

УДК 629.7.03:526.24.001

А.А. ПАНТЕЛЕЕВ, В.А. СЛЕСАРЕВ, В.А. ТРУШИН*Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия***ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СОПЛОВОМ АППАРАТЕ ГТД
НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ –
МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Мотивом начала исследований нестационарного теплообмена на лопатках турбины послужило разрушение лопаток турбостартера при запуске ГТД. Причина разрушения была неясной, поскольку все существовавшие методы расчета температурного состояния лопаток (с известными в практике расчетов граничными условиями) давали заниженные (не приводящие к разрушению) значения температур и их градиентов. Это послужило толчком к детальному анализу граничных условий конвективного теплообмена на лопатках турбины ГТД на неуставившихся режимах его работы. Результаты исследований подтвердили вывод, содержащийся в большинстве литературных источников о том, что квазистационарный подход к определению теплоотдачи в нестационарных условиях в принципе не оправдан. Эксперименты показали, что при обтекании лопаток турбины ГТД отличие нестационарных коэффициентов теплоотдачи от соответствующих квазистационарных значений может составлять до 3 – 3,5 раз.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен, температурная нестационарность, идентификация граничных условий, сопловые лопатки турбины, термонапряженное состояние.

Введение

Исследования нестационарного теплообмена в условиях внутренней (при течении теплоносителей в каналах) и внешней (при обтекании тел различной геометрии) задач получили существенное развитие за последние 40 – 50 лет. Этому способствовали работы ученых Московского авиационного института (технического университета), Института тепломасообмена им. А.В.Лыкова (ИТМО НАН Беларуси, г. Минск), Института проблем машиностроения (ИП-Маш НАН Украины г. Харьков), Днепропетровского государственного университета (ДГУ, г. Днепропетровск), Института технической теплофизики (ИТТФ НАН Украины, г. Киев) и др. Общее состояние вопроса по данному направлению достаточно объективно характеризуется опубликованными трудами ученых этих коллективов [1 – 8]. В совокупности с результатами, полученными за рубежом, создается достаточно полная картина исследований в области нестационарного теплообмена. На основании анализа опубликованных результатов исследований были сделаны следующие выводы:

– необходима разработка специальных рекомендаций по учету влияния нестационарности при определении характеристик теплообмена на элементах проточной части турбин газотурбинных двигателей;

– для разработки физической модели явления необходимо решение сопряженной задачи неста-

ционарного теплообмена, что связано со значительными трудностями;

– достоверные результаты о закономерностях нестационарного теплообмена в проточной части турбомашин могут быть получены только экспериментальным путем;

– методы экспериментального исследования должны предполагать возможность реализации при значительных тепловых, газодинамических и вибрационных нагрузках на элементы проточной части турбины; отсутствие ограничений на характер протекания теплообменных процессов; возможность оценки погрешностей измеряемых и расчетных величин.

1. Методика экспериментального исследования

Вышеуказанным требованиям в наибольшей мере удовлетворяет методика, основанная на решении граничной обратной задачи теплопроводности в одномерной постановке. В основу численного алгоритма положена аппроксимация одномерного дифференциального уравнения теплопроводности по неявной конечно-разностной схеме с итерационным учетом нелинейности 1 рода (зависимости λ и c от температуры). Для измерения быстроменяющейся температуры газового потока использовался один из контактных методов – метод двух термоприемников. В исследованиях использовалась модификация этого

метода для случая, когда чувствительные элементы термодатчиков имеют форму плоских пластин различной толщины [9]. Указанный метод позволяет определять нестационарную температуру газового потока при отсутствии ограничений на характер изменения температуры среды и условий теплообмена.

Все эксперименты по исследованию влияния температурной нестационарности на теплообмен в сопловом аппарате турбины ГТД выполнялись на специальном стенде для «горячих» продувок турбинных решеток. Стенд позволяет имитировать реальные условия эксплуатации (по температуре газового потока и характеру ее изменения, по расходу газа в проточной части) и оснащен всеми необходимыми контрольно-измерительными приборами [10].

Непосредственным объектом исследования служили полые тонкостенные сопловые лопатки первой ступени турбины одного из натуральных авиационных ГТД (без подвода охлаждающего воздуха).

В целях практического осуществления одномерного подхода к определению коэффициентов теплоотдачи в характерных участках среднего сечения лопатки способом электроэрозии выполнялись сквозные пазы с небольшими перемычками, чтобы выделенные локальные участки стенки лопатки имитировали вырезку из пластины. Схема препарирования лопатки приведена на рис. 1, общий вид подготовленной к испытаниям лопатки – на рис. 2.

В ходе экспериментов регистрировались изменения температур наружной поверхности выделенных участков лопатки и температура газового потока с помощью двух термопар, имеющих различную инерционность. Температурные измерения $T_{wi}(t)$, $T_{f1}(t)$, $T_{f2}(t)$, служащие исходными данными для определения коэффициентов конвективного теплообмена α_t и нестационарной температуры газового потока T_f^* по методу двух термодатчиков, для повышения точности решения обратной задачи теплопроводности и возможного дифференцирования экспериментальной информации предварительно сглаживались кубическими сплайнами по методу [11, 12].

Отличительными особенностями построения сглаживающей функции, минимизирующей функционал [11, 12]:

$$\Phi(u) = \int_a^b [u''^2] dx + \sum_{k=1}^n p_k [u(x_k) - \tilde{f}_k]^2 \quad (1)$$

являлись автоматический выбор весовых коэффициентов p_k (на основании ограничения максимально допустимой относительной погрешности сглаживания в каждой узловой точке) и автоматическая оценка амплитуды относительной случайной погрешности в исходных данных (на основе ограничения количества точек перегиба сплайн-функции на заданном интервале сглаживания).

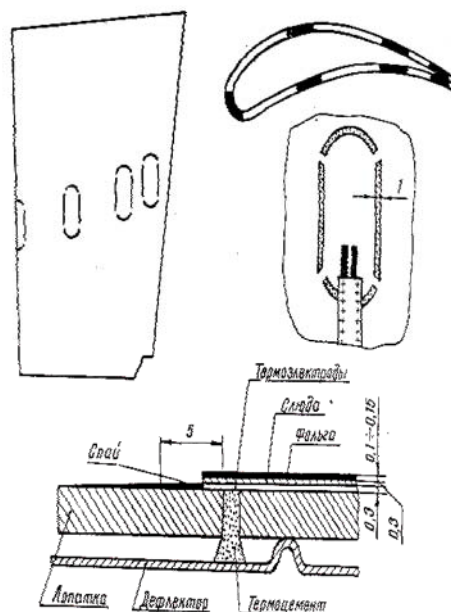


Рис. 1. Схема препарирования лопатки

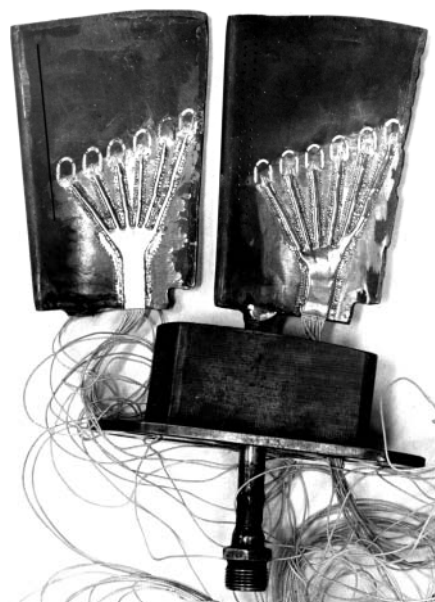


Рис. 2. Общий вид подготовленной к испытаниям лопатки

В ходе экспериментов режимные параметры газового потока менялись в широких диапазонах: $Re_b = (0,3 \div 1,4) \cdot 10^6$; $T_f^* = 670 \div 1240$ °К для режимов резкой подачи дополнительного топлива в камеру сгорания («наброс» тепловой нагрузки) и $Re_b = (0,4 \div 1,22) \cdot 10^6$; $T_f^* = 1170 \div 670$ °К для режимов частичной отсечки топлива, подаваемого в камеру сгорания («сброс» тепловой нагрузки).

Типичный характер изменения температуры газа T_f^* , поверхности датчиков теплового потока T_{wi} и рассчитанных по ним $\alpha_t = f_1(t)$ и коэффициентов влияния температурной нестационарности $\epsilon = Nu_t / Nu_b = f_2(t)$ приведен на рис. 3. Здесь Nu_t и Nu_b – со-

ответственно числа Нуссельта в нестационарных и квазистационарных (при тех же определяющих режим параметрах) условиях.

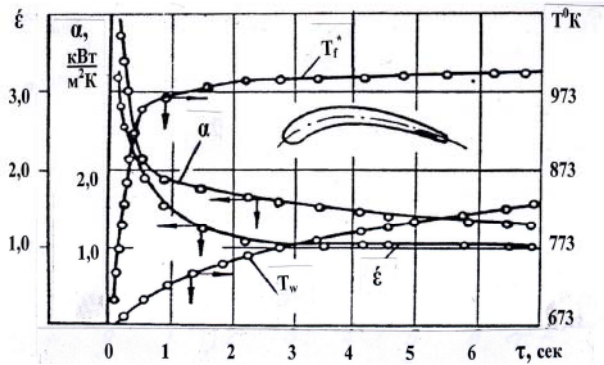


Рис. 3. Изменения температуры газа T_f^* , поверхности датчика теплового потока T_w , $\alpha_{\tau} = f_1(\tau)$ и $\epsilon = Nu_{\tau} / Nu_0 = f_2(\tau)$ при «набросе» тепловой нагрузки

2. Основные экспериментальные результаты

Сложность процессов нестационарного теплообмена, значительное число отдельных факторов, совместно влияющих на его характер, позволяют подойти к идентификации нестационарного теплообмена с позиции метода обобщенных переменных А.А. Гухмана. При этом данные численно-аналитических и экспериментальных исследований нестационарного конвективного теплообмена на элементах проточной части турбины для случая температурной нестационарности должны быть представлены в форме [13]:

$$Nu_f = f_3(Fo_f; Re_f; K_{ин,f}) = f_4(Fo_f; Re_f; Pr_f; K_{ин,f}). \quad (2)$$

где безразмерный комплекс

$$K_{ин,f} = \frac{(c_p l_0^2)_s}{(c_p l_0^2)_f} \quad (3)$$

представляет собой отношение объемных теплоемкостей твердого тела и омывающего его теплоносителя (критерий инерционности системы «твердое тело – омывающая среда»).

Анализ возможности практического использования полученных экспериментальных данных по влиянию температурной нестационарности на интенсивность конвективного теплообмена между высокотемпературным газовым потоком и сопловыми лопатками турбины ГТД показал следующее. При расчете температурных полей и градиентов температур по толщине лопаток, а также при оценке термонапряженного их состояния более целесообразно обобщение результатов экспериментов с использованием чисел подобия типа:

$$K_{TW} = \frac{\partial T_w}{\partial \tau} \frac{1}{T_w} \sqrt{\frac{\lambda}{c_p g(\rho w)}}. \quad (4)$$

Обобщение результатов экспериментов проводилось с использованием алгоритма оптимизации – модифицированного на основе минимизации среднеквадратической невязки метода Нелдера-Мида [14]. При этом было получено уравнение, описывающее влияние температурной нестационарности на конвективный теплообмен между высокотемпературным газовым потоком и участками профиля лопатки:

$$\epsilon = 1 + \{ \exp[a - b] K_{TW} \cdot 10^5 [^\circ C] \} \cdot m \cdot Re^a. \quad (5)$$

Результаты обобщения (для средней части корыта лопатки) представлены на рис. 4 и в табл.1.

Таблица 1

Результаты обобщения для средней части корыта лопатки

Режим	Параметры					Диапазон применимости	
	a	b	c	m	n	Re _b	K _{TW} · 10 ⁻³
«наброс» тепловой нагрузки	1,99	1,6	0,88	0,048	0,224	3 · 10 ³ ... 1,4 · 10 ⁶	0 ... 3,6
«сброс» тепловой нагрузки	1,18	0,45	1,26	1,0	0	4 · 10 ³ ... 1,2 · 10 ⁶	0 ... (-1,5)

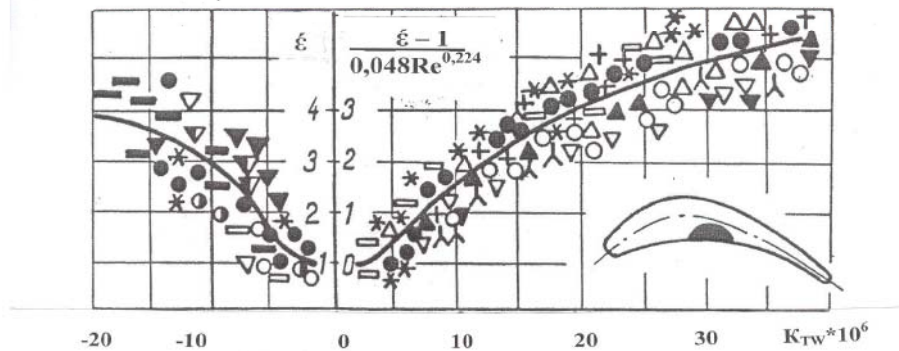


Рис. 4. Результаты обобщения (для средней части корыта лопатки)

Для других характерных участков профиля лопатки (входная и выходная кромки, спинка лопатки, корыто на расстоянии 0,3 хорды от выходной кромки) результаты обобщения представлены в [15]. В целях оценки влияния температурной нестационарности на термонапряженное состояние лопаток турбины были выполнены расчеты температурных полей и напряжений охлаждаемых сопловых лопаток на переходных режимах работы ГТД.

Расчеты температурного состояния в нестационарных условиях проводились конечно-разностным методом (методом сеток) [16], расчеты напряжений – в рамках стержневой теории [17].

Заключение

Результаты расчета температурных полей и термических напряжений сопловых лопаток турбины свидетельствуют о том, что даже в условиях сравнительно «мягких» переходных режимов (температура газа менялась в диапазоне 670°K – 1240°K в течении 3-5 секунд) влияние температурной нестационарности на конвективный теплообмен необходимо учитывать при оценке термонапряженного состояния лопаток. В противном случае ошибка в определении «пиковых» температурных напряжений может превышать 100% (рис. 5).

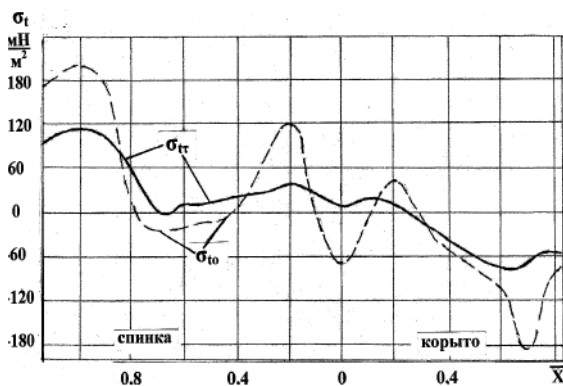


Рис. 5. Распределение температурных напряжений по внешнему профилю охлаждаемой сопловой лопатки АГТД ГАЗ при «сбросе» тепловой нагрузки

Идентификация граничных условий теплообмена на основе решения обратной задачи теплопроводности является эффективным инструментом получения практических результатов при исследовании нестационарного конвективного теплообмена в турбине ГТД.

Литература

1. *Нестационарный теплообмен: монография / В.К. Кошкин [и др.]*. – М.: Машиностроение, 1973. – 328 с.

2. *Смольский Б.М. Нестационарный теплообмен: монография / Б.М. Смольский, Л.А. Сергеева, В.Л. Сергеев* / – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.

3. *Кудрявцев Е.В. Нестационарный теплообмен: монография / Е.В. Кудрявцев, К.Н. Чакалев, Н.В. Шумаков*. – М.: АН СССР, 1961. – 128 с.

4. *Нестационарный теплообмен в трубах: монография / Н.М. Беляев [и др.]*. – Киев-Донецк: Вища школа, 1980. – 160 с.

5. *Шумаков Н.В. Метод последовательных интервалов в теплотехнике нестационарных процессов: монография / Н.В. Шумаков*. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

6. *Мацевитый Ю.М. Моделирование теплового состояния элементов турбомашин: монография / Ю.М. Мацевитый, В.А. Маляренко*. – К.: Наукова думка, 1979. – 256 с.

7. *Мацевитый Ю.М. Идентификация в задачах теплопроводности: монография / Ю.М. Мацевитый, А.В. Мултановский*. – К.: Наукова думка, 1982. – 240 с.

8. *Методы расчета сопряженных задач теплообмена: монография / Э.К. Калинин [и др.]*. – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.

9. *Пантелеев А.А. Об определении нестационарной температуры газового потока с помощью инерционных термомпар / А.А. Пантелеев, В.А. Трушин // Известия ВУЗов СССР, сер. «Авиационная техника»*. – 1976. – № 1. – С. 156-162.

10. *Пантелеев А.А. Исследование влияния температурной нестационарности на теплоотдачу на лопатках турбины / А.А. Пантелеев, В.А. Слесарев, В.А. Трушин // Теплоэнергетика*. – 1981. – № 10. – С. 58-61.

11. *Марчук Г.И. Методы вычислительной математики: монография / Г.И. Марчук*. – М.: Наука, 1977. – 456 с.

12. *Стечкин Б.С. Сплайны в вычислительной математике: монография / Б.С. Стечкин, Ю.Н. Субботин*. – М.: Наука, 1976. – 248 с.

13. *Цирельман Н.М. К идентификации нестационарного теплообмена на элементах проточной части охлаждаемой высокотемпературной турбины ГТД / Н.М. Цирельман, А.А. Пантелеев // Идентификация динамических систем и обратные задачи: сб. докл. III Международной конференции*. – М.: МАИ, 1998. – С. 85-93.

14. *Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: монография / Д. Химмельблау*. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

15. *Trushin V.A. Research of unsteady heat-transfer in the nozzle-block of gas turbine engine / V.A. Trushin, A.A. Panteleev, V.A. Slesarev // Symposium on actual problems of aircraft engines construc-*

tions. – Ufa, Russia, 1999. – P. 7-11.

16. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов: монография / В.И. Локай [и др.]. – М.: Машино-

строение, 1985. – 216 с.

17. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

Поступила в редакцию 28.05.2009

Рецензент: канд. техн. наук, начальник конструкторского отдела малоразмерных ГТД А.Ю. Чечулин, Федеральное государственное унитарное предприятие «Уфимское агрегатное предприятие «Гидравлика», Уфа, Россия.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕПЛОБМІНУ В СОПЛОВОМУ АПАРАТІ ГТД НА НЕСТАЛИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ – МЕТОДИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

А.О. Пантелєєв, В.О. Слесарєв, В.О. Трушин

Мотивом початку досліджень нестационарного теплообміну на лопатках турбіни послужило руйнування лопаток турбостартера при запуску ГТД. Причина руйнування була неясною, оскільки всі існуючі методи розрахунку температурного стану лопаток (з відомими в практиці розрахунків граничними умовами) давали занижені (що не приводять до руйнування) значення температур і їх градієнтів. Це послужило поштовхом до детального аналізу граничних умов конвективного теплообміну на лопатках турбіни ГТД на несталих режимах його роботи. Результати досліджень підтвердили висновок, що міститься в більшості літературних джерел про те, що квазістационарний підхід до визначення тепловіддачі в нестационарних умовах в принципі не виправданий. Експерименти показали, що при обтіканні лопаток турбіни ГТД відмінність нестационарних коефіцієнтів тепловіддачі від відповідних квазістационарних значень може складати до 3 – 3,5 разів.

Ключові слова: нестационарний теплообмін, температурна нестационарність, ідентифікація граничних умов, соплові лопатки турбіни, термонапружений стан.

HEAT EXCHANGE IDENTIFICATION IN THE NOZZLE DIAPHRAGM OF THE GTE AT TIME DEPENDS MODES – METHODS AND RESULTS OF THE RESEARCH

A.A. Panteleev, V.A. Slesarev, V.A. Trushin

The reason for beginning the research of the non-stationary heat exchange on the turbine blades was the turbine starter blades destruction when starting the gas turbine engine. The cause of the destruction was not clear because all the existent methods of the calculation of the temperature condition of the blades (with the well-known in practice calculations and its gradients) gave the understated value (which wasn't the cause of the destruction) of the temperatures and its gradients. It gave the impetus to the thorough analysis of the convectional heat exchange boundary condition on the gas turbine engine blades at its time dependent modes. The results of the research proved the conclusion which was discussed in the majority of the literary sources that the quasi-stationary approach to the determination of the heat emission in non-stationary conditions is not justified. The experiments showed that when flowing of the gas turbine engine blades the difference of the non-stationary coefficients of the heat emission from the corresponding quasi-stationary values may be up to 3-3.5 times.

Key words: non-stationary heat exchange, temperature nonstationarity, identification of the boundary conditions, turbine nozzle blades, thermotension condition.

Пантелєєв Аркадій Александрович – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела подготовки научно-педагогических и научных кадров высшей квалификации Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: asprance@mail.ru.

Слесарєв Виктор Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: tard@ugatu.ac.ru.

Трушин Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: tard@ugatu.ac.ru.