

РАСЧЁТ ВОЗБУЖДАЮЩЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ЛОПАТКУ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, НАХОДЯЩУЮСЯ В ПОЛЕ НЕРАВНОМЕРНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

©2014 А.И. Ермаков¹, А.О. Шкловец¹, Д.Г. Федорченко²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²ОАО «Металлист – Самара»

Работа посвящена созданию методики расчёта возбуждающей нагрузки, действующей на лопатки рабочих колёс газотурбинных двигателей (ГТД), находящиеся в условиях окружной неравномерности газовой нагрузки. Наличие в тракте двигателя плохо обтекаемых тел, например стоек опоры двигателя, вызывает существенную окружную неравномерность потока. Вследствие этого, в лопатках возникают опасные резонансные колебания, которые могут привести к поломке изделия. Определение амплитуд возбуждающих гармоник на этапе проектирования позволит оценить степень опасности вынужденных колебаний лопаток. Разработанная методика определения возбуждающих гармоник в потоке позволяет рассчитывать их амплитуды, определять влияние на них конструктивных изменений в проточной части двигателя. Конечно-элементная модель состоит из лопаток входного направляющего аппарата, рабочих лопаток и опоры с шестью стойками. Газодинамическая нагрузка определяется в узлах рабочих лопаток, однако при малом числе лопаток, например для вентиляторных рабочих колёс, точность определения амплитуд возбуждающих гармоник может быть недостаточной. Используя возможности Ansys CFX, газодинамическую нагрузку определяли в дополнительных областях тракта между рабочими лопатками. Определено изменение амплитуд гармоник в зависимости от числа точек измерения нагрузки.

Газотурбинный двигатель, рабочая лопатка, направляющий аппарат, окружная неравномерность, вынужденные колебания, возбуждающая гармоника, Ansys, CFX.

Введение. Основным источником возбуждения колебаний рабочего колеса (РК) газотурбинного двигателя является окружная неоднородность газового потока, обтекающего лопатку. Она проявляется в виде неоднородности поля скоростей и поля давлений в потоке перед и за РК. Неоднородность приводит к тому, что интенсивности газовой нагрузки в окружном и радиальном направлениях непостоянны по окружности проточной части. В результате этого на любую из лопаток при вращении РК действует непостоянная по величине интегральная газодинамическая сила Q_r [1].

Поскольку газодинамическая сила Q_r является периодической величиной, т.е. $Q_r(\alpha) = Q_r(\alpha + 2\pi)$, то её можно разложить в ряд Фурье:

$$Q_r = \sum_{m_e} Q_m \cdot \cos(m_e \alpha - \gamma_m) = \sum_{m_e} Q_{r m_e}, \quad (1)$$

где Q_m - амплитуда составляющей гармоники, m_e - номер гармоники, α - цент-

ральный угол, γ_m - фазовый сдвиг по окружности.

Разложение (1) позволяет газовую нагрузку, имеющую сложный характер распределения по окружности, представить в виде суммы составляющих гармоник, каждая из которых представляет собой цепь волн нагрузки, укладываемых по окружности проточной части.

Для вращающегося рабочего колеса любая из составляющих в разложении (1) является возбуждающей гармоникой, представляющей собой цепь назад бегущих волн. Нагрузка вращается с угловой скоростью ω , равной угловой скорости вращения РК. Таким образом, окружная неоднородность газового потока для колеса эквивалентна воздействию бесконечной совокупности возбуждающих гармоник, каждая из которых представляет собой цепь m_e назад бегущих волн нагрузки, совершающей

гармонические колебания во времени с частотой $f_g = m_g n_c$, где $n_c = \frac{\omega}{2\pi}$.

Расчётная модель (рис. 1). Для расчёта поля неравномерности потока разработана условная модель ступени компрес-

сора и опоры, состоящей из двух направляющих аппаратов, рабочего колеса и стоек опоры. Исходные данные для расчёта: давление на входе в направляющий аппарат 101,3 кПа, температура на входе 288 К, давление на выходе 100 кПа, модель турбулентности к-ε.

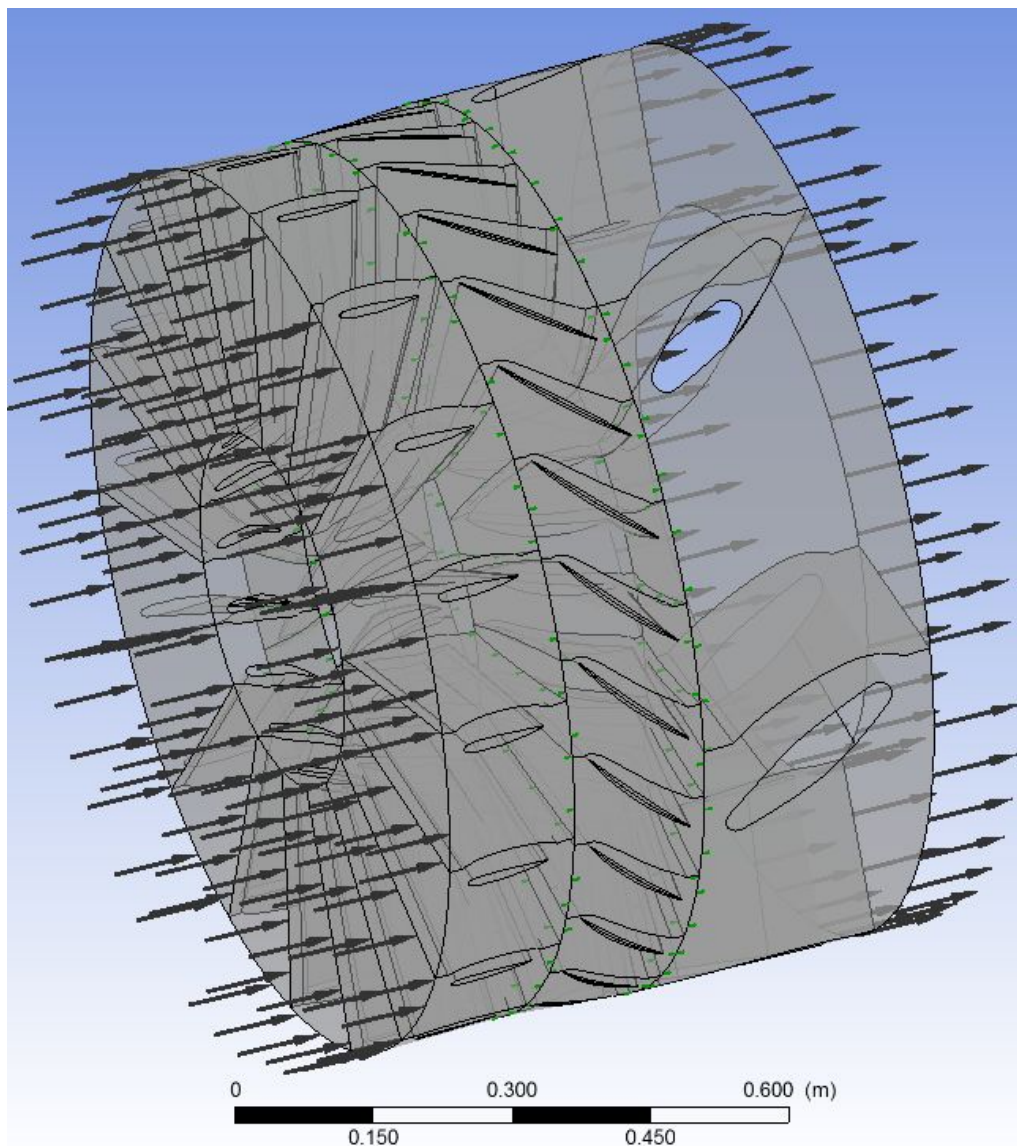


Рис. 1. CFD-модель

Анализ структуры потока в лопаточных венцах НА 1, РК, НА 2, опоры выявил, что в области стоек наблюдается существенная окружная неравномерность потока (рис. 2).

Лопатка, помещённая в область неравномерного газового потока, является зондом для снятия давления потока. Рас-

пределённая по лопаточному венцу нагрузка экспортируется в Ansys Mechanical, где с использованием возможностей языка программирования APDL нагрузка раскладывается в ряды Фурье по сходственным узлам лопаток. Порядок получения амплитуд возбуждающих гармоник описан ниже.

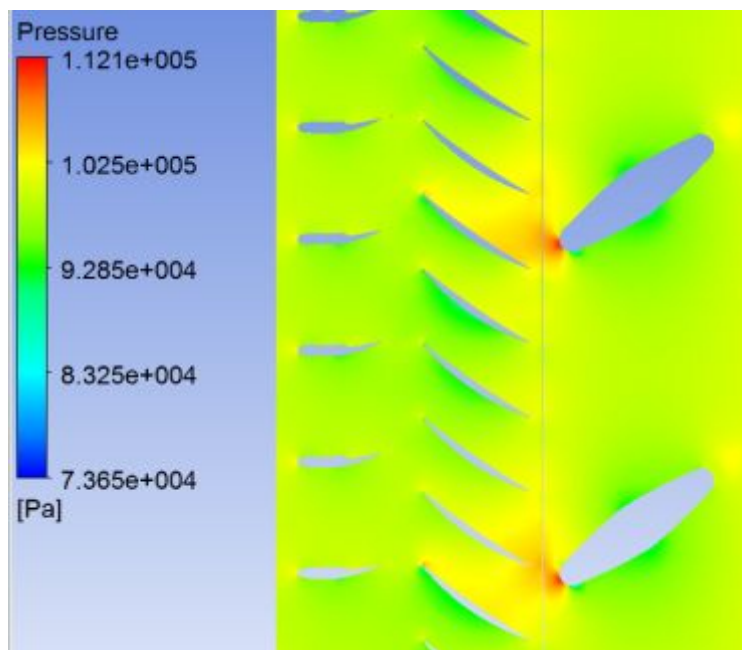


Рис. 2. Распределение статического давления в канале

1. Строятся точки с координатами узлов лопатки из CFX (рис. 3).

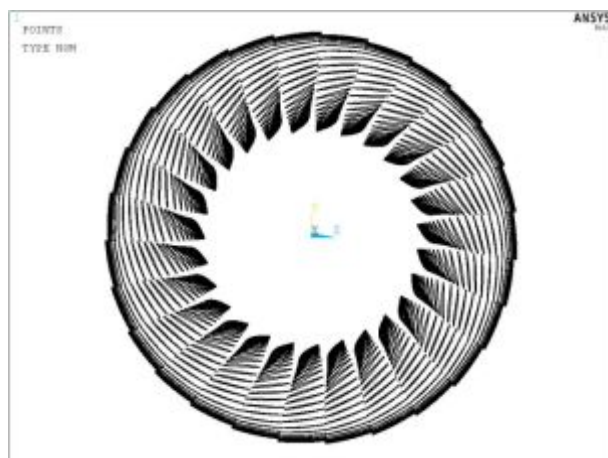


Рис. 3. Узлы рабочих лопаток из CFD-модели

2. Создаётся массив, содержащий координаты узлов лопатки в цилиндрической системе координат. Это необходимо для обеспечения возможности выбора необходимых сходственных узлов, у которых координата Y отличается на шаг лопатки рабочего колеса.

3. Так как вначале строятся точки корытца лопаток, а затем спинок, то нумерация узлов в пределах одной лопатки непоследовательна. Поэтому необходимо создать массивы данных по

каждой лопатке, содержащие соответствующие номера точек.

4. Выделяются узлы, принадлежащие одной лопатке, и при помощи матричных операций создаётся массив, в которых номера узлов в пределах одной лопатки выстроены в порядке возрастания.

5. Создаются массивы номеров узлов остальных лопаток таким образом, что сходственные узлы в этих массивах отличаются только угловой координатой. Таким образом, созданы 27 массивов, содержащие номер узлов каждой лопатки рабочего колеса.

6. Создаётся массив, содержащий значения давления, структурированные по каждой лопатке. Для этого при помощи матричной операции каждый массив номеров узлов сопоставляется с исходным массивом координат и давлений в узлах лопаток.

Таким образом, можно определить наиболее опасные возбуждающие гармоники, действующие на лопатку, и, представив гармонику в виде назад бегущей волны, провести динамический расчёт напряжений в лопатке. Для определения опасных режимов работы компрессора строится резонансная диаграмма колеба-

ний лопатки. Однако, учитывая дискретное распределение лопаток по окружности, необходимо определить, с какой точностью производить снятие давления из потока. Вопрос наиболее актуален для вентиляторных лопаток, число которых недостаточно велико.

Определение амплитуд возбуждающей нагрузки. Число рабочих лопаток в CFD-расчёте 27, число возбуждающих гармоник 13. В первом приближении экспорт распределённой нагрузки осуществлялся с поверхностями рабочих лопаток (рис. 4).

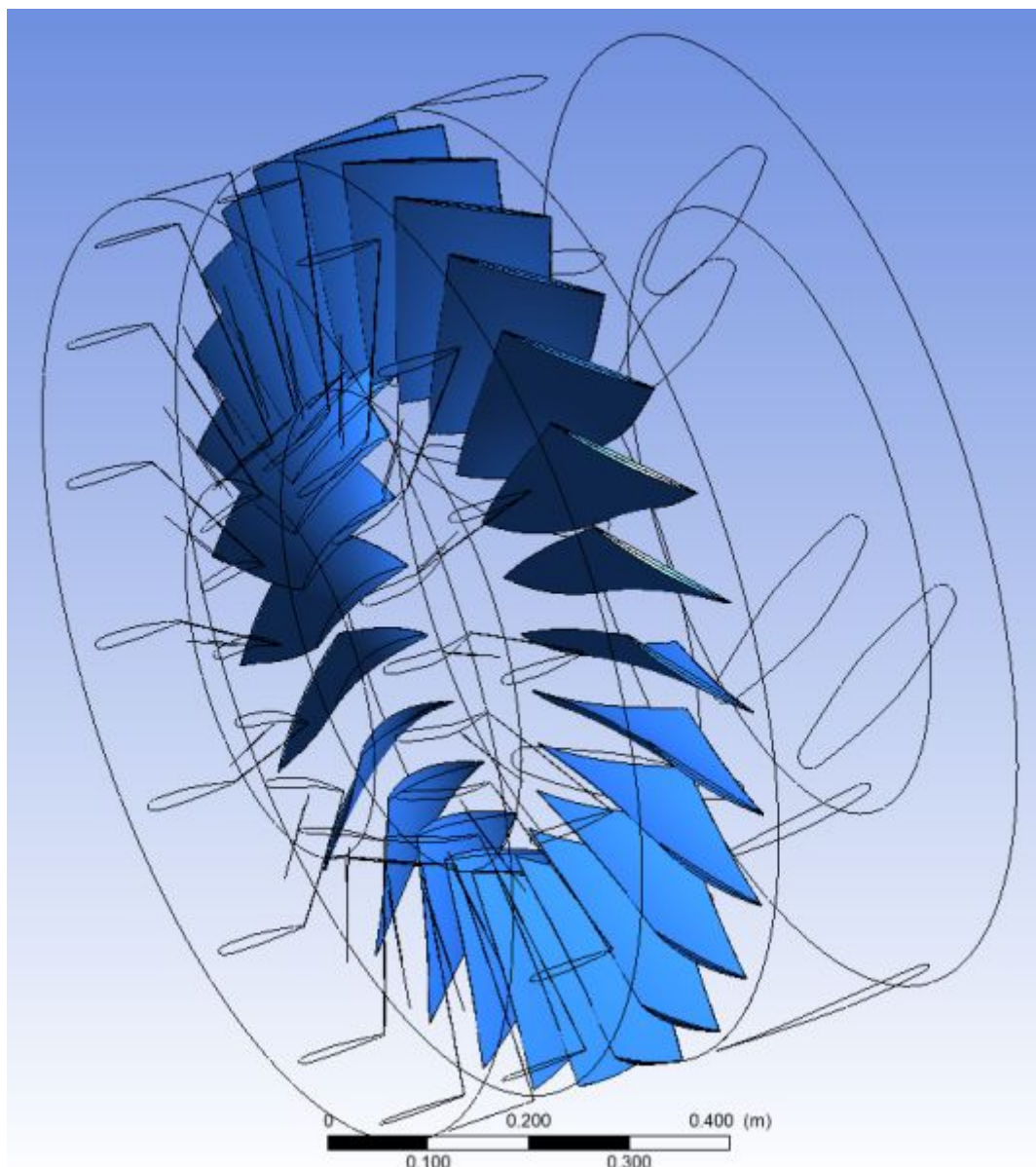


Рис. 4. Поверхности экспорта нагрузки

Для анализа влияния количества зондов снятия давления в CFD-Post создавались промежуточные поверхности экспорта нагрузки, повторяющие контур лопатки (рис. 5). Во втором приближении число лопаток для снятия нагрузки равнялось 54, в третьем - 108 и в четвёртом - 162.

патки (рис. 5). Во втором приближении число лопаток для снятия нагрузки равнялось 54, в третьем - 108 и в четвёртом - 162.

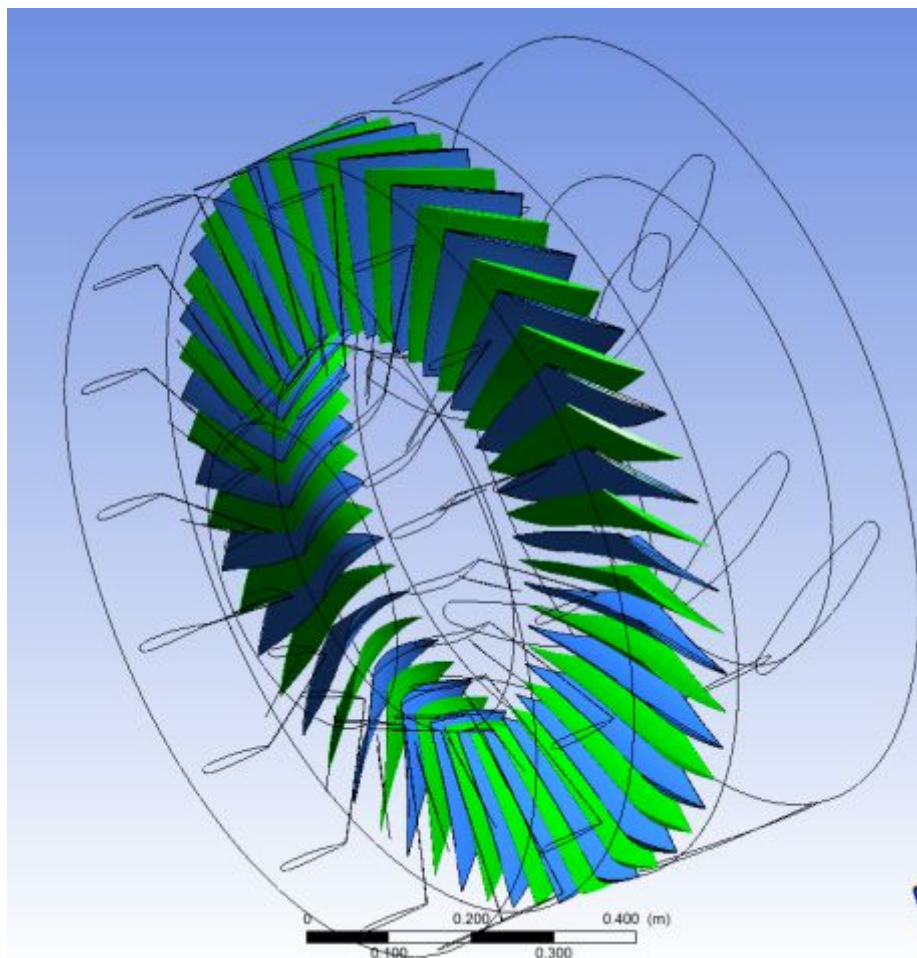


Рис. 5. Добавление промежуточных поверхностей для экспорта нагрузки

Таким образом, были рассчитаны амплитуды возбуждающих гармоник для рабочих лопаток вентилятора при различном числе точек для определения давления в потоке.

На рис. 6 приведены средние амплитуды возбуждающих гармоник при различном числе точек снятия нагрузки. Очевидно, что для подобной CFD-модели максимальную амплитуду будет иметь шестая гармоника (по числу стоек опоры).

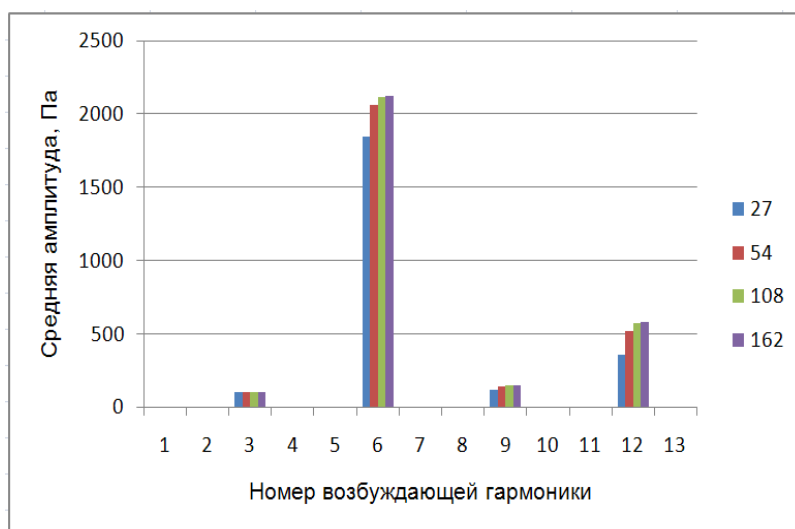


Рис. 6. Средняя амплитуда возбуждающих гармоник давления в узлах лопаток

С увеличением числа точек снижается погрешность определения амплитуды гармоник. Так, например, для наиболее опасной шестой гармоники при двукратном увеличении числа точек (с 27 до 54) средняя амплитуда изменяется на 11%.

При увеличении числа точек до 108 средняя амплитуда шестой гармоники изменяется на 2,5%, при увеличении числа точек до 162 средняя амплитуда изменяется на 0,3%. Для менее опасных гармоник уточнение может достигать 40-50% (рис. 7).

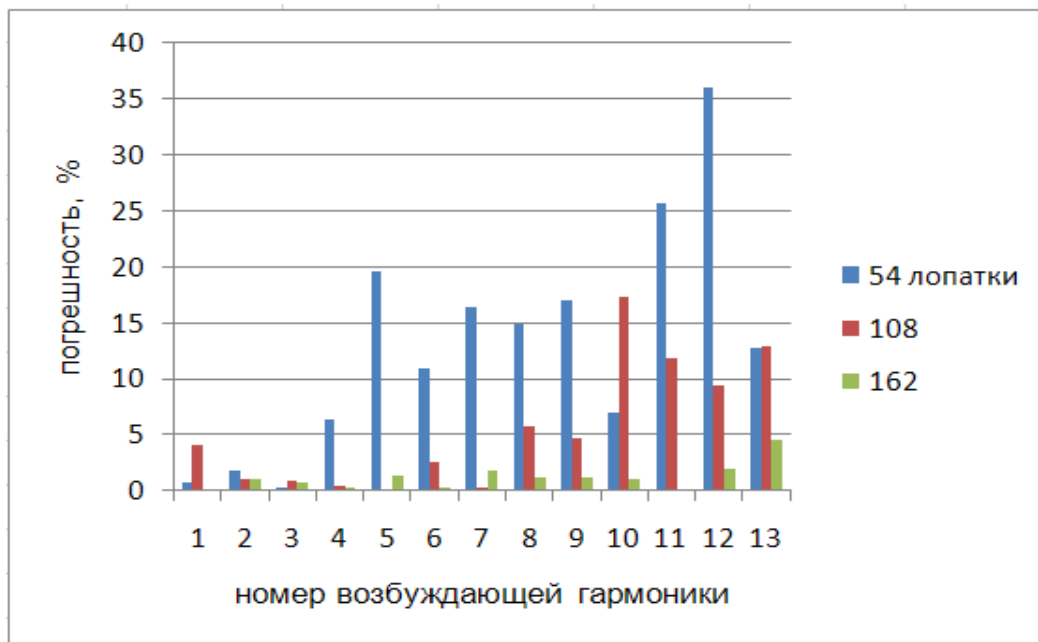


Рис. 7. Уточнение амплитуды возбуждающих гармоник

Вывод. При определении возбуждающих нагрузок на рабочие лопатки ГТД, возникающих в неравномерном газовом потоке, важно учитывать число рабочих лопаток. При малом числе лопаток РК, например для вентилятора, недостаточно рассматривать нагрузку, действующую в области пера лопатки. Необходимо учитывать распределение газовой нагрузки в межлопаточном канале, увеличивая

число сходственных точек снятия нагрузки. Необходимо минимум двукратное увеличение числа зондов снятия нагрузки в CFD-расчёте.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Иванов В.П. Колебания рабочих колёс турбомашин. М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
2. Аксенов А.П. Математический анализ (ряды Фурье): учебное пособие. СПб.: Нестор, 1999. 85 с.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергети-

- ческих установок: учебник для ВУЗов. Том V. М.: Машиностроение, 2008. 198 с.
4. Шкловец А.О., Попов Г.М., Колмакова Д.А. Оптимизация проточной части ступени компрессора ГТД с целью обеспечения динамической прочности в рабочем лопаточном венце // Вестник двигателестроения. 2013. № 2. С. 192-197.

Информация об авторах

Шкловец Александр Олегович, младший научный сотрудник отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Вибрационная прочность и надёжность авиационных изделий», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ssau_shklovets@mail.ru. Область научных интересов: статическая и динамическая прочность турбомашин.

Ермаков Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструкции и проек-

тирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: статическая и динамическая прочность турбомашин.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, главный конструктор ОАО «Металлист-Самара», г. Самара. E-mail: dgfedorchenko@yandex.ru. Область научных интересов: статическая и динамическая прочность турбомашин.

CALCULATION OF EXCITING AERODYNAMIC LOAD ON A GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADE INDUCED BY THE EFFECT OF A NON-UNIFORM GAS FLOW

©2014 A.I. Ermakov¹, A.O. Shklovets¹, D.G. Fedorchenko²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Joint-Stock Company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation

Work is devoted to the creation of a design procedure of the exciting loads occurring on the impeller blades of GTE in situations of uneven circumferential gas load. The presence in the path of the engine bluff bodies, such racks engine mounts, causing substantial circumferential flow unevenness. Consequently, in blades having dangerous resonant vibrations that can lead to product failure. Determination of amplitude of the excited harmonics in the design phase will assess the severity of forced oscillations of the blades. The technique of determining the excitation of harmonics in the flow allows the calculation of the amplitude, to determine the impact of structural changes in the running of the engine on them. The finite element model consists of the inlet guide vane, rotor blades and bearing racks. Gas dynamic load is determined in units of rotor blades, but a small number of blades, eg for fan impellers, the accuracy of the excitation amplitudes of harmonics may be insufficient. Using the capabilities of Ansys CFX, gas-dynamic load is defined in additional areas path between the rotor blades. In work changing amplitudes of harmonics based on the number of measurement points of load.

Gas turbine engine, blade, guide vane, circumferential variation, forced oscillations, harmonic wave, Ansys, CFX.

References

1. Ivanov V.P. Kolebaniya rabochikh koles turbomashin [Fluctuations impellers of turbomachiner]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 224 p.

2. Aksenov A.P. Matematicheskiy analiz (ryady Fur'e): uchebnoe posobie [Mathematical analysis (Fourier series)]. SPb.: Nestor Publ., 1999. 85 p.

3. Inozemtsev A.A., Nihamkin M.A., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok: uchebnik dlya VUZov. [Basics of designing aircraft engines and power plants. V. 5]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. 198 p.

4. Shklovets A.O., Popov G.M., Kolmakova D.A. Optimization of the compressor stage blading of gas turbine engine to ensure the dynamic strength in rotor blade row // Vestnik dvigatelestroeniya. 2013. No. 2. P. 192-197. (In Russ.)

About the authors

Shklovets Aleksandr Olegovich, associate research fellow of sectoral research laboratory "Vibration resistance and reliability of aeronautical products", Samara State Aerospace University. E-mail: ssau_shklovets@mail.ru. Area of Research: static and dynamic strength of turbomachinery.

Ermakov Aleksander Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Professor,

Samara State Aerospace University. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of Research: static and dynamic strength of turbomachinery.

Fedorchenko Dmitriy Gennadievich, Candidate of Science (Engineering), chief designer of JSC «Metallist-Samara». E-mail: dgfedorchenko@yandex.ru. Area of Research: static and dynamic strength of Turbomachinery.