

УДК 621.43

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАТОК НА ДИНАМИЧЕСКИХ РАЗГОННЫХ СТЕНДАХ

© 2011 Ю. А. Ножницкий, Ю. А. Федина, Д. В. Шадрин

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

Сформулированы требования к динамическим разгонным стендам для испытаний на многоцикловую усталость рабочих лопаток турбомашин при вращении. Проанализированы методические особенности таких испытаний.

Динамический разгонный стенд, вибрационная прочность, лопатка, испытания, предел выносливости, возбуждение колебаний, метод Локати.

Существенная часть выявляемых в эксплуатации дефектов двигателей связана с недостаточной вибрационной прочностью деталей. Дефекты, связанные с многоцикло-вой усталостью (МнЦУ), могут существенно снизить экономическую эффективность эксплуатации многодвигательных и безопасность эксплуатации однодвигательных летательных аппаратов.

При создании перспективных двигателей проблема предотвращения разрушений деталей в результате МнЦУ в связи с повышением напорности ступеней; применением обладающих плотным спектром частот собственных колебаний широкохордных лопаток; использованием узлов с низким конструкционным демпфированием (блисков, блингов); усилением связанности колебаний, применением недостаточно пластичных, чувствительных к дефектам материалов; ростом статических напряжений и увеличением температуры деталей; увеличением наработки двигателей без съема с крыла, значительно обостряется. Следует также иметь в виду известные трудности прогнозирования и экспериментального подтверждения вибрационной прочности деталей двигателей.

В последние годы интенсивно развиваются технологии предотвращения разрушения деталей двигателей, прежде всего рабочих лопаток турбомашин, от МнЦУ.

Ряд факторов, такие как зависимость эффективности демпфирования, места расположения очага разрушения и сопротивления материала от статических напряжений, обусловленных вращением ротора, приводят к необходимости проведения исследования вибрационной прочности лопаток в поле центробежных сил. Испытания на двигателе

требуют значительных затрат времени и средств. Кроме того, в этом случае возникают трудности с проведением необходимых измерений. Всё это определяет актуальность осуществления части исследований вибрационной прочности на разгонных стендах с возбуждением колебаний вращающихся лопаток.

Опыт показывает, что разгонные стенды могут эффективно использоваться для проведения работ по обеспечению вибрационной прочности деталей роторов. Вместе с тем для обеспечения возможности проведения испытаний вращающихся лопаток на МнЦУ необходимо обеспечить эффективное возбуждение колебаний, высокую точность регулирования и поддержания частоты вращения исследуемого ротора и высокоточную систему сбора и обработки информации о вибрационных характеристиках исследуемого объекта испытаний.

Возбуждение колебаний деталей роторов на динамических разгонных стендах (ДРС) можно осуществлять различными способами, в частности с использованием [1-4]:

- кинематической связи ротора с электродинамическим вибростендом (возбуждение зонтичных форм);
- неподвижных или вращающихся от независимого привода стационарных воздушных струй (раскрутка ротора при частичном вакуумировании или в атмосферных условиях);
- турбулизаторов потока или генераторов воздушных импульсов (раскрутка ротора при частичном вакуумировании или в атмосферных условиях);
- пьезовибраторов, закрепленных на деталях (недостаточная для испытаний на

усталость (эффективность возбуждения);

- струй жидкости (масла или масляного тумана);
- вихревых токов (постоянных магнитов);
- возбуждение колебаний через магнитные подшипники опор ротора.

Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным способом возбуждения высокочастотных колебаний лопаток турбомашин по сложным формам колебаний является использование струй масла. Данный метод, в частности, реализован на установ-

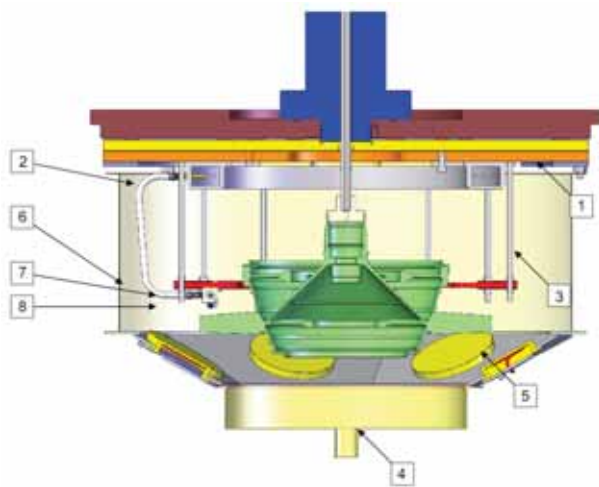


Рис. 1. Система возбуждения колебаний струями масла: 1 – установочная плита; 2 – маслопровод; 3 – вспомогательная камера; 4 – масляный резервуар; 5 – нагревательное устройство; 6 – оснастка для крепления возбуждителей; 7 – блоки форсунок; 8 – форсунки

ленном в ЦИАМ ДРС производства фирмы Test Devices, Inc. При возбуждении колебаний лопаток масляными струями [5-6] (рис. 1) в области периферии испытываемого ротора расположены направленные на лопатки форсунки (рис. 2).

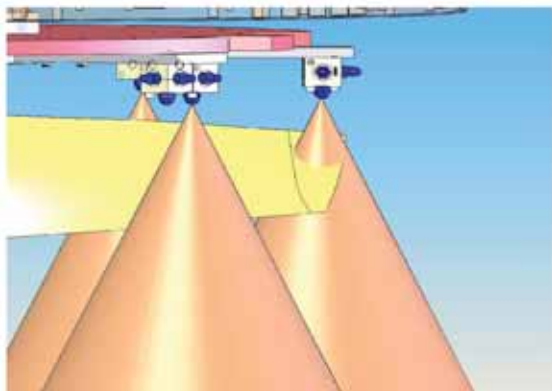


Рис. 2. Возбуждение колебаний форсунками

Жидкость в ходе испытания непрерывно прокачивается через эти форсунки так, чтобы распыленный поток в заданных местах ударялся о вращающиеся лопатки. Подбором количества струй при заданной частоте вращения ротора достигается совпадение частоты (или кратности) возбуждающей силы с частотой интересующей формы колебаний. Лопатка при таком сочетании откликается с уровнем вибронпряжений, который регулируется посредством управления расходом жидкости через форсунки. Кроме того, на эффективность возбуждения колебаний оказывают влияние конструкция форсунок и их расположение по отношению к испытываемым деталям.

Описанная система обеспечивает хороший уровень возбуждения, однако может работать только при низких температурах (до 220°C) в связи с опасностью воспламенения масла. По этой причине её использование целесообразно при проведении испытаний без нагрева или с минимальным нагревом и при испытаниях роторов с плохо возбуждаемыми лопатками. Другая проблема при возбуждении колебаний струями жидкости – опасность возникновения капельной эрозии лопаток. Известны попытки возбуждения колебаний лопаток масляным туманом для уменьшения эрозии, однако этот подход приводит к значительному снижению эффективности возбуждения. В этой связи более эффективным является возбуждение колебаний тонкими струями масла.

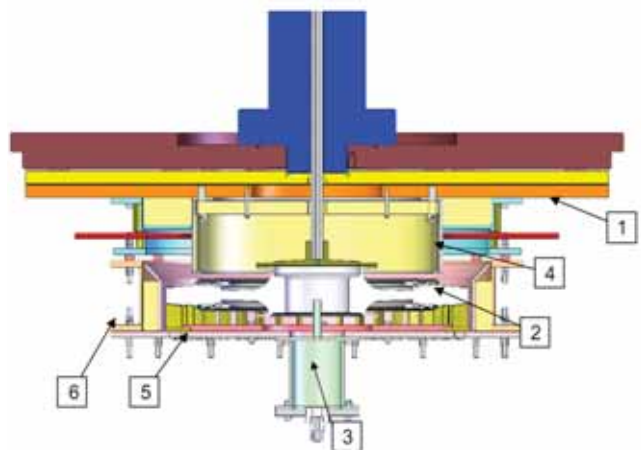


Рис. 3. Система возбуждения колебаний генератором воздушных импульсов: 1 – установочная плита; 2 – вспомогательная камера; 3 – воздушный резервуар; 4 – нагревательное устройство; 5 – оснастка для крепления возбуждителей; 6 – возбуждители

В случае необходимости проведения испытаний при высокой температуре (до 800°C) предпочтительным является возбуждение колебаний воздушными импульсами. Этот способ возбуждения колебаний реализован, в частности, на стендах ЦИАМ и на ДРС фирмы TDI [3;5]. Генератор воздушных импульсов (рис. 3) обеспечивает возбуждение при помощи аэродинамических сил, которые создаются в результате передачи кинетической энергии от вызываемых вращающимися лопатками завихрений потока. Периодический импульс возбуждающей силы генерируется при прохождении лопаткой возбудителя. Давление в камере поддерживается на достаточном для создания необходимого возбуждения уровне при помощи прецизионной системы контроля вакуума. Число возбудителей определяется в зависимости от выбранной гармоники. Резонансный отклик лопатки возникает тогда, когда произведение частоты вращения ротора и количества возбудителей становится равным или кратным частоте колебаний по выбранной форме. Амплитуда возбуждения регулируется изменением давления в камере. Данный метод обеспечивает более низкий уровень возбуждения, чем предыдущий, однако позволяет проводить испытания с температурой лопаток до ~800°C. Таким образом, целесообразно использовать данную систему при проведении испытаний с нагревом, например, при испытаниях лопаток турбин.

Для поддержания резонансных колебаний лопаток в течение длительного времени необходимо иметь возможность регулировать частоту вращения исследуемого ротора с точностью порядка ± 1 об/мин. Подобная точность регулирования может быть обеспечена при использовании в качестве привода воздушной турбины и специальной системы управления частотой вращения. Эта система должна также обеспечить возможность изменения частоты вращения с заданной скоростью для точной настройки на резонанс, поскольку при высокой скорости изменения частоты вращения измерительные системы могут не зафиксировать прохождения резонанса. При испытании рабочих колес, обладающих низким демпфированием (в частности, блисков), точность

регулирования имеет особое значение, поскольку резонансные колебания наблюдаются в очень узком диапазоне изменения частоты. Также в случае недостаточности имеющейся точности изменения частоты вращения может потребоваться введение дополнительного демпфирования.

Для определения режима испытаний необходимо провести анализ собственных частот и форм колебаний лопаток, на основании которого строится резонансная диаграмма (диаграмма Кемпбелла). По данной диаграмме выбирается форма и гармоника колебаний, на которых будут проводиться испытания. Наибольший интерес представляет такое сочетание формы и гармоники, которое может наблюдаться в реальной эксплуатации и поэтому представляет наибольшую опасность (гармоники, соответствующие числу сопловых лопаток или направляющих аппаратов, стоек камеры сгорания и т.п.).

Для определения места наклейки тензодатчиков проводится расчетное определение распределения вибронапряжений в лопатке. Важно, чтобы крепление тензодатчиков и термопар не приводило к преждевременному разрушению лопаток. В то же время датчики должны быть размещены в зонах, где уровень вибронапряжений по исследуемой форме колебаний составляет не менее 40% от максимального значения. Кроме того, при возбуждении колебаний струями жидкости тензодатчики не должны располагаться в зоне действия масляных струй, т.е. вблизи периферии лопатки.

Отрицательное влияние крепления термопар на вибропрочность лопаток может быть устранено предотвращением появления резонанса препарированной термопарой лопатки на режим испытаний (например, путем подрезки этой лопатки). Выбор типа тензодатчиков осуществлялся в соответствии с применяемой тензоусилительной и регистрирующей аппаратурой.

Для передачи сигналов от тензодатчиков и термопар, установленных на вращающемся роторе, могут использоваться контактные (щеточные или с ртутными кольцами) и бесконтактные (с телеметрической или оптической передачей сигнала) токосъемники.

Для получения информации по всем лопаткам, в том числе непрепарированным, а также в случае выхода тензодатчиков из строя может быть использована бесконтактная система измерения, которая регистрирует время прохождения каждой лопаткой датчика на каждом обороте. Могут использоваться оптические, вихретоковые или индукционные датчики. В сочетании с диаграммой Кемпбелла и информацией, полученной в ходе предварительных расчетов, данные от датчиков позволяют получить частоту и фазу колебаний, уровень вибронпряжений.

Для чистых сред без масла рекомендуется использовать более чувствительную и дорогую систему на базе оптических датчиков. Для загрязненных (например, маслом) сред может быть использована система на базе вихретоковых датчиков, более дешевая и менее чувствительная к неблагоприятным внешним условиям, однако имеющая меньшую разрешающую способность, что может привести к снижению чувствительности при измерении высокочастотных колебаний лопатки.

Испытания ротора на ДРС должно начинаться с достаточно медленного прохода по частоте вращения с целью уточнения резонансных режимов и оценки демпфирования.

При испытаниях лопаток на ДРС может использоваться нагружение с нарастающей амплитудой напряжений, в частности, метод ступенчатого повышения нагрузки или метод Локати.

При испытании облопаченного рабочего колеса уровень вибронпряжений в отдельных лопатках определяется их откликом при данных условиях возбуждения колебаний. Испытание проводится до появления трещины (о чем судят по существенному снижению частоты резонансных колебаний и (или) значительному повышению демпфирования) в одной из лопаток или разрушения одной из лопаток. При этом остальные лопатки комплекта имеют ту же циклическую наработку, но при специфическом для каждой лопатки уровне вибронпряжений. Наличие тензодатчиков на отдельных лопатках и одновременное использование бесконтактной системы измерения колебаний

позволяют оценить вибронпряженность каждой лопатки.

После удаления разрушенной лопатки и восстановления балансировки (для чего может потребоваться удаление лопатки, диаметрально противоположной разрушенной в испытании, или замена разрушенной лопатки имитатором) испытание продолжается до разрушения следующей лопатки и т.д. Следует учитывать, что при повторных настройках на резонанс может несколько измениться частота вращения на резонансном режиме, что приведет к соответствующему изменению статических и вибрационных напряжений. Ниже рассмотрены возможные подходы к обработке результатов испытаний [7].

Метод ступенчатого повышения нагрузки (метод одного образца) применим для материалов, имеющих горизонтальный участок кривой усталости и не склонных к эффекту тренировки.

Порядок проведения испытаний и обработки результатов:

1. При выбранных значениях k, f, n (k - номер гармоники, f - резонансная частота, n - частота вращения ротора) возбуждаются колебания с амплитудой напряжений $\sigma = \sigma_{-1}/3$ для произвольной лопатки, для каждой лопатки определяются значения напряжений σ_{i0} , где i - порядковый номер лопатки, $i = 1..z$; z - общее число лопаток. За первую базовую для проведения испытаний выбирается лопатка l_1 с напряжением $\sigma_{l_1 0} = \max\{\sigma_{i0}\}$.

2. Возбуждают колебания установленных на ротор лопаток в течение N_0 циклов, принимаемых за базу для определения предела выносливости так, чтобы $\sigma_{l_1 1} = 0,8 \cdot \sigma_{r0}$, где σ_{r0} - ожидаемый предел выносливости при заданной асимметрии цикла.

3. Если в результате лопатка разрушилась, испытание останавливают, удаляют лопатку, компенсируют дисбаланс, и продолжают испытание. Если разрушилась базовая лопатка, выбирают новую базовую лопатку l_i с максимальным напряжением. При этом если напряжение данной лопатки на момент остановки испытания $\sigma_{l_i} < 0,8\sigma_{r0}$,

принимают $\sigma_{l_1} = 0,8\sigma_{r0}$, если $\sigma_{l_1} \geq 0,8\sigma_{r0}$, принимают $\sigma_{l_1} = \sigma_{l_i}$. Если разрушилась лопатка, отличная от базовой, испытание продолжают с момента остановки.

4. Если разрушение не произошло, уровень нагрузки увеличивают на $\Delta\sigma = 30 \dots 50$ МПа: $\sigma_{l_i}(j+1) = \sigma_{l_i}j + \Delta\sigma$ и проводят испытание в течение базового числа циклов, где j – номер ступени нагружения.

5. Повторяют пп. 3-4 до разрушения определенного программой испытаний количества лопаток. Разрушением считается невозможность поддержания заданного уровня вибронпряжений или изменение частоты колебаний на величину больше определенной.

6. За предел выносливости i -й лопатки принимается напряжение, предшествующее тому, при котором возникла трещина.

Метод позволяет получить значение среднего предела выносливости группы лопаток, а также, при достаточном количестве испытаний, функцию распределения предела выносливости. К недостаткам метода можно отнести возможное влияние для значительного числа материалов эффекта тренировки при проведении испытаний на уровнях напряжений ниже предела выносливости со ступенями, длительность которых сопоставима с базой, на которой определяется предел выносливости, а также большую длительность.

Метод Локати также предполагает испытание при ступенчатом повышении нагрузки, однако основан на линейной гипотезе накопления повреждений, исходящей из того, что усталостное повреждение материала пропорционально наработанному числу циклов.

Порядок проведения испытаний по методу Локати.

1. При выбранных значениях k, f, n возбуждаются колебания с амплитудой напряжений $\sigma = \sigma_{-1}/3$ для произвольной лопатки, для каждой лопатки определяются значения напряжений σ_{i0} , где i – номер лопатки, $i = 1 \dots z$; z – общее число лопаток. Для определенности за первую базовую для

проведения испытаний выбирается лопатка l_1 , амплитуда напряжений которой $\sigma_{l_10} = \max\{\sigma_{i0}\}$.

2. Возбуждают в течение $n_1 = 5 \cdot 10^4$ циклов колебания установленных на ротор лопаток так, чтобы $\sigma_{l_11} = 1,1 \cdot \sigma_{r0}$, где σ_{r0} – ожидаемый предел выносливости при заданной асимметрии цикла.

3. Переходят на следующий уровень напряжений $\sigma_{l_12} = \sigma_{l_11} + \Delta\sigma_1$, на котором лопатки работают n_2 циклов. Напряжения последовательно повышают таким образом до разрушения какой-либо лопатки. Принимают $\Delta\sigma_j = 0,1 \cdot \sigma_{r0}$, $n_{j+1} = n_j$, где j – номер ступени нагружения.

4. При разрушении лопатки испытание останавливают, удаляют лопатку, компенсируют дисбаланс и продолжают испытание. Если разрушилась базовая лопатка l_i , за новую базовую лопатку l_{i+1} принимают лопатку с максимальным напряжением из оставшихся и переходят на следующий уровень. Если при этом переходе $\sigma_{l_i} < \sigma_r$, увеличивают амплитуду напряжений либо изменяют режим испытаний таким образом, чтобы $\sigma_{l_i} \geq \sigma_r$. Если разрушилась лопатка, отличная от базовой, испытания продолжают с момента разрушения.

5. Испытания проводят до разрушения заданного числа лопаток. Разрушением считается невозможность поддержания заданного уровня вибронпряжений или изменение частоты колебаний на величину больше определенной.

6. Для каждой лопатки заносят в протокол испытаний следующие данные: номер ступени нагружения j , наблюдаемый уровень напряжений на ступени для данной лопатки σ_{ij} , длительность нагружения n_{ij} в циклах, частота колебаний лопатки f_{ij} .

Обработка результатов испытаний по методу Локати:

1. Обработка всех результатов ведется независимо для каждой лопатки. Результаты испытаний сортируются в порядке возрастания амплитуд напряжений.

2. Для материалов, кривая усталости которых имеет горизонтальный участок, выбирается минимальное учитываемое расчетное напряжение $\sigma'_1 = \sigma_{r0}$. В этом случае все ступени $\sigma_j < \sigma'_1$ при дальнейшей обработке не учитываются.

3. По взятым из литературы или полученным в результате предшествующих испытаний кривым усталости для материала строятся условные кривые усталости А, В, С (рис. 4), соответствующие 95%, 50% и 5% вероятности разрушения.

4. По результатам испытаний строится график зависимости $\sigma(N)$ (рис. 4).

5. По линейной гипотезе суммирования напряжений определяются параметры a_1, a_2, a_3 для условных кривых усталости А, В, С. При наличии горизонтального участка кривой усталости расчет ведется по зависимости

$$a = \sum_{i=1}^{i=p} \frac{n_i}{N_i},$$

где n_i – наработанное при напряжении σ_i число циклов; N_i – долговечность до разрушения при напряжении σ_i , определяемая по зависимости

$$N_i = N_p \cdot 10^{(\sigma_p - \sigma_i)/k},$$

где σ_p – разрушающее напряжение; N_p – долговечность на уровне σ_p , найденная в опыте; p – число ступеней нагружения; $k = |tg\beta| = \frac{1}{m}$ – тангенс угла наклона наклонной части кривой усталости; m – параметр уравнения кривой усталости $\sigma^m N = C$.

Если кривая усталости имеет 2 наклонных участка, параметр a определяется по зависимости

$$a = \sum_{i=1}^{i=s} \frac{n_i}{N_i} + \sum_{i=s+1}^{i=p} \frac{n_i}{N'_i},$$

где s – число ступеней нагружения с амплитудой $\sigma_i \geq \sigma_r$, N'_i – долговечность до разрушения при напряжении σ_i , определяемая по зависимости

$$N'_i = N_p \cdot 10^{(\sigma_p - \sigma_i)/k'},$$

где $k' = |tg\beta| = \frac{1}{m'}$ – тангенс угла наклона нижней части кривой усталости.

6. По подсчитанным значениям параметров a_1, a_2, a_3 строится кривая сумм накопленных повреждений (рис. 5). Искомым пределом выносливости считается значение, отвечающее условию $a = 1$.

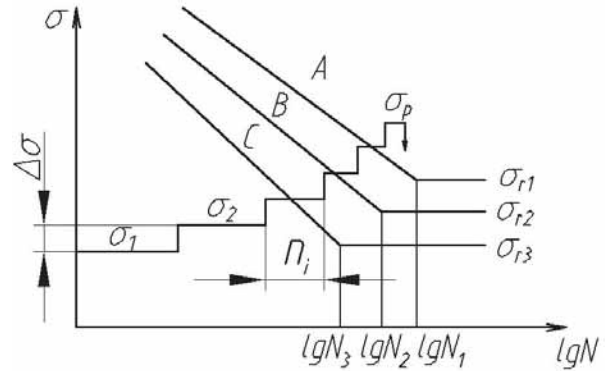


Рис. 4. Условные кривые усталости для определения предела выносливости

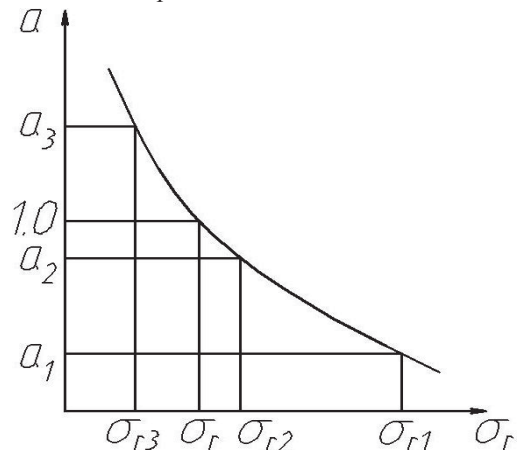


Рис. 5. Кривая сумм накопленных повреждений

Метод позволяет получить значение среднего предела выносливости группы лопаток и функцию распределения предела выносливости. При этом испытания проводятся одновременно для всех лопаток, в связи с чем повышается производительность, снижается стоимость испытаний и не наблюдается эффект тренировки. К недостаткам метода можно отнести необходимость использования условных кривых усталости, которые строятся по предварительной информации, что при некорректном их задании приводит к значительным ошибкам определения предела выносливости.

Библиографический список

1. Proceedings of the 10-th National Turbine Engine HCF Conferences, March 8-11, 2005, New Orleans, USA.

2. Лучшие практические рекомендации по снижению потерь в эксплуатации авиационной техники от повреждений деталей ГТД посторонними предметами, инициирующих многоцикловое усталостное разрушение лопаток компрессора. - НАТО, RTO-NR-AVT-094, 2005 (перевод ЦИАМ №13655, 2009).

3. Ножницкий, Ю.А. Применение динамических разгонных стендов для исследований вибрационной прочности деталей роторов [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Ю.А. Федина, Б. Милатовик // Тез. докл. на междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и пер-

спективы развития двигателестроения». - Самара: 2009. -Т.2, - С. 70-71.

4. Расчетно-экспериментальные исследования демпфера рабочей лопатки турбины высокого давления / Ю.А. Ножницкий, Б.Ф. Шорр, Г.В. Мельникова [и др.] // Сб. тр. конф. «EUCASS», Брюссель (Бельгия), 2007. [СД].

5. Методические особенности испытаний рабочих лопаток турбомашин на многоцикловую усталость на разгонном стенде [Текст] / Ю.А. Ножницкий [и др.] // Тр. ЦИАМ, №1344, 2010. - С. 146-174.

6. Patent №US6,679,121 B2, Jan.20, 2004. Blade vibration test apparatus and method.

7. Олейник, Н.В. Ускоренные испытания на усталость [Текст] / Н.В. Олейник, С.П. Скляр. - Киев, Наукова думка, 1985. - 304с.

METHODICAL FEATURES OF VIBRATION TESTS OF ROTATING BLADES USING DYNAMIC SPIN RIGS

© 2011 Yu. A. Nozhnitsky, Yu. A. Fedina, D. V. Shadrin

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

Methodical Features of Investigations of Rotating Blades Vibration Characteristics and High Cycle Fatigue Using Dynamic Spin Rigs are discussed.

Vibration, Methodical Features, Aviation Engine.

Информация об авторах

Ножницкий Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор, заместитель Генерального директора центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Область научных интересов: безопасность, прочность и ресурс газотурбинных двигателей.

Федина Юлия Алексеевна, кандидат технических наук, начальник сектора центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. E-mail: fedina@ciam.ru. Область научных интересов: виброиспытания на динамических разгонных стендах.

Шадрин Дмитрий Владимирович, инженер 1-й категории центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. E-mail: shadrin@ciam.ru. Область научных интересов: виброиспытания на динамических разгонных стендах.

Nozhnitskiy Yuri Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, professor, deputy director general of Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Area of research: safe, integrity and life of gas turbine engines.

Fedina Yulia Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, head of sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. E-mail: fedina@ciam.ru. Area of research: vibration tests using dynamic spin rigs.

Shadrin Dmitry Vladimirovich, engineer of Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. E-mail: shadrin@ciam.ru. Area of research: vibration tests using dynamic spin rigs.