

УДК 621.625+621.438

Ю.А. БЫКОВ*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ, Харьков, Украина*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОУПРУГОСТИ В РЕШЕТКЕ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК

В статье представлены результаты моделирования течения в решетке колеблющихся турбинных лопаток с различными конфигурациями охлаждающих каналов. Моделирование произведено с помощью ранее разработанного метода совместного численного решения аэродинамической задачи обтекания решетки и задачи теплопроводности в лопатке. Продемонстрировано влияние характера теплообмена на аэроупругие характеристики решетки. В результате анализа результатов сделан вывод о возможности использования разработанного метода для прогнозирования аэроупругих характеристик венцов турбин высокого давления с охлаждаемыми лопатками.

Ключевые слова: нестационарная аэродинамика в турбомашине, теплопередача, аэроупругость в турбомашине, аэротермоупругость.

Введение

В настоящее время широко применяемым способом повышения эффективности турбомашин является увеличение температуры на входе в первые ступени турбины. В связи с этим возникает проблема обеспечения надежности лопаточных аппаратов с учетом повышенных тепловых нагрузок на лопатки. В частности, до последнего времени не была исследована проблема понижения уровня вибраций, в том числе по выявлению возможных автоколебаний лопаток ступеней, в условиях значительного перепада температур. Данная проблема может решаться экспериментально, однако возможно существенно снизить затраты на экспериментальный поиск оптимальных материалов и режимов эффективной работы турбины, с помощью внедрения в практику проектирования современных методов и средств численного моделирования.

Таким образом, актуальной проблемой на данный момент является проблема численного моделирования взаимодействия натекающего потока и колебаний лопаток с учетом значительной температурной неравномерности в первых ступенях газовых и паровых турбин.

В последнее время проделана значительная работа по совершенствованию методов прогнозирования автоколебаний в различных видах лопаточных аппаратов, в том числе и ступенях турбомашин [1,2,3]. В то же время остается открытым вопрос о влиянии значительной температурной неравномерности в первых ступенях газовых турбин высокого давления на возможность возникновения самопроизвольных колебаний лопаток, могущих привести к ускоренному износу венцов. Картина распределения температуры осложняется применением в первых

ступенях различных способов охлаждения лопаток.

На данный момент не существует надежных и проверенных методов решения данной проблемы. Поэтому в основу алгоритма положены известные и зарекомендовавшие себя методы решения задач аэроупругости [3] и недавно разработанные методы решения совместной задачи аэроупругости и теплопроводности [4]. Текущей задачей является исследование зависимости аэроупругих характеристик решетки лопаток от распределения температуры по лопатке, зависящей, в частности, от наличия и конфигурации охлаждающих каналов. В статье представлены результаты моделирования аэроупругого поведения решетки турбинных лопаток с применением различных конфигураций каналов охлаждения.

Математическая модель и численный метод

Для решения задачи определения работы аэродинамических сил по возбуждению колебаний с учетом влияния распределения температуры необходимо совместное решение аэродинамической задачи и задачи теплопроводности в лопатке. Для решения аэродинамической задачи используется известный и всесторонне исследованный модифицированный метод Годунова [4]. Данный метод решает систему уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Для замыкания уравнений используется модель турбулентности Ментера SST [5]. Метод использует комбинированные расчетные сетки типа О-Н.

Совместное решение аэродинамической задачи и задачи теплопроводности выполняется с помощью модифицированного метода Годунова второго порядка, описанного в работе [6].

Граничные условия

Для успешного интегрирования уравнений аэродинамики на границах расчетной области ставились следующие граничные условия: на входе задавались полное давление и полная температура, направление потока; на выходе – статическое давление; на поверхности лопатки – условие прилипания для компонент скорости, отсутствие градиента давления в нормальном направлении, постоянная температура поверхности лопатки. Для уравнений модели турбулентности задавались такие граничные условия на входе:

$$k = 1,5(u_{in} Tu_{in})^2, \quad \omega = k^{1/2} / L,$$

где u_{in} – скорость потока на входе;

Tu_{in} – интенсивность турбулентности на входе;

L – масштаб турбулентных вихрей. На поверхности лопатки задавались условия:

$$k = 0, \quad \omega = 60\mu / (\rho\beta(\Delta y_1)^2),$$

где μ – вязкость среды;

ρ – плотность среды;

β – коэффициент модели турбулентности;

Δy_1 – расстояние до поверхности лопатки.

В качестве масштаба турбулентных вихрей выбиралась величина 5% от длины осевой хорды лопатки. Для уравнения теплопроводности на границах лопатки ставятся условия сопряжения для температуры:

$$\lambda_g \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_g = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s, \quad T|_g = T|_s,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, индексы s и g – соответственно значения со стороны лопатки и газа.

Результаты моделирования

В качестве объекта исследования была выбрана плоская решетка турбинных профилей, исследованная в Лозаннском политехническом институте [7] под наименованием «4-я стандартная конфигурация». Эта решетка была помещена в условия, соответствующие второй ступени газовой турбины высокого давления со следующими параметрами: $p_0 = 0,56$ МПа, $p_2 = 0,3$ МПа, $T_0 = 1300$ К, средняя температура наружной стенки лопатки $T_w = 1100$ К, температура охлаждающей жидкости $T_c = 900$ К, рабочая жидкость – воздух, материал лопатки – сталь. Лопатки совершали изгибные колебания амплитудой 0,0033 от хорды и частотой 300 Гц. Разность фаз колебаний между лопатками составляла 0, 180, 90 и –90 градусов.

Было рассмотрено два варианта размещения охлаждающих каналов в лопатке: с двумя широкими

каналами в передней части лопатки (далее вариант 1) и шестью каналами, распределенными по длине лопатки (далее вариант 2). Варианты размещения каналов представлены на рис. 1. Для сравнения результатов также было проведено моделирование течения с условием постоянной температуры всей поверхности лопатки: $T_w = 1100$ К (далее вариант 3). Для расчета использовалась H-O – сетка в области течения и области тела лопатки, аналогичная сетке, использованной в предыдущей работе [6].

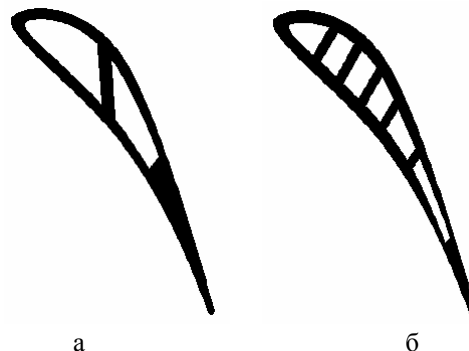


Рис. 1. Варианты охлаждающих каналов лопатки: а – вариант 1; б – вариант 2

На рис. 2 представлено распределение температуры по поверхности лопатки соответственно для варианта 1 и 2.

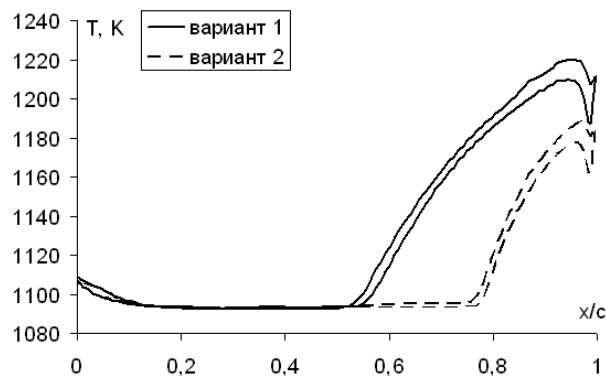


Рис. 2. Распределение температуры по хорде лопатки

В качестве результатов нестационарного обтекания решетки, вызванного колебанием лопаток, были получены распределения по хорде следующих величин на поверхности лопатки: давления, осредненного по периоду колебания, амплитуда нестационарного давления и фаза первой гармоники колебаний нестационарного давления. Сравнительная диаграмма распределения усредненного по времени коэффициента давления c_p вдоль хорды лопатки представлена на рис. 3. Коэффициент давления определяется как:

$$c_p = \frac{p(x) - p_1}{p_0 - p_1},$$

где $p(x)$ – распределение давления по хорде;
 p_1 – давление на входе в решетку;
 p_0 – давление заторможенного потока.

Хорошо видно присутствие скачка давления на стороне разрежения лопатки в области $x/c = 0,85$. Также видно, что распределение давления для всех трех вариантов отличается незначительно.



Рис. 3. Распределение усредненного по времени давления по хорде лопатки

На рис. 4 – 7 представлены распределения коэффициента амплитуды p_n и фазы нестационарного давления ϕ по хорде лопатки, соответственно для межлопаточных фазовых углов 0° , 180° , -90° и 90° . Коэффициенты определены следующим образом:

$$p_n(x) = \frac{\sqrt{C_1^a(x) + C_1^b(x)}}{(p_0 - p_1)h_0c},$$

$$\phi(x) = \arctg \frac{C_1^b(x)}{C_1^a(x)},$$

где C_1^a , C_1^b – распределение по хорде коэффициентов Фурье давления для частоты колебания лопаток;
 h_0 – амплитуда колебаний лопаток;
 c – хорда лопатки.

Несмотря на малое отличие значений осредненного по времени давления для различных вариантов охлаждения лопатки, значения коэффициентов нестационарного давления отличаются довольно значительно. Для всех значений МЛФУ, в особенности для 0° , амплитуда давления в области скачка $x/c = 0,85$ больше для варианта №3. Распределение фазы практически не зависит от варианта расчета, однако, для МЛФУ = 0° в области $x/c = 0,58$ для варианта №1 наблюдается значительное отличие. Такое поведение может быть обосновано малой амплитудой колебаний давления в этой точке, в то же время значения фазы давления около 90° для стороны разрежения ведут к положительной работе аэродинамических сил, а следовательно, к возможности появления автоколебаний.

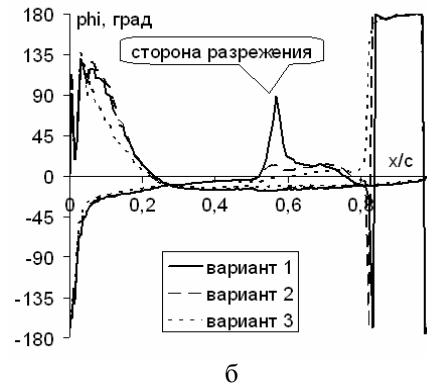


Рис. 4. Распределение p_n и ϕ по хорде лопатки, МЛФУ = 0° :
 а – амплитуда давления p_n ;
 б – фаза давления ϕ

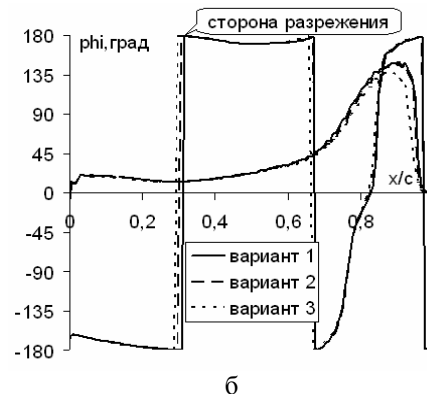
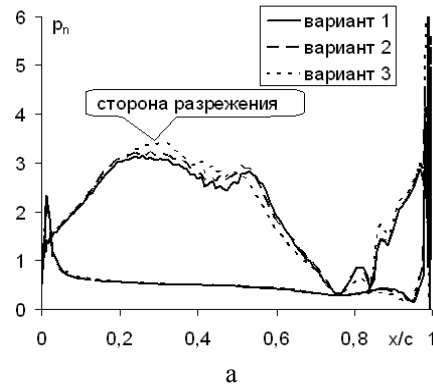


Рис. 5. Распределение p_n и ϕ по хорде лопатки, МЛФУ = 180° :
 а – амплитуда давления p_n ;
 б – фаза давления ϕ

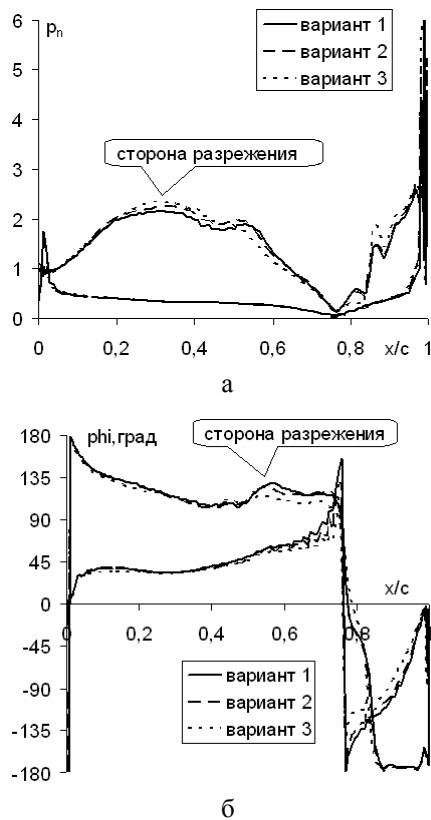


Рис. 6. Распределение p_n и ϕ по хорде лопатки, МЛФУ = -90° :
а – амплитуда давления p_n ;
б – фаза давления ϕ

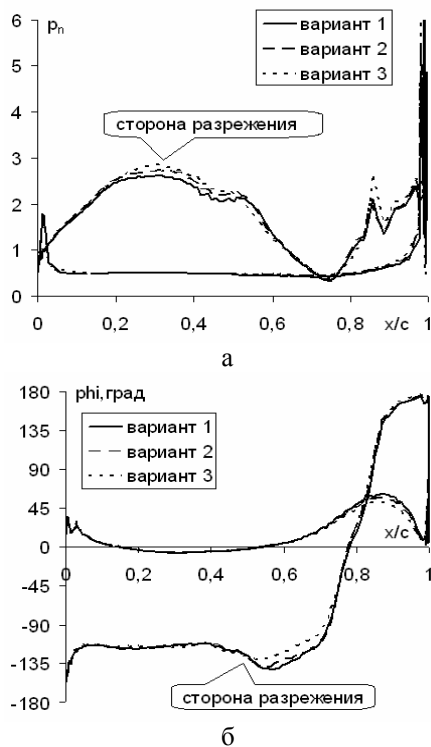


Рис. 7. Распределение p_n и ϕ по хорде лопатки, МЛФУ = 90° :
а – амплитуда давления p_n ;
б – фаза давления ϕ

Таким образом, различное распределение температуры поверхности лопатки влияет на изменение параметров нестационарного обтекания решетки в большей степени, чем на стационарные характеристики, хотя степень этого влияния невелика.

Возможность возникновения автоколебаний лопаток определяет знак работы аэродинамических сил по перемещению лопатки. На рис. 8 представлены значения коэффициента аэродемпфирования, который является безразмерной работой сил со знаком «минус»:

$$\Xi = - \frac{\int \mathbf{F} \mathbf{w} ds}{(p_0 - p_1) \pi h_0^2 c},$$

где \mathbf{F} – вектор аэродинамической силы на лопатке;
 \mathbf{w} – вектор перемещения лопатки, интегрирование ведется по поверхности лопатки.

Положительные значения коэффициента свидетельствуют о демпфировании колебаний, отрицательные – о возможности возбуждения колебаний. Представленные значения коэффициента для различных вариантов довольно близки. Можно утверждать, что различия в исходных условиях влияют на демпфирование колебаний лопаток незначительно для номинальных режимов. Однако следует заметить, что наблюдаемые отличия в определенных условиях, например, в переходных или частичных режимах, а также в случае близкого к нулю значения коэффициента аэродемпфирования, могут изменить границы устойчивости колебаний лопаток.

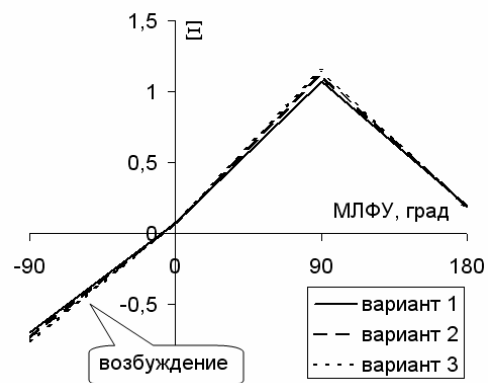


Рис. 8. Зависимость коэффициент а аэродемпфирования от фазового угла

Заключение

Проведено численное моделирование нестационарного обтекания решетки колеблющихся охлаждаемых лопаток. В результате получено, что характер распределения температуры по поверхности практически не влияет на стационарные характеристики решетки, зато имеет заметное влияние на нестационарные характеристики. В частности, малые изменения в амплитуде или фазе нестационар-

ного давления на поверхности могут привести к локальному появлению положительной работы аэродинамических сил, что дает возможность возникновения автоколебаний.

Представленные результаты для номинального режима демонстрируют незначительное влияние распределения температуры на демпфирование колебаний лопаток.

Использованный метод может использоваться для моделирования аэроупругости в лопаточных венцах турбин высокого давления при наличии охлаждения лопаток.

Литература

1. Verhoosel C.V. *Uncertainty and Reliability Analysis of Fluid-Structure Stability Boundaries* / C.V. Verhoosel, T.P. Scholcz, S.J. Hulshoff, M.A. Gutierrez // *AIAA Journ.* – 2009. – 47, № 1. – P. 91-104.

2. Mani K. *Adjoint-Based Sensitivity Formulation for Fully Coupled Unsteady Aeroelasticity Problems* / K. Mani, D.J. Mavriplis // *AIAA Journ.* – 2009. – 47, № 8. – P. 1902-1915.

3. Гнесин В.И. Численный анализ влияния соотношения чисел лопаток статора и ротора на нестационарные нагрузки и режимы колебаний лопаток / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная // *Вестн. НТУ «ХПИ». Сер. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование.* – 2009. – № 3. – С. 23-32.

4. Гнесин В.И. Численное исследование аэроупругих характеристик лопаточного венца турбомашин, работающей на нерасчетном режиме / В.И. Гнесин, Ю.А. Быков // *Пробл. машиностроения.* – 2004. – Т. 7, №1 – С. 31-40.

5. Menter F.R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications* / F.R. Menter // *AIAA Journ.* – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605.

6. Быков Ю.А. Численное моделирование течения в решетке колеблющихся профилей с учетом теплообмена. / Ю.А. Быков // *Пробл. машиностроения.* – 2009. – Т. 12, № 5. – С. 36-41.

7. Bolcs A. *Aeroelasticity in Turbomachines. Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results* / A. Bolcs, T.H. Fransson // *Communication du Laboratoire de Thermique Appliquee et de Turbomachines, Lausanne, EPFL.* – 1986. – № 13. – 230 p.

Поступила в редакцию 7.07.2010

Рецензент: д-р техн. наук, член-корр. НАНУ, зав. отд. оптимизации процессов и конструкций турбомашин А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОПРУЖНОСТІ В РЕШІТЦІ ОХОЛОДЖУВАНИХ ЛОПАТОК

Ю.А. Биков

В статті представлені результати моделювання течії в решітці коливних турбінних лопаток з різноманітними конфігураціями охолоджуючих каналів. Моделювання виконане з використанням раніше розробленого методу спільного чисельного моделювання аеродинамічної задачі обтікання решітки та задачі теплопровідності в лопатці. Продемонстровано вплив характеру теплообміну на аеропружні характеристики решітки. В результаті аналізу зроблено висновок про можливість використання розробленого методу для прогнозування аеропружних характеристик вінців турбін високого тиску з охолоджуваними лопатками.

Ключові слова: нестационарна аеродинаміка в турбомашинах, теплопередача, аеропружність в турбомашинах, аеротермопружність.

NUMERICAL SIMULATION OF AEROELASTICITY IN CASCADE OF COOLED BLADES

Yu.A. Bykov

The paper presents results of numerical simulation of flow through cascade of vibrating blades with different arrangements of blade cooling channels. Simulation is performed with use of recently developed method of simultaneous numerical solving of aerodynamic problem of blade cascade and problem of thermal conductivity in blade. Influence of thermal conductivity on aeroelastic characteristics of the cascade is demonstrated. The analysis gives a conclusion about possibility to employ the developed method for prediction of aeroelastic characteristics of the high power turbine with rows of cooled blades.

Key words: unsteady aerodynamics in turbomachines, heat transfer, aeroelasticity in turbomachines, aérothermoelasticity.

Быков Юрий Адольфович – канд. техн. наук, вед. инженер, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ, Харьков, Украина, e-mail: bykov@ukrpost.ua.