

УДК 621

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

С. Ю. Данилкин¹, В. В. Шкуров², Т. И. Мазикина³, Д. А. Редькин⁴, В. А. Телешев⁵

¹ danilkin@rtc.ciam.ru, ²⁻⁵ 20202@rtc.ciam.ru

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова»
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

Поступила в редакцию 22.03.2019

Аннотация. Представлены результаты исследования динамической прочности лопаток турбины высокого давления в составе полноразмерного двухконтурного турбореактивного двигателя при стендовых испытаниях с применением методики бесконтактной диагностики резонансных колебаний. Исследование выполнено в условиях повышенных температур рабочей среды с использованием высокочастотных высокотемпературных охлаждаемых датчиков пульсаций статического давления. Приведены результаты исследований характеристик высокотемпературного измерителя пульсаций давления на основе микроволновых технологий. Показано, что чувствительность разработанного измерителя достаточна для его использования в системах бесконтактной диагностики колебаний деталей роторов турбомашин.

Ключевые слова: колебания лопаток; резонанс; пульсации потока; бесконтактная диагностика колебаний; спектральный анализ; стендовые испытания.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное стремление к снижению весовых характеристик авиационных двигателей приводит к повышению вибрационной нагруженности лопаток рабочих колес и способствует возникновению опасных аэроупругих процессов (флаттер, вращающийся срыв, резонансные колебания лопаток, помпаж). Для авиационных двигателей 5-го и последующих поколений характерным является дальнейшее повышение напорности ступеней и использование так называемых блисковых конструкций, что увеличивает аэродинамическую нагрузку и снижает конструкционное демпфирование колебаний.

Аэроупругие процессы в ГТД характеризуются сложным взаимодействием потока газа с колеблющимися лопатками [1]. Современные методы расчета и проектирования ГТД не позволяют полностью исключить возникновение в них опасных аэроупругих колебаний из-за сложности моде-

лирования нестационарных аэродинамических сил, действующих на лопатки. В зависимости от действия нестационарных аэродинамических сил, от сочетания подводимой и рассеиваемой энергии в лопатках могут возникать различные виды опасных колебаний.

В ЦИАМ накоплен большой опыт проведения экспериментальных исследований аэроупругих процессов в ГТД на стендах института и предприятиях промышленности с использованием новых технологий обработки и анализа динамических сигналов. Развитие измерительной и вычислительной техники за последнее десятилетие дало толчок к развитию новых технологий обработки, анализа и 3D представления результатов исследования аэроупругих процессов в ГТД с применением алгоритмов на базе быстрого преобразования Фурье, Прони, вейвлет-преобразования и вероятно статистических методов [2–4]. В настоящее время вы-

числительные возможности современной измерительной аппаратуры позволяют осуществлять спектрально-корреляционный анализ колебаний лопаток с 3D отображением взаимных спектрально-фазовых и корреляционных характеристик [5] в темпе эксперимента при проведении исследований динамической прочности и устойчивости узлов авиационных ГТД.

В ЦИАМ были разработаны и запатентованы методы диагностики автоколебаний рабочего колеса и других видов колебаний лопаток в составе осевой турбомшины [6–9]. Данные методы успешно применяются в настоящее время при проведении экспериментальных исследований динамической прочности лопаток двигателей различного назначения на стендах института и предприятиях промышленности.

В настоящей работе представлены результаты развития разработанных в ЦИАМ методов для исследования колебаний лопаток рабочих колес турбомашин при стендовых испытаниях в условиях повышенных температур рабочей среды.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЯ

При колебаниях рабочие лопатки являются вращающимся источником возмущений потока, обусловленным видом деформаций и частотным спектром. Известно, что при флаттере эти возмущения относительно неподвижного датчика реализуются в виде амплитудно-фазомодулированных волн деформации, бегущих по вращению колеса. Такой вывод был сделан на основе рассмотрения физических моделей явления и подтвержден многочисленными экспериментами. С использованием этих физических моделей были разработаны методы диагностики флаттера. В основе этих методов лежит спектральный анализ пульсаций потока на диагностических частотах.

Применительно к резонансным колебаниям такие подходы практически отсутствуют, однако эффективность диагностики флаттера по изменению спектра пульсаций в высокочастотной области вблизи частот следования лопаток [10] предопределила

разработку аналогичного метода для резонансных колебаний [6, 8]. Была предложена математическая модель бесконтактной диагностики резонансных колебаний, основанная на спектральном анализе сигнала с датчика пульсаций статического давления на частоте следования лопаток. Также было установлено, что при возникновении резонансных колебаний лопаток в однородном колесе в сигналах с датчиков пульсаций статического давления потока над лопатками рабочего колеса будет происходить уменьшение амплитуды спектральной составляющей в пульсациях потока на частоте следования рабочих лопаток $f = Nf_p$, где N – число лопаток, f_p – частота вращения ротора. Схема реализации способа диагностики резонансных колебаний лопаток представлена на рис. 1.

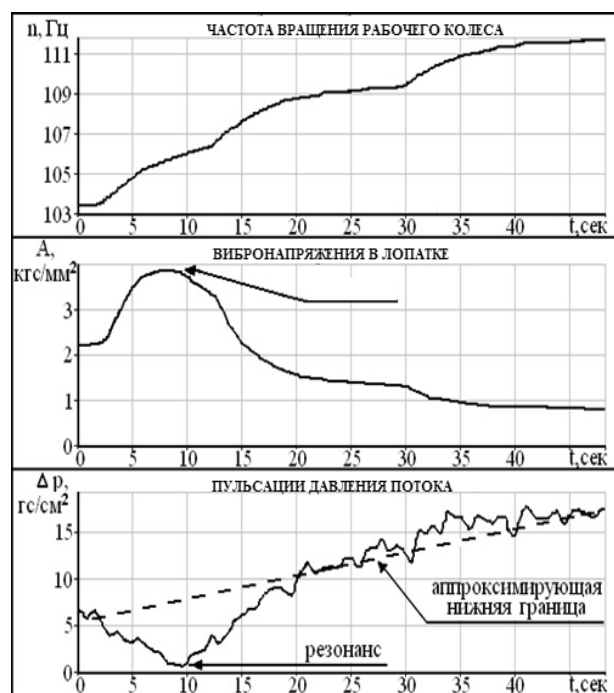


Рис. 1. Схема реализации способа диагностики резонансных колебаний лопаток

Однако реальные рабочие колеса являются неоднородными, и частоты колебаний лопаток в них из-за допусков на изготовление различаются, вследствие чего резонансные колебания лопаток будут возникать на разных частотах вращения. При этом следует учесть, что разброс собственных частот лопаток в колесе обычно подчиняется нормальному закону распределения (если нет направленной разночастотности)

и уменьшение спектральной составляющей на частоте следования лопаток будет происходить на тех частотах вращения ротора, на которых большинство лопаток находятся в резонансе. Эффективность этого метода была подтверждена экспериментально при стендовых испытаниях авиационных двигателей различного назначения.

В данной работе представлены результаты исследования динамической прочности лопаток турбины высокого давления (ТВД) в составе полноразмерного двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) в стендовых условиях (рис. 2) с применением методики бесконтактной диагностики резонансных испытаний.



Рис. 2. Объект испытаний, препарированный датчиками пульсаций

Исследуемая конструкция имела ряд особенностей. Во-первых, рабочая температура газов в исследуемом узле турбины высокого давления могла достигать $t_2 = 800$ °С. Во-вторых, связи с тем, что двигатель двухконтурный, необходимо было разработать конструкцию, позволяющую разместить датчик во внутреннем контуре, и провести необходимые коммуникации через внешний контур. В-третьих, исследуемые лопатки турбины имели бандажные полки, что значительно затрудняло проведение исследований их колебаний, и ранее методика применялась только для диагностики колебаний лопаток компрессоров и турбин, не имеющих бандажных полок, и датчик располагался над исследуемым колесом.

Требования по неравномерности АЧХ измерительных каналов и частотному диапазону не позволяли использовать в данной работе волноводную схему подключения

датчиков пульсаций, в связи с этим было принято решение применять высокочастотные высокотемпературные охлаждаемые датчики пульсаций статического давления фирмы «Kulite».

Для проведения исследования была выполнена доработка и подготовка двигателя в соответствии с разработанной конструкторской документацией, подготовлена и смонтирована стендовая система диагностики колебаний лопаток ТВД в режиме реального времени. Измерения пульсаций потока осуществлялись в сечении соплового аппарата за рабочими лопатками первой ступени. Место расположения датчиков в поясе первого соплового аппарата турбины низкого давления схематично представлено на рис. 3.



Рис. 3. Место расположения датчиков в поясе первого соплового аппарата турбины низкого давления

Для обеспечения водяного охлаждения высокотемпературных датчиков пульсации давления испытательный стенд был доработан для подачи воды с давлением не менее 2 бар и расходом не менее 0,5 л/мин. Для очистки воды от механических примесей с размером частиц больше 100 мкм был применен фильтр. К двум датчикам были подключены шланги подачи и отвода воды охлаждения. Препарирование узла турбины высокотемпературными охлаждаемыми датчиками пульсации статического давления фирмы «Kulite» показано на рис. 4 и 5.

При проведении исследовательских работ было разработано и реализовано следующее:

- схема препарирования узла турбины высокотемпературными датчиками пульсации давления с целью исследования динамической прочности лопаток ТВД;

– схема информационно-измерительной системы для измерения и регистрации пульсаций;

– оригинальная конструкция для установки охлаждаемых датчиков пульсаций в узле турбины, для которой выполнена доработка корпуса турбины (рис. 5);

– система водяного охлаждения датчиков пульсаций, установленных в корпусе турбины, с системой фильтрации охлаждающей жидкости.

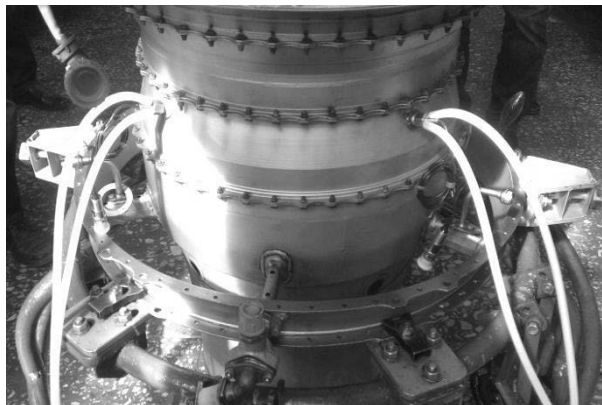


Рис. 4. Места установки охлаждаемых датчиков пульсации статического давления фирмы «Kulite» на корпусе турбины

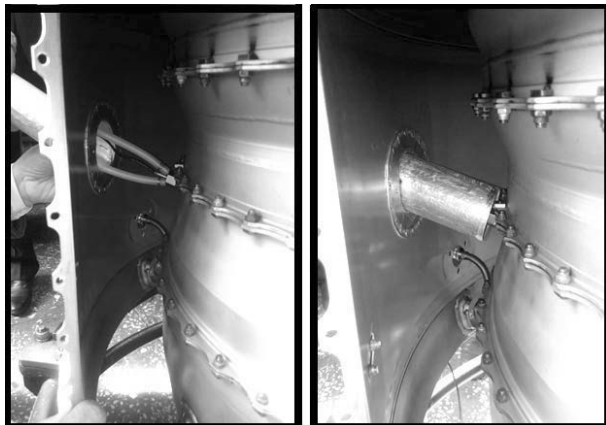


Рис. 5. Расположение измерительных каналов во внешнем контуре двигателя

Экспериментальные исследования колебаний рабочих лопаток I ступени ТВД в составе двигателя были проведены во всем эксплуатационном диапазоне частот вращения от режима «малого газа» до максимальной частоты вращения взлетного режима. На основании проведенного узкополосного спектрального анализа акустических сигналов (рис. 6), измеренных с помощью высокочастотных высокотемпературных датчиков пульсаций давления, установленных на корпусе узла турбины.

С учетом результатов расчета частот и форм собственных колебаний лопаток и данных по тензометрированию лопаток ТВД были определены резонансные частоты вращения ротора ТВД, а также идентифицированы частоты и формы колебаний лопаток, по которым реализуются наиболее сильные резонансы. Результаты диагностики резонансных режимов представлены на рис. 7.

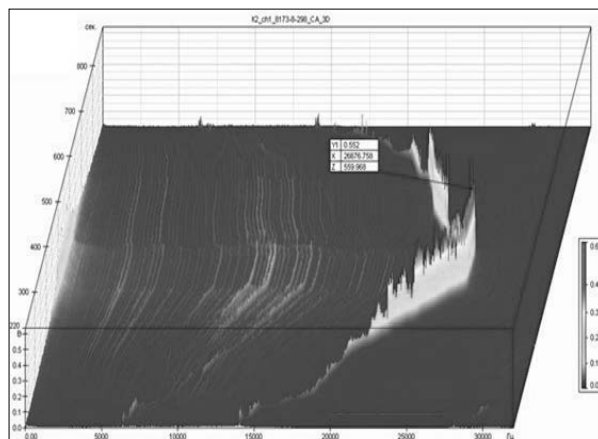


Рис. 6. Спектр сигнала с датчика пульсации давления

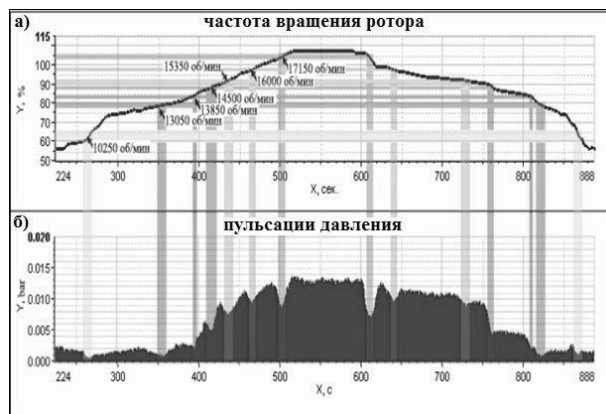


Рис. 7. Результаты определения резонансных режимов: а – график изменения частоты вращения ротора; б – график изменения амплитуды спектральной составляющей на частоте следования лопаток

С учетом рекомендаций, выданных на основании выполненных исследований, были проведены резонансно-циклические испытания лопаток I ступени ТВД с необходимой выдержкой на каждом резонансном режиме. Объем проведенных исследований вибрационной нагруженности рабочих лопаток турбины, в том числе с применением бесконтактной диагностики колебаний лопаток, позволил принять положительное решение об увеличении назначенного ресурса исследованным рабочим лопаткам турбины высокого давления ТРДД.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Разработанные в ЦИАМ методики бесконтактной диагностики различных видов колебаний по сигналам с высокочастотных датчиков пульсаций статического давления, установленных в корпусе турбомшины, используются в настоящее время практически при всех испытаниях двигателей и их узлов, проводимых при доводке и сертификации с целью подтверждения вибрационной прочности. В практике экспериментальных исследований динамической прочности хорошо себя зарекомендовали датчики пульсаций давления фирмы «Kulite» (пьезорезистивного типа) и датчики фирмы «PCB» (пьезоэлектрического типа). Однако указанные типы датчиков имеют ограничения по рабочему частотному диапазону и температуре, что не всегда позволяет применять их для исследования перспективных конструкций, работающих в условиях высоких температур ($t_{\text{газа}} > 1100$ °С) и высокочастотных динамических нагрузок.

Для обеспечения возможности исследования пульсаций потока в широком частотном и температурном диапазонах в данной работе была предпринята попытка разработать, изготовить и апробировать в лабораторных условиях макет первичного микроволнового преобразователя с целью оценки перспективности развития микроволновых систем измерения пульсаций давления применительно к исследованию колебаний деталей и узлов авиационных ГТД бесконтактным методом. Работа проводилась при участии специалистов ООО «Радарные технологии-2Т» и ПАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева [11].

Микроволновые измерения являются частью радиотехнических измерений и предполагают совокупность методов и средств измерения сигналов и устройств в диапазоне СВЧ. При этом под измерениями в технике СВЧ понимают обычно экспериментальное определение параметров и характеристик закрытых, замкнутых объектов и узлов [12–15].

Микроволновые измерения относятся к радиочастотным методам и, исходя из их названия, основаны на приеме и обработке сигналов СВЧ диапазона (3–300 ГГц). Они могут быть как пассивными, без излучения сигнала, так и активными. Для достижения цели данного проекта, а именно: «разработка высокотемпературного высокоскоростного измерителя пульсаций давления на основе микроволновых систем», наиболее подходящими являются активные методы микроволновых измерений. В зависимости от своего предназначения микроволновые измерители могут использовать различные сигналы: узкополосные или широкополосные; непрерывные или импульсные. В общем случае в состав микроволновой измерительной системы могут входить: антенная система, микроволновый модуль, СВЧ линии связи, устройство обработки.

Для подтверждения реализуемости микроволнового метода измерений пульсаций давления был выбран датчик резонансного типа. В данном варианте передатчик возбуждает электромагнитные волны в резонаторе. При многократном отражении в резонаторе образуется электромагнитное поле, которое в точке приема преобразуется в гармонический сигнал с амплитудой и фазой, зависящей от параметров резонатора и среды распространения (рис. 8).

Разрабатываемый датчик рассчитан на рабочую частоту – 15 ГГц. Он представляет собой длинный волновод (резонатор), свернутый в спираль, который интегрирован с коаксиально волноводным переходом. Через него датчик соединяется с микроволновым модулем. Волновод имеет разрез по средней линии широкой стенки, который соединяется со связанным с измеряемой средой коротким воздуховодом, расположенным в центре спирали.

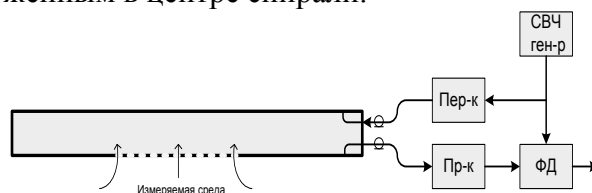


Рис. 8. Структурная схема микроволнового измерителя давления с резонатором

Конструкция первичного преобразователя микроволнового датчика пульсаций давления разрабатывалась с учетом его изготовления с применением процесса электроэрозионной обработки. Полученная в результате электродинамического моделирования внутренняя полость с оптимизированной геометрией микроволнового датчика затем транслировалась в пакет твердотельного 3D моделирования, где с ее использованием была создана 3D модель датчика (рис. 9). Внешний вид заготовок после электроэрозионной обработки показан на рис. 10. В крышке датчика монтировался полужесткий коаксиальный кабель, и датчик собирался с применением зажимного бандажа для настройки на лабораторном оборудовании. После настройки датчика выполнялось неразборное соединение основания и крышки с использованием лазерной сварки.

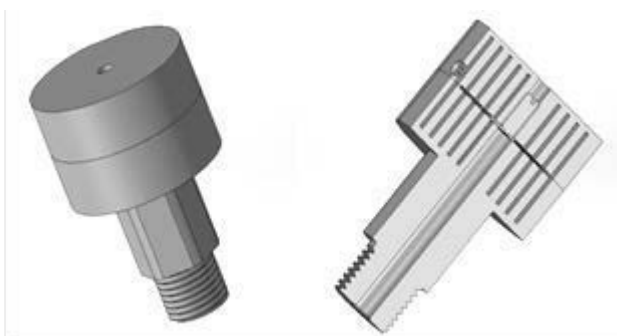


Рис. 9. 3D модель микроволнового датчика пульсаций давления



Рис. 10. Заготовки после электроэрозионной обработки

Для исследования амплитудно-частотной характеристики разработанного микроволнового датчика пульсаций давления использовалась установка периодического давления на стенде ЦИАМ.

Внешний вид установки и размещение аппаратуры при проведении испытаний показан на рис. 11. Принцип действия установки основан на создании газодинамическим пульсатором периодических давлений газовой среды в резонансной камере путем циклического перекрытия выходного сопла при вращении бесколлекторного двигателя с установленным на нем диском с прорезями. Частота генерируемых периодических давлений определяется скоростью вращения двигателя и может изменяться в диапазоне от 30 до 4000 Гц. Минимальный коэффициент гармонических искажений обеспечивается поиском резонанса путем изменения длины резонансной камеры. Генерируемое динамическое давление газа измеряется эталонным датчиком, установленным на стенке резонансной камеры, и исследуемым датчиком, который через акустический волновод соединен с резонансной камерой. Оба датчика находятся в одном сечении.

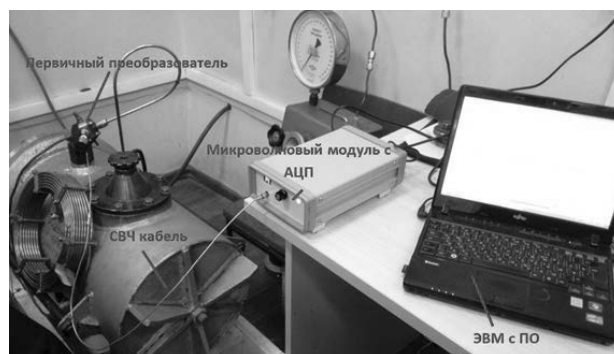


Рис. 11. Размещение аппаратуры при проведении измерений на «Пульсатор-2»

Определение амплитудно-частотной характеристики производилось при атмосферном давлении с последовательным изменением частоты генерируемых периодических давлений от 50 до 4000 Гц с шагом 50 Гц (рис. 12).

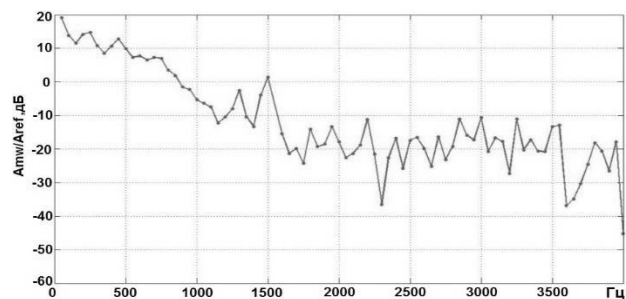


Рис. 12. Нормированная АЧХ измерителя пульсаций

По результатам испытаний были получены таблицы с показаниями амплитуд пульсаций эталонного датчика на каждой из воспроизводимых частот. Последующая обработка сигналов с микроволновой системы и сравнение с показаниями эталонного датчика производились в среде *Matlab*.

При проведении работ был изготовлен и исследован макет первичного микроволнового преобразователя, выполнена доработка микроволновой системы для измерения пульсаций давления и проведено исследование характеристик микроволнового преобразователя на испытательном оборудовании ЦИАМ.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность применения для измерения пульсации давления микроволновых систем, использующих зависимость диэлектрической проницаемости газо-воздушной смеси от давления.

В результате проведенных исследований установлено, что:

– достоинством микроволновых измерителей пульсации давления является потенциальная возможность работы при воздействии высоких температур и отсутствие в их конструкции подвижных элементов (мембран);

– повышение чувствительности и снижение габаритов микроволновых первичных преобразователей возможно при повышении рабочей частоты до 40...300 ГГц

– дополнительного исследования требуется процесс взаимодействия волн пульсации давления с электромагнитными колебаниями в волноводных СВЧ структурах и его влияние на частотные характеристики микроволновых измерителей;

– микроволновая система измерений пульсаций давления обладает достаточной чувствительностью для ее использования в системах бесконтактной диагностики колебаний лопаток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и апробирована технология бесконтактной диагностики колебаний лопаток бандажированного рабочего колеса ТВД ТРДД с применением высокочастотных высокотемпературных охлаждаемых датчиков пульсаций давления.

2. В результате применения бесконтактной диагностики с использованием охлаждаемых датчиков пульсаций давления для исследования колебаний лопаток ТВД полноразмерного ТРДД были определены резонансные режимы, на которых рекомендовано проводить резонансно-циклические испытания лопаток.

3. Для обеспечения возможности исследования пульсаций потока в широком частотном и температурном диапазонах выполнена разработка макета первичного микроволнового преобразователя и доработка микроволновой системы для измерения пульсаций давления, а также проведено исследование характеристик микроволнового преобразователя на испытательном оборудовании ЦИАМ.

4. Анализ результатов исследования частотных характеристик микроволновой системы измерений пульсаций давления показал, что ее чувствительность достаточна для использования в системах бесконтактной диагностики колебаний деталей роторов турбомашин. В дальнейшем планируется апробировать данную систему при проведении испытаний узлов перспективных двигателей, работающих в условиях высоких температур и высокочастотных динамических нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Самойлович Г. С.** Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1975. 288 с. [G. S. Samoylovich, *The excitation of vibrations of blades of turbomachines*, (in Russian). М.: Mashinostroyeniye, 1975.]
2. **Исследование** вибрационного состояния широкохордных рабочих лопаток перспективных вентиляторов / А. А. Хориков и др. // Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. М.: ТОРУСС ПРЕСС, 2010. С. 234–254. [A. A. Khorikov, et. al., "Investigation of the vibration state of wide-chord working blades of promising fans", (in Russian), in *Sovremennyye metody obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti detaley aviatsionnykh dvigateley*. М.: TORUSS PRESS, 2010.]
3. **Хориков А. А.** Исследование механизмов возникновения и развития аэроупругих процессов в газотурбинных двигателях на основе новых технологий обработки и анализа динамических сигналов // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 24-26 июня 2009): сборник тезисов. Часть 1. Самара: СГАУ, 2009. С. 124–125. [A. A. Khorikov, "Investigation of the mechanisms for the emergence and development of aeroelastic processes in gas turbine engines based on new technologies for processing and analyzing dynamic signals", (in Russian), in *Problemy i perspektivy*

tivy razvitiya dvigatelestroyeniya: sbornik tezisev. Chast' 1. Samara: SGAU, 2009.]

4. **Хориков А. А., Данилкин С. Ю., Мазикина Т. И.** Ранняя диагностика вибрационного состояния многоступенчатых осевых компрессоров авиационных двигателей на предлопаточных режимах при стендовых испытаниях // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14, № 3. Ч. 1. С. 148–159. [A. A. Khorikov, S. Y. Danilkin, T. I. Mazikina, "Early diagnostics of the vibration state of multi-foam axial compressors for aircraft engines in pre-surge modes during bench testing", in *Vestnik SGAU*, vol. 14, no. 3, Ch. 1, pp. 148-159, 2015.]

5. **Исследование** механизмов возникновения и развития классического флаттера компрессорных лопаток с применением современных методов обработки динамических процессов / А. А. Хориков и др. // Вестник двигателестроения. ХАИ. 2013. № 3. С. 136–141. [A. A. Khorikov, et. al., "Study of mechanisms of occurrence and development of classical flutter of compressor blades with the use of modern methods of processing of dynamical processes", in *Vestnik dvigatelestroyeniya. KHAI*, no. 3, pp. 136-141, 2013.]

6. **Хориков А. А., Данилкин С. Ю.** Способ диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. Патент РФ № 2451279. Оpub. 20.05.2012. Бюл. № 14. [A. A. Khorikov, S. Y. Danilkin, "Method for the diagnosis of resonant oscillations of the impeller blades in the composition of the axial turbomachine", Patent RU 2451279, 2012.]

7. **Хориков А. А., Данилкин С. Ю.** Способ диагностики вида аэроупругих колебаний лопаток рабочего колеса осевой турбомшины. Патент РФ № 2451922. Оpub. 27.05.2012. Бюл. № 15. [A. A. Khorikov, S. Y. Danilkin, "Method for diagnosing the type of aeroelastic vibrations of the impeller blades axial turbomachine", Patent RU 2451922, 2012.]

8. **Хориков А. А., Данилкин С. Ю.** Устройство диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. Патент РФ № 109287. Оpub. 10.10.2011. Бюл. № 28. [A. A. Khorikov, S. Y. Danilkin, "Device for diagnosing resonant oscillations of impeller blades as part of an axial turbomachine", Patent RU 109287, 2011.]

9. **Устройство** для бесконтактной диагностики автоколебаний рабочего колеса турбомшины / А. А. Хориков и др. // Патент РФ № 118745. Оpub. 27.07.2012. Бюл. № 21. [A. A. Khorikov, et. al., "Device for contactless diagnostics of oscillations of working wheel of turbomachine", Patent RU 118745, 2012.]

10. **Хориков А. А.** Метод и система диагностики аэроупругих колебаний рабочих лопаток компрессоров датчиками пульсаций // Сб. докладов конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». Харьков: Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 1997. [A. A. Khorikov, "Method and system for diagnosing aero-elastic oscillations of compressor blades with pulsation sensors", (in Russian), in *Institut problem mashinostroyeniya im. A. N. Podgornogo NAN Ukrainy*, 1997.]

11. **Разработка** макета высокотемпературного высокочастотного измерителя пульсаций давления на основе микроволновой системы / С. Ю. Данилкин и др. // Научно-технический конгресс по двигателестроению (НКТД-2018) (г. Москва, 4-6 апреля 2018): сборник тезисов. М.: издательство «Ваш Успех», 2018. С. 252–254. [S. YU. Danilkin, et. al. "Development of a model of high-temperature high-frequency pressure pulsation meter based on a microwave system", (in Russian), *Nauchno-tekhnicheskiy kongress po*

dvigatelestroyeniya (NKTD-2018): sbornik tezisev. M.: izdatel'stvo «Vash Uspek», pp. 252-254, 2018.]

12. **Данилин А. А.** Измерения в технике СВЧ. М.: Радиотехника, 2008. [A. A. Danilin, *Measurments in microwave technology*, (in Russian). M.: Radiotekhnika, 2008.]

13. **Bryant G. H.** Principles of microwave measurements. N.Y.: Peregrinus, 2003. [G. H. Bryant, *Principles of microwave measurements* (in English). N.Y.: Peregrinus, 2003.]

14. **Андронов Е. В., Глазов Г. Н.** Теоретический аппарат измерений на СВЧ: Т. 1. Методы измерений на СВЧ. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. 804 с. [Ye. V. Andronov, G. N. Glazov, *Theoretical Measurement Apparatus for Microwave: Vol. 1.*, (in Russian), in *Metody izmereniy na SVCH*. Tomsk: TML-Press, 2010.]

15. **Teppati V., Ferrero A., Sayed M.** Modern RF and Microwave Measurement Techniques. Cambridge University Press, 2013. 448 p. [V. Teppati, A. Ferrero, M. Sayed, *Modern RF and Microwave Measurement Techniques*. Cambridge University Press, 2013.]

ОБ АВТОРАХ

ДАНИЛКИН Сергей Юрьевич, нач. отд. ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер (РГРТА, 2005). Исследования вибрационной прочности деталей ГТД и цифровая обработка сигналов.

ШКУРОВ Владимир Викторович, нач. сектора ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер-механик-исследователь (МЭИ, 1982). Исследования вибрационной прочности деталей ГТД и цифровая обработка сигналов.

МАЗИКИНА Татьяна Ивановна, вед. конструктор ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер-механик (ВЗМИ, 1979). Исследования вибрационной прочности деталей ГТД и цифровая обработка сигналов.

РЕДЬКИН Дмитрий Александрович, вед. инженер ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. магистр (МАТИ, 2013). Исследования вибрационной прочности деталей ГТД и цифровая обработка сигналов.

ТЕЛЕШЕВ Виктор Анатольевич, ведущий инженер ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова». Дипл. инженер (РГРТА, 2004). Исследования вибрационной прочности деталей ГТД и цифровая обработка сигналов.

METADATA

Title: Development of investigation methods for turbomachines rotor blades vibration during bench tests

Authors: S. Y. Danilkin¹, V. V. Shkurov², T. I. Mazikina³, D. A. Red'kin⁴, V. A. Teleshev⁵

Affiliation:

Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov (CIAM), Russia.

Email: ¹ danilkin@rtc.caim.ru, ²⁻⁵ 20202@rtc.ciam.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 2 (84), pp. 17-25, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper presents the results of studies of the dynamic strength for high-pressure turbine blades of full size turbofan during bench tests using the non-contact method for blade resonance diagnostic. The study was performed under high temperature conditions of workflow using

high-frequency high-temperature cooled static pressure pulsation transducers. The results of the characteristics analysis for high-temperature microwave pressure pulsation probe are presented. The sufficiency of sensitivity of the developed microwave probe for using in the non-contact vibration diagnostic systems in turbomachine rotor parts are reported.

Key words: blade vibrations; resonance; flow pulsations; non-contact diagnosis of vibrations; spectral analysis; bench tests.

About authors:

DANILKIN, Sergey Yur'yevich, Head of Department, Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov (CIAM). Dipl. engineer (RGRТА, 2005). Research of the vibration strength and digital signal processing.

SHKUROV, Vladimir Viktorovich, head of the sector, Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov (CIAM). Dipl. engineer-mechanic-researcher (MEI, 1982). Research of the vibration strength and digital signal processing.

MAZIKINA, Tat'yana Ivanovna, Lead Designer, Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov (CIAM). Dipl. engineer-mechanic (VZMI, 1979). Research of the vibration strength and digital signal processing.

RED'KIN, Dmitriy Aleksandrovich, Leading Engineer, Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov (CIAM). Dipl. Dipl. Master's degree (MATI, 2013). Research of the vibration strength and digital signal processing.

TELESHEV, Viktor Anatol'yevich, Leading Engineer, Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov (CIAM). Dipl. engineer (RGRТА, 2004). Research of the vibration strength and digital signal processing.