

А. А. КАРПИК

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ КОМПРЕССОРА С УЧЕТОМ
ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ**

Представлено чисельне моделювання турбулентної в'язкої течії газу на основі рівнянь Нав'є-Стокса осереднених по Рейнольдсу (RANS-модель). Результати розрахунку параметрів течії в нестационарній тривимірній постановці отримані за допомогою програмного комплексу F. Чисельний аналіз проводився з метою дослідження характеру течії у вінці робочих лопаток з урахуванням взаємодії між ними. В результаті був отриманий розподіл полів тиску і швидкості в різні моменти часу при обертанні робочого колеса. У міжлопатковому каналі виявлені несприятливі зони течії.

Ключові слова: міжлопатковий канал, RANS-модель, в'язка течія, нестационарність.

Представлено численное моделирование турбулентного вязкого течения газа на основе уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу (RANS-модель). Результаты расчета течения в нестационарной трехмерной постановке получены с помощью программного комплекса F. Численный анализ проводился с целью исследования характера течения в венце рабочих лопаток с учетом взаимодействия между ними. Получено распределение полей давления и скорости в разные моменты времени при вращении рабочего колеса. В межлопаточном канале выявлены неблагоприятные зоны течения.

Ключевые слова: межлопаточный канал, численное моделирование, вязкое течение, нестационарность.

This paper presents numerical simulation of turbulent viscous flows using the Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations. The gas-dynamic simulation is required to estimate the vibration strength and additional losses caused by the periodic non-stationarity of the gas flow. The non-uniformity of the flow represents itself as a non-uniformity of the fields of the velocity and pressure in front of and behind the working blades. The simulation is carried on for a model describing all the properties, such as compressibility, viscosity, 3D effects, influence of the radial gap, leakages etc. The differential two-parametrical $k-\omega$ SST Menter's model is used as a model of turbulence. The values of the flow parameters in the non-stationary three-dimensional formulation are obtained using the F solver. Numerical analysis is used to investigate the character of the flow in the rotor, in particular the blade interaction. The model allows determining the flow in the blade channel and zones of the adverse flow. The basic factors causing non-uniformity and non-stationary of the gas flow are determined. The pressure and velocity fields at different times during the rotation of the runner are computed.

Key words: blade channel, numerical simulation, viscous flow, non-stationarity.

Введение. Лопаточный аппарат турбомашин представляет собой деформируемую систему, способную совершать механические колебания. Основным источником переменных во времени нагрузок являются вибрация ротора, кромочные следы за решеткой профилей соплового аппарата, неравномерность распределения газодинамических параметров из-за радиального зазора. Течение в компрессорных решетках профилей может быть неустойчивым с возможным отрывом потока, что также может являться причиной повышения вибрационной нагрузки на лопатки.

Все отмеченные факторы, которые являются причинами возникновения нестационарных нагрузок, имеют периодический характер. Определение распределений вибрационных напряжений под действием гармоник возмущающих газодинамических сил является актуальной задачей для обеспечения динамической прочности лопаточного аппарата турбомашин [1]. С этой целью необходимо провести газодинамический расчет компрессора.

Исследование обтекания лопастей турбомашин на основе различных математических моделей имеет важное значение в энергетике при проектировании и оптимизации конструкций. Склонные к отрывным течениям высоконагруженные осевые компрессоры являются наиболее сложными для численных исследований. Реальное течение в межлопаточном канале характеризуется турбулентностью, отрывом потока и возникновением вторичного течения [2]. Математические модели, описывающие подобные явления, базируются на основе *системы уравнений Навье-Стокса*. Учет турбулентности является одним из определяющих факторов для оценки характеристик реального течения, следовательно, математическая модель должна включать соответствующие уравнения. Система нестационарных уравнений Навье-Стокса, дополненная уравнениями турбулентности, представлена в виде нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Анализ последних исследований. В настоящее время для расчета вязкого течения газа в межлопаточном канале используются CFD решатели уравнений газовой динамики. В них реализованы наиболее эффективные вычислительные алгоритмы для решения систем уравнений в виде методов конечных разностей и конечных объемов. [3, 4]. Разработка метода CFD за последние годы позволила проводить расчеты и моделирование рабочих процессов за более короткое время и с высокой точностью. Моделирование с помощью CFD-решателей обеспечивает расчет параметров газодинамического потока, поскольку экспериментальные испытания компрессоров очень дороги и во многих случаях невозможны.

Численное моделирование потока газа для решения практических инженерных задач зачастую проводят в стационарной постановке. Однако такой подход не позволяет учесть некоторые важные моменты, такие как статор-ротор взаимодействие, вторичные течения, взаимодействие кромочных следов, которые оказывают существенное влияние на достоверность полученных результатов моделирования.

В настоящее время проводится много исследований в области моделирования газодинамического потока при вращении аэродинамической решетки профилей [3 – 5]. При этом часто использовалась двумерная модель потока. Потoki обычно описывались уравнениями Эйлера, которые решались либо с помощью центрально-разностных схем второго порядка аппроксимации с искусственной вязкостью, либо с помощью схем обратного потока [5].

© А. А. Карпик, 2017

Постановка задачі. В данной статье представлено моделирование газодинамического потока в межлопаточном канале, которое в дальнейшем будет использовано для оценивания газодинамических сил, действующих на лопатки компрессора.

Численное моделирование, представленное в данной работе, проведено с помощью программного комплекса F [2]. CFD программа решения системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, для расчетов течений вязкого газа в проточных частях турбомашин была разработана в ИПМаш НАН Украины.

В качестве объекта исследования выбрана ступень осевого компрессора низкого давления газотурбинного двигателя, состоящая из ВНА и 1 РК. Меридиональное сечение проточной части исследуемого компрессора изображено на рис. 1

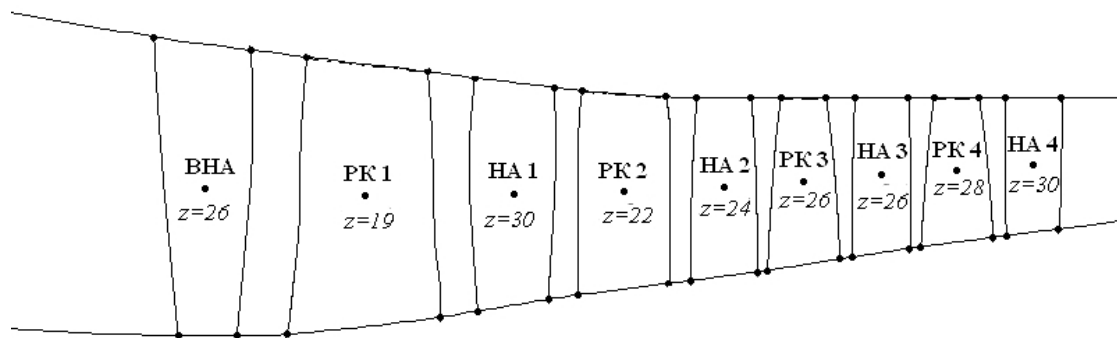


Рис. 1 – Проточная часть осевого компрессора: ВНА – входной направляющий аппарат; РК – рабочее колесо; НА – направляющий аппарат.

Для моделирования течения газа рассматривалась регулярная разностная H – сетка трех уровней. Вид профилей сечений лопаток 1РК и расчетная сетка показаны на рис. 2. Размерность мелкой сетки, использованной для всего расчета, составляет $96 \times 96 \times 144 = 1327104$ ячеек, что в значительной степени увеличивает точность численного решения данной задачи [7].

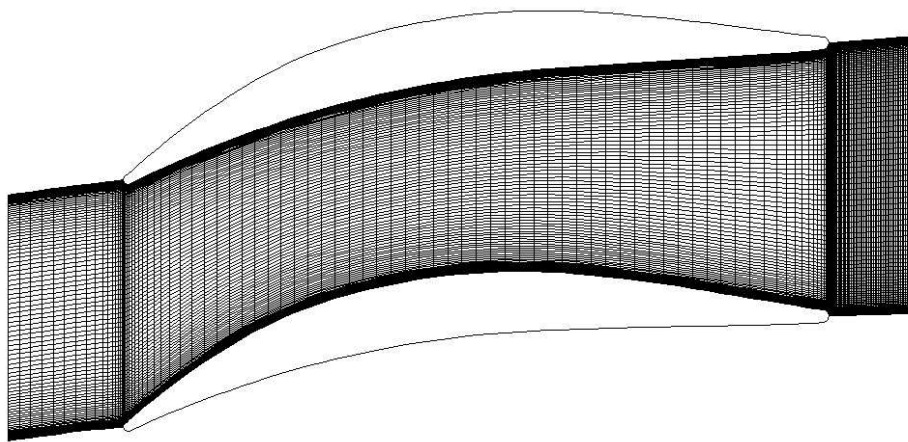


Рис. 2 – Расчетная сетка в межлопаточном канале 1РК.

Математическая модель. Турбулентное течение вязкого сжимаемого газа многоступенчатого компрессора описывается системой нелинейных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS-модель).

Система, записанная в локальной криволинейной системе координат, связанной с обтекаемыми телами и вращающейся с постоянной угловой скоростью Ω относительно оси z в векторной форме имеет вид [8]:

$$\frac{\partial Q_j}{\partial t} + \frac{\partial F_j}{\partial \psi_i} = H_j,$$

где

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ h \end{bmatrix}; \quad F_j = \begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_1 u_j + \delta_{1j} p - \tau_{1j} \\ \rho u_2 u_j + \delta_{2j} p - \tau_{2j} \\ \rho u_3 u_j + \delta_{3j} p - \tau_{3j} \\ (h+p)u_j - u_i \tau_{ij} + q_j \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\rho u_2 \Omega + \rho \Omega^2 r_x \\ -2\rho u_1 \Omega + \rho \Omega^2 r_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\tau_{ij} = 2(\mu + \hat{\mu}) \left[S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad q_i = -(\lambda + \hat{\lambda}) \frac{\partial T}{\partial x_i}; \quad h = e + p \frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 - \Omega^2 r^2}{2} + \rho k;$$

Q – вектор консервативных переменных; F_j – вектора потоков; H – вектор источников членов; J – якобиан преобразования координат; ψ_i – криволинейные координаты ξ, η, ζ ; u_j – декартовы компоненты скорости; τ_{ij} – тензор вязких напряжений; ρ – плотность; Ω – скорость вращения; p – давление; k – кинетическая энергия турбулентности; r – расстояние от оси вращения до текущей точки; r_x, r_y – проекции r на оси x, y соответственно; δ_{ij} – символ Кронекера; T – температура; μ – коэффициент молекулярной динамической вязкости; $\hat{\mu}$ – коэффициент турбулентной динамической вязкости; λ – коэффициент теплопроводности (молекулярный); $\hat{\lambda}$ – коэффициент теплопроводности (турбулентный); q – тепловой поток; e – внутренняя энергия единицы объема.

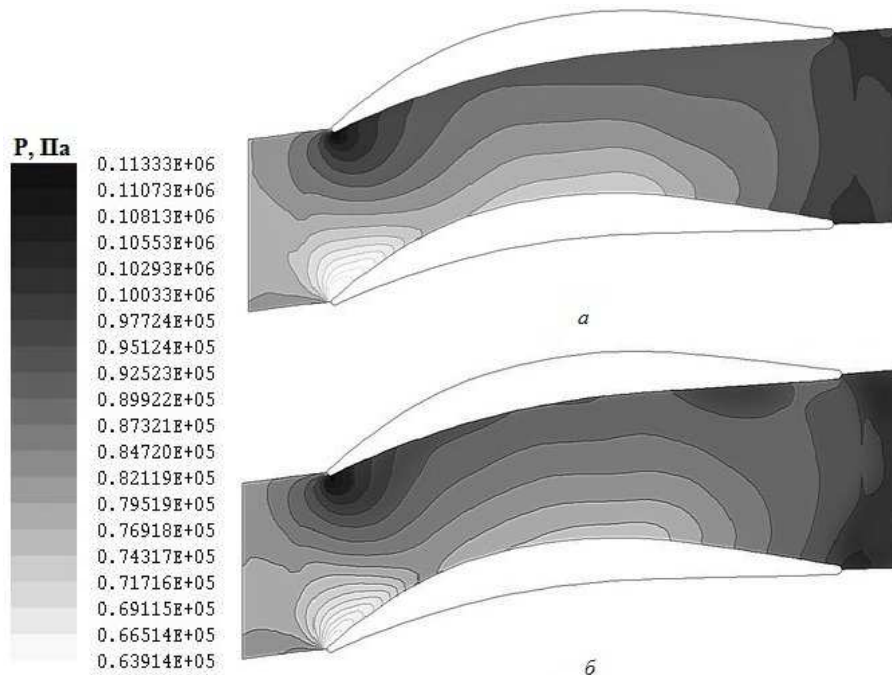


Рис. 3 – Поля давления: *a* – на временном шаге полупериода; *b* – на временном шаге периода.

Рассматривается $k - \omega$ SST модель турбулентности, которая учитывает перенос касательных напряжений и дает точное предсказывание отрыва потока при неблагоприятных градиентах давления [6].

$$\frac{\partial \bar{\rho} \hat{k}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} \hat{u}_j \hat{k} - (\bar{\mu} + \sigma_k \hat{\mu}) \frac{\partial \hat{k}}{\partial x_i} \right] = P_k - \beta^* \bar{\rho} \hat{\omega} \hat{k};$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \hat{\omega}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} \hat{u}_j \hat{\omega} - (\bar{\mu} + \sigma_\omega \hat{\mu}) \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial x_j} \right] = \frac{\alpha \bar{p}}{\hat{\mu}} P_k - \beta \bar{\rho} \hat{\omega}^2 + (1 - F_1) \bar{\rho} \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\hat{\omega}} \frac{\partial \hat{k}}{\partial x_j} \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial x_j},$$

где $\bar{\mu}$ и $\hat{\mu}$ – коэффициенты динамической ламинарной и турбулентной вязкости соответственно; $P_k = \hat{\tau}_{ij} S_{ij}$ – производство кинетической энергии турбулентности; F_1 – смешивающая функция Ментера; $\hat{\omega}$ – удельная скорость диссипации.

Исходные уравнения интегрируются численно с помощью итерационной явно-неявной разностной схемой, явный оператор которой основан на ENO схеме Хартена, а неявная аппроксимация реализована с помощью схемы Бима-Уорминга-Стегера [2].

На входе в расчетную область задаются распределения по радиусу полного давления, полной температуры, меридионального и тангенциального углов, задающих направление вектора скорости. На твердых стенках задаются условия прилипания. На проницаемых поверхностях, отделяющих текущий межлопаточный канал от соседних каналов того же лопаточного аппарата задаются условия периодичности.

Численные результаты. После определения газодинамических параметров потока и неблагоприятных явлений, вызывающих дополнительные потери, предоставляется возможность конструктивными способами снизить значения неблагоприятных факторов и повысить эффективность работы конструкции в целом. Набегающий поток характеризуется неравномерным распределением параметров, поэтому для оценки прочности лопаточно-

го аппарата и дополнительных потерь, вызванных периодической нестационарностью, необходимо определить нестационарные силы, действующие на лопатки рабочего колеса.

В результате расчета были получены распределения полей скорости и давления. Моделирование было проведено с учетом вращения рабочего колеса и представленные результаты дают возможность определить характер изменения потока в разные моменты времени. Это позволяет выделить нестационарную газодинамическую составляющую в аэродинамических силах и проводить расчет колебаний лопаточного аппарата. Радиальное сечение межлопаточного канала рабочего колеса и поля давления, и чисел Маха в разные моменты времени при вращении (на периоде и полупериоде) показаны на рис. 3 – 4.

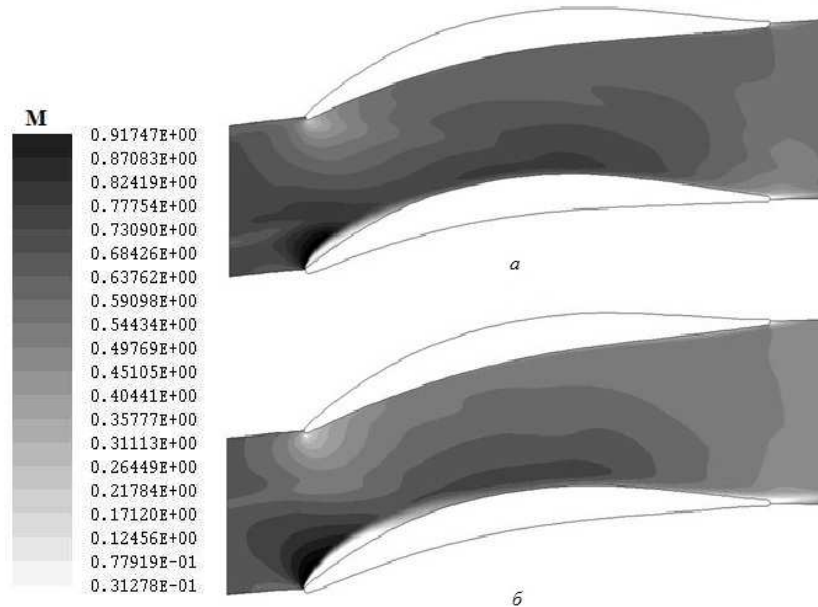


Рис. 4 – Поля чисел Маха: *a* – на временном шаге полупериода; *b* – на временном шаге периода.

Из рис. 5 видно, что на периферии лопатки у входной и выходной кромках интенсивность турбулентности возрастает, под воздействием радиального зазора и кромочного следа направляющего аппарата. Данные области характеризуются значительной завихренностью и образованием обратного течения (рис. б).

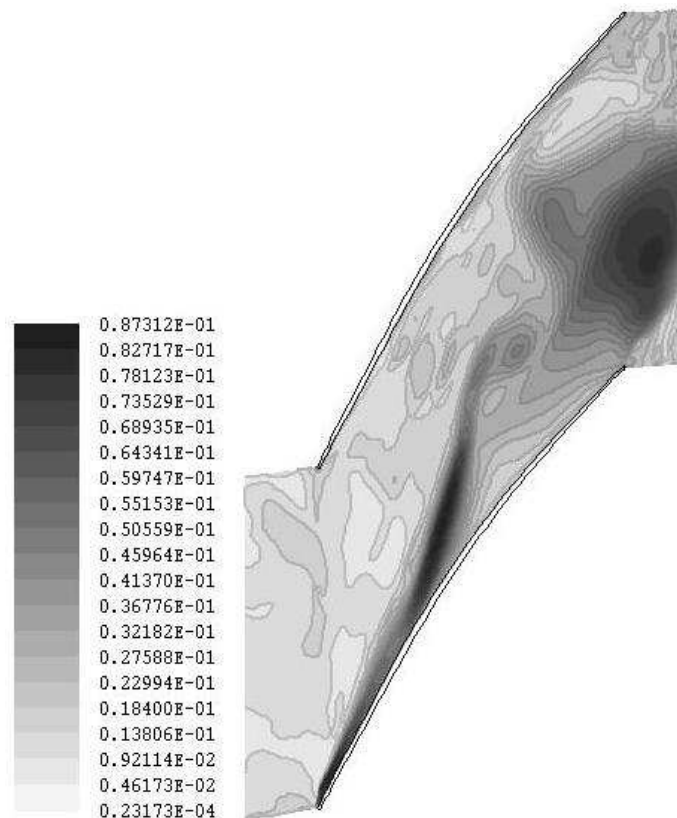


Рис. 5 – Степень турбулентности в межлопаточном канале на периферии лопатки.

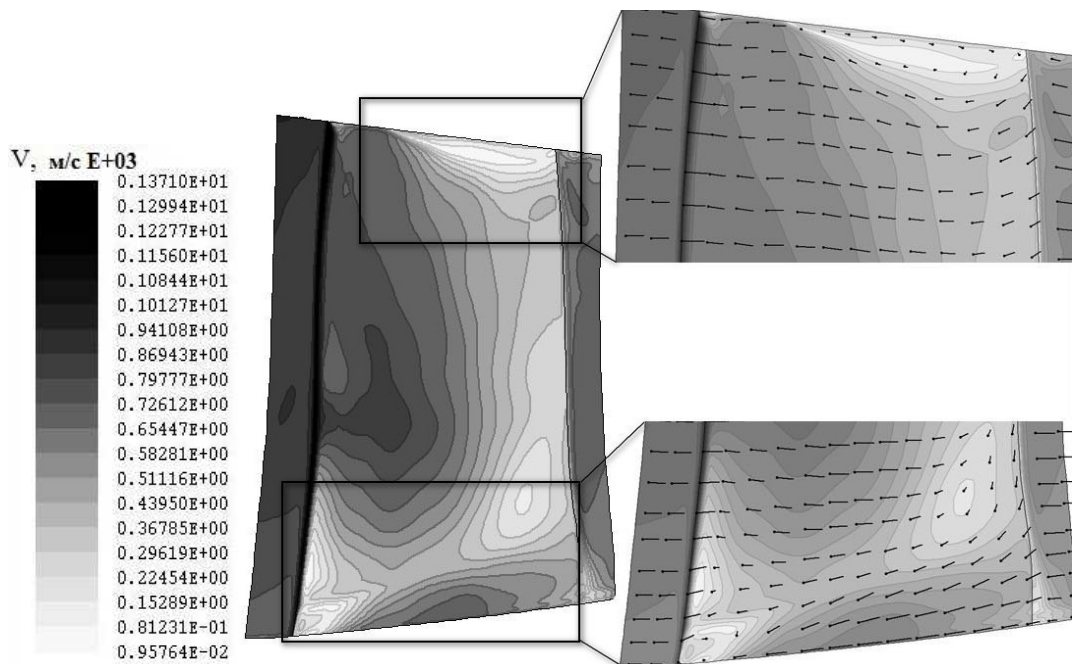


Рис. 6 – Обратное течение в канале.

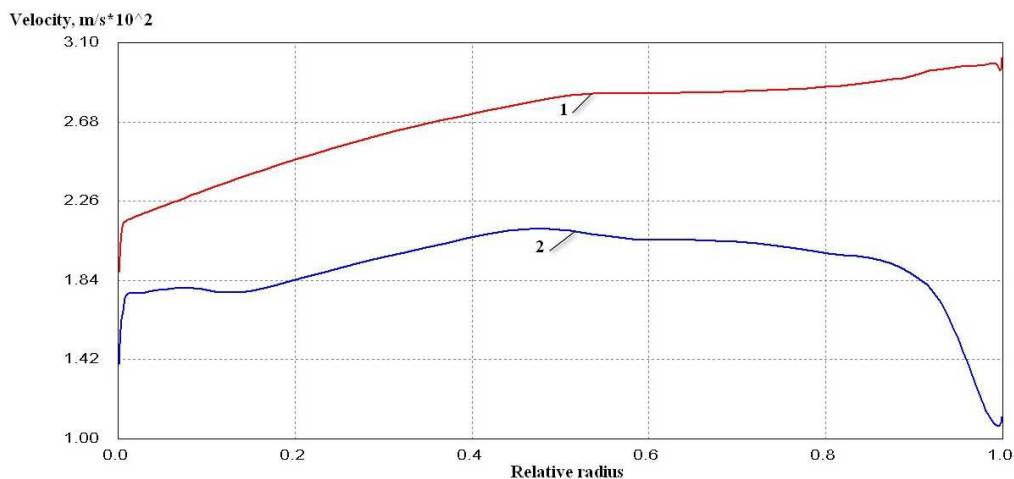


Рис. 7 – Сравнительная характеристика осредненной скорости в радиальном зазоре: 1 – на входе; 2 – на выходе.

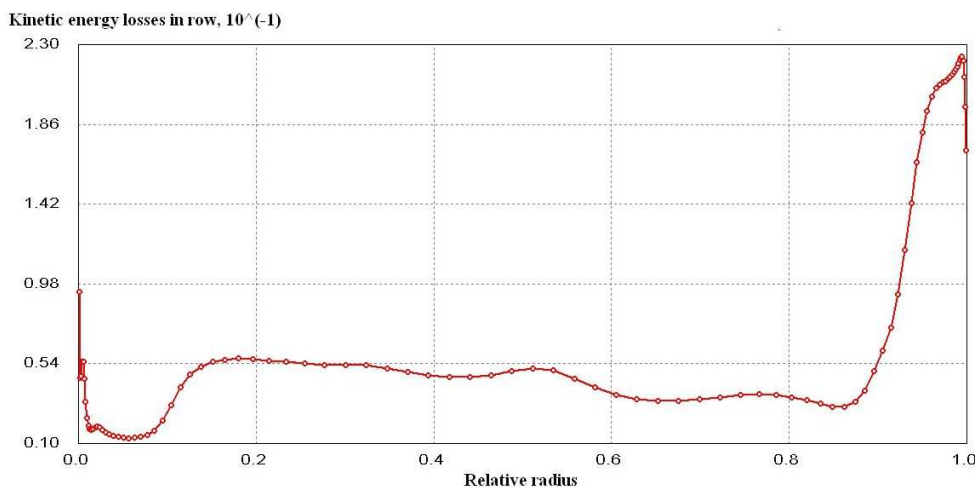


Рис. 8 – Потери кинетической энергии в лопаточном винце.

Перетекание через радиальный зазор существенно влияет на характер обтекания лопатки. На поверхности корпуса происходит нарастание пограничного слоя и возникает обратное течение. Область образования вихре-

вой структуры характеризуется значительным понижением скорости на выходе из радиального зазора. Сравнительная характеристика осреднённой скорости в радиальном зазоре на входе и выходе изображена на рис. 7.

Наличие радиального зазора над рабочими лопатками существенно оказывает влияние на распределение параметров потока в ступени компрессора. Уменьшение перепада давления на поверхности профиля приводит к снижению окружного усилия. Данные явления сопровождаются энергетическими потерями в венце. На рис. 8 показано распределение потерь кинетической энергии, осредненное в окружном и осевом направлениях.

Выводы. Численное моделирование газодинамического потока позволяет оценить прочность лопаточного аппарата компрессора. С этой целью было выполнено численное исследование течения в компрессорной решетке с помощью программного пакета *F*. Реализованная в нём математическая модель течения газа позволяет определить структуру потока и различные эффекты, которые могут вызывать дополнительные нагрузки.

Учёт вращения рабочего колеса позволяет определить действие периодически изменяющихся газовых сил, возникновение которых связано с неравномерностью газоздушного потока по окружности в проточной части двигателя. Данная неравномерность проявляется в виде неоднородности поля скоростей и поля давлений перед и за рабочей лопаткой. Из полученного распределения полей видно, что кромочные следы вызывают локальные изменения в окружном направлении поля скоростей и давлений.

Газодинамическая структура потока имеет изменчивый характер по высоте лопатки от корня к периферии, что объясняется закруткой рабочей лопатки.

Все отмеченные факторы являются причиной возникновения переменных усилий, вызывающих изгибные и крутильные колебания при действии нестационарного потока. Данное моделирование было проведено с целью определения газодинамической силы для дальнейшего расчета вынужденных колебаний под её действием.

Список литературы

1. Биргер И. А., Шорр Б. Ф. Динамика авиационных газотурбинных двигателей. – М. : Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Ершов С. В., Русанов А. В. Проблемы численного моделирования трехмерных вязких течений в осевых и центробежных компрессорах // Вісник СумДУ. – 2005. – № 1 (73). – С. 25 – 34.
3. Karpik A., Vorobiev Yu. Nonlinear Analysis Of Gas Flow In Compressors Stage Based On Cfd-Method // Proceedings of the 5 th International Conference «Nonlinear Dynamics – 2016», Sept. 27 – 30, 2016, Kharkov. – P. 318 – 319.
4. Yershov S., Yakovlev V., Derevyanko A., Gryzun M., Kozyrets D. The development of new CFD solver for 3D turbomachinery flow computations // Ciepłota Maszyn Przepływowe. Turbomachinery. – 2012. – No. 141. – P. 15 – 24.
5. Niazi S. Numerical Simulation of Axial Compressor Rotor Flow Using Two Dimensional Euler Equations // Journal of Basic and Applied Scientific Research. – 2012. – No. 2 (4). – P. 3926 – 3934.
6. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. – 1994. – V. 32. – No. 8. – P. 1598 – 1605.
7. Карпик А. А., Яковлев В. А., Воробьев Ю. С. Анализ газодинамической структуры потока в решетках профилей осевого компрессора газотурбинного двигателя // Проблемы машиностроения. – 2015. – No. 18, 4/2. – С. 18 – 23.
8. Ершов С. В., Яковлев В. А. Аэродинамическая оптимизация лопаточных аппаратов турбин : подходы, методы, результаты // Проблемы машиностроения. Аэро- и гидромеханика в энергетических машинах. – 2012. – Т. 15 (№2). – С. 3 – 13.

References (transliterated)

1. Birger I. A., Shorr B. F. *Dinamika aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigateley* [Dynamics of aviation gas-turbine engines]. Moscow, Mashinostroeniye, 1981. 232 p.
2. Yershov S. V. Rusanov A. V. *Problemy chislennogo modelirovaniya trekhmernykh vyazkikh techeniy v osevykh i tsentrobezhnykh kompressorakh* [Problems of numerical simulation of three-dimensional viscous flows in axial and centrifugal compressors]. *Visnyk SumDU* [Bulletin of Sumy State University]. 2005, no. 1 (73), pp. 25–34.
3. Karpik A., Vorobiev Yu. Nonlinear Analysis Of Gas Flow In Compressors Stage Based On Cfd-Method. *Proceedings of the 5 th International Conference «Nonlinear Dynamics – 2016», Sept. 27 – 30, 2016, Kharkov*. Kharkov, 2016, pp. 318–319.
4. Yershov S., Yakovlev V., Derevyanko A., Gryzun M., Kozyrets D. The development of new CFD solver for 3D turbomachinery flow computations. *Ciepłota Maszyn Przepływowe. Turbomachinery*. 2012, no. 141, pp. 15–24.
5. Niazi S. Numerical Simulation of Axial Compressor Rotor Flow Using Two Dimensional Euler Equations. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*. 2012, no. 2 (4), pp. 3926–3934.
6. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J*. 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
7. Karpik A. A., Yakovlev V. A., Vorobiev Yu. S. Analiz gazodinamicheskoy struktury potoka v reshetkakh profiley oseвого kompressora gazoturbinного dvigatelya [Analysis of the gas-dynamic structure of the flow in the blade channel of the axial compressor of a gas turbine engine]. *Problemy mashinostroeniya* [Problems of Mechanical Engineering]. 2015, no. 18, 4/2, pp. 18–23.
8. Yershov S., Yakovlev V. Aerodinamicheskaya optimizatsiya lopatochnykh apparatov turbin : podkhody, metody, rezultaty [Aerodynamic optimization of turbine blades: approaches, methods, results]. *Problemy mashinostroeniya. Seriya : Aerodinamika i gidromekhanika v energeticheskikh mashinakh* [Problems of Mechanical Engineering. Ser.: Aero- and hydromechanics for energy machinery]. 2012, vol. 15, no. 2, pp. 3–13.

Поступила (received) 12.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання потоку в міжлопатковому каналі компрессора з урахуванням обертання робочого колеса для визначення аеродинамічних сил / А. О. Карпик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 64 – 70. Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2222-0631.

Моделирование потока в межлопаточном канале компрессора с учетом вращения рабочего колеса для определения аэродинамических сил / А. А. Карпик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 64 – 70. Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2222-0631.

вання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 64 – 70. Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2222-0631.

Simulation of the flow in the compressor blade channel taking into account the rotation of the runner for the estimation of aerodynamic forces / A. O. Karpik // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 30 (1252). – pp. 64 – 70. Bibliog.: 8 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Карпик Анна Олександрівна – асистент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (050) 739-39-62; e-mail: Karpikann@gmail.com.

Карпик Анна Александровна – ассистент кафедры компьютерного моделирования процессов и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (050) 739-39-62; e-mail: Karpikann@gmail.com.

Karpik Anna Aleksandrovna – assistant at the Department of Computer Modeling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (050) 739-39-62; e-mail: Karpikann@gmail.com.

УДК 621.317.1

О. Ю. КРОПАЧЕК

КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ АВТОКОГЕРЕНТНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Удосконалено математичну модель для розрахунку коефіцієнта автокогерентності з метою виявлення частотної і тимчасової нестационарності перехідних випадкових теплових процесів. Показано можливість використання коефіцієнта частотної нестационарності по зрушенню для контролю екстремальних значень багатовимірних теплових процесів при істотних обмеженнях інтервалу часу спостереження. Доведено можливість екстраполяції контрольованих багатовимірних термодинамічних параметрів за вдосконаленими коефіцієнтами автокогерентності з використанням імовірно обґрунтованої процедури локального прогнозування.

Ключові слова: теплові процеси, температура, прогнозування, діагностика, ідентифікація, когерентність.

Усовершенствована математическая модель для расчёта коэффициента автокогерентности с целью выявления частотной и временной нестационарности переходных случайных тепловых процессов. Показана возможность использования коэффициента частотной нестационарности по сдвигу для контроля экстремальных значений многомерных тепловых процессов при существенных ограничениях интервала времени наблюдения. Доказана возможность экстраполяции контролируемых многомерных термодинамических параметров по усовершенствованным коэффициентам автокогерентности с использованием вероятностно обоснованной процедуры локального прогнозирования.

Ключевые слова: тепловые процессы, температура, прогнозирование, диагностика, идентификация, когерентность.

The mathematical model for computing the coefficient of auto-coherence has been improved to detect the frequency and time nonstationarity of transient random thermal processes. The possibility of using the factor of frequency nonstationarity in the shift to control the extreme values of multidimensional thermal processes is shown under significant limitations of the observation time interval. The possibility of extrapolation of the controlled multidimensional thermodynamic parameters by the improved coefficients of auto-coherence with the use of a probabilistically grounded procedure of local prediction is proved. Equations for predicting error variances for alternative computational procedures are obtained and conditions for improving forecasting efficiency are determined. The possibility of increasing the accuracy of the statistical control of thermal processes when extrapolating by the improved coefficients of auto-coherence is proved.

Key words: thermal processes, temperature, prediction, diagnostics, identification, coherence.

Введение. Измерительные случайные сигналы, отражающие локальные термодинамические процессы, несут важную информацию о долговременной функциональной стабильности динамических объектов. Однако обнаружить такую информацию в сигналах с априори неизвестными вероятностными моделями нестационарности – это проблема. Ее возможное решение – создание информационных технологий параметризации и нормирования случайных спектральных изменений сигналов при существенных ограничениях на время наблюдения. Выявление закономерностей в случайных моделях нестационарности – это получение принципиально новой дополнительной информации о функциональных свойствах динамического объекта, способствующей решению многих проблемных задач идентификации объектов и оптимального синтеза информационных компьютеризированных систем в условиях априорной неопределенности.

Анализ последних исследований. Проблема эффективного прогнозирования поведения сложных промышленных объектов по характеру процессов, протекающих в них, всегда являлась предметом вероятностно-статистического анализа процедур преобразования первичной измерительной информации во вторичные логические решения. При этом, степень и глубина изучения проблемы связывалась со сложностью математической

© О. Ю. Кропачек, 2017