

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 α

и температурное сопротивление поверхностного слоя лопатки $\frac{\delta}{\lambda}$; f , V – площадь и объём локальной зоны лопатки; ρ , 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 газовой воздушного 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_γ , 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_γ . Для этого целесообразно выбирать большие значения параметра γ (≈ 1000). Найденные из численного эксперимента с некоторой погрешностью коэффициенты

матрицы Z_γ 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.