

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД, ВОЗБУЖДАЕМЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ СЛЕДАМИ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ

Абдухакимов Ф.А.¹, Веденеев В.В.¹, Зайко Ю. С.¹, Гареев¹ Л.Р., Колотников М.Е.¹,
Макаров П.В.², Филиппенко В.А.¹, Чепига С. А.², Ерохин М.А.².

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, farruh.abduhakimov7@gmail.com

²ПК "Салют" АО «ОДК», г. Москва

Ключевые слова: резонанс, лопатка, демпфирование.

Основной проблемой доводки компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) является борьба с усталостными разрушениями рабочих лопаток (РЛ) и лопаток направляющих аппаратов (НА). При этом основной причиной, вызывающей развитие колебания РЛ, являются резонансные колебания, вызванные возбуждением от аэродинамических следов лопаток впереди и сзади стоящих НА. Основным методом борьбы с резонансными колебаниями РЛ на этапе проектирования является отстройка их собственных частот возбуждающих гармоник вблизи частоты вращения номинального режима для стационарных ГТД или вблизи максимальных частот вращения ротора компрессора для авиационных ГТД. Однако, для гармоник возбуждения, соответствующих числу впереди или сзади стоящих лопаток НА это сделать, как правило, невозможно из-за того, что в этой области спектр собственных частот лопаток становится практически сплошным. В связи с этим задача прогнозирования амплитуд резонансных колебаний РЛ на стадии проектирования, вызванная возбуждением от лопаток НА является крайне актуальной. Важно отметить, что, судя по литературным данным, описанная задача до конца не решена как в нашей стране, так и за рубежом.

В основном в работах, посвященных проблеме расчетной оценки амплитуд резонансных колебаний РЛ компрессоров ГТД расчет аэродинамических возмущающих сил от лопаток НА проводится или в квазидвумерной постановке [1–2], или прямым численным моделированием в полностью трехмерной постановке [3–5]. Стоит отметить, что в нескольких работах сравнение расчетных значений амплитуд резонансных напряжений в РЛ с полученными в результате экспериментов либо вообще не проводилось [1,3], либо показало достаточно большое различие [4]. В [1] были определены конструктивные факторы и степень их влияния на высокий уровень резонансных напряжений. В [3] рассмотрены способы снижения амплитуды резонансных колебаний. В работе [5] результаты расчетов амплитуд резонансных напряжений сравнивались с измерениями при проведении экспериментов в рамках проекта Future и показали хорошее совпадение.

В настоящей работе, для определения амплитуды резонансных колебаний РЛ применяется метод, предполагающий расчет неустановившегося течения воздуха в лопаточном венце с использованием упрощенного подхода, позволяющего учитывать влияние следов НА без моделирования полной (360 градусов) геометрии. После расчета нестационарного обтекания РЛ проводится расчет частотного отклика под действием гармонической составляющей аэродинамической периодической нагрузки, обусловленной числом лопаток НА. Выделение синусоидальной части нагрузки осуществляется с помощью специально разработанной программы. Определение амплитуды колебаний проводится с учетом конструкционного и аэродинамического демпфирования. В силу отсутствия надежных аналитических и вычислительных методов определения конструкционного демпфирования его оценка проводится экспериментальными методами.

Приводятся результаты расчёта амплитуд вынужденных колебаний РЛ, выполненного по разработанной методике, для компрессоров низкого давления ГТД от возбуждения аэродинамическими следами лопаток как впереди, так и сзади стоящих НА. Рассматриваются бандажированные РЛ и рабочие колеса блисковой конструкции. Проведено сравнение расчета нестационарных газодинамических нагрузок, действующих на лопатку ротора со стороны

аэродинамических неоднородностей обтекания лопаток ближайшего статора с результатами полного трехмерного расчета. Получено хорошее совпадение результатов. Проведена валидация разработанной методики на выбранных резонансных режимах по имеющимся экспериментальным замерам амплитуд резонансных колебаний лопаток. Получено хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом, как при малой амплитуде вынужденных колебаний около 1 кгс/мм^2 , так и при достаточно больших значениях больше 8 кгс/мм^2 .

Список литературы

1. Хориков А.А. и др. Расчётно-экспериментальные исследования вынужденных колебаний рабочих лопаток 1 ступени вентилятора изделия 99 от входного направляющего аппарата. Технический отчёт ЦИАМ, 1989.
2. Августинович В.Г. и др. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. М.: Машиностроение, 2005.
3. А.И. Ермаков и др. Расчёт возбуждающей аэродинамической нагрузки на лопатку компрессора газотурбинного двигателя, находящуюся в поле неравномерного газового потока. Вестник СГАУ, № 5 (47), часть 4, 2014.
4. C. Degenrofer et al. Experimental and numerical investigation of blade resonance in a centrifugal compressor for varying gas properties. J. Glob. Power Propuls. Soc.. 2018, Vol. 2, pp. 415–428.
5. F. Vanti et al. An integrated numerical procedure for flutter and forced response assessment of turbomachinery blade-rows. Proceedings of 13th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC13, 2019; Lausanne, Switzerland.

Сведения об авторах

Абдухакимов Ф.А., младший научный сотрудник НИИ механики МГУ. Область научных интересов: флаттер и вынужденные колебания конструкций в потоке газа.

Веденев В.В., д.ф.-м.н., заместитель директора по НИР НИИ механики МГУ. Область научных интересов: линейное и нелинейное взаимодействие гибких конструкций с потоком газа.

Гареев Л.Р., младший научный сотрудник НИИ механики МГУ. Область научных интересов: устойчивость течений, ламинарно-турбулентный переход, струйные течения.

Зайко Ю.С., к.ф.-м.н, старший научный сотрудник, НИИ механики МГУ. Область научных интересов: устойчивость течений, струйные течения, динамика природных склоновых потоков.

Колотников М.Е., профессор, д.т.н., ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ. Область научных интересов: прочность ГТД.

Макаров П.В., к.т.н., заместитель генерального конструктора по прочности, технической экспертизе и сертификации производственного комплекса «Салют» АО «ОДК», Область научных интересов: прочность ГТД.

Филиппенко В.А., к.т.н., старший научный сотрудник НИИ механики МГУ. Область научных интересов: газовая динамика и аэроупругость турбомашин.

Чепига С.А., начальник конструкторского бюро производственного комплекса «Салют» АО «ОДК». Область научных интересов: динамическая прочность ГТД.

Ерохин М.А., начальник конструкторского отдела экспериментальных исследований производственного комплекса «Салют» АО «ОДК». Область научных интересов: многоцикловая усталость, экспериментальные методы исследования прочности деталей ГТД.

**METHOD FOR THE CALCULATION OF THE RESONANT OSCILLATIONS
AMPLITUDE OF THE TURBOMACHINE BLADES, TAKING INTO ACCOUNT TRACES
FROM GUIDE VANES**

Abdukhakimov.F.A¹, Vedenev V.V.¹, Gareev L.R.¹, Zayko J.S.¹, Kolotnikov M.E.¹,
Makarov P.V.², Filippenko V.A.¹, Chepiga S.A.², Erokhin M.A.²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, farruh.abduhakimov7@gmail.com

²Salut Gas Turbine Engineering Research and Production Center, Moscow, Russia

Keywords: resonance, blade, damping

In this work, forced vibrations of compressor blades are studied, taking into account traces from closely spaced guide vanes. Based on the developed method, the amplitude of resonant vibrations of the blades for various models and airflow parameters was determined. The results of the numerical calculation are validated by the experimental data.