer coefficient is used infrared heat diagnostics, in base which prescribed method of the regular heat mode of the first sort. At first the metal plate was heated, after through an internal channel turned on blowing cold air. Temperature of plate was measured by infrared thermography. In processing the results were based on graphics logarithm excess temperature from time. Slope ratio of the curves is the rate of cooling of the plate. The borders of application of this method are experimentally determined from criterion Bi. The experimental results coincide well with the known criterion dependence $Nu=0,018Re^{0,8}$. Developed experimental setup and methodology of transitional experiment allow to determine the heat transfer coefficient in forced for restricted flow, when the regular warm mode of 1 type is realized.

Regular thermal mode, heat exchange, turbine.

References

1. Kondratiev G.M. *Regulyarnyy teplovoy rezhim* [Regular thermal regime]. Moscow: State publishers technician-theoretical literature Publ., 1954. 408 p.
2. Avduevsky, V.S., Galitseisky B.M., Glebov G.A., Danilov Y.I. et al. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno – kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of Heat Transfer in the aviation and rocket - space technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 624 p.
3. Vavilov V.P., Aleksandrov A.N. *Infrakrasnaya termograficheskaya diagnostika v stroitel'stve i energetike* [Infrared thermal diagnostic in building and energetics]. Moscow: Energoprogress, Energetik Publ., 2003. 76 p.
4. State Standart 8.585-2001. State system for ensuring the uniformity of measurements. Thermocouples. Nominal static characteristics of conversion. Moscow: Standartinform Publ., 2002. 78 p. (In Russ.)
5. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energy Publ., 1973. 320 p.

About the authors

Kolesova Elena Gennadjevna, Chief Specialist of Joint-Stock Company “NPO Saturn”, Rybinsk. E-mail: kolesova_eg@mail.ru. Area of Research: heat transfer, gas dynamics.

Veretennikov Sergej Vladimirovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of P.A. Solovyov Rybinsk Aviation Technical University. E-mail:

serveret@yahdex.ru. Area of Research: heat transfer, gas dynamics.

Zhornik Maksim Nikolaevich, Candidate of Science (Engineering), Chief Specialist of Joint-Stock Company “NPO Saturn”, Rybinsk. E-mail: mn.zhornik@yandex.ru. Area of Research: heat transfer, gas dynamics.