

УДК 629.7:539.4+621.431.75

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗГОННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЁЖНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2015 Ю. А. Ножницкий, Ю. А. Федина, Д. В. Шадрин, А. Н. Серветник,
Б. А. Балуев, А. В. Каначкин, А. Р. Лепешкин, А. А. Томашев, С. А. Чернышев

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Сформулированы основные задачи использования разгонных стендов при проведении сертификационных, инженерных и технологических испытаний деталей и узлов газотурбинных двигателей. Рассмотрены конструктивные особенности разгонных стендов. Представлены основные характеристики разгонных стендов, используемых в ЦИАМ. Рассмотрены методические особенности проведения различных видов испытаний на разгонных стендах и основные требования к стендам для проведения различных испытаний. Приведены примеры использования стендов для проведения разгонных испытаний для подтверждения несущей способности или упрочнения материала роторов; эквивалентно-циклических испытаний для подтверждения ресурса роторов; исследований вибрационных свойств вращающихся деталей, в том числе для оптимизации конструкционного демпфирования колебаний и определения сопротивления многоцикловой усталости вращающихся лопаток; подтверждения удержания в корпусах фрагментов разрушившихся роторов; определения стойкости роторов к соударению с птицами и другими попадающими в газоздушный тракт двигателя посторонними предметами. Показана необходимость сочетания испытаний на разгонных стендах с расчётами и физическими исследованиями. Рассмотрены основные направления модернизации разгонных стендов. Показана, в частности, необходимость создания стендов для различных испытаний вентиляторов двигателей с большой степенью двухконтурности; совершенствования стендов и методик испытаний для исследований сопротивления вращающихся лопаток многоцикловой усталости; создания оборудования для испытаний в условиях термоциклирования деталей роторов, особенно деталей, изготовленных из композиционных и керамических материалов; для исследования колебаний при контакте ротора и статора.

Разгонный стенд, ротор, корпус, несущая способность, ресурс, вибрационные свойства, удерживание фрагментов роторов, стойкость к удару птицы.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-71-87

Разгонные стенды на протяжении длительного времени широко используются в авиационной промышленности для решения различных задач с целью обеспечения прочностной надёжности газотурбинных двигателей (ГТД). Вместе с тем, в последние годы область применения разгонных стендов существенно расширяется, а цели их применения несколько изменяются, что связано с совершенствованием конструкции стендов и методов испытаний, развитием методов расчёта, появлением новых сертификационных требований к двигателям.

Эти стенды используются для проведения сертификационных, инженерных и технологических испытаний. В частности, сертификационные испытания проводятся для подтверждения прочности (несущей способности) и циклического ресурса основных (критических по последствиям отказа) деталей роторов. При

сертификации двигателя целесообразно также определять сопротивление многоцикловой усталости вращающихся лопаток турбомашин в поле центробежных сил (при наличии асимметрии цикла нагружения).

Инженерные испытания проводятся для доводки двигателя (проверки и оптимизации новых конструктивно-технологических решений, в т.ч. разработанных с использованием новых конструктивных материалов); предварительной оценки возможности обеспечения требований норм лётной годности (испытания по исследованию вибрационных характеристик деталей роторов, по подтверждению локализации фрагментов лопатки или ротора в корпусе, по проверке стойкости вращающегося ротора к ударному воздействию птиц и других предметов и т.д.); для воспроизведения дефектов и отработки методов диагностики техни-

ческого состояния деталей двигателей; для валидации и верификации методов расчёта. Проведение инженерных испытаний позволяет снизить риск неудачи при сертификационных испытаниях, в том числе дорогостоящих испытаниях двигателя. Если с использованием результатов испытаний на разгонном стенде удаётся показать, что последствия заброса крупной одиночной птицы в двигатель менее критичны, чем последствия обрыва лопатки вентилятора, а отсутствие опасных последствий при обрыве лопатки вентилятора подтверждено при испытании на двигателе, то появляется возможность исключить необходимость дорогостоящего испытания двигателя с забросом крупной одиночной птицы.

Наконец, разгонные стенды используются с целью повышения прочностной надёжности двигателей для проведения технологических операций автофретирования ротора с целью упрочнения материала или раскрутки ротора для подтверждения качества его изготовления.

При проведении одного и того же вида испытания могут решаться различные задачи. Например, испытания с раскруткой исследуемого ротора могут проводиться для проверки новых конструктивно-технологических решений, подтверждения несущей способности ротора при сертификации двигателя, для упрочнения материала ротора или проверки качества его изготовления. В большинстве случаев для успешного решения задач обеспечения и подтверждения прочностной надёжности деталей ГТД необходимо механические испытания (в том числе с использованием разгонных стендов) сочетать с расчётами и физическими исследованиями.

Ниже на основе имеющегося в ЦИАМ опыта рассмотрены методические особенности проведения на разгонных стендах различных испытаний.

Используются разгонные стенды различных конструкций, но, как правило, стенды включают привод; опору с объектом испытания, расположенным в бронекамере, обеспечивающей безопасность проведения испытания; дополнительные

системы и узлы, обеспечивающие требуемые условия нагружения объекта испытания, и получение в результате испытаний необходимой информации.

Стенды с горизонтальной осью вращения позволяют обеспечить более близкие к эксплуатационным условия испытаний, упростить сборку конструкции и получить необходимую информацию о поведении объекта испытаний. На стендах с вертикальной осью вращения проще обеспечить центровку и приемлемое вибрационное состояние исследуемого ротора, обеспечить локализацию фрагментов ротора в случае его разрушения.

При использовании в качестве привода электродвигателя нет необходимости в большом расходе сжатого газа (обычно воздуха). При использовании воздушной турбины для раскрутки даже высокооборотных роторов можно обойтись без использования мультипликатора.

При испытаниях объекта, размещённого в вакуумированной камере, снижаются затраты мощности на привод объекта исследований во вращение, исключается нагрев вращающегося ротора за счёт трения его о воздух, который может быть недопустимым. При проведении испытаний в атмосферных условиях (или при частичном вакуумировании камеры) можно реализовать нагрев вращающегося облопаченного ротора за счёт его трения о воздух, использовать для возбуждения колебаний вращающихся лопаток воздушные импульсы.

Для получения требуемого теплового состояния объекта могут использоваться различные методы нагрева. Нагрев с помощью электронагревателей используется для проведения испытаний при стационарном тепловом состоянии. При этом использование многозонного нагрева с независимым управлением нагревом в отдельных зонах позволяет получить заданные тепловые условия в различных зонах испытываемого узла. Однако этот метод не пригоден для испытаний при циклическом измерении температуры объекта. Широко применяемый индукционный метод может использоваться для нестационарного нагрева дисков и проставок, но сложно

реализуем для нагрева вращающихся лопаток и нагрева деталей из материалов, в которых не возникают вихревые токи. При нагреве объекта испытания – рабочего колеса с лопатками – за счёт его трения о воздух при раскрутке ротора в воздушной среде или в камере с неглубоким вакуумом ограничены возможности для получения требуемого температурного поля. Ламповый нагрев (с помощью галогенных ламп) может использоваться для получения нестационарных температурных полей в деталях из разных материалов, однако разрушение объекта испытаний может привести и к разрушению нагревательных ламп.

В ЦИАМ в настоящее время имеется комплекс разгонных стендов, основные

данные о которых приведены в табл. 1. Стенды входят в состав аккредитованной Авиарегистром МАК и Ростехрегулированием лаборатории для сертификационных испытаний. Стенды Т14-01Б, Т14-21Б, Э1029, У365 разработаны в институте и введены в эксплуатацию более 25 лет назад. Стенды РС-1Д и РС-2Ц разработаны фирмой Test Devices Inc. (США) по техническому заданию ЦИАМ и введены в эксплуатацию в 2011г.

На основе накопленного опыта проведения испытаний в настоящее время активно проводятся работы по модернизации разгонных стендов, прежде всего стенда Т14-01Б, обладающего уникальными возможностями для испытаний рабочих колёс вентиляторов.

Таблица 1. Основные параметры разгонных стендов ЦИАМ

№ п/п	Стенд	Расположение оси стенда	Вакуум, мбар	Привод		n_{\max} объекта, об/мин	Параметры объекта испытаний (max)			T_{\max} , °С (метод нагрева)
				Тип	Мощность, кВт		Масса ротора, кг	Диаметр ротора, мм	Длина ротора, мм	
1	Т14-01Б	Верт.	60	Электродвигатель	730	30000	1500	2000**	1400	700 (вихретоковый)
2	Т14-21Б	Гор.	60	Электродвигатель	90	60000	50	700 (850 при частичном съёме брони)	450	-
3	Э-1029	Гор.	20	Электродвигатель	300	80000	40	800	900	-
4	У-365	Гор.	Атм. условия	Электродвигатель	360	48000	120	800**	700	> 800 (за счёт трения вращающегося колеса о воздух)
5	РС-1Д	Верт.	0,04	Малоинерционная реверсивная воздушная турбина*	160	24000	1350	1300	1000	800 (электронагреватели)
6	РС-2Ц				30	60000	90			
					7,5	100000	45			

* имеется набор из трёх воздушных турбин, отличающихся максимальной мощностью и максимальной частотой вращения;

** возможно увеличение диаметра ротора при частичном съёме брони.

Одним из наиболее востребованных видов испытаний, проводимых на разгонных стендах, является раскрутка исследуемого ротора для определения разрушающей частоты вращения или до заданной частоты вращения для подтверждения несущей способности. При автофретировании требуемая частота вращения ротора (обычно используется заготовка диска) при испытании определяется, исходя из необходимости обеспечения пластического деформирования и получения

упрочнения материала в зоне диска, ограничивающей его долговечность. При сертификации необходимо подтвердить, что ротор даже при возможном неблагоприятном сочетании механических свойств материала выдержит 5 минут без разрушения при работе на заданной частоте вращения. При этом в соответствии с требованиями авиационных правил – норм лётной годности («Авиационные правила» AP МАК, часть 33; FAR33, CS-E) значение заданной частоты вращения выбира-

ется (с определёнными запасами), исходя из ожидаемых условий эксплуатации конструкции, включая анализ отказных ситуаций. Наибольшую сложность при этом представляет определение возможной частоты раскрутки ротора турбины при потере потребителя мощности (в частности, при разрушении вала турбины).

Разгонные испытания ротора являются необходимой частью исследований при отработке новых конструктивно-технологических решений для деталей и узлов роторов. Примером может служить испытание керамических рабочих лопаток турбины (рис.1 [1]).



Рис. 1. Ротор для разгонного испытания керамической лопатки турбины

Требования к стенду для проведения раскрутки ротора включают возможность получения требуемых частоты вращения и теплового состояния ротора с выдержкой на заданном режиме в течение 5 минут, а также возможность регистрации в темпе эксперимента этих параметров. Для повышения эффективности исследований важно также иметь возможность контроля (лучше в темпе эксперимента) радиальной вытяжки ротора.

Для учёта возможного отличия в тепловом состоянии ротора в условиях эксплуатации и при проведении испытания вводится поправка величины частоты вращения, при которой должно проводиться испытание, учитывающая влияние указанного отличия на механические свойства материала диска. Учёт возможного неблагоприятного сочетания характеристик материала ротора (по отношению к соответствующим характеристикам материала исследуемого экземпляра ротора) также может быть осуществлён с по-

мощью соответствующей корректировки частоты вращения, при которой будет испытываться ротор.

Возможность раскрутки ротора до заданной частоты вращения определяется располагаемой мощностью привода, конструкцией испытуемого ротора и давлением в камере, в которой осуществляется раскрутка ротора. Для уменьшения потребной для раскрутки ротора мощности (снижения аэродинамического сопротивления) и предотвращения нежелательного нагрева ротора вместо лопаток в ротор устанавливают имитаторы, позволяющие моделировать действие на диск контурной нагрузки, а раскрутку ротора осуществляют в камере с пониженным давлением воздуха. Поэтому из рассмотренных в табл. 1 стендов стенды РС-1Д и РС-2Ц с хорошо вакуумированной камерой обладают существенными преимуществами. Однако на этих стендах диаметр камеры недостаточен для экспериментальных исследований рабочих колёс вентиляторов

двигателей летательных аппаратов магистральной авиации. Такие исследования очень важны при создании перспективных двигателей, для вентиляторов которых предлагается использовать новые конструктивно-технологические решения: блиски рабочих колёс вентиляторов; рабочие колёса вентиляторов с лёгкими широкохордными лопатками (пустотелыми титановыми лопатками, лопатками из алюминиевого сплава, лопатками из композиционных материалов). Для обеспечения возможности проведения испытаний рабочих колёс вентиляторов в настоящее время завершается модернизация стенда Т14-01Б с оснащением этого стенда современной системой вакуумирования. Запланировано также оснащение системой вакуумирования стенда У-365.

При анализе разрушения роторов ГТД первых поколений обычно рассматривались разрушения по меридиональному или по цилиндрическому сечению. При использовании высокопрочных сплавов разрушение ротора может инициироваться в зонах концентрации напряжений. Поэтому необходимо учитывать влияние на прочность ротора как характеристик прочности, так и характеристик пластичности его материала. Ранее этот учёт осуществлялся на основе использования отношения значений предела текучести материала, имеющего свойства на уровне нижней границы технических условий (ТУ) на поставку полуфабриката и материала объекта испытания или с использованием эмпирических коэффициентов. В настоящее время для этой цели используются результаты расчётов по 3D моделям разгонных испытаний с применением деформационного или энергетического критерия разрушения [2]. Применение этих моделей может позволить не проводить сертификационные испытания по подтверждению несущей способности роторов, а ограничиться виртуальными испытаниями. Однако необходимо надёжное экспериментальное подтверждение возможности использования указанного подхода для новых конструктивно-

технологических решений. Для этого требуется проведение испытаний модельных и натуральных роторов и сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования. Верификацию и валидацию методов расчёта целесообразно проводить не только по значению разрушающей частоты вращения, но и по радиальной вытяжке ротора. Поэтому важно иметь возможность контроля (лучше в темпе эксперимента) радиальной вытяжки ротора. В настоящее время такой (вихретоковой) системой контроля оснащён только стенд РС-1Д. Температура, при которой система работоспособна, ограничена 100°C. Для расширения возможности испытаний выполнен комплекс специальных работ и завершается оснащение стендов РС-1Д и РС-2Ц более совершенной системой определения вытяжки неравномерно нагретого ротора, работоспособной при температуре до 600° С.

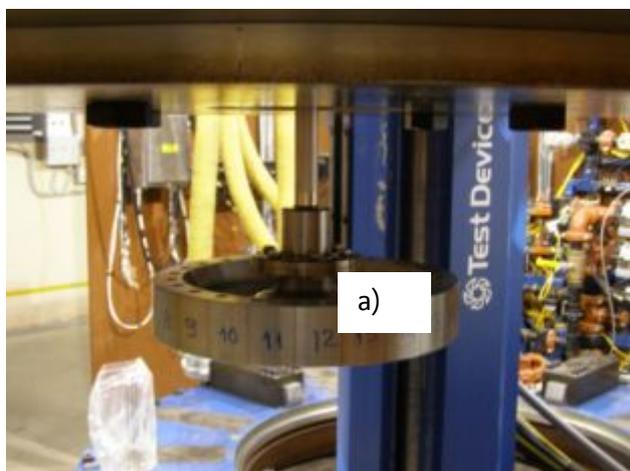
Пример расчётно-экспериментального исследования несущей способности модельного диска на стенде РС-1Д представлен в табл. 2 и на рис. 2.

Информативность испытаний обеспечивается также за счёт наличия высокооборотного токосъёмника, позволяющего получать информацию от расположенных на вращающихся объектах испытаний термопар и тензодатчиков, и за счёт применения высокоскоростной видеосъёмки.

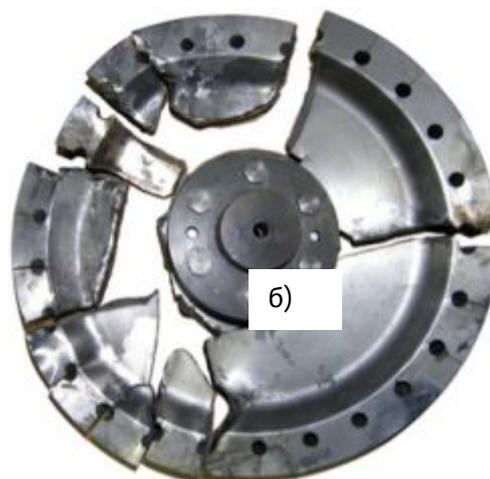
В настоящее время на стендах института используются высокооборотные щёточные токосъёмники фирмы Aerodyne, а также ртутные токосъёмники. Возможно использование и бесконтактных токосъёмников. Стенды РС-1Д, РС-2Ц и Т14-01Б оснащены также камерами, позволяющими осуществлять высокоскоростную видеосъёмку разрушения ротора, что существенно повышает информативность испытаний. Кроме того, имеющаяся на стенде РС-1Д возможность балансировки установленного на стенд объекта испытаний позволяет упростить и сократить продолжительность подготовки к испытаниям.

Таблица 2. Сопоставление результатов расчёта несущей способности модельного диска с экспериментальными данными

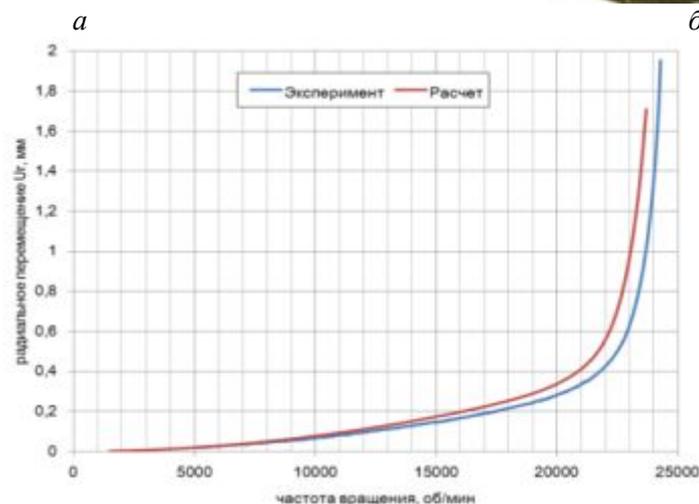
Величины	Расчёт	Эксперимент
Разрушающая частота вращения, об/мин	23700	24282
Запас по несущей способности	1,58	1,61
Радиальное перемещение обода диска, мм	1,71	1,94



а)



б)



в)

Рис. 2. Расчётно-экспериментальное исследование несущей способности модельного диска:
 а – диск с имитаторами лопаток, установленный на разгонный стенд; б – разрушенный диск;
 в – сопоставление результатов расчёта и испытаний
 (замер перемещений вихретоковыми датчиками в темпе эксперимента)

Одной из важнейших областей использования разгонных стендов является их применение для определения циклической долговечности и подтверждения циклического ресурса работающих в условиях малоциклового усталости (МЦУ) деталей роторов, относящихся к числу основных (критических по последствиям разрушения) деталей двигателя. В соответствии с требованиями современных нормативных технических документов ресурс этих деталей должен подтвер-

ждаться как до появления так называемой «инженерной» трещины малоциклового усталости – трещины МЦУ длиной 0,8 мм и глубиной 0,4 мм – в предположении об отсутствии начальных дефектов, так и с учётом безопасного развития трещины от начальных дефектов [3].

Ресурс до появления трещины МЦУ может подтверждаться на основании результатов эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ) деталей или на основании расчётов их долговечности с использова-

нием базы данных по конструкционной прочности материалов.

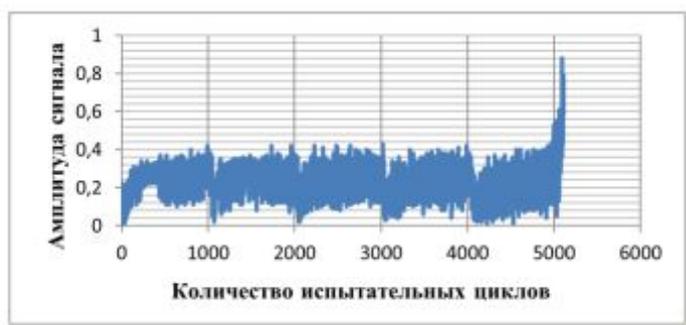
ЭЦИ деталей могут проводиться в составе двигателей или на разгонных стендах. При этом проведение ЭЦИ деталей роторов на разгонных стендах (по сравнению с ЭЦИ двигателя) позволяет существенно сократить необходимые для подтверждения ресурсов деталей затраты времени и средств.

При проведении ЭЦИ ресурс детали подтверждается с требуемым нормативной документацией запасом по циклической долговечности k_N , величина которого зависит от количества испытанных роторов и разброса их циклической долговечности (обычно в соответствии с имеющимися в промышленности данными предполагается, что разброс циклической долговечности роторов характеризуется величиной среднего квадратичного отклонения $\sigma_{lgN}=0,13$). Например, при испытании одного экземпляра ротора используется значение $k_N=4$. Кроме того, учитывается соответствие повреждаемости ротора в испытательном цикле (ИЦ), выбранном с учётом возможностей испытательного стенда, повреждаемости ротора в типовом полётном цикле (ТПЦ). При этом существенного отклонения в величинах повреждаемостей в ИЦ и ТПЦ быть не должно, т.к. это может привести к отличию повреждающих механизмов в ИЦ и в условиях эксплуатации (в ТЦП). Опыт показывает, что определение коэффициента соответствия повреждаемости ротора в ИЦ повреждаемости ротора в ТПЦ должно основываться на 3D расчётах с учётом нестационарности нагружения и особенностей нагружения детали при её работе в узле двигателя и при испытании этой детали на стенде.

В процессе ЭЦИ циклически изменяется частота вращения ротора. Поскольку при требуемых значениях запасов

по циклической долговечности для подтверждения ресурса детали необходимо наработать большое количество ИЦ, то большое значение имеет сокращение их продолжительности. Для проведения ЭЦИ роторов стенды РС1-Д и РС-2Ц обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с ранее использовавшимися стендами. В качестве привода на этих стендах используются малоинерционные реверсивные воздушные турбины, а раскрутка исследуемого ротора осуществляется в камере с высоким вакуумом. Это позволяет снизить затраты мощности на привод объекта испытаний вращения и сократить время раскрутки объекта до требуемой частоты вращения и время, необходимое для последующего торможения объекта испытаний. Осуществляемое в настоящее время вакуумирование разгонной камеры Т14-01Б и запланированное вакуумирование разгонной камеры стенда У-365 позволят повысить эффективность использования этих стендов для проведения ЭЦИ роторов.

Значительные продолжительность и стоимость ЭЦИ связаны также с необходимостью периодического контроля состояния исследуемого ротора. Для этого требуется периодически снимать ротор со стенда, разбирать, дефектировать, собирать, балансировать и снова устанавливать на стенд для продолжения испытаний. Стенд РС-1Д укомплектован системой контроля появления и развития трещины МЦУ в исследуемом роторе в темпе эксперимента. На рис. 3, а показано изменение амплитуды сигнала, полученного с датчика в процессе ЭЦИ ротора турбины. Видно, что после наработки 5000 циклов начался интенсивный рост трещины в диске, что было подтверждено после остановки испытания, снятия и дефектации диска из гранулируемого никелевого сплава (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Показания в режиме реального времени системы контроля трещины МЦУ (а) и трещина, выявленная в диске из гранулируемого сплава после остановки испытания (б)

Сохранение ротора с трещиной для последующих фрактографических и иных исследований позволяет повысить информативность испытания, снизить затраты времени и средств на восстановление стенда после разрушения ротора. В настоящее время проводится оснащение стенда РС-2Ц системой обнаружения трещины МЦУ в исследуемом роторе в темпе эксперимента.

ЭЦИ на стендах РС1-Д и РС-2Ц проводятся при стационарных тепловых условиях. На рис. 4 показана оснастка для обеспечения неравномерного (по радиусу) нагрева рабочего колеса турбины на стенде РС-1Д. Использование многозонного нагрева позволяет получить требуемую неравномерность нагрева ротора также и в направлении продольной оси ротора.

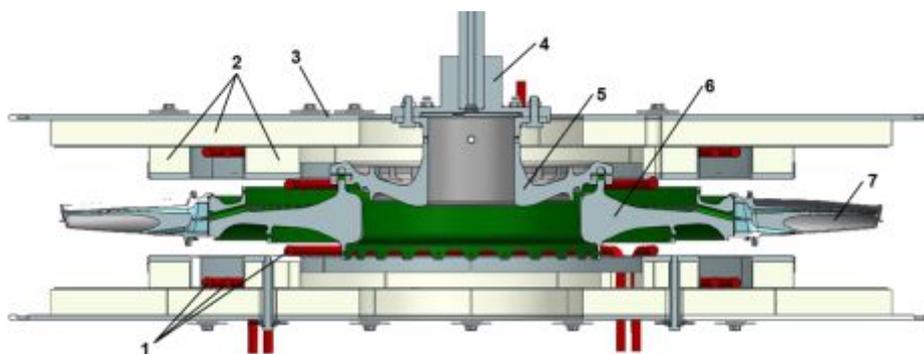


Рис. 4. Оснастка для обеспечения неравномерного нагрева в радиальном направлении рабочего колеса турбины при испытании на стенде РС-1Д

На стенде У-365 испытания могут проводиться с циклическим нагревом (за счёт использования вентиляционных потерь при раскрутке в атмосферных условиях) и охлаждением исследуемого ротора. На стенде Т14-01Б циклический нагрев ротора обеспечивается за счёт использования индукционных нагревателей. В настоящее время рассматривается возможность создания разгонного стенда, приспособленного для исследований прочности изготовленных из различных материалов деталей роторов в условиях термоциклирования. Такой стенд должен

быть оснащён комплексом различных систем нагрева, позволяющих осуществлять как нагрев детали с помощью нагревателей сопротивления, индукционных нагревателей и галогенных ламп, так и быстрое охлаждение ротора.

Выше уже отмечалась возможность получения при испытаниях информации от расположенных на вращающемся объекте испытаний термодпар и тензодатчиков, применения высокоскоростной видеосъёмки, замера вытяжки ротора в темпе эксперимента.

В настоящее время институтом и рядом других предприятий (прежде всего ОАО «Авиадвигатель» и ФГУП «ВИАМ») ведутся интенсивные работы по формированию отраслевой базы (банка) данных по конструкционной прочности материалов. Эти данные должны использоваться для обеспечения прочностной надёжности деталей двигателей, в том числе для подтверждения ресурса (вместо подтверждения ресурса этих деталей на основе результатов их ЭЦИ). Подтверждение ресурса основных деталей на основе базы данных по конструкционной прочности материалов позволяет по сравнению с подтверждением ресурса на основе ЭЦИ существенно снизить затраты времени и средств. Однако для использования этого подхода необходимо разработать систему выбора запаса по циклической долговечности, обеспечивающую получение требуемой вероятности неразрушения (согласно требованиям вероятность разрушения основной детали не должна превышать 10^{-8}). Для решения этой задачи необходимо как обобщение опыта эксплуатации двигателей, так и проведение обширных ЭЦИ натурных и модельных роторов на разгонных стендах. Эта работа в настоящее время ведётся институтом совместно с рядом предприятий.

Для обеспечения возможности подтверждения ресурса с учётом развития трещины МЦУ от начального дефекта в институте проводится комплексная работа, включающая решение этой задачи в детерминированной и вероятностной постановках. Эта работа включает исследование различных дефектов (производственных, в т.ч. металлургических и эксплуатационных) в основных деталях, анализ выявляемости этих дефектов при инспекциях; определение характеристик трещиностойкости материалов; фрактрографические и расчётные исследования кинетики трещин МЦУ. Следует учитывать, что если методика формирования программ ЭЦИ на этапе до возникновения трещины МЦУ в настоящее время достаточно хорошо отработана, то кинетика

трещин МЦУ исследована пока недостаточно. Поэтому большое значение имеет проведение циклических испытаний деталей с дефектами. Примером может являться циклическое испытание на стенде Т14-01Б диска турбины высокого давления с исходными дефектами (трещинами в радиусе галтели заднего лабиринта). По специальной программе осуществлялись циклическое изменение частоты вращения ротора и его циклический вихретоковый нагрев. Периодически осуществлялось измерение размеров трещин. Проведение после циклического испытания фрактрографического и расчётного исследования кинетики трещин МЦУ при различных условиях нагружения позволило исследовать особенности развития трещин при различных условиях нагружения [4].

На протяжении длительного времени институтом и другими отечественными и зарубежными предприятиями проводятся исследования вибрационных свойств деталей вращающихся роторов с использованием разгонных стендов. Основными задачами таких исследований являются:

- исследование резонансных режимов и резонансной диаграммы;
- анализ влияния на вибрационное состояние связанности колебаний (взаимодействия лопаток с диском, разночастотности лопаток, наличия демпферов);
- оптимизация конструкционного демпфирования;
- построение диаграммы Гудмена для определённой формы колебаний конкретной детали;
- анализ влияния на сопротивление многоциклового усталости (МнЦУ) повреждений от попадания посторонних предметов, фреттинга;
- исследование влияния на место образования трещины статических и вибрационных нагрузок;
- оценка влияния на долговечность детали совместного действия повреждающих факторов при МЦУ и МнЦУ;
- калибровка аппаратуры для бесконтактного контроля вибраций вращающихся деталей;

- проведение резонансных испытаний;
- отработка методик бесконтактного обнаружения трещин и повреждений от посторонних предметов вращающихся деталей.

Вибрационные испытания на разгонных стендах используются, в частности, для подтверждения результатов расчётов (например, при оптимизации конструкционного демпфирования колебаний). Для обеспечения возможности исследования вибрационных свойств деталей вращающихся роторов разгонные стенды должны быть оснащены устройствами для возбуждения колебаний вращающихся роторов и системами для регистрации и анализа динамических процессов. Для возбуждения колебаний деталей роторов при испытаниях на разгонных стендах могут использоваться следующие способы:

- силовое возбуждение через кинематическую связь ротора с электродинамическим вибратором (для возбуждения зонтичных форм колебаний ротора);

- установка рядом с вращающимися лопатками турбулизаторов (при испытаниях в атмосферных условиях или при частичном вакуумировании разгонной камеры);
- воздействие струй сжатого воздуха (неподвижных или вращающихся от независимого привода) или специально создаваемых воздушных импульсов (при испытаниях в атмосферных условиях или при частичном вакуумировании);
- воздействие струй жидкости (масла) или масляного тумана (при температуре до 220-250°C);
- воздействие вихревых токов (постоянных магнитов);
- передача возбуждения через электромагнитные подшипники (при использовании таких подшипников).

На протяжении длительного времени в институте для исследования вибрационных свойств вращающихся деталей роторов (прежде всего на стенде У-365) использовалось возбуждение колебаний лопаток специальными турбулизаторами и (или) воздушными соплами (рис. 5).

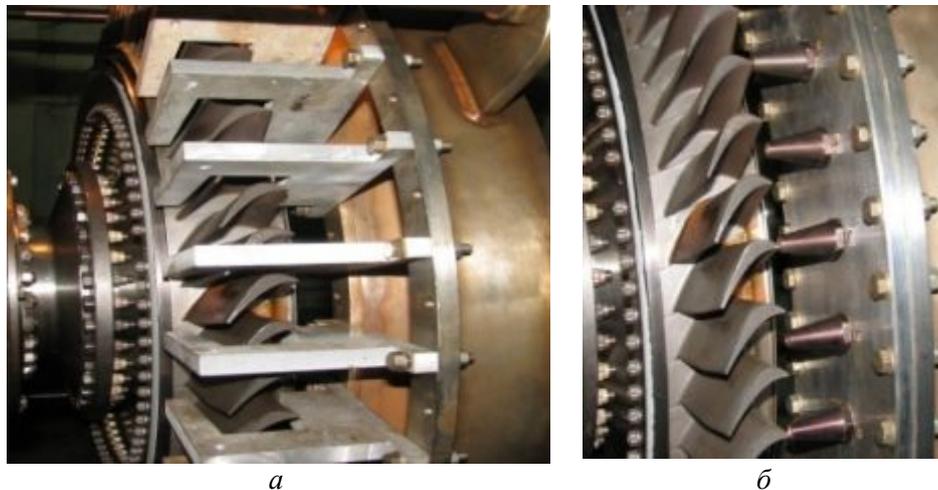


Рис. 5. Возбуждение колебаний вращающихся лопаток специальными турбулизаторами (а) и воздушными соплами (б)

Эти способы возбуждения колебаний могут использоваться при исследовании амплитудно-частотных характеристик вращающихся лопаток, определении относительного распределения вибрационных напряжений в лопатках, отработке методов и средств конструкционного демпфирования колебаний.

Методические особенности проведения этих работ рассмотрены в [5, 6]. В качестве примера на рис. 6 показаны амплитудно-частотные характеристики, определённые при испытаниях на разгонном стенде небандажированных лопаток турбины без демпфера и с демпфером ($f_{рез}$ – резонансная частота колебаний, D – декремент колебаний).

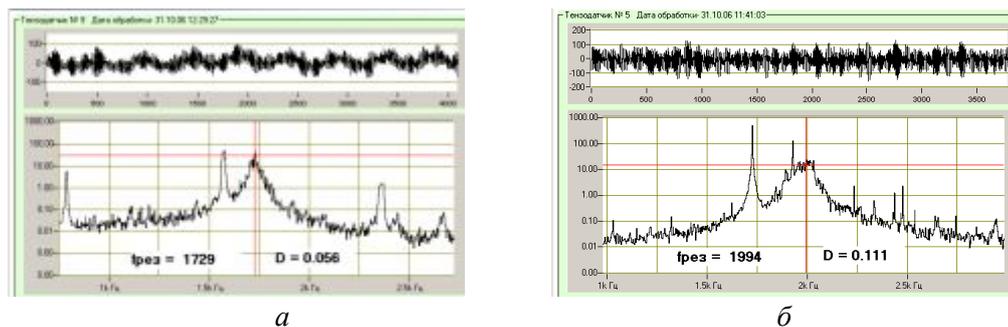


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики небандажированных лопаток турбины без демпфера (а) и с демпфером (б)

Однако эффективность возбуждения колебаний этими способами недостаточна для проведения испытаний вращающихся лопаток на многоцикловую усталость, особенно при колебаниях лопаток по сложным высокочастотным формам. Анализ показал, что наиболее эффективным является возбуждение вращающихся в вакуумированной камере лопаток струями масла. К сожалению, этот способ (из-за необходимости обеспечения пожаробезопасности) может применяться только при относительно невысокой температуре (до 220...250°C). Необходимо также предотвратить эрозию лопаток каплями масла.

Кроме того, при проведении испытаний на МНЦУ (особенно при низком уровне демпфирования колебаний в системе, например, при испытаниях блисков) для настройки на резонанс лопаток и поддержания резонансного режима испытания необходимо обеспечить высокую точность управления частотой вращения и поддержания заданной частоты вращения в процессе испытаний. Стенд РС-1Д оборудован двумя системами возбуждения колебаний вращающихся лопаток (струями масла и воздушными импульсами) и

системой регулирования частоты вращения ротора с погрешностью менее 0,5 об/мин. Специальная вакуумная система стенда обеспечивает поддержание вакуума при возбуждении колебаний струями масла. Возбуждение колебаний воздушными импульсами осуществляется при частичном вакуумировании разгонной камеры. Специальная система нагрева обеспечивает возможность проведения испытаний при нагреве струями масла при температуре до 200...250°C, а при возбуждении колебаний воздушными импульсами – при температуре до 800°C.

На стенде РС-1Д были получены усталостные трещины в рабочей лопатке блиска КВД при возбуждаемых струями масла колебаниях по 4-й форме с частотой ~2400Гц при температуре 20°C (рис. 7). Вместе с тем, результаты этих испытаний показали, что точность поддержания частоты вращения ротора недостаточна для сохранения в течение времени испытаний резонансного режима колебаний лопаток блиска, имеющих крайне низкое демпфирование.

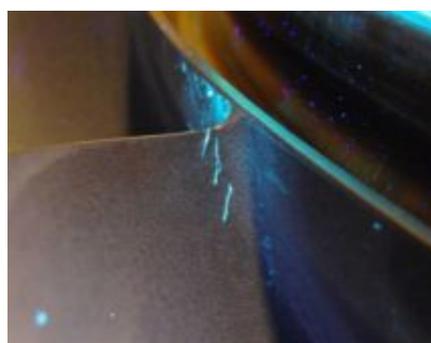


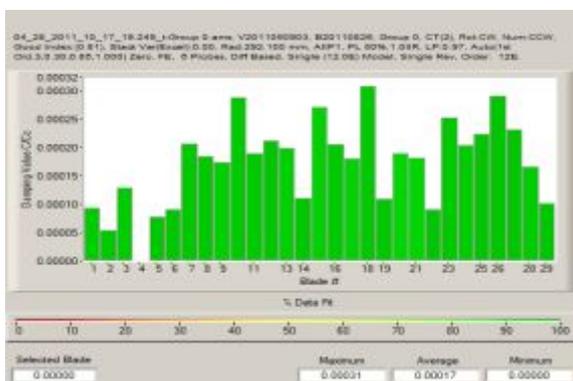
Рис. 7. Блиск КВД, установленный на разгонном стенде (а), и лопатка блиска с усталостными трещинами (б)

В настоящее время проводятся работы по совершенствованию методики испытаний на МнЦУ вращающихся лопаток при низком демпфировании.

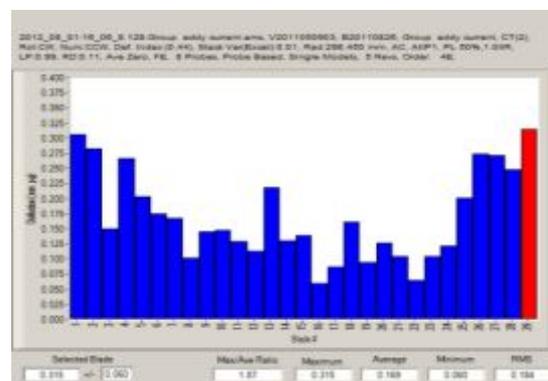
При проведении на разгонных стендах вибрационных, в т.ч. усталостных, испытаний необходимо иметь информацию о вибрационном состоянии объекта испытаний. Как уже отмечалось выше, стенды оснащены высокооборотными токосъёмниками, а также системами анализа динамических процессов. При испытаниях на МнЦУ высока вероятность выхода из строя в процессе испытания тензодатчиков или токосъёмника. В связи с этим стенд РС-1Д оснащён двумя бесконтакт-

ными системами измерения колебаний (tip timing) – лазерной и вихретоковой. Вихретоковая система применяется при возбуждении колебаний вращающихся лопаток струями масла, а лазерная – при возбуждении воздушными импульсами. Наличие этих систем позволяет одновременно получать информацию о вибрационном состоянии всех лопаток вращающегося рабочего колеса (рис. 8).

В настоящее время начаты работы по оснащению устройством для возбуждения колебаний лопаток и системой для бесконтактного измерения колебаний стенда Т14-01Б.



а



б



в

Рис. 8. Данные о вибрационном состоянии лопаток близка КВД при вращении (а – коэффициенты демпфирования колебаний лопаток, б – амплитуды резонансных колебаний лопаток, в – частоты резонансных колебаний лопаток)

Значительный интерес при разработке двигателя вызывает исследование его вибрационного состояния при контакте ротора о статор. В частности, процесс врезания лопаток ротора в корпус должен анализироваться при выборе значений радиальных зазоров в турбомашинах и по-

крытий, используемых для уплотнения этих зазоров. Ранее (под руководством А.Н. Меньшикова) были выполнены конструктивные проработки такой установки для испытаний модели на стенде У365. При этом использовалась «обратная» схема – врезание ротора в статор обеспечива-

лось за счёт перемещения в процессе испытания статорного элемента. В настоящее время рассматривается создание такой установки на базе стенда РС-2Ц.

Значительный интерес представляет проведение на разгонных стендах специальных динамических испытаний по проверке локализации в корпусе двигателя фрагментов разрушившихся роторов, по подтверждению стойкости двигателя к повреждениям в результате попадания в его тракт птиц, льда и других посторонних предметов.

Для обеспечения возможности проведения таких испытаний к разгонному стенду предъявляются следующие требования:

- объём камеры, достаточный для размещения исследуемых ротора (с требуемым количеством лопаток, опорами, устройством для снижения нагрузок при обрыве лопаток и т.д.) и корпусов;
- возможность раскрутки ротора до требуемой частоты вращения при исключении недопустимого нагрева объекта испытаний (требования к мощности привода и вакуумированию камеры);
- наличие дополнительных устройств, обеспечивающих обрыв лопатки или заброс посторонних предметов;
- возможность проведения необходимых измерений, регистрации и анализа динамических процессов, высокоскоростной съёмки;
- исключение опасных последствий эксперимента и дорогостоящего ремонта оборудования.

Строго говоря, для обеспечения близких к эксплуатационным условий такие испытания было бы целесообразно проводить на стенде с горизонтальной осью вращения. Проведение указанных динамических испытаний является наиболее важным для вентиляторов. Однако имеющихся в институте стендов только имеющий вертикальную ось стенд Т14-01Б (и то с определёнными оговорками) имеет пригодную по размерам разгонную камеру. В настоящее время завершается модернизация этого стенда для проведе-

ния указанных испытаний, которая включает обеспечение вакуумирования объёма разгонной камеры; создание специальных устройств, обеспечивающих обрыв лопатки или заброс крупной одиночной птицы; разработку и внедрение систем измерения, регистрации и анализа динамических процессов, высокоскоростной съёмки. В дальнейшем планируется модернизировать систему электропривода стенда. Узлы меньших размеров могут испытываться и на других стендах, прежде всего на стендах РС-1Д, РС-2Ц и (после специальной модернизации, включая внедрение системы вакуумирования камеры) на стенде У365, имеющем горизонтальную ось вращения.

Испытание на разгонном стенде по подтверждению локализации в корпусах ГТД фрагментов ротора турбокомпрессора чаще всего является инженерным, т.к. в соответствии с сертификационными требованиями должно быть показано, что при разрушении ротора не только отсутствует вылет за пределы корпусов нелокализованных фрагментов, но и отсутствуют опасные вторичные последствия (неконтролируемый пожар, обрыв двигателя с узлов крепления). Учитывая высокую сложность и стоимость испытания двигателя, целесообразно предварительное испытание на разгонном стенде. При этом анализ последствий обрыва лопатки осуществляется на основе 3D моделирования, позволяющего оценить возможность получения «эффекта домино» (разрушения после обрыва одной лопатки последующих лопаток), непробиваемость корпусов, срабатывание устройства для снижения нагрузок при обрыве лопатки вентилятора. Для агрегатов двигателя (например, турбостартера), вентилятора редуктора вертолёта на разгонном стенде может быть проведено сертификационное испытание по подтверждению локализации в корпусе фрагментов ротора.

Согласно требованиям норм лётной годности ГТД гражданской авиации при подтверждении локализации фрагментов лопатки в корпусах она должна быть

оборвана по наиболее удалённому от оси двигателя пазу замкового соединения. В некоторых случаях допускается обрыв лопатки по корневому сечению. Обрыв лопатки в заданном сечении на требуемой частоте вращения может быть обеспечен ослаблением соответствующего сечения (например, путём его подрезки). Однако, как показывает опыт, при этом можно получить преждевременный обрыв лопатки или не получить разрушения лопатки при достижении требуемой частоты вращения ротора.

Наиболее часто для получения разрушения лопатки на требуемой частоте вращения используется взрыв.

Сигнал для обеспечения разрушения лопатки обычно подаётся через токосъёмник. При этом взрыв может оказывать влияние на траекторию и энергию фрагментов лопатки. Кроме того, применение взрыва должно сопровождаться специальными мерами по обеспечению безопасности. В институте был разработан метод обрыва лопатки под действием центробежной силы в заданном сечении на требуемой частоте вращения без применения взрыва. Метод заключается в ослаблении сечения лопатки и последующей её подгрузке вплоть до разрушения на заданной частоте вращения [7]. Рис. 9 иллюстрирует такое испытание.

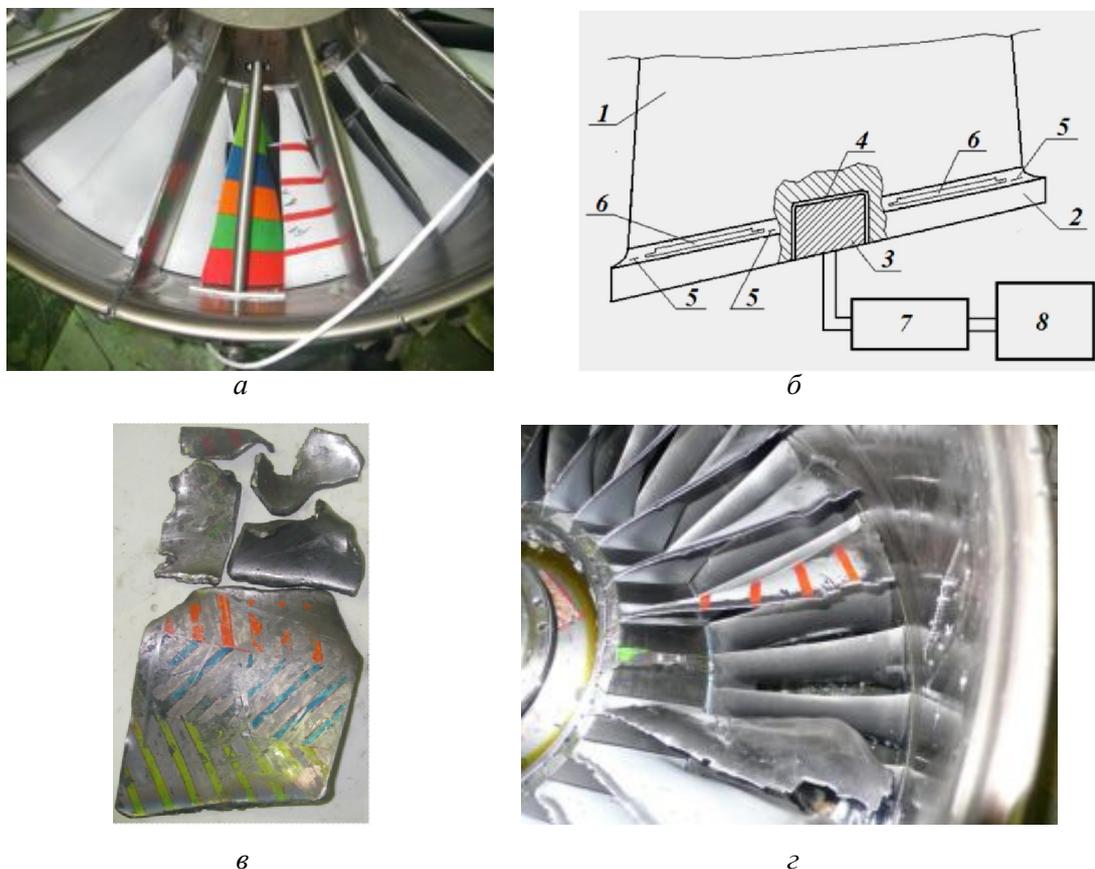


Рис. 9. Испытание корпуса вентилятора ГТД на непробиваемость с обрывом лопатки без использования взрыва: а – вентилятор с подготовленной лопаткой; б – схема устройства для обрыва лопатки;

в - оборванная лопатка после испытаний; z – вентилятор после испытаний;

1 – лопатка, 2 – хвостовик лопатки, 3 – нагреватель внутри лопатки, 4 – зазор между нагревателем и лопаткой, заполненный высокотемпературным наполнителем-клеем, 5 - сечение обрыва, 6 – прорези, 7 – токосъёмник, 8 – блок питания

Испытания на разгонном стенде с забросом посторонних предметов обычно являются инженерными, т.к. требования при попадании в тракт двигателя стайных

птиц (мелких, средних, крупных), льда, града, дождя, различных посторонних предметов предъявляются к двигателю в целом. Исключение, как было отмечено

выше, составляют требования к стойкости двигателя к попаданию крупных одиночных птиц. Требования к массе, скорости и количеству забрасываемых в двигатель посторонних предметов, в том числе к массе и скорости крупных одиночных птиц, содержатся в нормативно-технических документах (для двигателей гражданской авиации – в нормах лётной годности). В любом случае проведению испытаний на разгонном стенде предшествует расчёт по 3D моделям, позволяющий выбрать область лопатки, в которую будет направлен удар, и спрогнозировать последствия удара.

В институте накоплен большой опыт по забросу птиц в неподвижные объекты с помощью пневматической пушки. В настоящее время завершаются работы по подготовке и испытанию вращающегося рабочего колеса вентилятора с забросом крупной одиночной птицы на стенде Т14-01Б.

Таким образом, испытания на разгонных стендах являются важной частью комплекса исследований по обеспечению и подтверждению прочностной надёжности авиационных ГТД.

Библиографический список

1. Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D., Petrov N.I. Ceramic Gas Turbine Component Development Experience at the Central Institute of Aviation Motors // Ceramic Gas Turbine Design and Test Experience. 2002. V. 1. P. 669-682.

2. Nozhnitsky Yu.A., Karimbaev K.D., Servetnik A.N. Numerical Simulation of Spin Testing for Turbo Machine Disks Using Energy-based Fracture Criteria // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2012. V. 7, Iss. Parts A and B. P. 35-40. doi: 10.1115/GT2012-68953

3. Nozhnitsky Y.A., Lokshtanov E.A., Dolgoplov I.N., Shashurin, G.V., Volkov M.E., Tsykunov N.V., Ganelin I.I. Probabilistic prediction of aviation engine critical parts lifetime // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2006. V. 5 Part B. P. 1025-1034. doi: 10.1115/GT2006-91350

4. Nozhnitsky Y.A., Tumanov N.V. Prevention of Low Cycle Fatigue Fracture of Aviation Engine Critical Parts // 28th Congress of the International Council of the Aer-

onautical Sciences 2012, ICAS 2012. V. 3. P. 2449-2456.

5. Nozhnitsky Y.A., Shadrin D.V., Fedina Y.A. Vibration Strength Increase of Rotating Blades Using Dynamic Spin Rigs // 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012, ICAS 2012. V. 3. P. 2435-2442

6. Ножницкий Ю.А., Федина Ю.А., Шадрин Д.В. Исследование конструкционного демпфирования колебаний рабочих лопаток турбомашин на динамических разгонных стендах // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3(34), ч. 1. С.314-320.

7. Lepeshkin A., Bychkov N., Vaganov P., Nozhnitsky Y., Baluev B. The Blade Releasing Method for Test of Engine Casing Containment // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). 2013. V. 1. doi: 10.1115/IMECE2013-63749

Информация об авторах

Ножницкий Юрий Александрович, доктор технических наук, заместитель генерального директора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Область научных интересов: безопасность и ресурс газотурбинных двигателей.

Федина Юлия Алексеевна, кандидат технических наук, начальник сектора,

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: fedina@ciam.ru. Область научных интересов: виброиспытания на динамических разгонных стендах.

Шадрин Дмитрий Владимирович, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail:

shadrin@ciam.ru. Область научных интересов: испытания на разгонных стендах.

Серветник Антон Николаевич, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: servetnik@ciam.ru. Область научных интересов: прочность дисков.

Балуев Борис Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: baluev@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: экспериментальные исследования прочности.

Каначкин Александр Владимирович, начальник стенда, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Область научных интересов: испытания на разгонных стендах.

Лепешкин Александр Роальдович, доктор технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: испытания на разгонных стендах, индукционный нагрев.

Томашев Алексей Алексеевич, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Область научных интересов: виброиспытания на динамических разгонных стендах.

Чернышев Сергей Александрович, начальник стенда, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: dsr-lcf@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: испытания на разгонных стендах.

NEW POSSIBILITIES OF USING SPIN RIGS TO PROVIDE GAS TURBINE ENGINE STRENGTH RELIABILITY

© 2015 Yu. A. Nozhnitsky, Yu. A. Fedina, D. V. Shadrin, A. N. Servetnik, B. A. Baluev, A. V. Kanachkin, A. R. Lepeshkin, A. A. Tomashev, S. A. Chernyshev

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

The main tasks of using spin rigs for carrying out certification, engineering and technological tests of gas turbine engine parts and assemblies are formulated. Specific design features of spin rigs are described in the paper. The main characteristics of the spin rigs used at CIAM are presented. The peculiarities of carrying out different tests using spin rigs and the main requirements for rigs are discussed. Examples of using spin rigs for carrying out tests are given. Examples of using the rigs are given, among them are tests intended to confirm the rotor load capacity or technological hardening of the rotor material; equivalent-cyclic tests to confirm the rotor life; investigation of the vibration properties of rotating parts (optimization of structural damping of vibrations and specifying high-cycle fatigue of rotating blades, etc.); tests carried out to confirm the containment of rotor fragments in the engine casing and to determine the rotor integrity under the impact of bird or other foreign objects sucked in the engine gas-air flow duct. The necessity of combining spin rig tests with calculations and physical investigations is shown. The main directions of updating spin rigs are considered. In particular, the necessity of developing rigs for different tests of engine fans with high bypass ratios; perfecting rigs and testing procedures for high-cycle fatigue investigations of rotating blades; producing the equipment for thermal cycling tests of rotor parts, especially parts made of composite or ceramic materials; investigation of vibrations in the conditions of rotor-stator contact; improvement of hardware and methods.

Spin rig, rotor, casing, load capacity, service life, vibration properties, containment of rotor fragments, resistance to bird impact.

References

1. Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D., Petrov N.I. Ceramic Gas Turbine Component Development Experience at the Central Institute of Aviation Motors. *Ceramic Gas Turbine Design and Test Experience*. 2002. V. 1. P. 669-682.

2. Nozhnitsky Yu.A., Karimbaev K.D., Servetnik A.N. Numerical Simulation of Spin Testing for Turbo Machine Disks Using Energy-based Fracture Criteria. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2012. V. 7, Iss. Parts A and B. P. 35-40. doi: 10.1115/GT2012-68953

3. Nozhnitsky Y.A., Lokshtanov E.A., Dolgoplov I.N., Shashurin, G.V., Volkov M.E., Tsykunov N.V., Ganelin I.I. Probabilistic prediction of aviation engine critical parts lifetime. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2006. V. 5 Part B. P. 1025-1034. doi: 10.1115/GT2006-91350

4. Nozhnitsky Y.A., Tumanov N.V. Prevention of Low Cycle Fatigue Fracture of Aviation Engine Critical Parts. *28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012, ICAS 2012*. V. 3. P. 2449-2456.

5. Nozhnitsky Y.A., Shadrin D.V., Fedina Y.A. Vibration Strength Increase of Rotating Blades Using Dynamic Spin Rigs. *28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012, ICAS 2012*. V. 3. P. 2435-2442.

6. Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Shadrin D.V. Investigation of structural damping of turbomachine blade vibrations using dynamic spin rigs. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3(34), part 1. P. 314-320. (In Russ.)

7. Lepeshkin A., Bychkov N., Vaganov P., Nozhnitsky Y., Baluev B. The Blade Releasing Method for Test of Engine Casing Containment. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. 2013. V. 1. doi: 10.1115/IMECE2013-63749

About the Authors

Nozhnitsky Yury Aleksandrovich, Doctor of Science (Engineering), Deputy General Director, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Area of Research: safety, integrity and service life of gas turbine engines.

Fedina Yuliya Alekseevna, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: fedina@ciam.ru. Area of Research: vibration tests using spin rigs.

Shadrin Dmitriy Vladimirovich, Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: shadrin@ciam.ru. Area of Research: spin rig tests.

Servetnik Anton Nikolaevich, Senior Engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: servetnik@ciam.ru. Area of Research: integrity of disks.

Baluev Boris Aleksandrovich, Candidate of Science (Engineering), Head of Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Rus-

Russian Federation. E-mail: baluev@rtc.ciam.ru. Area of Research: experimental investigation of integrity.

Kanachkin Aleksandr Vladimirovich, Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. Area of Research: spin rig tests.

Lepeshkin Aleksandr Roaldovich, Doctor of Science (Engineering), Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru. Area of Research: spin rig tests, induction heating.

Tomashev Aleksey Alekseevich, second-rank engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. Area of Research: vibration spin rig tests.

Chernyshev Sergey Aleksandrovich, Rig Supervisor, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: dslcf@rtc.ciam.ru. Area of Research: spin rig tests.