

УДК 621.438.001.57 : 629.7.036.3 : 536.242

П.Г. КРУКОВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.Д. ЮРЧЕНКО<sup>1</sup>, С.Б. РЕЗНИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>ГП Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс»  
им. академика А.Г. Ивченко, Украина

## ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ CFD-МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКИ ГТД ПО ДАННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Описана разработанная авторами трёхмерная CFD-модель гидродинамики и теплообмена охлаждаемой лопатки ГТД в сопряжённой постановке. Проведена верификация модели путем качественного сравнения расчетных и экспериментальных газодинамических течений в канале охлаждения и межлопаточном канале и количественного сравнения гидравлических характеристик каналов, а также значений температур в ряде сечений лопатки. Результаты верификации показали удовлетворительное совпадение соответствующих характеристик и температур, что позволяет использовать CFD-модель для оптимизации рабочих параметров как самой лопатки, так и системы ее охлаждения.

**охлаждаемая лопатка ГТД, моделирование, CFD-модель, верификация модели**

### Введение

В настоящее время получил развитие численный метод расчёта газодинамического обтекания и температурного режима лопаток ГТД, называемый CFD (Computational Fluid Dynamics) подходом или технологией, основанный на методе контрольного объёма и позволяющий выполнять трёхмерное моделирование полей давлений, скоростей и температур. К наиболее совершенным компьютерным программам, реализующим метод контрольного объёма, можно отнести программы STAR-CD, FLUENT, CFX. Они позволяют создавать CFD-модели теплообмена между лопаткой, горячим газом и охлаждающим воздухом в сопряжённой постановке. Очень важно, что такая постановка позволяет отказаться от задания коэффициентов теплоотдачи на внешней и внутренней поверхностях лопатки. В опубликованных ранее авторами работах [1 – 3] была разработана и исследована трехмерная CFD-модель охлаждаемой лопатки ГТД (рис. 1) в сопряженной постановке. Детальный анализ теплообмена в межлопаточном канале и теплового состояния лопатки ГТД в сопряженной стационарной постановке приведен в [1, 2].

В работе [3] проведена верификация теплообмена в канале охлаждения лопатки ГТД. Лопатку ГТД со стороны межлопаточного канала обтекает горячий рабочий газ с температурой торможения 1229К и давлением торможения  $3.786 \cdot 10^5$  Па. На вход в канал охлаждения лопатки ГТД поступает воздух с температурой 565 К и давлением  $1.998 \cdot 10^5$  Па.

**Целью работы** является верификация разработанной авторами трёхмерной CFD-модели охлаждаемой лопатки ГТД в сопряжённой постановке путем качественного сравнения расчетных и экспериментальных газодинамических течений в канале охлаждения и межлопаточном канале и количественного сравнения гидравлических характеристик каналов, а также значений температур в ряде сечений лопатки.

### 1. Трёхмерная CFD- модель

Рассматривается CFD-модель теплового состояния охлаждаемой рабочей лопатки ГТД (рис. 1, б) совместно с внешним межлопаточным каналом (рис. 1, а) и сложным внутренним каналом охлаждения (рис. 1, в) в трёхмерной сопряжённой постановке.

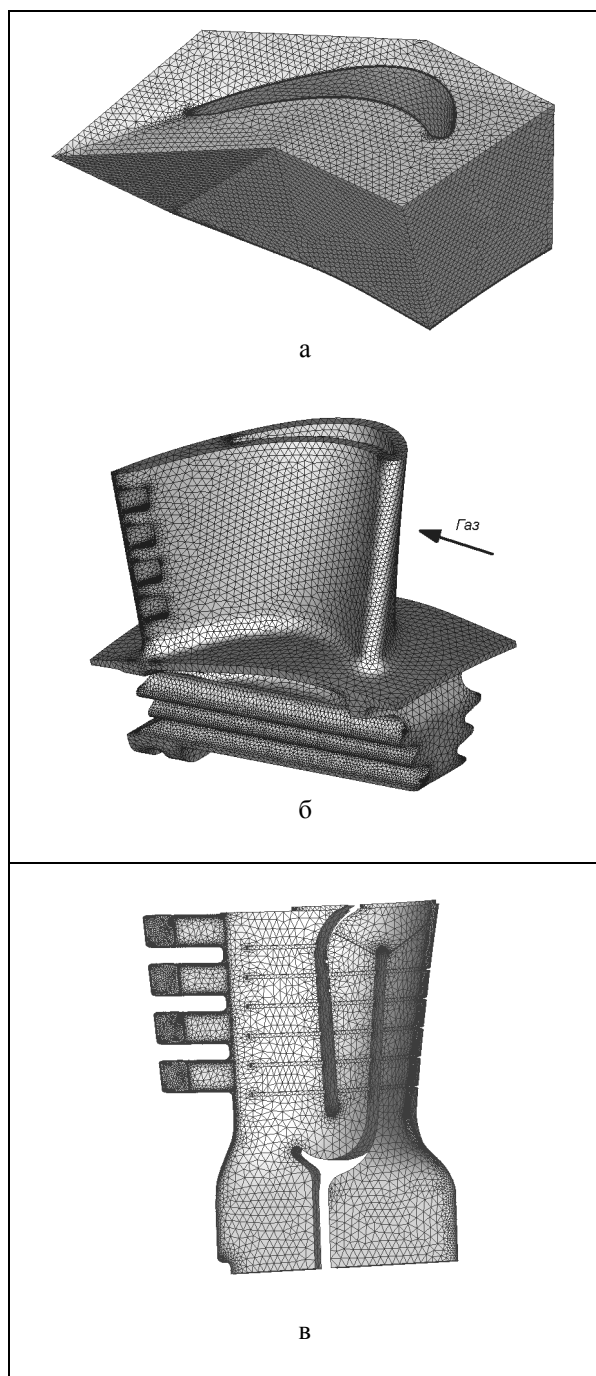


Рис.1. Геометрия и расчетная сетка модели:  
 а – межлопаточного канала; б – тела лопатки;  
 в – канала охлаждения с наложенной сеткой

Следует напомнить, что CFD-модели представляют собой физико-математическое представление исследуемого объекта и/или процесса, основанное на численном решении системы уравнений Навье-Стокса, реализованное, как правило, в среде компьютерной программы. Такие CFD-модели разрабатываются в том числе и для расчета теплового состоя-

ния лопаток ГТД в сопряженной постановке, что подразумевает расчет теплообмена на границе между жидкостью и твердым телом при граничных условиях четвертого рода (условиях сопряжения). Теплообмен между жидкостью и твердым телом в сопряженной постановке определяется из совместного решения уравнений переноса и энергии в области жидкости и уравнения теплопроводности в области твердого тела.

На рис. 1, а изображен межлопаточный канал, который представляет собой циклический сегмент рабочего колеса. Лопатка, высота которой составляет 14 мм, содержит четыре горизонтальных выходные отверстия системы охлаждения, а также одно радиальное (рис. 1, б).

Для моделирования гидродинамических и тепловых процессов используется численный метод контрольного объема, хорошо описанный в литературе (например [4]) и в полной мере реализованный в программе STAR-CD [5]. Исследование стационарного теплового состояния охлаждаемой лопатки выполняется методом установления, при этом численно решается полная система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, осредненная по Рейнольдсу [4], сохранения энергии и система дифференциальных уравнений для  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности.

Плотность газа изменяется в соответствии с уравнением состояния идеального сжимаемого газа, динамическая вязкость, теплопроводность и изобарная теплоемкость являются функциями температуры. На боковых поверхностях межлопаточного канала вдоль проточной части (рис. 1, а) задавались условия цикличности.

На входе в межлопаточный канал принимались переменные по высоте параметры потока: давление, температура, угол входа потока и постоянная начальная интенсивность турбулентности 5%. На выходе из газового канала задавалось статическое давление, на входе в канал охлаждения – давление, температура и интенсивность турбулентности 5%.

Расход воздуха через систему охлаждения составил ~1,5% от расхода газа через межлопаточный канал. В межлопаточном канале моделировалось трансзвуковое течение вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Сеточная модель области решения содержала 3.5 млн. контрольных объёмов.

## 2. Качественная и интегральная верификация модели

С помощью описанной выше CFD-модели были получены трёхмерные поля температур, давлений и скоростей в обоих каналах и в теле лопатки, представленные в [1, 2]. Представляет большой интерес качественная и количественная верификация разработанной сложной CFD-модели. Под верификацией здесь подразумевается проверка адекватности разработанной CFD-модели путем сопоставления рассчитанных характеристик с известными из натурального эксперимента или представленных в научной литературе. Под качественной верификацией подразумевается анализ и сравнение расчетных и экспериментально наблюдаемых газодинамических течений в канале охлаждения и межлопаточном канале, а также сравнение интегральных гидравлических характеристик каналов по величине расходов газа и воздуха. На рис. 2 представлены линии тока в поперечных сечениях межлопаточного канала. Полученные при помощи разработанной CFD-модели вихреобразования в области межлопаточного канала качественно согласуются с вихреобразованиями, наблюдаемыми различными авторами (например [6]) при экспериментальных исследованиях, что свидетельствует о качественной адекватности разработанной CFD-модели в части гидродинамики в межлопаточном канале.

Проведенное сравнение величины расхода газа в межлопаточном канале и величины крутящего момента, полученных при помощи разработанной модели, со значениями, полученными экспериментально в ЗМКБ "Прогресс", показало отличие в 1,3%

и 1,25% соответственно. Сравнение расхода в канале охлаждения исследуемой лопатки ГТД, полученной при помощи разработанной модели, со значением, полученным экспериментально в ЗМКБ "Прогресс", показало отличие в 1,5%, что уже свидетельствует о количественной адекватности разработанной CFD-модели в части интегральных гидравлических характеристик каналов по величине расходов газа и воздуха.

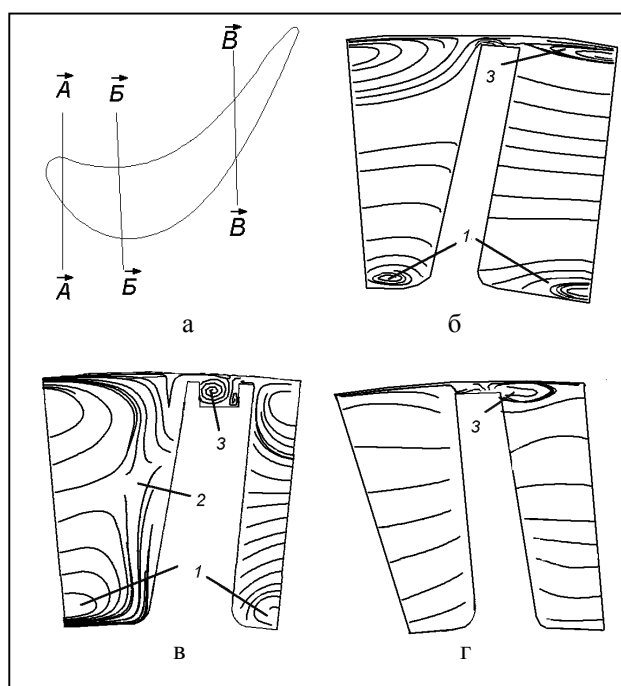


Рис. 2. Линии тока в поперечных сечениях:  
а – межлопаточного канала; б – сечение А-А;  
в – сечение Б-Б; г – сечение В-В;  
1 – шнур подковообразного вихря;  
2 – канальный вихрь; 3 – торцевой вихрь

Проведен также анализ и качественное сравнение с литературными данными течения в канале охлаждения лопатки ГТД и цилиндрическом канале с интенсификаторами теплообмена. На рис. 3 представлены линии тока, полученные при экспериментальном исследовании течения в канале с интенсификаторами теплообмена и полученные при помощи CFD-модели в канале с интенсификаторами теплообмена, которые, как видно из рисунка, качественно также хорошо согласуются. При этом наблюдаются все типичные вихревые структуры.

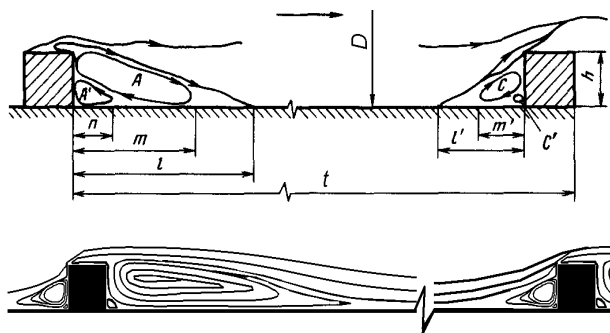


Рис. 3. Вихревая структура в канале с интенсификаторами теплообмена, наблюдаемая экспериментально (верхний рисунок) и полученная при помощи CFD-модели (нижний рисунок)

### 3. Количественная верификация модели

В работах [1 – 3] приведены результаты верификации модели теплового состояния охлаждаемой лопатки, а также верификация и идентификация структурных параметров модели канала охлаждения с интенсификаторами. Методика верификации CFD-моделей теплового состояния исследуемых объектов в сопряженной постановке, изложенная в [3], не требует экспериментальных температурных измерений исследуемого объекта, а позволяет использовать представленные в научной литературе критериальные зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи. Разработанная методика носит общий характер и применима к любым CFD-моделям в сопряженной постановке. На основе этой методики была проведена количественная верификация модели охлаждаемой лопатки ГТД по величине коэффициента теплоотдачи вдоль профиля лопатки в среднем по высоте сечения. Верификация проводилась отдельно как для межлопаточного канала, так и для канала охлаждения лопатки. Так отличие по коэффициентам теплоотдачи в области входной и выходной кромок лопатки составило 4,5%, в средней части профиля – 17%, что находится в пределах погрешности самих эмпирических зависимостей. Отклонение среднего по шагу оребрения коэффициента теплоотдачи в канале охлаждения (рис. 3) составило 11,6%, что свидетельствует о хорошей количе-

ственной адекватности разработанной CFD-модели в части теплообмена в межлопаточном канале и канале охлаждения. Естественно, что наибольший интерес представляет верификация такой модели по прямым измерениям температур на самой лопатке, результаты которой и представлены ниже.

На рис. 4 представлены поля температур в трех сечениях исследуемой лопатки, полученные при помощи разработанной CFD-модели и экспериментальные значения, полученные в ЗМКБ "Прогресс". На выносках показано отличие между расчетными и экспериментально полученными значениями температур. Подробный анализ представленных полей позволяет отметить, что наибольшее среднее отличие расчетных и экспериментальных значений температур наблюдается в периферийном сечении и составляет 10,5 °С. В среднем сечении среднее отклонение составляет 1,5 °С, а в корневом – 3,9 °С. В целом такое отличие расчетных и экспериментальных значений температур подтверждает адекватность разработанной CFD-модели охлаждаемой лопатки в двухсторонней сопряженной постановке. Более того, такое хорошее совпадение свидетельствует о правомерности предложенного в работе подхода верификации CFD-моделей в сопряженной постановке при помощи данных по теплообмену, представленных в литературе. На основании представленных результатов можно также утверждать, что если коэффициенты теплоотдачи и температуры омывающих сред на поверхностях теплообмена заданы правильно, то и поле температур также будет правильным.

Полученные при помощи разработанной CFD-модели поля температур можно также использовать для расчета напряженно-деформированного состояния лопатки и, следовательно, замкнуть процесс термочного проектирования лопатки ГТД.

### Выводы

1. Описана трёхмерная CFD-модель гидродинамики и теплообмена охлаждаемой лопатки ГТД в двухсторонней сопряжённой постановке.

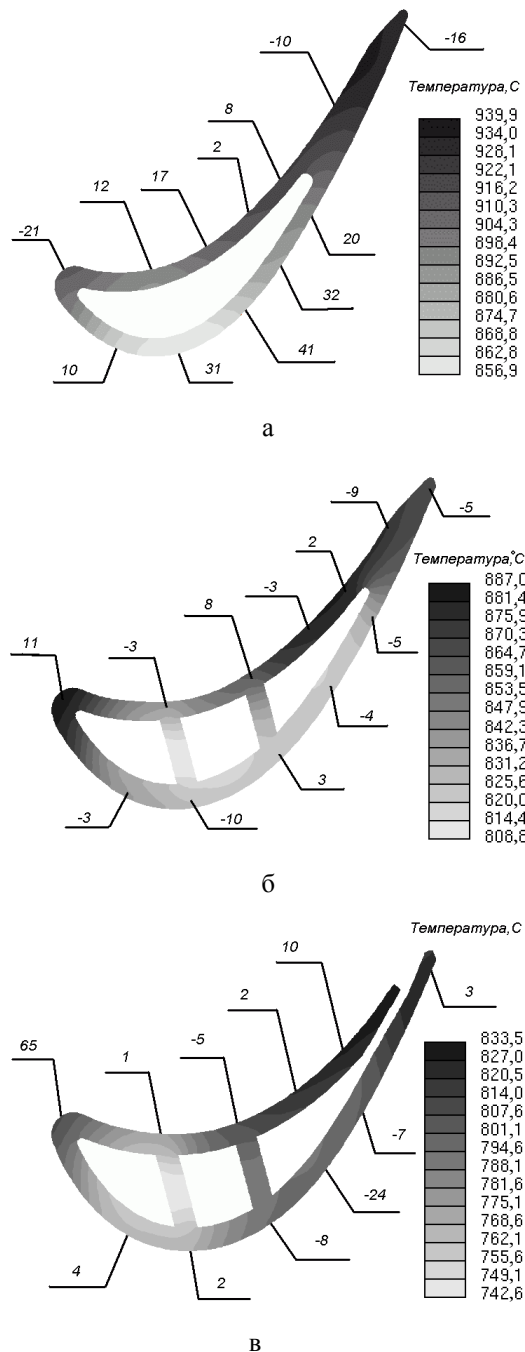


Рис. 4. Поле температур в периферийном (а), среднем (б) и корневом (в) сечениях исследуемой лопатки

2. Проведена верификация модели путем качественного сравнения расчетных и экспериментальных газодинамических течений в канале охлаждения и межлопаточном канале и количественного сравнения гидравлических характеристик каналов, а также значений температур в ряде сечений лопатки,

которое показало удовлетворительное совпадение соответствующих характеристик и температур.

3. Разработанная CFD-модель может использоваться для оптимизации рабочих параметров, как самой лопатки, так и системы ее охлаждения.

## Литература

1. Тепловое состояние охлаждаемой лопатки ГТД в сопряженной постановке (3-D CFD-модель и ее верификация) / П.Г. Круковский, Д.Д. Юрченко, А.С. Полубинский, В.А. Яцевский // Вестник двигателестроения: Научн. техн. журн. – 2005. – № 2. – С. 106-111.

2. Трехмерная CFD - модель теплового состояния охлаждаемой лопатки газотурбинного двигателя в сопряженной постановке / П.Г. Круковский, Д.Д. Юрченко, А.С. Полубинский, В.А. Яцевский // Докл. НАН Украины. – Сер. А. – 2006. – № 1. – С. 88-94.

3. Юрченко Д.Д., Круковский П.Г. Анализ гидродинамики и теплообмена в канале охлаждения лопатки ГТД на основе трехмерной CFD-модели в сопряженной постановке // Авиационно-космическая техника и технология: Научн. техн. журн. – 2006. – № 7 (33). – С. 161-166.

4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

5. Methodology STAR-CD. Version 3.15, CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, London, 2001. – 244 p.

6. Халатов А.А., Кащенко А.А., Халатов С.А. Теплообмен и гидродинамика на торцевой поверхности криволинейных каналов и сопловых аппаратов турбин // Промышленная теплотехника. – 1990. – Т. 12, № 4. – С. 30-38.

Поступила в редакцию 31.05.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук Г.А. Фролов, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, Киев.