

УДК 629.7.03.018

М.Е. КОЛОТНИКОВ¹, П.В. МАКАРОВ¹, В.М. САЧИН²¹*ФГУП «ММПП «Салют», Москва, Россия*²*ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия***ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ШИРОКОХОРДНОГО ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

Представлены результаты экспериментального исследования динамической напряженности рабочих колес вентилятора ТРДДФ с широкохордными лопатками при стендовых испытаниях. Использован комплекс методов и диагностических признаков флаттера, многократно верифицированных при доводочных испытаниях ряда авиадвигателей поколений 4 и 4+. Получены новые экспериментальные данные о физических особенностях флаттера, которые могут быть использованы для верификации методов его расчетного прогнозирования. Показана необходимость разработки новых критериев прогнозирования флаттера колес современных широкохордных вентиляторов авиационных ГТД, к которым предъявляются противоречивые требования по повышению параметров с одной стороны, и по снижению удельного веса и увеличению ресурсов с другой.

вентилятор, рабочее колесо, блиск, лопатки, флаттер, диагностика, прогнозирование**Введение**

Создание ТРДДФ нового поколения, оптимальных с точки зрения сочетания термодинамического совершенства и прочностной надежности, невозможно без решения проблемы обеспечения приемлемого уровня динамической напряженности рабочих колес (РК) высоконапорных вентиляторов с широкохордными безбандажными беззамковыми лопатками, изготовленными по технологии «блиск» (зацело с дисками). Особого внимания заслуживает флаттер (динамическая аэроупругая неустойчивость), возникновение которого на подобных конструкциях с пониженным механическим демпфированием способно привести к быстрому усталостному разрушению [1].

В этих условиях актуальна разработка достоверных методов прогнозирования флаттера РК вентиляторов ТРДДФ на стадии конструирования, а также методов его диагностирования на самой ранней стадии исследовательских испытаний, в том числе, в темпе эксперимента.

В настоящее время в практике российского авиадвигателестроения расчетное прогнозирование

флаттера РК базируется преимущественно на статистическом подходе, суть которого заключается в обобщении экспериментальных данных методами математической статистики и построении областей флаттера и устойчивости в многомерном пространстве диагностических факторов [2]. Такой подход достаточно хорошо себя зарекомендовал главным образом для схем вентиляторов с рабочими лопатками, имеющими антивибрационные полки, для которых накоплен большой объем экспериментальных данных. Однако в случае его использования применительно к колесам широкохордных высоконапорных вентиляторов без бандажных связей между лопатками (т.е. проведения экстраполяции за пределы области параметров, не охватываемой имеющимися сегодня экспериментальными данными), результат представляется далеко не очевидным.

Аналогичным образом нуждалась в экспериментальной проверке (применительно к новой разновидности конструкции вентилятора) адекватность характерных признаков и созданного на их основе комплекса методов ранней диагностики флаттера РК как стационарного волнового процесса в неконсервативной поворотно-симметричной системе со мно-

гими степенями свободы [3 – 9]. Эти методы в свое время успешно применены при стендовых и летных доводочных испытаниях двигателей предыдущих поколений 4 и 4+ с вентиляторами, имеющими антивибрационные полки.

1. Постановка задачи

Задачами представленной работы являлись:

- получение новых экспериментальных данных о физических особенностях флаттера РК широкохордного вентилятора, которые можно было бы использовать в качестве ориентира для верификации и целенаправленного усовершенствования методов его расчетного прогнозирования;
- верификация, применительно к конструкции этого типа, вышеуказанных характерных признаков и методов диагностики флаттера РК.

2. Краткая характеристика объекта и методики экспериментальных исследований

Объектом экспериментальных исследований являлся трехступенчатый вентилятор с широкохордными лопатками типа «блиск». Предварительно на этапе конструирования для РК 1-й ступени данного вентилятора была выполнена расчетная оценка устойчивости к флаттеру при номинальных размерах лопаток.

Испытания вентилятора проведены на высотном стенде ЦИАМ.

Рабочие лопатки были препарированы тензодатчиками базой 3 мм, причем, для применения фазового метода диагностики флаттера РК [4, 5] была предусмотрена установка датчиков в сходственных точках нескольких пар соседних лопаток (нумерация лопаток была принята возрастающей в направлении вращения). С целью применения методики бесконтактной виброакустической диагностики флаттера [4, 6, 7], при помощи датчиков, установленных в различных точках на корпусах вентилятора, были проведены измерения пульсаций статиче-

ского давления потока, вибраций и вибронапряжений.

При обработке экспериментальных данных, проведенной с помощью программного комплекса WinПОО НПП «Мера» г. Королев, использовался анализ тонкой структуры (с разрешающей способностью по частоте ~ 1 Гц) спектральной плотности мощности, характеризующей распределение по частоте энергии каждого из указанных колебательных процессов, измеренных в отдельных точках, а также анализ взаимной спектральной плотности, характеризующей их взаимосвязанность.

Интерпретация результатов обработки проведена в рамках модели связанных аэроупругих колебаний РК компрессоров как волновых процессов в неконсервативной поворотной-симметричной системе, с учетом комплекса диагностических признаков флаттера РК [4 – 9]:

- возникновение связанных колебаний колеса в виде так называемой вперед бегущей (ВБ) волны деформации, движущейся от корытца к спинке (т.е. относительно компрессорной рабочей решетки – в направлении вращения) и характеризующейся тем или иным числом пространственных окружных периодов («диаметров») m ;
- возбуждение в окружающем потоке и на элементах конструкции статора аналогичных волн давления и вибраций, характеризующихся тем же, что и на диагностируемом колесе, числом диаметров, и диагностической частотой (в неподвижной системе координат), которая превышает «тензометрическую» частоту (фиксируемую тензодатчиками на рабочих лопатках) на величину, равную произведению числа диаметров и частоты вращения;
- уменьшение (в процессе варьирования режимных параметров вблизи от границы флаттера) логарифмического декремента соответствующей формы связанных колебаний РК, определяемого статистическим анализом отклика лопаток на широкополосные турбулентные пульсации потока.

Необходимо отметить, что в случае отклонения реального рабочего колеса от строгой поворотной симметрии (что особенно характерно для конструкций с консольными лопатками, имеющих весьма плотный спектр собственных частот связанных колебаний по формам с близкими числами диаметров, см. [3]), собственная форма, по которой происходит потеря устойчивости, уже не строго синусоидальна и не может быть охарактеризована одним числом – числом диаметров. Она описывается конечным рядом Фурье с числом членов, равным числу лопаток z ; при этом возникает разброс по венцу амплитуд колебаний отдельных лопаток и разброс сдвигов фаз между колебаниями различных пар соседних лопаток. В результате при флаттере асимметричного РК по каждой i -й собственной форме с частотой f_{ω_i} в окружающем пространстве будет генерироваться уже не одно колебание – ВБ волна давления и вибраций корпуса с вышеуказанной частотой $f_{\omega_i} + m \times f_p$, а, вообще говоря z колебаний в виде вперед - и назад бегущих волн с частотами $f_{\omega_i} \pm m_1 \times f_p$. Однако, по крайней мере, для случаев малой асимметрии венца, амплитуды ВБ волн выше [4, 6].

Здесь f_p – частота вращения ротора, а m_1 – номер гармоники конечного ряда Фурье, аппроксимирующего собственную форму колебаний РК (для конкретного семейства форм, см. [3]); этот номер может варьироваться в пределах от нуля до значения, равного $z/2$ и $(z - 1)/2$ при соответственно четном и нечетном числе лопаток колеса z .

3. Обсуждение результатов экспериментальных исследований

В целом для проведенных испытаний был характерен вполне приемлемый уровень амплитуд вибронпряжений в рабочих лопатках всех ступеней исследованного вентилятора при обычных резонансных колебаниях, возбуждавшихся низшими гармониками неподвижной окружной неравномерности потока. Наиболее примечательным видом колеба-

ний, определявшим вибронпряженность вентилятора, оказался флаттер РК 1-й ступени, которому и было уделено основное внимание.

3.1. Испытания с атмосферными условиями на входе в вентилятор. На первом этапе испытаний с атмосферными условиями на входе было установлено отсутствие каких-либо признаков флаттера РК на всех режимах работы с номинальными значениями углов установки регулируемого входного направляющего аппарата (ВНА) вентилятора.

Однако при испытаниях с раскрытием ВНА (что соответствовало увеличению углов атаки при обтекании потоком рабочих лопаток 1-й ступени) в процессе увеличения приведенной частоты вращения ротора при $n_{пр} \approx 73\%$ был зафиксирован резкий («стенкой») рост амплитуд нерезонансных колебаний одновременно всех лопаток с частотой, не кратной физической частоте вращения ($\kappa = 4,1$). Это проиллюстрировано осциллограммами тензосигналов с рабочих лопаток 1-й ступени, отфильтрованных в окрестности указанной частоты (рис. 1), а также соответствующими графиками спектральной плотности мощности (рис. 2, а; 2, б).

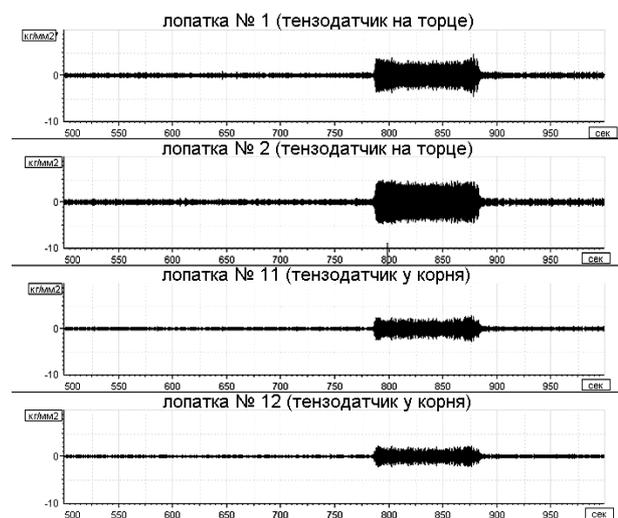


Рис. 1. Осциллограммы вибронпряжений в рабочих лопатках, характеризующие выход и уход с режима, на котором возник флаттер РК1 вентилятора

Близость к единице функции когерентности колебаний различных лопаток (рис. 2, в) являлась при-

знаком реализации связанных колебаний колеса с общей для всех лопаток частотой.

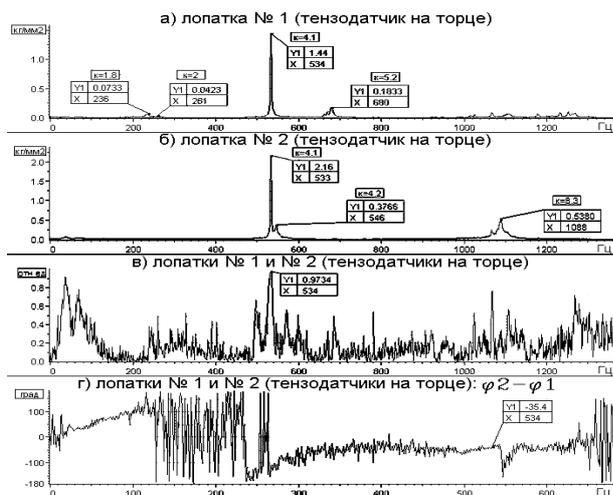


Рис. 2. Спектрограммы (а, б), функция когерентности (в) и сдвиги фаз (г) вибронапряжений в лопатках, свидетельствующие о возникновении флаттера РК1 вентилятора

Сопоставление этих данных с результатами расчетов и вибрационных испытаний конструкции в лабораторных условиях (без вращения) показало, что обнаруженные связанные колебания РК 1-й ступени реализовались по собственной форме, характеризовавшейся превалированием крутильной составляющей деформаций лопаток с максимумом вблизи от входной кромки.

Обращало на себя внимание отсутствие в указанных спектрограммах компонент, которые бы являлись признаками вращающегося срыва потока. Узость пика спектрограмм на частоте обнаруженных колебаний, а также отмеченное высокое значение функции когерентности исключали версию о случайных вынужденных колебаниях, генерируемых срывными явлениями в потоке вследствие приближения к левой ветви напорной характеристики ступени. Совокупность вышеизложенных фактов дала основание причислить обнаруженные колебания РК 1-й ступени к флаттеру.

Достоверность этого предварительного диагноза была существенно повышена путем использования вышеуказанного комплекса характерных признаков и методов диагностики [4 – 9], который, как показа-

ли проведенные эксперименты, оказался вполне адекватен применительно к исследованному широкохордному вентилятору. Во-первых, отрицательные значения межлопаточного сдвига фаз в окрестности частоты обнаруженных колебаний (рис. 2, г) свидетельствовали о реализации связанных колебаний РК вентилятора в виде ВБ волны, характерной именно для флаттера.

Во-вторых, четкое выделение из шума в спектрах пульсаций потока, вибраций и вибронапряжений корпуса (рис. 3) дискретных компонент на частоте кратности $k = 7,1$, превышающей «тензометрическую» частоту кратности $k = 4,1$ на величину утроенной частоты вращения, являлось еще одним диагностическим признаком флаттера РК по форме связанных колебаний, характеризующейся так называемым превалирующим числом диаметров $m = 3$. Наличие еще нескольких компонент на частотах с нецелыми кратностями $k = 4,1$, $k = 5,1$, $k = 6,1$ и $k = 8,1$ достаточно типично для флаттера колес с консольными лопатками [6] и является признаком проявления эффектов динамической неоднородности (асимметрии) исследованного колеса.

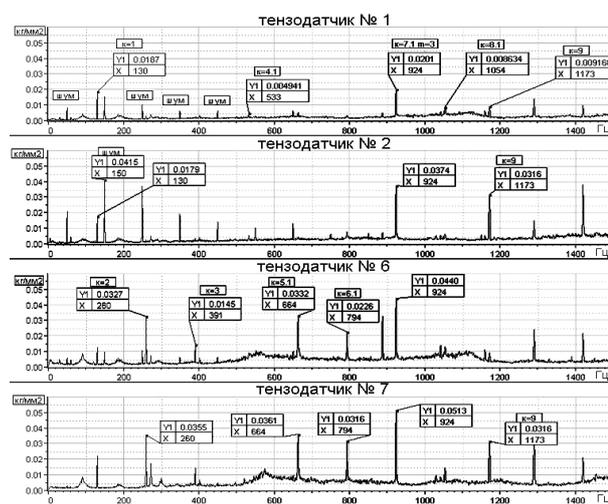


Рис. 3. Спектрограммы вибронапряжений в корпусе вентилятора, свидетельствующие о возникновении флаттера РК1

Аналогичным путем при испытаниях на режиме с приведенной частотой вращения $n_{пр} \approx 75\%$ был диагностирован флаттер РК 1-й ступени по форме

связанных колебаний, характеризуемой двумя узловыми диаметрами $m = 2$.

Еще одним диагностическим признаком флаттера исследованного РК 1-й ступени в области режимов с $n_{np} = 73 - 75\%$ явилось обнаружение на предшествующем режиме с $n_{np} \approx 70\%$ резкого уменьшения декремента связанных колебаний до уровня $\delta \approx 0,3\%$, который более чем на порядок ниже обычных уровней (4 – 10%), характеризующих демпфирование колебаний компрессорных лопаток по низшим формам. Результаты проведенной при этом идентификации случайных связанных колебаний в виде случайно-модулированной ВБ волны (в окрестности собственной частоты кратности $\kappa = 4,3$), характеризующей предфлаттерное состояние РК (см. [8]), представлены на рис. 4.

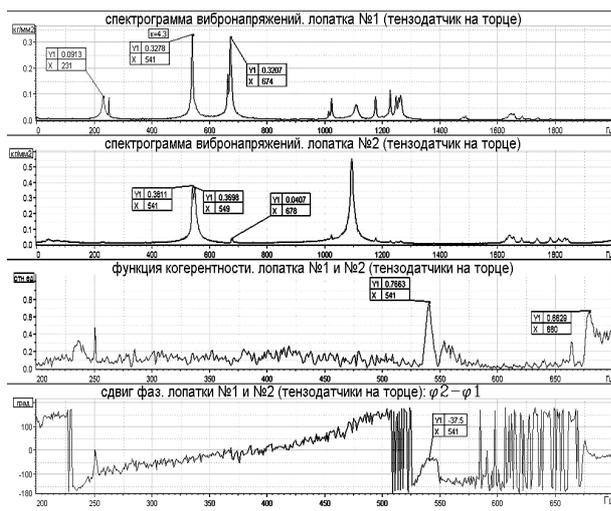


Рис. 4. Спектрограммы (а, б), функция когерентности (в) и сдвиги фаз (г) вибронпряжений в лопатках, свидетельствующие о реализации предфлаттерного состояния РК 1 вентилятора

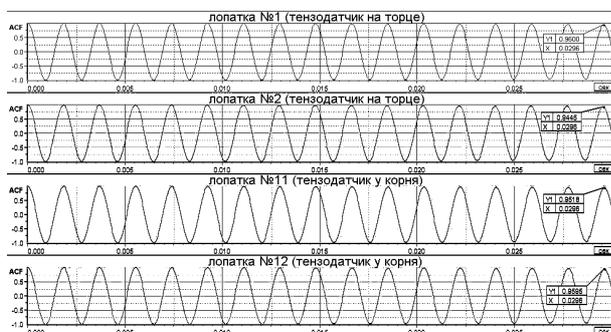


Рис. 5. Оценивание логарифмического декремента ($\delta \approx 0,3\%$), характеризующего близость к границе флаттера РК1, по затуханию огибающих автокорреляционных функций случайных колебаний лопаток

Результаты, относящиеся к непосредственному измерению декремента для выделенной формы по затуханию огибающих нормированных автокорреляционных функций случайных колебаний нескольких лопаток, показаны на рис. 5.

3.2. Испытания при повышенных значениях температуры и давления потока на входе. При испытаниях с повышенными значениями параметров потока на входе в вентилятор флаттер РК 1-й ступени был выявлен в диапазоне режимов работы с $n_{np} = 74 - 76\%$; он реализовался (в зависимости от конкретного режима) с частотами $f = 526 - 539$ Гц по формам связанных колебаний, которые характеризовались преобладающими числами диаметров, изменяющимися в диапазоне $m = 2 - 4$. Для него был характерен резкий рост амплитуд вибронпряжений в лопатках при увеличении температуры и давления, а также при движении рабочей точки по напорной характеристике в направлении границы срыва (при дросселировании).

На этом этапе испытаний, как и при испытаниях с атмосферными условиями на входе, при диагностировании флаттера РК 1-й ступени эффективно использован комплекс вышеуказанных методов. Типичные результаты выявления флаттера (характеризуемого преобладающим числом диаметров $m = 3$) представлены на рис. 6, 7.

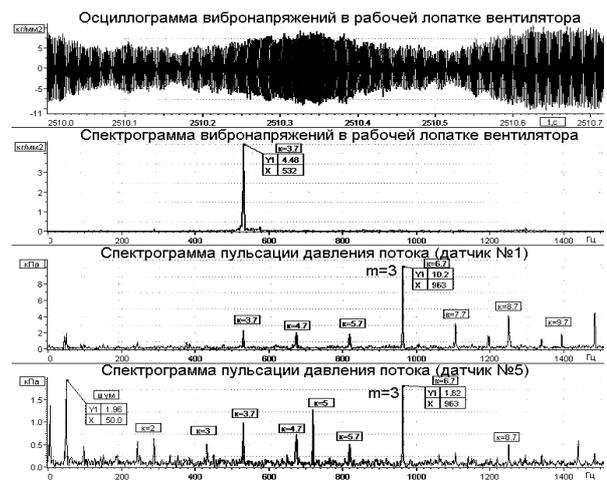


Рис. 6. Осциллограмма (а) и спектрограмма (б) вибронпряжений в рабочей лопатке вентилятора, а также спектрограммы пульсаций давления потока (в, г), свидетельствующие о возникновении флаттера РК1 вентилятора

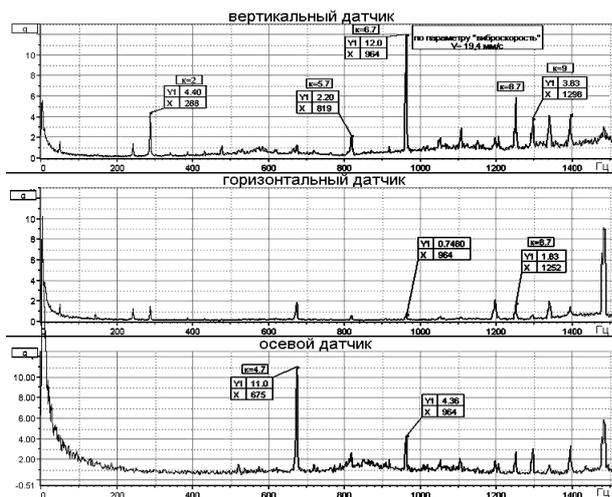


Рис. 7. Спектрограммы вибраций корпуса, свидетельствующие о возникновении флаттера РК1

Одной из причин высокого уровня побочной компоненты (с кратностью $k = 4,7$) на спектрограмме осевой вибрации (рис. 7) может быть проявление локального корпусного резонанса. В целом при испытаниях обнаружена отмечавшаяся и ранее (см. [4, 6]) тенденция к уменьшению побочных компонент в спектрах пульсаций потока и вибраций статорной части вентилятора по мере углубления в область флаттера РК, например, при дросселировании.

3.3. Выявление особенностей связанности колебаний РК всех ступеней вентилятора и снижения собственной частоты лопаток при флаттере. При тензометрировании с повышением температуры и давления на входе флаттер рабочих лопаток 1-й ступени по крутильной форме сопровождался интенсивными вынужденными колебаниями рабочих лопаток 2-й и 3-й ступеней. Расчетные значения собственных частот колебаний рабочих лопаток 2-й, и 3-й ступеней оказались близкими к замеренным по рабочей лопатке 1-й ступени, а выполненный расчетный модальный анализ всего ротора показал наличие форм его взаимосвязанных колебаний, когда по одной собственной частоте колеблются не только лопатки 1-й и 3-й ступеней, но и также диски 2-й и 3-й ступеней по зонтичной форме и форме с одним узловым диаметром.

При экспериментальных исследованиях динами-

ческой напряженности РК 1-й ступени вентилятора было отмечено, что частота колебаний, на которой реализовался флаттер, оказалась ниже (≈ 10 Гц), по сравнению с частотой резонансных колебаний для режимов с практически совпадающими значениями частоты вращения ротора.

4. Рекомендации по прогнозированию и устранению флаттера лопаток широкохордных вентиляторов

По нашему мнению, оценки устойчивости к флаттеру рабочих лопаток вентиляторов, базирующиеся на использовании вероятностно-статистических методов, следует проводить не только для зоны насыщения (с большим числом узловых диаметров), но и для зоны интерференции на частотных диаграммах (рис. 8).



Рис. 8. Частотная диаграмма собственных форм колебаний РК1

Учет этого обстоятельства может сказаться на функции правдоподобия [2], которая из области прогнозирования устойчивости к флаттеру или неопределенности диагноза может перейти в область неустойчивости к флаттеру.

По-видимому, целесообразно также проводить расчеты работы нестационарных аэродинамических сил на перемещениях лопаток при колебаниях по собственным формам. Разработанную модель необ-

ходимо верифицировать по данным экспериментов.

Необходима разработка специальных демпфирующих устройств для РК типа «блиск» для эффективной борьбы с флаттером лопаток и снижения амплитуды интенсивных вынужденных (резонансных) колебаний.

Заключение

Основными результатами проведенного экспериментального исследования применительно к РК широкохордного вентилятора являются следующие:

1) получены новые экспериментальные данные о физических особенностях флаттера, которые могут быть использованы для верификации методов его расчетного прогнозирования, базирующихся как на статистическом подходе, так и на расчете работы нестационарных аэродинамических сил на собственных колебательных перемещениях системы «лопатки – диск – поток»;

2) верифицированы характерные признаки и методы ранней диагностики флаттера РК, что позволяет надеяться на их успешное использование для диагностики явления в темпе эксперимента на следующих стадиях испытаний.

Литература

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

2. Локштанов Е.А., Михайлов В.М., Хориков А.А. Статистическое прогнозирование флаттера лопаток турбомашин // *Аэроупругость лопаток турбомашин*. – К.: Наукова думка. – 1980. – С. 73-81.

3. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. – М: Машиностроение, 1983. – 224 с.

4. Сачин В.М. Некоторые особенности аэроупругих колебаний рабочих колес турбомашин // *Аэроупругость лопаток турбомашин*. – М.: ЦИАМ. – 1981. – Труды №953. – С. 267-287.

5. Сачин В.М., Шатохин А.Г. Фазовый метод диагностики связанных аэроупругих колебаний и опыт его применения при доводке рабочих колес осевых компрессоров // *Аэроупругость лопаток турбомашин*. – М.: ЦИАМ. – 1989. – Труды № 1266, вып. 5. – С. 157-165.

6. Сачин В.М., Шатохин А.Г. Исследование возможностей бесконтактного обнаружения флаттера рабочего колеса осевого компрессора // *Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении*. – М.: ЦИАМ. – 1985. – Труды № 1109, вып. 3. – С. 166-175.

7. Сачин В.М., Туманов Н.В., Шатохин А.Г. Бесконтактная вибродиагностика флаттера рабочих колес компрессоров // *Аэроупругость лопаток турбомашин*. – М.: ЦИАМ. – 1987. – Труды № 1221, вып. 4. – С. 195-206.

8. Сачин В.М. К вопросу об определении декрементов связанных аэроупругих колебаний рабочего колеса компрессора // *Аэроупругость лопаток турбомашин*. – М.: ЦИАМ. – 1983. – Труды №1064, вып. 2. – С. 172-187.

9. Сачин В.М. Верификация характерных признаков и методов ранней диагностики флаттера рабочего колеса компрессора, осуществленная при доводочных испытаниях двигателя поколения 4+ на высотном стенде ЦИАМ // *ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности*. Т 2. – М.: ЦИАМ. – 2005. – С. 162-166.

Поступила в редакцию 26.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Б. Коровин, Федеральное государственное унитарное предприятие РФ «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Москва, Россия.