

УДК 620.179.13

Б.Н. БАЖЕНОВ¹, А.Г. ЧУМАКОВ¹, С.И. МЕЛЬНИК²¹ ФГУП "Московское машиностроительное производственное предприятие "Салют", Россия² Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

МЕТОД ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ЛОПАТОК ТУРБИН

Представлен метод тепловой дефектоскопии лопаток турбин, разработанный в федеральном государственном унитарном предприятии "Московское машиностроительное производственное предприятие "Салют" (ФГУП "ММПШ "САЛЮТ"), рассмотрены теоретические основы данного метода. Описана установка для тепловой дефектоскопии лопаток турбин, примеры типовых дефектов лопаток и прогноза их теплового состояния.

тепловой контроль, лопатки турбин, ресурс работы, продувка, качество охлаждения

Введение

Лопатки турбин являются одними из наиболее сложных и ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД). Они работают в условиях высоких температур и нагрузок. От надежности лопаток турбин во многом зависят ресурс и экономичность ГТД в эксплуатации. В свою очередь надежность лопаток определяется качеством их изготовления и контроля. Существующие методы контроля производства и эксплуатации лопаток турбин высокого давления (ТВД) – метод вихревых токов, рентгеновский метод и др., дают лишь косвенную информацию об особенностях тепловых режимов работы лопаток и не позволяют делать вывод об эффективности системы их охлаждения. Тепловой метод контроля позволяет непосредственно оценивать как качество охлаждения лопаток, так и оценивать величину возможного перегрева. В перспективе это позволит определять и ресурс работы лопатки.

1. Сущность проблемы контроля качества лопаток ТВД тепловым методом

Трудности диагностики системы охлаждения лопатки тепловым методом обусловлены конструкцией лопатки, внутренние каналы которой имеют ма-

лые геометрические размеры и сложную форму проточной части. При этом высокая теплопроводность материала лопатки приводит к быстрому растеканию тепла и сильному выравниванию температуры на ее поверхности. Кроме того, неоднородность коэффициента излучения поверхности лопатки вызывает существенные артефакты, которые могут превышать эффект от реального температурного перепада. Для решения этих проблем идут по пути интенсификации теплообмена и повышению быстродействия контроля. При этом возникает существенно нестационарный режим, в течении которого проявляются особенности внутренней структуры лопаток. В одном из наших докладов мы опишем особенности контроля лопаток в этом режиме. Тем не менее, использование сравнительно недорогих тепловизоров и регулярного режима теплообмена также позволяет получить интегральные оценки качества охлаждения лопатки в различных зонах. Для этого необходимо использование специальных алгоритмов обработки, которые позволят отфильтровать артефакты и выявить слабо охлаждаемые зоны в рамках регулярного режима.

В связи с актуальностью существующей проблемы на предприятии ФГУП «ММПШ «САЛЮТ»» была разработана методика теплового контроля турбинных лопаток, реализующий её пакет про-

грамм совместно с базой данных, а также спроектирована и изготовлена автоматизированная установка АСТКЛ, в настоящее время применяемая в производстве [1].

2. Теоретические основы метода

Сущность разработанной методики заключается в предварительном нагреве лопатки с последующим ее охлаждением сжатым воздухом, продуваемым через внутренние каналы. Процесс охлаждения фиксируется с помощью тепловизора и результаты измерения поля температур обрабатываются по оригинальному алгоритму. Полученные результаты сравниваются с эталонными и на основании сравнения делается вывод о наличии дефектов. Кроме того дается оценка пригодности лопатки для использования.

Использование дополнительных специальных методик позволяет на основании полученных результатов при тепловой дефектоскопии лопатки оценить поле температур лопатки при ее работе в составе ГТД.

В основу метода тепловизионного контроля эффективности охлаждения рабочих лопаток турбины положен метод регулярного теплового режима, широко используемый при исследованиях нестационарных процессов теплообмена. Метод был разработан Г.М. Кондратьевым [2].

При охлаждении тела в среде с постоянной температурой изменение во времени избыточной температуры тела в любой его точке начиная с некоторого момента времени может быть описано уравнением

$$t_i - t_o = (t_{io} - t_o) e^{-m(\tau_i - \tau_o)}, \quad (1)$$

где t_i – текущее значение температуры в i -й точке;

t_o – температура охлаждающего воздуха;

t_{io} – начальная температура в i -й точке;

$\tau_i - \tau_o$ – интервал времени охлаждения между начальной температурой τ_i и температурой τ_{io} ;

m – темп охлаждения.

Наступление регулярного режима охлаждения характеризуется постоянным значением темпа охлаждения m в процессе охлаждения или нагрева и определяется из уравнения (1) его логарифмированием, а именно

$$m = - \frac{\ln(t_i - t_o) - \ln(t_{io} - t_o)}{\tau_i - \tau_o}. \quad (2)$$

С другой стороны, согласно теории регулярного режима темп охлаждения определяется формулой

$$m = \Psi \frac{F}{vc\gamma} \alpha, \quad (3)$$

где Ψ – коэффициент пропорциональности, означающий отношение средней температуры поверхности к средней температуре в объеме тела [3];

F – площадь охлаждаемой поверхности;

γ – удельный вес;

c – теплоёмкость тела;

α – коэффициент теплоотдачи.

В соответствии с разработанной в лаборатории тепловидения методикой тепловизионные испытания лопаток проводятся на переменном расходе воздуха. Исходя из анализа условий эксперимента, поперечные тепловые потоки оказываются значительно выше продольных. Это позволяет пренебречь растеканием тепла параллельно поверхности лопатки в условиях регулярного режима, и использовать уравнение (3) локально. При этом рассчитывается производная от темпа по расходу:

$$\frac{dm}{dG_{охл}} = \frac{d\left(\Psi \frac{F}{vc\gamma} \alpha\right)}{dG_{охл}},$$

или

$$\frac{dm}{dG_{охл}} = C \left(\Psi \frac{d\alpha}{dG_{охл}} + \alpha \frac{d\Psi}{dG_{охл}} \right), \quad (4)$$

где $C = \frac{F}{vc\gamma}$ – является конструктивной характери-

стикой лопатки ТВД для каждого локального участка. В частном случае – соответствующего одному пикселю на кадрах термофильма.

В принятых приближениях коэффициент ψ определяется локальными особенностями лопатки и практически не зависит от расхода. Поэтому вторым слагаемым в (4) можно пренебречь. В то же время первое зависит как от конструктивных особенностей локальной области ($C\psi$), так и от качества охлаждения ($d\alpha/dG_{охл}$).

Поэтому предложенный параметр позволяет анализировать качество охлаждения лопатки и принимать решение о пригодности лопатки к эксплуатации по полученным данным на основании сравнения с эталонными данными. В случае частичной, или полной закупорки канала величина производной от темпа температуры по расходу воздуха для пикселей, соответствующих этому каналу, будет отличаться от эталонных величин. Аналогичным образом проявляют себя и локальные участки с ухудшенной теплопроводностью.

Характер влияния указанных факторов на величину производной от темпа охлаждения по расходу подтверждаются результатами разрушающего контроля, а также при осмотре полостей лопатки с помощью эндоскопа.

3. Автоматизированная установка для инфракрасной диагностики охлаждаемых лопаток турбин

Автоматизированная установка для инфракрасной диагностики охлаждаемых лопаток турбин (в дальнейшем АСТКЛ) предназначена для оценки качества внутреннего охлаждения лопаток турбин, в частности, для выявления дефектов, вызванных наличием посторонних включений во внутренних полостях, налетами на стенках каналов охлаждения, перераспределением расхода воздуха в каналах, либо другими причинами.

В состав установки входят: стенд (1), компрес-

сорный модуль(2), тепловизор (3) и компьютер для управления установкой и обработкой получаемых результатов.

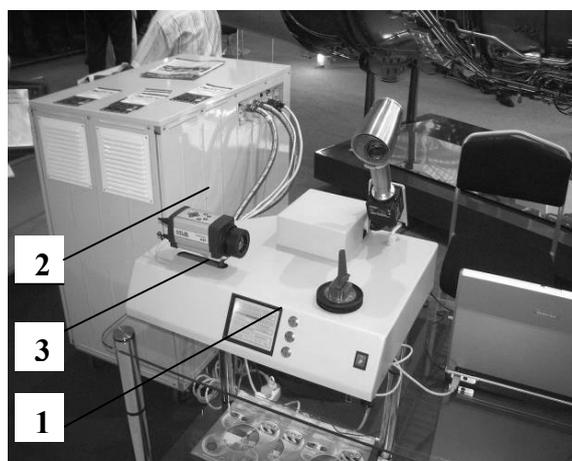


Рис. 1. Общий вид установки

Более подробные данные по устройству установки АСТКЛ можно найти на сайте www.salut.ru.

На рис. 2, 3 представлены примеры обнаружения типичных дефектов. Зоны, окрашенные серыми тонами различной интенсивности, являются дефектными по характеристике качества внутреннего охлаждения.

4. Прогноз теплового состояния лопатки

Получаемые при проведении испытаний лопаток данные позволяют прогнозировать тепловое состояние лопатки при ее работе в составе ГТД. Прогноз теплового состояния основан на сравнении реального распределения коэффициента качества внутреннего охлаждения с распределением, полученным для эталона. Кроме того, предварительно проводится тепловой расчет для конкретной конструкции лопатки [4], результатом которого является распределение коэффициентов, связывающих результаты теплового расчета и результаты испытаний лопатки.

Описанная методика реализована пакетом программ, позволяющим рассчитать поле максимальных отклонений прогнозируемых температур на поверхности лопатки при ее эксплуатации от расчетных величин.

Лопатка № 1E9026**Неохлаждаемых зон 13,17%**

Эталон 1

Критерий отбора 0,50

Перепад на шум 7,00 °С

Т рамки 165,00 °С

Т продувки 35,00 °С

Р начальное 4,21 кгс/см²Р конечное 2,74 кгс/см²

Сглаживание есть

Градация качества
охлаждения:

■ <0,25

0,25-0,5

0,5-0,75

>0,75



Рис. 2. Диаграмма распределения коэффициента качества охлаждения при засорении канала охлаждения в верхней части лопатки со стороны корытца лопатки

Лопатка № 5Б1420**Неохлаждаемых зон 16,00%**

Эталон 0в3008

Критерий отбора 0,30

Перепад на шум 7,00 °С

Т рамки 160,00 °С

Т продувки 22,00 °С

Р начальное 3,00 кгс/см²Р конечное 2,20 кгс/см²

Сглаживание есть

Метод "По логарифму"

Градация качества
охлаждения:

■ <0,05

0,05-0,1

0,1-0,2

>0,2

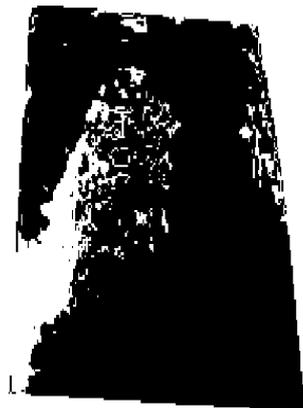


Рис. 3. Диаграмма распределения коэффициента качества охлаждения при засорении канала охлаждения в нижней части лопатки со стороны корытца лопатки

На рис. 4 представлен пример прогноза теплового состояния. На основании значений возможного перегрева при работе лопатки в составе ГТД может быть принято решение о ее пригодности.

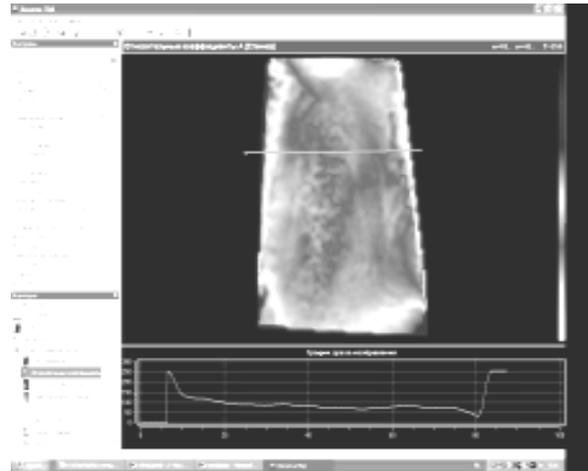


Рис. 4. Распределение максимальных отклонений температур от их расчетных величин для лопатки, имеющей частичное перекрытие каналов внутреннего охлаждения

Литература

1. Основные результаты, полученные в лаборатории теплового контроля НПО «Салют» и НТЦ «Термоконтроль» ХНУРЭ (г. Харьков) по проблеме теплового контроля дефектов элементов конструкции двигателя (техническая справка) // ФГУП «ММПШ»Салют». – М., 2002.
2. Кулиниченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам. – К.: Техніка, 1990. – 165 с.
3. ГОСТ 8.207-76. основополагающие стандарты в области метрологии.
4. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД. – Х.: Основа, 1994. – 240 с.

Поступила в редакцию 11.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.М. Любчик, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.