

УДК 536.2.072

Д.В. КРИКУНОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, Украина*

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ТУРБИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАБОРАТОРНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Рассмотрен расчётно-теоретический подход прогнозирования стационарного температурного состояния лопаток турбин на эксплуатационных режимах, имеющих дефекты в каналах воздушного охлаждения. В качестве исходных данных для прогнозирования температурного состояния используются результаты лабораторных теплофизических испытаний, реализующих регулярный тепловой режим. Моделирование температурного состояния лопатки производится с помощью математической модели мониторинга, идентифицированной с помощью численного эксперимента.

**прогнозирование температурного состояния, лопатки турбин, дефекты каналов воздушного охлаждения, математическая модель, теплофизический эксперимент, регулярный тепловой режим**

### Введение

Недостаточная несущая способность современных конструкционных материалов при высоких рабочих температурах, имеющих место в современных ГТД и ГТУ, приводит к необходимости совершенствования систем охлаждения деталей горячей части. Наиболее сложными по конструктивному исполнению являются системы охлаждения лопаток газовых турбин, реализующие конвективное и заградительно-плёночное воздушное охлаждение [1]. Конструктивная сложность заключается в наличии системы внутренних воздушных каналов, от качества которых зависит эффективность охлаждения лопатки.

В проектных расчётах при определении температурного и напряжённо-деформированного состояний, установлении ресурса рассматривается некоторая эталонная лопатка, имеющая среднестатистическую геометрическую форму. В силу же технологических (отклонение геометрической формы) и эксплуатационных факторов (налёт на стенках и закупорка каналов) качество каналов воздушного охлаждения лопаток турбин может существенно отличаться, что выявляется разнообразными современными методами неразрушающего контроля, прово-

димого на заводах-изготовителях и в эксплуатирующих организациях.

При этом при обработке результатов неразрушающего контроля возникает вопрос: на сколько существенно будет отличаться температурное состояние дефектной лопатки от температурного состояния эталонной лопатки; приведет ли это отличие к уменьшению ресурса? В связи с этим перспективным является создание и развитие средств диагностики, позволяющих осуществить прогнозирование температурного состояния охлаждаемых лопаток турбин на эксплуатационных режимах по результатам лабораторных теплофизических экспериментов, реализующих некоторые частные (упрощённые) условия нагружения.

### Результаты исследований

**Организация теплофизического эксперимента.** Поле температур лопатки может быть восстановлено, если известно, какое влияние оказывают дефекты на граничные условия теплообмена. Для определения локальных коэффициентов теплоотдачи (в общем случае – коэффициентов теплопередачи) в каналах воздушного охлаждения предлагается организовать теплофизический эксперимент, реали-

зующий в локальных зонах лопатки регулярный тепловой режим. Для тонкостенных охлаждаемых лопаток (толщина стенок порядка 1 мм) регулярный режим может быть обеспечен организацией вынужденной конвекции с коэффициентами теплоотдачи  $\approx 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ . В этом случае теплообмен локальных зон лопатки с охлаждающим воздухом будет существенно преобладать над теплообменом путём теплопроводности локальных зон между собой.

При регулярном тепловом режиме температурное состояние локальных зон лопатки описывается экспоненциальной зависимостью [2]:

$$\Theta(\tau) = e^{-m\tau}, \quad (1)$$

где  $\Theta(\tau) = \frac{T_f - T(\tau)}{T_f - T_0}$  – безразмерная температура;

$T_f$  – локальная температура воздушного потока;

$T(\tau)$  – локальная температура лопатки;  $T_0$  – начальная температура лопатки.

Параметр  $m$  в показателе степени экспоненты уравнения (1) зависит от геометрических факторов, свойств материала и условий теплообмена:

$$m = \frac{kf}{\rho c V}, \quad (2)$$

где  $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}}$  – локальный коэффициент теплопередачи, учитывающий конвективный теплообмен  $\alpha$

и температурное сопротивление поверхностного слоя лопатки  $\frac{\delta}{\lambda}$ ;  $f$ ,  $V$  – площадь и объём локальной зоны лопатки;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и удельная объёмная теплоёмкость материала лопатки.

Таким образом, идентифицированный по результатам теплофизического эксперимента параметр  $m$  является интегральной характеристикой теплообмена, учитывающей дефекты засорения и изменения формы каналов охлаждения, влияющие на локальные коэффициенты теплоотдачи и температурное сопротивление поверхностного слоя лопатки.

Учитывая идентичность условий теплофизического эксперимента для эталонных и дефектных лопаток, а также считая, что сохраняется подобие течений охлаждающего воздуха в каналах лопатки при теплофизическом эксперименте и на эксплуатационных режимах, можно записать расчётные зависимости для определения локальных коэффициентов теплопередачи на эксплуатационных режимах:

$$k = k_{расч} \frac{m}{m_{эталон}}, \quad (3)$$

где  $k_{расч}$  – локальные коэффициенты теплопередачи эталонной лопатки на эксплуатационном режиме (в частности, на режиме максимального нагружения, по характеристикам которого назначают ресурс лопатки);  $m$ ,  $m_{эталон}$  – значения параметров показателей степени регулярного режима исследуемой и эталонной лопатки соответственно.

Таким образом, располагая полем параметра  $m$  эталонной и диагностируемой лопаток, с помощью зависимости (3) могут быть пересчитаны значения локальных коэффициентов теплопередачи на стационарных эксплуатационных режимах.

**Моделирование температурного состояния лопатки.** Рассчитанные с помощью зависимости (3) локальные коэффициенты теплопередачи могут быть использованы в качестве граничных условий при моделировании температурного состояния лопатки. При этом в зависимости от задачи моделирования могут использоваться как подробные МКЭ модели, так и быстросчётные модели мониторинга.

Для диагностического экспресс анализа температурного состояния лопатки может быть использована математическая модель мониторинга на основе матрицы статических тепловых характеристик [3]:

$$\vec{T}_w = Z \vec{T}_f, \quad (4)$$

где  $\vec{T}_w$ ,  $\vec{T}_f$  – векторы локальных температур поверхности лопатки и газозвдушного потока;

$$Z = \mathbf{A}(\mathbf{W} + \mathbf{A})^{-1} - \quad (5)$$

матрица коэффициентов влияния локальных температур потока на локальные температуры поверхности лопатки, зависящая от матрицы теплопередачи в лопатке  $W$  и диагональной матрицы коэффициентов теплоотдачи (или, в общем случае коэффициентов теплопередачи)  $A$ .

Как указано в работе [3], основную сложность в получении модели (4 – 5) составляет определение сингулярной матрицы  $W$ , связывающей граничные температуры  $\bar{T}_w$  и тепловые потоки  $\bar{Q}_w$ :

$$\bar{Q}_w = W\bar{T}_w.$$

Для определения коэффициентов матрицы  $W$  с помощью численного эксперимента на математической модели верхнего уровня (например, МКЭ модели температурного состояния эталонной лопатки) предлагается следующая процедура. На модели задаются граничные условия 3-го рода (конвективный теплообмен) с одинаковыми коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_i \equiv \gamma$  на всех граничных участках. В этом случае матрица коэффициентов теплоотдачи равна

$$A = \gamma E, \quad (6)$$

где  $E$  – единичная матрица.

Коэффициенты матрицы  $Z_\gamma$ , соответствующей одинаковым коэффициентам теплоотдачи  $\alpha_i \equiv \gamma$ , определяются в результате серии численных экспериментов как отклики граничных температур  $T_{wi}$  лопатки на единичные локальные температуры среды  $T_{fi}$ . Матрица  $W$  определяется из зависимости (5). С учётом соотношения (6) получаем

$$W = \gamma(Z_\gamma^{-1} - E). \quad (7)$$

Имеющаяся в уравнении (7) операция обращения требует обусловленности матрицы  $Z_\gamma$ . Для этого целесообразно выбирать большие значения параметра  $\gamma$  ( $\approx 1000$ ). Найденные из численного эксперимента с некоторой погрешностью коэффициенты

матрицы  $Z_\gamma$  в случае её слабой обусловленности при операции обращения могут привести к большим погрешностям в определении матрицы теплопередачи  $W$ , и как следствие к неадекватности математической модели (4 – 5).

## Выводы

Таким образом, предложен подход, позволяющий учесть влияние дефектов охлаждаемых лопаток турбин на граничные условия теплообмена и выполнить прогноз температурного состояния лопаток на эксплуатационных режимах. В качестве исходных данных для расчёта граничных условий используются поля параметра  $m$  исследуемой и эталонной лопаток, полученные в результате теплофизического эксперимента, реализующего регулярный тепловой режим. Экспресс-моделирование температурного состояния производится с помощью математической модели мониторинга на основе матрицы статических тепловых характеристик лопатки.

## Литература

1. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкция и расчёт систем охлаждения ГТД. – Х.: Основа, 1994. – 240 с.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
3. Крикунов Д.В. Построение моделей мониторинга установившихся температурных состояний деталей ГТД на базе матриц статических характеристик тепловых систем // Вестник двигателестроения: научно-технический журнал. – 2003. – № 1. – С. 15 – 18.

Поступила в редакцию 9.06.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.