

УДК 620.179.13

А.Г. ЧУМАКОВ<sup>1</sup>, С.В. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>, А.В. ОЛЕЙНИК<sup>2</sup>, В.Е. КОСТЮК<sup>2</sup>,  
В.Г. ПЕРЕТЁРТОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Московское машиностроительное производственное предприятие «Салют», Россия<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМОЙ ТУРБИНОЙ ЛОПАТКИ С ВИХРЕВОЙ МАТРИЦЕЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

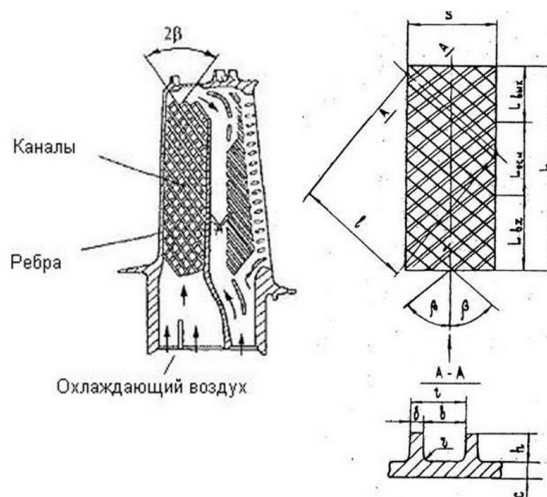
Представлены различные уровни компьютерных моделей нестационарной тепловой дефектоскопии охлаждаемой турбинной лопатки. Модель высокого уровня решает сопряженные задачи газовой динамики, теплообмена и нестационарной теплопроводности для всего объема лопатки. Фрагментарные модели решают отдельно задачи течения потока и теплопроводности в зоне дефекта. Проведено сравнение результатов моделирования и тепловизионного контроля.

**турбинная лопатка, тепловая дефектоскопия, CFD-моделирование, температурное состояние**

В ряде конструкций охлаждаемых лопаток турбин для интенсификации теплоотдачи к охлаждающему воздуху получили распространение вихревые матрицы – компланарные каналы, образованные параллельными ребрами на стенках внутренней полости лопатки, причем направление ребер на стенке корытца лопатки перпендикулярно направлению ребер на стенке ее спинки, а вершины ребер соприкасаются между собой (рис. 1). Образованная каналами зона течения воздуха имеет двухъярусную структуру в виде повторяющихся ячеек размером порядка 1 мм [1].

Мелкоячеистая структура и большая площадь поверхности вихревой матрицы уменьшают достоверность вихревого и рентгеновского методов контроля лопаток. В связи с этим в дополнение к ним применяют методы нестационарного теплового контроля (МНТК), заключающиеся в наблюдении нестационарного температурного поля в локальных зонах или в значительной части лопатки [1]. Возможности МНТК существенно расширились в связи с применением методов лазерного импульсного нагрева и тепловизионного контроля нестационарных температурных полей.

Один из методов теплового контроля, применяемого в серийном производстве лопаток, заключается в предварительном нагреве лопатки обдувом ее струей воздуха, нагреваемого промышленным феном, последующей выдержке для стабилизации и выравнивания температуры и охлаждении потоком сжатого воздуха, продуваемого через каналы (рис. 2). В процессе охлаждения нестационарное температурное поле поверхности лопатки регистрируется тепловизором с частотой 1 кадр полного обзора за 1с при разрешающей способности  $\sim 1 \times 1$  мм.



Ал- Рис. 1. Поперечный разрез лопатки с вихревой матрицей.

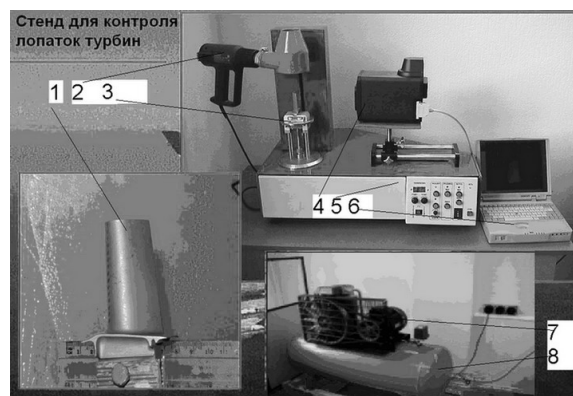


Рис. 2. Стенд контроля лопаток:

1 – исследуемая лопатка; 2 – фен с камерой прогрева; 3 – устройство для крепления лопатки и подачи сжатого воздуха; 4 – тепловизор; 5 – пульт управления; 6 – компьютер; 7 – компрессор; 8 – ресивер

горитмы обработки термограмм устраняют влияние неоднородности излучательной способности лопатки и интерпретируют локальные аномалии температурного поля как проявление различного вида дефектов.

**Цель работы** – создание математической и компьютерной модели процесса теплового контроля для отладки алгоритмов распознавания дефектов. Проводимые исследования направлены на повышение достоверности МНТК, разрабатываемых в лаборатории неразрушающего контроля ММП «Салют».

Из всех известных подходов к расчету турбулентных течений, в компьютерных моделях реализуют феноменологические, приводящие к системе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замыкаемых различными моделями турбулентной вязкости. В последнее десятилетие получили распространение коммерческие пакеты прикладных программ вычислительной гидродинамики, CFD-пакеты (computational fluid dynamics). Наиболее известные – FLOTRAN (в составе многоцелевого пакета ANSYS), FLOW-3D, STAR-CD, FLUENT и другие – позволяют моделировать трехмерные ламинарные и турбулентные течения, свободную и вынужденную конвекцию в областях сложной формы, предоставляют выбор из нескольких десятков

моделей турбулентной вязкости. Модули представления результатов визуализируют поля функций тока, температуры, давлений, скоростей и других величин, характеризующих течение жидкости или газа [1, 2].

Моделирование вязких течений методами вычислительной аэро- и гидродинамики позволяет выполнить корректное определение граничных условий на поверхностях твердых тел, контактирующих с газовым потоком, для решения задач расчета их температурного состояния. Обширная библиография по этому вопросу (более 500 наименований) представлена, например, в монографии [1].

Основным фактором, определяющим успех CFD-моделирования теплоотдачи деталей, является удачный выбор моделей турбулентности, т.к. вопрос их адекватности до настоящего времени остается открытым.

Из многочисленных методов моделирования температурного состояния деталей ГТД в конструкторской практике последнего десятилетия безусловное предпочтение отдается методу конечных элементов (МКЭ) [1, 2]. Это обусловлено рядом его достоинств, важнейшие из которых – возможность решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности с большим набором локальных граничных условий, высокая точность аппроксимации двух- и трехмерных криволинейных границ, простота реализации применительно к конструкционным узлам, состоящим из деталей с различными теплофизическими свойствами, возможность изменения конфигурации, размеров тел, свойств материалов, граничных условий и т.д.

Большинство CFD-пакетов допускают в принципе моделирование трехмерных газовых потоков, в сочетании с моделированием теплообмена и нестационарной теплопроводности в твердом теле, контактирующем с потоком. Однако для задач нестационарного теплового контроля это требует неадекватно больших затрат вычислительных ресурсов.

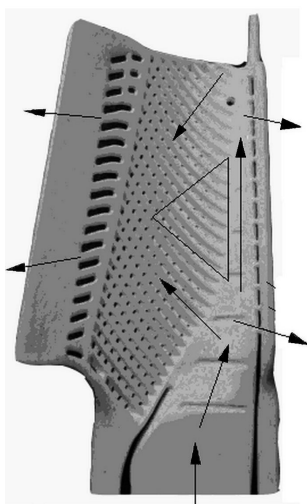


Рис. 3. Литейный стержень – твердотельная модель системы охлаждения лопатки. Стрелки – направление движение воздуха. Треугольник – участок фрагментарной модели

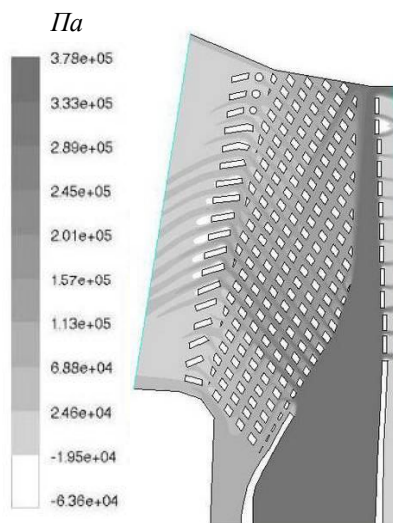


Рис. 4. Результат расчета поля полного давления в потоке охлаждающего воздуха

Сходная задача в работах [1] потребовала модели лопатки из 1,33 млн. тетраэдральных элементов: 340 тыс. – межлопаточный канал, 470 тыс. – канал охлаждения 510 тыс. – тело лопатки. Время расчета одного (стационарного) режима при быстродействии компьютера 2,4 ГГц составило около 6 часов.

В связи с разнообразием задач математического моделирования, связанных с применением методов теплового контроля, целесообразно использование моделей, разных по уровню воспроизведения геометрии лопатки и протекающих в ней процессов.

Модели, которые в настоящее время могут быть

отнесены к *моделям высокого уровня*, должны объединять 3-мерные модели трех пространственных областей: тела лопатки, внешнего окружающего пространства и внутреннего пространства охлаждающих каналов. Степень дискретизации тела лопатки – порядка размера возможного дефекта ( $\sim 0,1$  мм). Используемый математический аппарат (программное обеспечение) должен обеспечить решение сопряженной задачи течения – теплообмена – теплопроводности.

Модели *второго уровня* моделируют отдельно процесс в каждой из названных областей, по гра-

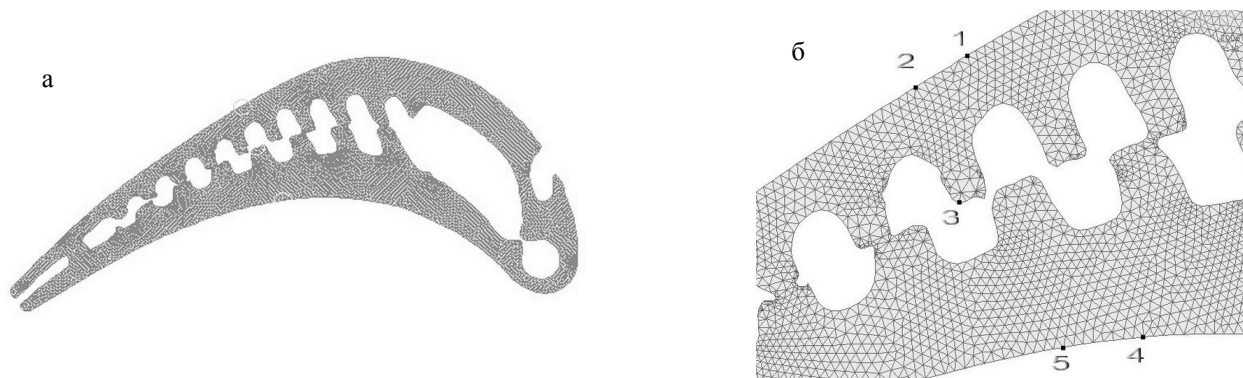


Рис. 5. Модель пространственной области тела лопатки:

а – сечение пера; б – фрагмент конечно-элементной сетки

ничным условиям, полученным при моделировании смежных областей. Степень дискретизации та же, что и в моделях высокого уровня, но требования к математическому обеспечению ниже, т.к. в каждой из областей воспроизводится один характерный для нее физический процесс. В принципе достаточно точное решение сопряженной задачи с использованием моделей этого уровня может быть найдено методом последовательных приближений. На рис. 3 и 5 приведены «твердотельные модели» внутренней области и тела лопатки.

Во *фрагментарных моделях* воспроизводится

содержащая дефект область, несколько большая, чем размер температурной аномалии, создаваемой дефектом. Степень дискретизации пространства несколько большая, чем в предшествующих моделях. Но за счет уменьшения моделируемой области появляется возможность оперативного решения сопряженной задачи. В качестве граничных условий используется решение на границе области по модели верхнего уровня при отсутствии дефекта (рис. 6).

Сравнение результатов моделирования с термограммами, полученными в ходе теплового контроля, показало, что точность моделирования достаточна

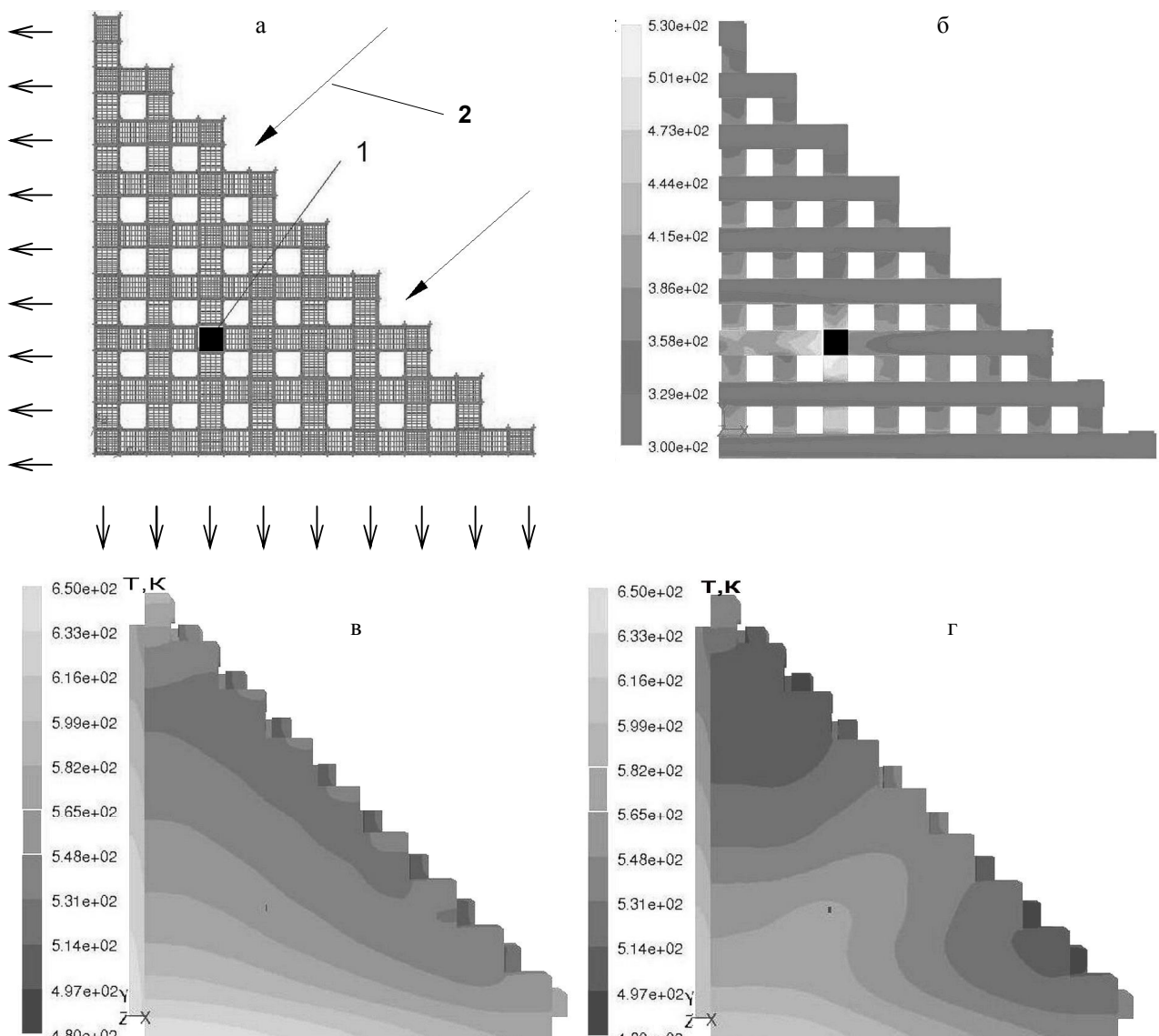


Рис. 6. Фрагментарная модель вихревой матрицы:

- а – моделируемая область: 1 – место расположения дефекта (закупорка канала), 2 – поток воздуха;
- б – поле температуры потока воздуха;
- в – поле температуры наружной стенки при отсутствии дефекта;
- г – поле температуры наружной стенки при наличии дефекта

для использования разработанных моделей как средства тестирования компьютерных программ распознавания наиболее распространенных дефектов (рис. 7, 8).

Рис. 7. Динамика температуры в процессе теплового контроля. Расчет по моделям 2-го уровня: 1 ...5 – номера точек, показанных на рис. 5, б

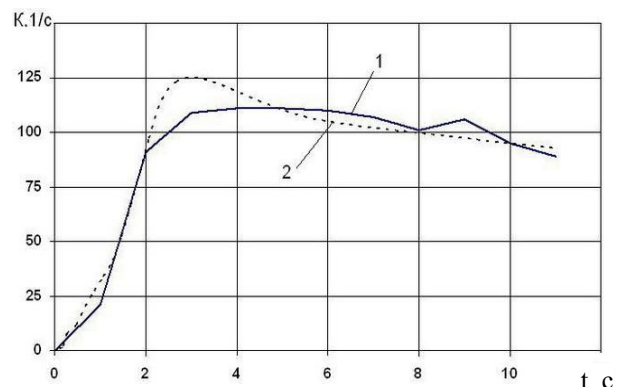
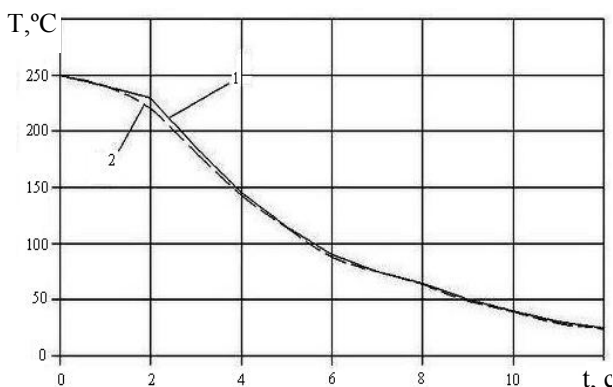
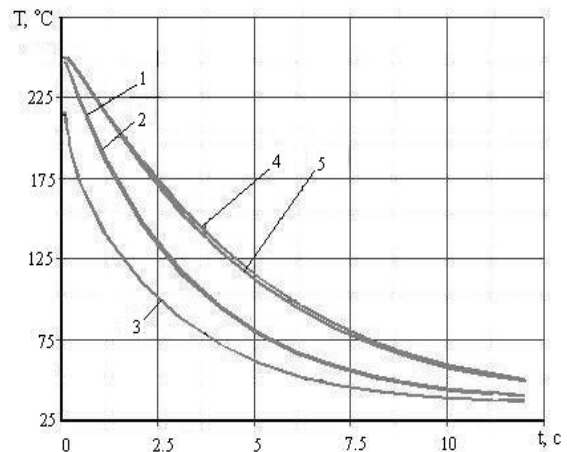


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования 1 и тепловизионного контроля 2:

а – температура поверхности лопатки; б – коэффициент регулярности режима  $K = \frac{1}{(T - T_B)} \frac{\partial T}{\partial t}$ ;

$T, T_B$  – температуры лопатки и воздуха,  $t$  – время

### Литература

1. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД. – Х.: Основа, 1994. – 240 с.

2. Контроль качества охлаждаемых лопаток турбин методом тепловой волны / С.И. Мельник, А.Г. Чумаков и др. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: ХАІ, 2002. – Вип. 34. – С. 176-180.

3. ANSYS Elements Reference, Release 5.5, ANSYS Inc., September 1998, P. 2-33, 34.

4. STAR-CD version 3.15, Methodology, CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2001.

5. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. – К.: Наук. думка, 2003. – 326 с.

6. Cook R.D., Concepts and Application of Finite Element Analysis. – John Wiley & Son, New York, 1993.

7. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. – Х.: Основа, 1991. – 272 с.

8. Верификация трехмерной CFD-модели теплового состояния охлаждаемой лопатки ГТД в сопряженной постановке / П.Г. Круковский, Д.Д. Юрченко, А.С. Полубинский и др. // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – С. 17-25.

Поступила в редакцию 1.04.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.