

Ю. П. КУХТИН, В. М. ЛАПОТКО, С. А. ХОМЫЛЕВ

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОТОКА НА СИЛОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ ЛОПАТОК ТВД

АННОТАЦИЯ Одним из способов снижения динамических напряжений на рабочие лопатки, при условиях эксплуатации, близких к резонансным, может быть уменьшение внешних возбуждающих сил. В работе приведены результаты численного исследования влияния окружной неравномерности потока перед рабочим колесом на уровень нестационарных аэродинамических сил, приложенных к рабочим лопаткам турбины. При численном моделировании течения задавалась неоднородность поля полной температуры на входе в турбин, а также пленочное охлаждение соплового аппарата. Проведены расчёты нестационарных течений в ступени турбины высокого давления для трех вариантов геометрии соплового аппарата: 1 – с исходной геометрией, имеющей одинаковые площади геометрического горла в каждом межлопаточном канале; 2 – с геометрией, полученной чередованием двух типов секторов, по три канала в каждом, имеющих увеличенную a_2 или уменьшенную a_1 площадь горла; 3 – с геометрией, полученной чередованием каналов, имеющих увеличенную a_2 или уменьшенную a_1 площадь горла. По результатам Фурье-анализа нестационарных сил проведен спектральный анализ динамической составляющей этих сил. Получено снижение уровня нестационарных аэродинамических сил на рабочей лопатке по частоте $z \cdot f_n$, где f_n – частота вращения ротора, z – количество лопаток соплового аппарата.

Ключевые слова: нестационарное течение, возбуждающая аэродинамическая сила, ступень турбины.

Yu. P. KUKHTIN, V. M. LAPOTKO, S. A. KHOMYLYEV

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL FLOW INHOMOGENEITY ON THE POWER LOADING OF HPT BLADES

ABSTRACT One of the methods used for the reduction of dynamic stresses in turbine blades when operating conditions are close to resonance conditions can be the reduction of external exciting forces. This scientific paper gives the data of numerical investigation of the influence of circumferential inhomogeneity before the turbine wheel on the level of nonstationary aerodynamic forces applied to turbine blades. With regard to the numerical flow simulation the full temperature field inhomogeneity was specified at the turbine inlet including the film deposition of the nozzle diaphragm. Nonstationary flows in the high pressure turbine stage were calculated for the three geometrical options of nozzle diaphragm: 1 – the initial geometry has the same area of geometric throat in each blade channel; 2 – the geometry obtained by the interlacing the two types of sectors; each includes three channels that have the enlarged area a_2 or the reduced area a_1 of throat; 3 – the geometry obtained by the interlacing of channels that have the enlarged area a_2 or the reduced area a_1 of throat; Using the Fourier – analysis data for nonstationary forces the spectral analysis of the dynamic component of these forces was done. A decrease in the level of nonstationary aerodynamic forces of $z \cdot f_n$ frequency was obtained for the turbine blade, where f_n is the rotor speed, z is the number of blades in the nozzle diaphragm.

Key words: nonstationary flow, exciting aerodynamic force, and the turbine stage

Введение

Прогресс в развитии современных турбомашин характеризуется применением высоконагруженных ступеней с высокими удельными параметрами, малыми размерами и весом. При создании таких двигателей существенно обостряется проблема обеспечения их надежности и долговечности. Окружная неоднородность набегающего потока газа является основным источником нестационарных аэродинамических сил, действующих на рабочие лопатки. Неравномерное поле параметров на выходе из камеры сгорания (КС), обусловленное дискретным количеством форсунок и конструктивными особенностями, взаимодействует с нижестоящим сопловым аппаратом (СА), имеющим дискретное количество лопаток. Таким образом, в сечении перед рабочим колесом (РК) турбины высокого давления (ТВД) получается существенно неоднородное распределение параметров. Эта неоднородность, при её взаимодей-

ствии с вращающимся РК, вызывает пульсации аэродинамической силы на рабочих лопатках с частотами, обусловленными количеством форсунок и лопаток СА.

При проектировании и доводке двигателя не всегда возможна полная отстройка от резонанса, так как спектр собственных частот рабочих лопаток (РЛ) может быть достаточно широким по отношению к диапазону рабочих оборотов ротора. Одним из направлений снижения динамических напряжений в РЛ при условиях эксплуатации, близких к резонансным, может быть уменьшение внешних возбуждающих сил [1].

Для ослабления интенсивности возбуждающих сил, практически без потери аэродинамической эффективности ступени турбины, возможно применение разношаговых решеток СА [1, 2]. В работе [3] было показано, что неоднородность поля полной температуры за КС является источником силового нагружения лопаток РК. Поэтому, для правильного определения полного спектра

сил, действующих на РЛ, необходимо также учитывать поле полной температуры T^* за КС.

Дополнительным фактором, влияющим на неоднородность потока, является падение полной температуры в закомочном следе СА, вследствие выдува охлаждающего воздуха. При численном моделировании, для максимального приближения к реальным условиям работы лопаток РК, следует учитывать и этот фактор.

Цель работы

Целью исследования является численная оценка влияния окружной неравномерности потока перед РК на уровень нестационарных аэродинамических сил, приложенных к рабочим лопаткам ТВД.

Изложение основного материала

Объект исследований

В качестве объекта для исследований была выбрана ступень турбины высокого давления авиационного двигателя, содержащая 29 сопловых и 82 рабочих лопатки.

На входе в расчетную область задавалось неравномерное в радиальном и в окружном направлениях поле полной температуры T^* и полного давления P^* , а также постоянные углы входа потока.

Параметры на входе в турбину были получены в результате численного расчета сектора камеры сгорания, содержащего одну из 16 форсунок. Полная окружная эпюра заторможенной температуры получалась копированием сектора в окружном направлении. Полученное таким образом поле температуры перед турбиной было теоретически ожидаемым, и существенно отличным от реальной эпюры, которая имеет значительно большие перепады температур.

На пере лопатки СА моделировалось пленочное охлаждение, а на втулочной и периферийной образующих проточной части турбины – выдув охлаждающего воздуха и утечки по стыкам полок (рис. 1).

Геометрия канала СА с увеличенной площадью горла получена уменьшением хорды исходной лопатки путем подрезки выходной кромки без изменения формы профиля в остальной части (рис. 2).

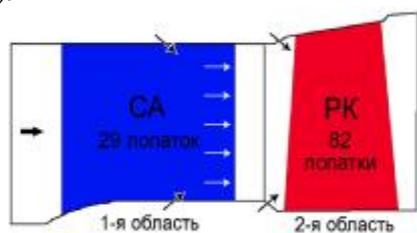


Рис. 1 – Геометрия расчётной области

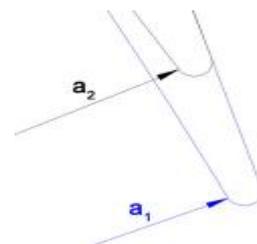


Рис. 2 – Геометрия профилей в области выходной кромки, образующих каналы СА с исходной (a_1) и увеличенной (a_2) площадью горла

Расчёты проводились для трёх вариантов СА:

- 1) с исходной геометрией, имеющей одинаковые площади геометрического горла в каждом межлопаточном канале;
- 2) с геометрией, полученной чередованием двух типов секторов, по три канала в каждом, имеющих увеличенную a_2 или уменьшенную a_1 площадь горла;
- 3) с геометрией, полученной чередованием каналов (через один), имеющих увеличенную a_2 или уменьшенную a_1 площадь горла.

Так как масштаб исследуемого явления был равен полному обороту, а также соотношение числа лопаток первого и второго венца не являются взаимно простыми числами, то в расчетные области были включены все межлопаточные каналы венцов (полный оборот).

Математическая модель и численный метод

Для моделирования течения газа в исследуемой области численно решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) записанные в приближении тонкого слоя для цилиндрической системы координат [4]. При расчёте вязких турбулентных течений основные уравнения замыкались стандартной $k-\epsilon$ моделью турбулентности Лаундера-Сполдинга. Граничные условия на твердой стенке для кинетической энергии турбулентности (ТКЕ) и скорости диссипации ТКЕ определялись с помощью пристеночной функции.

Решение системы уравнений проводилось с помощью численной схемы С.К. Годунова, имеющей 2-й порядок точности по пространству, с использованием процедуры распада произвольного разрыва. Вязкие компоненты аппроксимировались центральными разностями.

При выполнении расчётов использовалась сетка типа H содержащая для первого венца 3,3 млн. ячеек и для второго – 8 млн. ячеек (рис. 3).

Обсуждение результатов

В рассматриваемой геометрической области были проведены расчёты для трех вариантов СА с различными геометриями. Отношение полного давления на входе к полному давлению на выходе

достигало $P_0^*/P_2 = 3,4$. Среднемассовая температура газа на входе в турбину для первых трех расчётов составляла 1455 К. Число Рейнольдса, посчитанное по параметрам на выходе и ширине профиля РЛ, $Re = 4,5 \cdot 10^5$.

На рис. 4 приведен фрагмент расчетной области с мгновенным значением полной температуры в абсолютном для СА и в относительном для РК движении.

Неоднородность набегающего на рабочие лопатки потока обусловлена, прежде всего, закрученными следами от СА. Эта неоднородность дополнительно усугубляется температурными перепадами между горячим ядром потока и холодными струями от пленочного охлаждения пера лопатки и выдувов на втулочной и периферийной образующих тракта.

На рис. 5 и 6 приведено распределение на среднем радиусе безразмерной скорости M и полной температуры T^* для абсолютного (а) и относительного (б) движения.

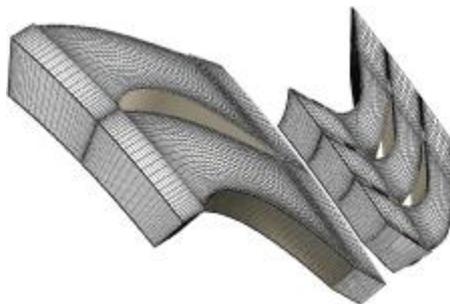


Рис. 3 – Расчётная сетка в первом и во втором венцах

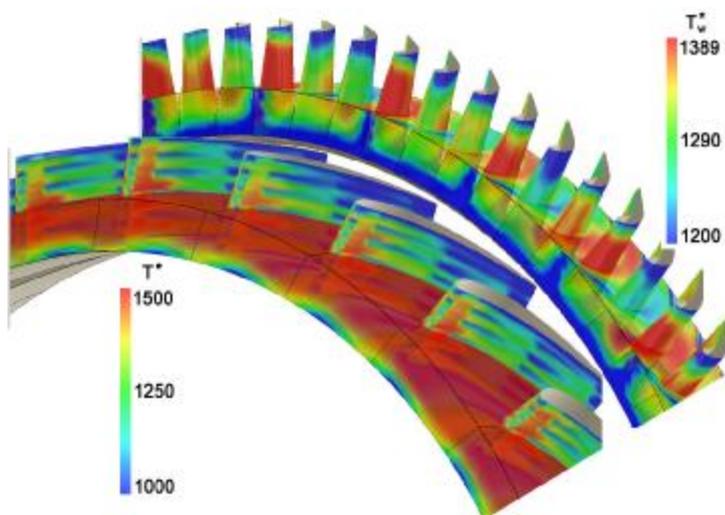


Рис. 4 – Фрагмент расчетной области с мгновенным распределением абсолютной в СА и относительной в РК полной температуры

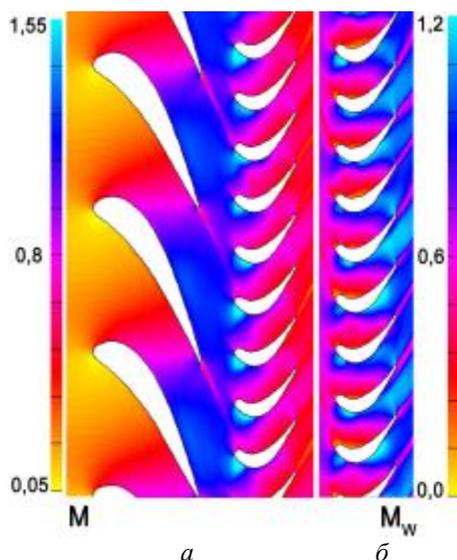


Рис. 5 – Поле числа M на среднем радиусе:
а – в абсолютном движении;
б – в относительном движении

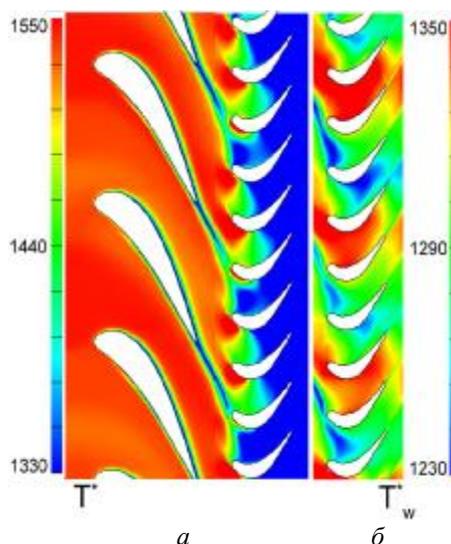


Рис. 6 – Поле полной температуры на среднем радиусе:
а – в абсолютном движении;
б – в относительном движении

Перепад в окружном направлении осредненной по высоте полной температуры на входе в турбину составляет всего 55° . В сечении же перед рабочим колесом он достигает 370° в абсолютном движении и 235° в относительном. На рис. 7 приведены диаграммы окружного распределения осредненной по высоте полной температуры для сечения перед турбиной (0) и сечения перед РК для трех геометрий соплового аппарата (1–3). Температуры изображены в одном масштабе, для половины окружности венца. Прямыми линиями отмечены значения среднемассовой температуры. Аналогичные диаграммы для безразмерной скорости M изображены на рис. 8.

После достижения режима установившегося течения, для каждого варианта проводился расчёт в течение двух оборотов ротора, что соответствовало физическому времени $t = 0,00663$ с. Через определенное количество итераций производилась запись значений крутящего момента $M_{кр}$ [Н·м] и осевой составляющей силы F_x [Н], приложенных к рабочей лопатке. Эпюры их изменения по времени

приведены на рис. 9 и 10. На рис. 9 видно, что амплитуда изменения крутящего момента, значение которой составляет $22,4$ Н·м, составляет 53 % от среднего по времени абсолютного значения данного параметра (42 Н·м).

По результатам Фурье-анализа нестационарных сил получены спектральные диаграммы, представленные на рис. 11 и 12. На них в качестве аргумента взята величина, определяющая номер гармоники, $i = ff_n$, где f – частота исследуемой функции, $1/c$; f_n – частота вращения ротора, $1/c$.

На диаграммах отчетливо выделяется 29-я гармоника и менее заметна, кратная ей, 58-я гармоника, обусловленные количеством лопаток СА. Нарушение строгого чередования межлопаточных каналов с одинаковой площадью горла, которое было применено во втором и третьем случаях геометрии СА, внесло дисгармонию во временном распределении возмущающей силы (рис. 9, 10), что выразилось в снижении амплитуды по основной гармонике и росте амплитуды гармоник в низкочастотной области (рис. 11, 12).

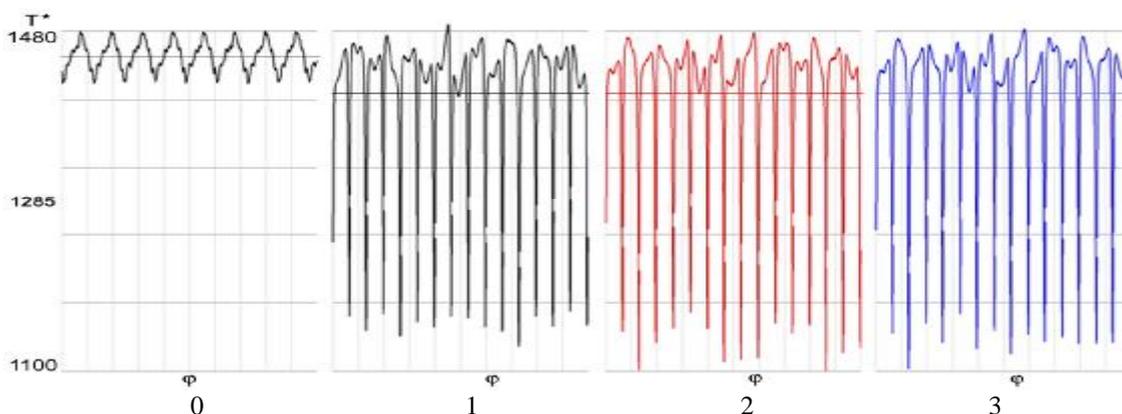


Рис. 7 – Распределение в окружном направлении осредненной по высоте полной температуры: 0 – сечение перед турбиной; 1 – сечение перед РК для первой геометрии СА; 2 – сечение перед РК для второй геометрии СА; 3 – сечение перед РК для третьей геометрии СА

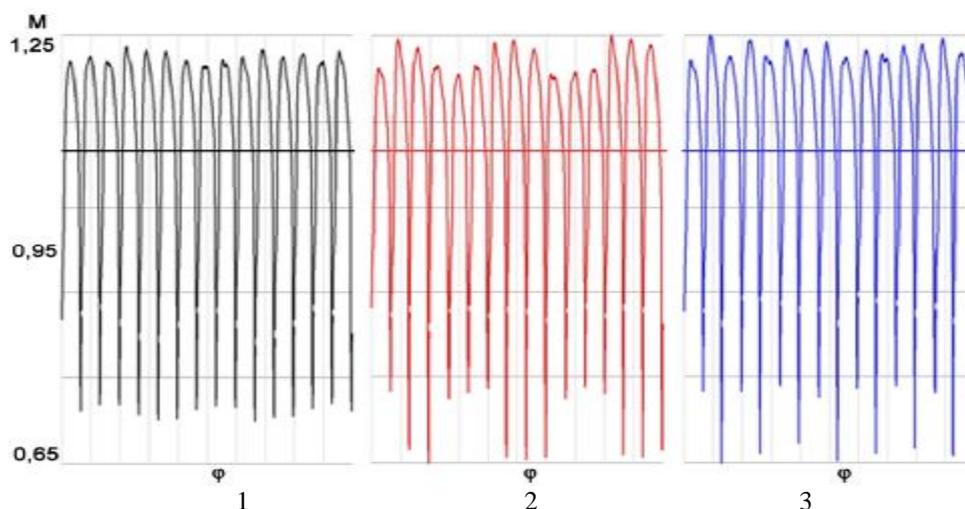


Рис. 8 – Распределение в окружном направлении осредненной по высоте скорости M в сечении перед РК: 1 – первая геометрия СА; 2 – вторая геометрия СА; 3 – третья геометрия СА

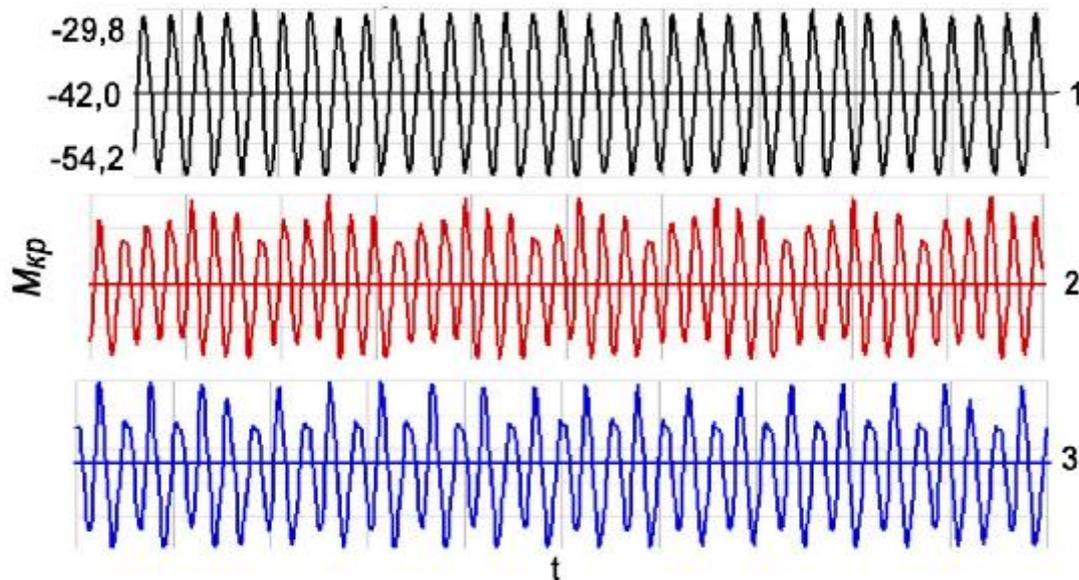


Рис. 9 – Эпюры крутящего момента, приложенного к перу РЛ:
1 – первая геометрия СА; 2 – вторая геометрия СА; 3 – третья геометрия СА

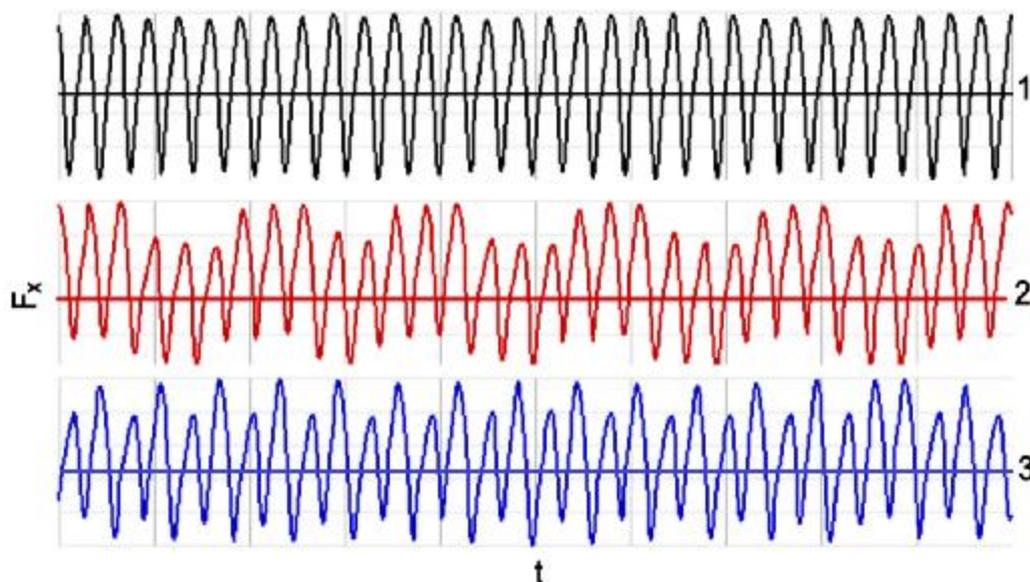


Рис. 10 – Эпюры осевой составляющей силы, приложенной к перу РЛ:
1 – первая геометрия СА; 2 – вторая геометрия СА; 3 – третья геометрия СА

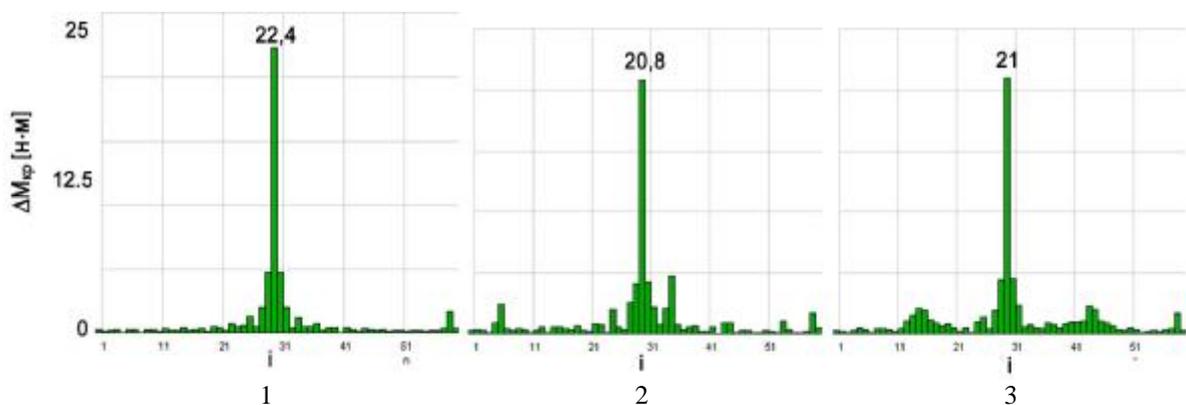


Рис. 11 – Спектрограммы крутящего момента, приложенного к перу РЛ:
1 – первая геометрия СА; 2 – вторая геометрия СА; 3 – третья геометрия СА

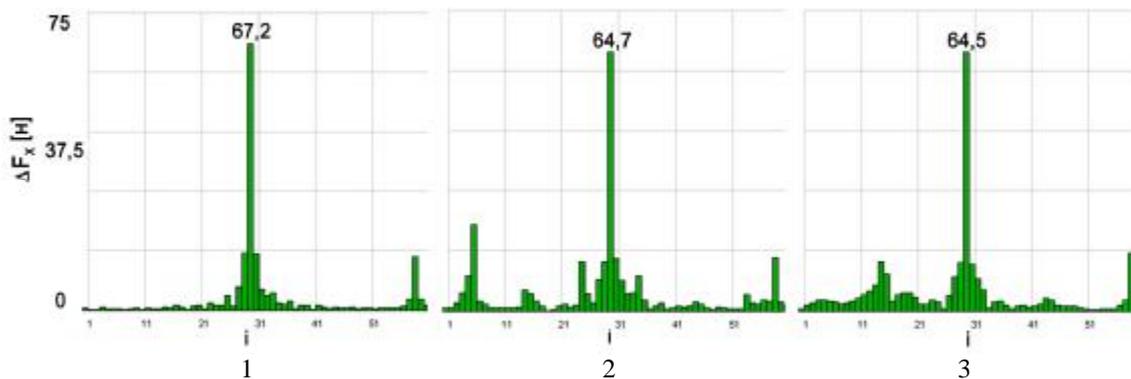


Рис. 12 – Спектрограммы осевой составляющей силы, приложенной к перу РЛ:
1 – первая геометрия СА; 2 – вторая геометрия СА; 3 – третья геометрия СА

Вследствие относительно равномерной входной эпюры полной температуры от камеры сгорания на среднем диаметре 16-я гармоника слабо наблюдается на рис. 12 во втором и третьем случаях.

Как видно из результатов, для второго и третьего вариантов геометрии СА наблюдается снижение динамической составляющей силы с частотой $z \cdot f_n$, действующей на рабочие лопатки турбины, где z – число лопаток в СА. Значение амплитуды крутящего момента для второй и третьей геометрии СА снизилось на 7,1 % и на 6,3 % соответственно. Для осевой составляющей силы снижение амплитуды составило 3,7 % и 4 % соответственно.

Снижение уровня нестационарных аэродинамических сил возможно осуществлять и путем выполнения решетки СА с нерадиально расположенными лопатками [1]. Эффективность применения таких конструктивных особенностей геометрии планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

Выводы

По результатам численных исследований влияния окружной неравномерности параметров потока на динамические нагрузки, действующие на рабочие лопатки ТВД, можно сделать следующие выводы:

1) Для более полного моделирования нестационарного нагружения рабочих лопаток турбин необходимо учитывать все факторы, влияющие на конфигурацию аэродинамических сил: неравномерность поля температуры за камерой сгорания, следовую неравномерность от лопаток СА, неравномерность температуры вследствие выдувов охлаждающего воздуха на пере лопатки и полочных поверхностях.

2) Применение соплового аппарата с переменными по окружности площадями критических сечений каналов приводит к снижению аэродинамических возмущающих сил на лопатки с частотой $z \cdot f_n$. При этом необходимо следить за тем, что-

бы не произошло чрезмерного роста гармоник в низкочастотной области.

Список литературы

- 1 **Самойлович, Г. С.** Возбуждение колебаний лопаток турбомашин [Текст] / **Г.С. Самойлович.** – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
- 2 **Кухтин, Ю. П.** Анализ возможности ослабления резонансного режима работы рабочей лопатки, обусловленного возбуждением от вышестоящего соплового аппарата [Текст] / **Ю. П. Кухтин, В. М. Лапотко** // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков : НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 4/20. – С. 33–38. – ISSN 1727-7337.
- 3 **Лапотко, В. М.** Анализ возможности ослабления резонансного режима работы рабочей лопатки ТВД, обусловленного неравномерностью камеры сгорания по температуре [Текст] / **В. М. Лапотко, Ю. П. Кухтин** // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков : НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 8/24. – С. 127–133. – ISSN 1727-7337.
- 4 **Кухтин, Ю. П.** Верификация метода численного моделирования отрывных течений газа [Текст] / **Ю. П. Кухтин, В. М. Лапотко, Г. И. Слынько** // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков : НАКУ «ХАИ», 2013. – Вып. 8(105). – С. 35–39. – ISSN 1727-7337.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Samoylovich, G. S.** (1975), *Vozbuzhdenie kolebanij lopatok tur-bomashin* [Vibration excitation of the turbomachines blades], Mashinostroenie, Moscow, SSSR.
- 2 **Kukhtin, Yu. P. and Lapotko, V. M.** (2005), ²Analiz vozmozhnosti oslablenija rezo-nansnogo rezhima raboty rabochej lopatki [Analysis of possibilities for attenuating resonance operation conditions of rotor blades caused by excitations from upstream NGV]², *Aviacionno-kosmicheskaja tehnik i tehnologija* [Aerospace Engineering&Technology], vol. 4/20, pp. 33–38, ISSN 1727-7337.
- 3 **Lapotko, V. M. and Kukhtin, Yu. P.** (2005) ²Analiz vozmozhnosti oslablenija rezo-nansnogo rezhima raboty rabochej lopatki TVD, obu-slovlennogo neravnomernost'ju kamery sgoranija po temperature [Analysis of possibilities for attenuating resonance operating conditions of HPT rotor blade caused by tempera-

ture non-uniformity of combustion chamber]², Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace Engineering&Technology], vol. 8/24, pp. 127–133, ISSN 1727-7337.

- 4 **Kukhtin, Yu. P., Lapotko, V. M. and Slynko, G. I.** (2013), ²Verifikacija metoda chislenogo modeli-

rovaniya otrivnyh techenij gaza [Verification of the numerical method for detached flows solution]², Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace Engineering&Technology], vol. 8(105), pp. 35–39, ISSN 1727-7337.

Сведения об авторах (About authors)

Кухтин Юрий Петрович – кандидат технических наук; ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина; e-mail: flow_gd2@mail.ru, тел. +38 (066) 791-41-95.

Kukhtin Yuriy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), advanced engineer of Zaporizhia Machine-Building Design Bureau "Progress" State Enterprise named after Academician O.H. Ivchenko, Zaporozhye, Ukraine.

Лapotko Василий Михайлович – кандидат технических наук; ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина; e-mail: flow_gd@mail.ru.

Lapotko Vasyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), advanced engineer of Zaporizhia Machine-Building Design Bureau "Progress" State Enterprise named after Academician O.H. Ivchenko, Zaporozhye, Ukraine.

Хомылев Сергей Александрович – ведущий конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина; e-mail: KhomylevSA@ivchenko-progress.com.

Khomylyev Sergey – project engineer of Zaporizhia Machine-Building Design Bureau "Progress" State Enterprise named after Academician O.H. Ivchenko, Zaporozhye, Ukraine

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кухтин, Ю. П. Численное исследование влияния окружной неоднородности потока на силовое нагружение лопаток ТВД [Текст] / **Ю. П. Кухтин, В. М. Лapotko, С. А. Хомылев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 81–87. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.11.

Please cite this article as:

Kukhtin, Y., Lapotko, V. and Homylev, S. (2016), “Numerical Investigation of the Influence of Circumferential Flow Inhomogeneity on the Power Loading of HPT Blades”, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 81–87, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.11.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кухтин, Ю. П. Чисельне дослідження впливу окружний неоднорідності потоку на силове навантаження лопаток ТВД [Текст] / **Ю. П. Кухтин, В. М. Лapotko, С. О. Хомилев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 81–87. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.11.

АНОТАЦІЯ Одним із способів зниження динамічних напружень на робочі лопатки, за умов експлуатації, близьких до резонансних, може бути зменшення зовнішніх збуджуючих сил. У роботі наведені результати чисельного дослідження впливу окружний нерівномірності потоку перед робочим колесом на рівень нестационарних аеродинамічних сил, прикладених до робочих лопаток турбіни. При чисельному моделюванні течії задавалася неоднорідність поля повної температури на вході в турбін, а також плівкове охолодження соплового апарату. Проведено розрахунки нестационарних течій в ступені турбіни високого тиску для трьох варіантів геометрії соплового апарату: 1 – з вихідної геометрією, що має однакові площі геометричного горла в кожному межлопаточном каналі; 2 – з геометрією, отриманою чергуванням двох типів секторів, по три канали в кожному, що мають збільшену A_2 або зменшену a_1 площа горла; 3 – з геометрією, отриманою чергуванням каналів, що мають збільшену A_2 або зменшену a_1 площа горла. За результатами Фур'є-аналізу нестационарних сил проведено спектральний аналіз динамічної складової цих сил. Отримано зниження рівня нестационарних аеродинамічних сил на робочій лопатці по частоті $z \cdot f_n$, де f_n - частота обертання ротора, z - кількість лопаток соплового апарату.

Ключові слова: нестационарне протягом, збудлива аеродинамічна сила, ступінь турбіни.

Поступила (received) 08.01.2016