

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛАТТЕРА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА НА РЕЖИМЕ СРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ

© 2011 А. А. Хориков, С. Ю. Данилкин

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

Приведены результаты экспериментального исследования динамического состояния трёхступенчатого вентилятора современной блисковой конструкции, спроектированного по новым расчётным технологиям. Выявлены особенности колебаний рабочих лопаток при исследовании флаттера в срывной области. В результате проведённого экспериментального исследования сделан вывод о том, что имеются два вида дозвукового решётчатого флаттера: бессрывной флаттер, которому соответствует волна деформации, бегущая по вращению, и срывной флаттер, при котором волна деформации бежит против вращения.

Флаттер, вращающийся срыв, срывное обтекание, вентилятор, рабочие лопатки, волны деформации, пульсации потока.

В работе [1] аналитическим решением было показано, что в отсутствие набегающего потока газа собственными колебаниями компрессорного колеса являются бегущие по вращению и против вращения волны деформации. При этом в каждой из бегущих волн реализуется временной сдвиг фаз колебаний между лопатками, соответствующий определенной диаметральной форме, а между крутильной и изгибной составляющими колебаний на каждой лопатке должен существовать сдвиг фаз колебаний, равный 90° . Однако, вследствие существующей в отсутствие потока симметрии системы, эти бегущие волны деформации при равном числе узловых диаметров имеют одинаковые частоты и амплитуды и в результате их суперпозиции получаются стоячие волны, в которых временной сдвиг между лопатками и между изгибной и крутильной составляющими колебаний на каждой лопатке становится равным нулю или 180° , что свойственно всем консервативным системам. При колебаниях лопаток в потоке набегающего потока газа, т.е. в неконсервативной системе, волны деформаций, бегущие по вращению и против вращения колеса, уже не являются одинаковыми. Вследствие несимметричности действующих на лопатки нестационарных аэродинамических сил, эти волны имеют разные частоты и разные декременты колебаний даже при равном числе узловых диаметров, а практическая реализация какой-либо из этих двух волн деформа-

ций зависит от конкретных значений аэродинамических сил.

Вместе с тем при экспериментальных исследованиях вентиляторов и компрессоров неоднократно было отмечено, что при возникновении флаттера (автоколебаний) лопаток на режимах вблизи рабочей линии по лопаткам и в потоке возникает только волна деформации, бегущая по вращению колеса. Это обстоятельство позволило сформулировать один из информативных диагностических признаков флаттера, основанный на измерении сдвигов фаз колебаний между лопатками (см., например, [2]), а также предложить способы бесконтактной диагностики флаттера по сигналам с датчиков пульсаций потока [3,4]. Появился даже ряд работ, в которых утверждалось о правомерности этого положения для всех случаев решётчатого флаттера лопаток вне зависимости от их упругомассовых характеристик и режимов обтекания лопаток.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования динамического состояния трехступенчатого вентилятора современной блисковой конструкции, спроектированного по новым расчётным технологиям. Исследование проводилось по линии рабочих режимов и в процессе дросселирования вентилятора по напорной характеристике на приведенной частоте вращения $n_{np} = 0,8$ ($f_p = 140,1$ Гц), которая соответствовала наиболее напряжённой работе вентилятора в эксплуатационных

условиях. При этом согласно расчетам все сечения лопаток обтекались дозвуковым потоком, кроме периферийных, где реализовалось почти трансзвуковое обтекание. Для проведения исследования вентилятор был подробно препарирован. Рабочие лопатки, лопатки направляющих аппаратов, барабан ротора и корпус вентилятора были препарированы тензорезисторами. Кроме того, на входе и на выходе из вентилятора были установлены датчики пульсаций давления ППД-100, непосредственно над рабочими лопатками были установлены высокочастотные датчики пульсаций М116В03, на корпусе вентилятора были размещены вибродатчики (в том числе векторные). Регистрация сигналов с перечисленных датчиков осуществлялась на регистраторы-анализаторы МІС-300М.

Отличительной особенностью поведения исследуемого вентилятора были срывные

колебания на частотах вращения вплоть до $\bar{n}_{np} = 0,7$ на линии рабочих режимов. Колебания происходили с суммарным уровнем напряжений до $\sigma = 9$ кгс/мм² с превалированием уровня с $\sigma \approx 2$ кгс/мм² для спектральных составляющих на частотах $f_l = 543...546$ Гц, что соответствовало первой крутильной форме колебаний. Спектр этих колебаний представлен на рис.1. Следует заметить, что эти колебания являются типичными для современных вентиляторов, так как при их проектировании существует четкая тенденция к уменьшению количества ступеней, которая при высокой аэродинамической нагруженности не позволяет обеспечить безотрывное обтекание лопаток первых ступеней в диапазоне малых частот вращения.

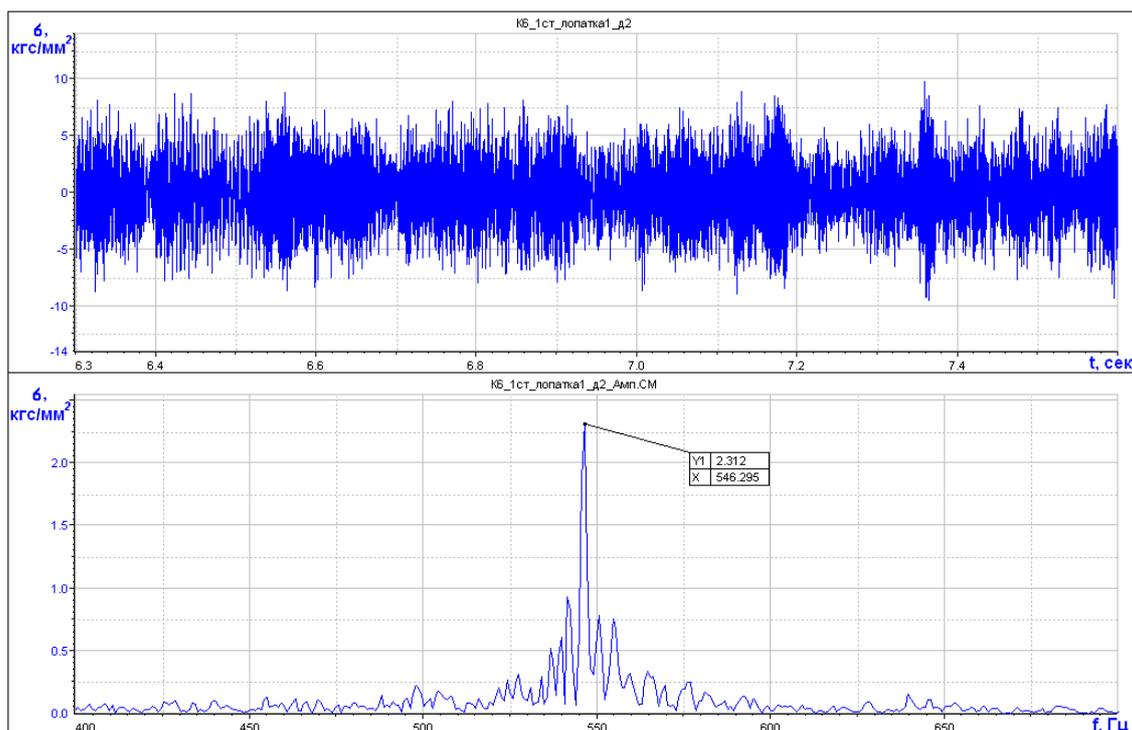


Рис. 1. Осциллограмма и спектр сигнала с тензодатчика при срывных колебаниях при $\bar{n}_{np} = 0,65$

На рис. 2 представлены осциллограмма и 3D спектрограмма колебаний одной из лопаток в процессе дросселирования при $\bar{n}_{np} = 0,8$. В начальный момент дросселирования вблизи линии рабочих режимов в спектре превалируют колебания с частотой крутильной формы колебаний $f_l = 559$ Гц с уровнем напряжений на этой частоте до

$\sigma \approx 0,5$ кгс/мм² и суммарным уровнем $\sigma \approx 1,5$ кгс/мм².

При достижении смещения от линии рабочих режимов на $\delta K_u \approx 0,5\%$ уровень напряжений с частотой $f_l = 559$ Гц увеличился до $\sigma \approx 1,5$ кгс/мм² и одновременно появились спектральные составляющие невысокого уровня на частотах $f_l = 229$ Гц, $f = 29,7$ Гц и

$f = 59,3$ Гц. Первая из этих спектральных составляющих соответствовала первой форме колебаний лопатки, а частоты $f = 29,7$ Гц и $f = 59,3$ Гц являются первой и второй гармониками вращающегося срыва. В спектре

пульсаций потока, т.е. в неподвижной системе координат, этот вращающийся срыв проявился весьма слабо на частоте $f = 110,7$ Гц и его второй гармонике с частотой $f = 221,4$ Гц (рис. 3).

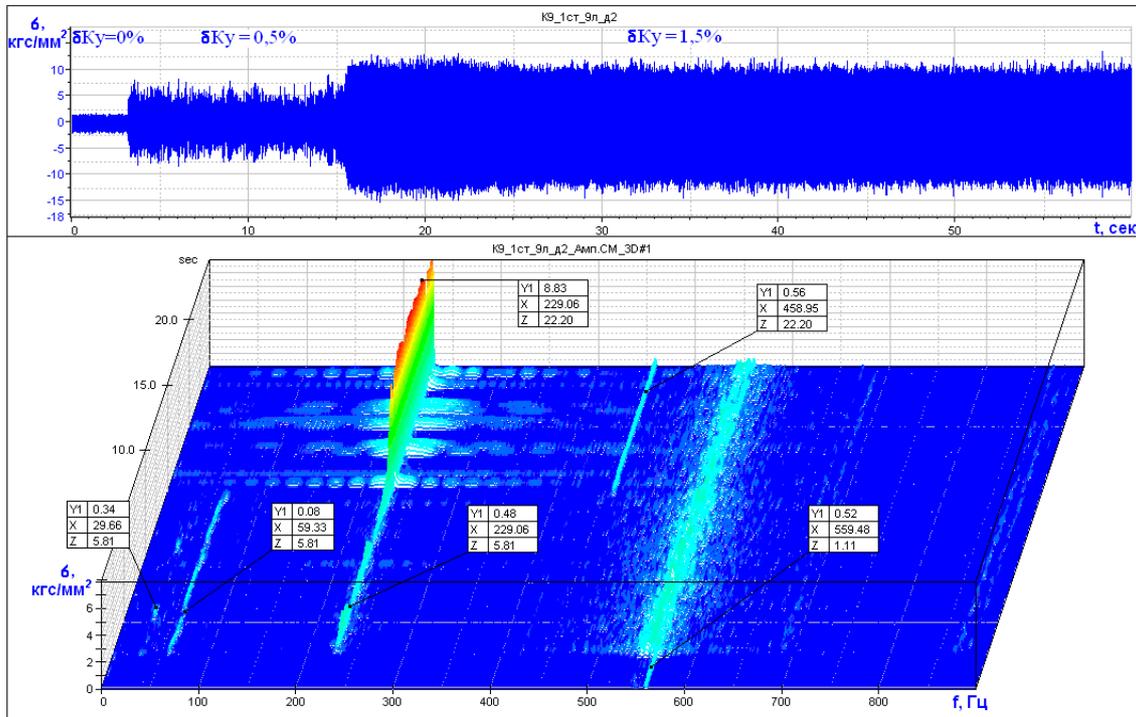


Рис. 2. Осциллограмма и 3D спектр колебаний лопатки в процессе дросселирования по напорной характеристике

При достижении $\delta Ku \approx 1,5\%$ спектральные составляющие, соответствующие слабому вращающемуся срыву, исчезают. При этом в спектре колебаний лопатки начинает доминировать частота $f_1 = 229$ Гц с замеренным уровнем напряжений до $\sigma = 15$ кгс/мм² (с учетом коэффициентов пересчета максимальный уровень составил $\sigma = 27$ кгс/мм²), а в спектрах пульсаций потока появляются частоты $f_1 = 749,8$ Гц, $f_2 = 1766,6$ Гц и $f_3 = 3266,2$ Гц, причем спектральная составляющая с частотой f_2 больше спектральной составляющей с частотой f_1 . Относительно спектральной составляющей, соответствующей частоте следования лопаток $Nf_p = 2518,9$ Гц ($N = 18$ – количество лопаток 1-й ступени), спектральные составляющие с частотами f_2 и f_3 находятся на одинаковом частотном расстоянии, равном f_1 . Аналогичная картина поведения частот имеет место и по лопаткам спрямляющего аппарата, где отмечены мгновенные значе-

ния $f_1 = 750,6$ Гц, $f_2 = 1769$ Гц, $f_3 = 3269$ Гц (рис. 4). Указанным колебаниям лопаток в барабане вентилятора соответствовали вибрационные напряжения той же частоты с уровнем $\sigma = 1,5$ кгс/мм².

На рис. 5 приведены осредненные спектры колебаний лопатки и пульсаций потока за время существования колебаний лопаток с высоким уровнем напряжений. Из них видно, что колебаниям лопаток с частотой $f_1 = 230$ Гц в спектрах пульсаций потока соответствуют диагностические частоты $f_1 = 751$ Гц, $f_2 = 1771$ Гц и $f_3 = 3273$ Гц, причем частоты f_2 и f_3 находятся точно на одинаковом расстоянии f_1 от частоты следования лопаток $Nf_p = 2522$ Гц, а спектральная составляющая на частоте f_2 больше, чем спектральная составляющая на частоте f_3 . В соответствии с положениями работ [5,6] это должно соответствовать волне деформаций, бегущей против вращения колеса.

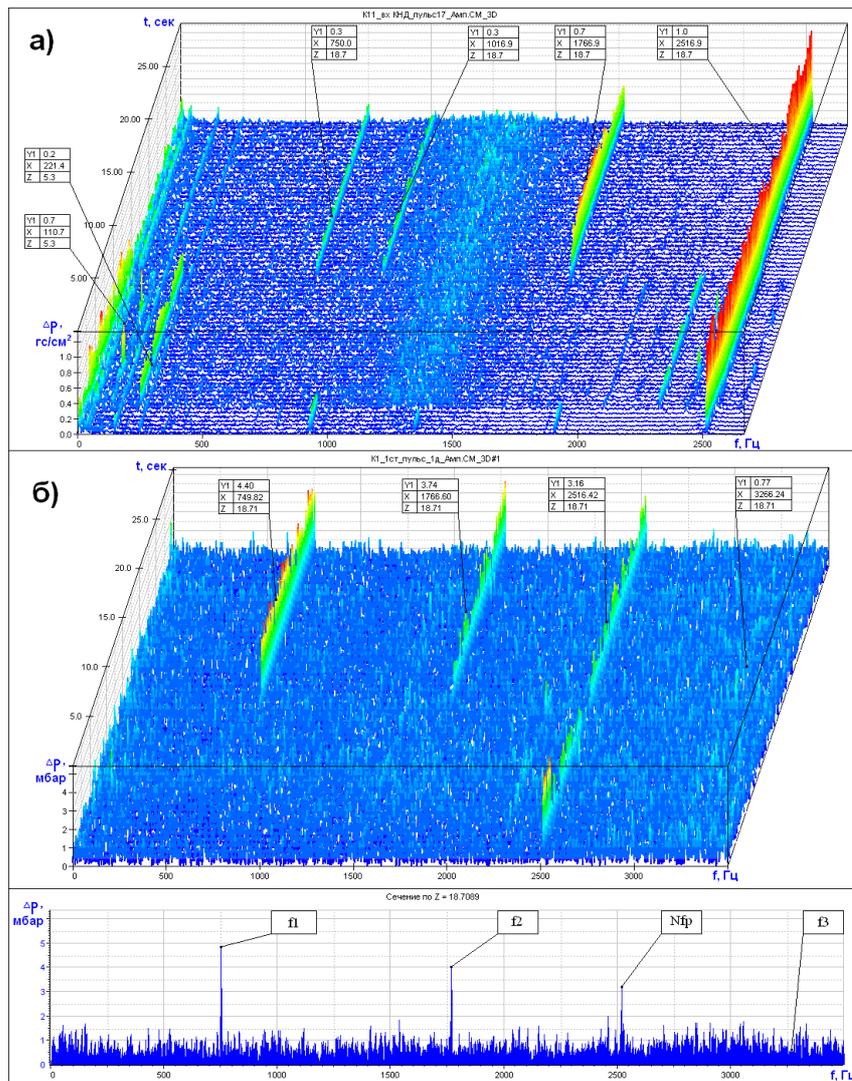


Рис. 3. 3D спектр пульсаций потока перед (а) и над (б) 1-й ступенью в процессе дросселирования по напорной характеристике

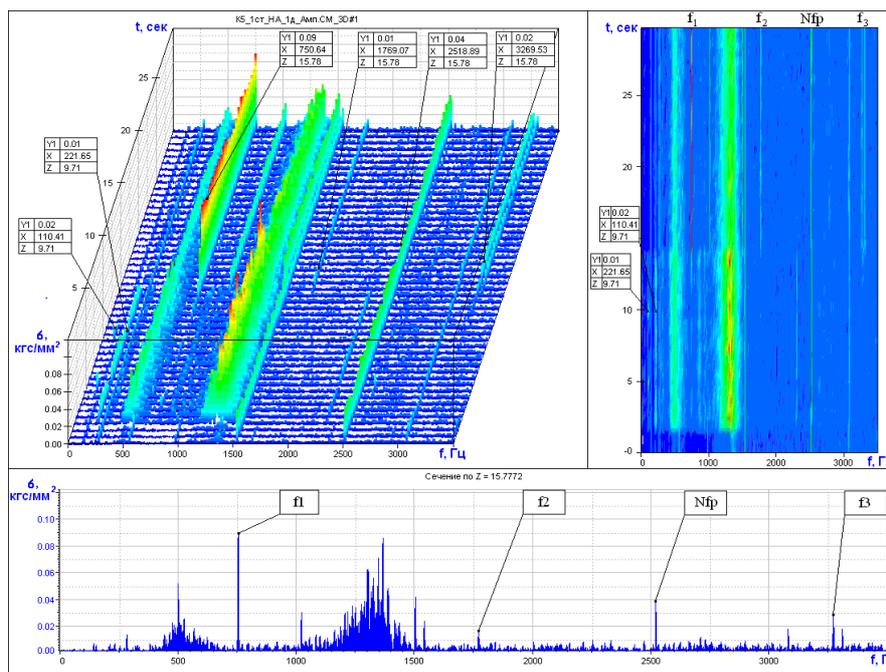


Рис. 4. 3D спектр колебаний лопатки направляющего аппарата в процессе дросселирования по напорной характеристике

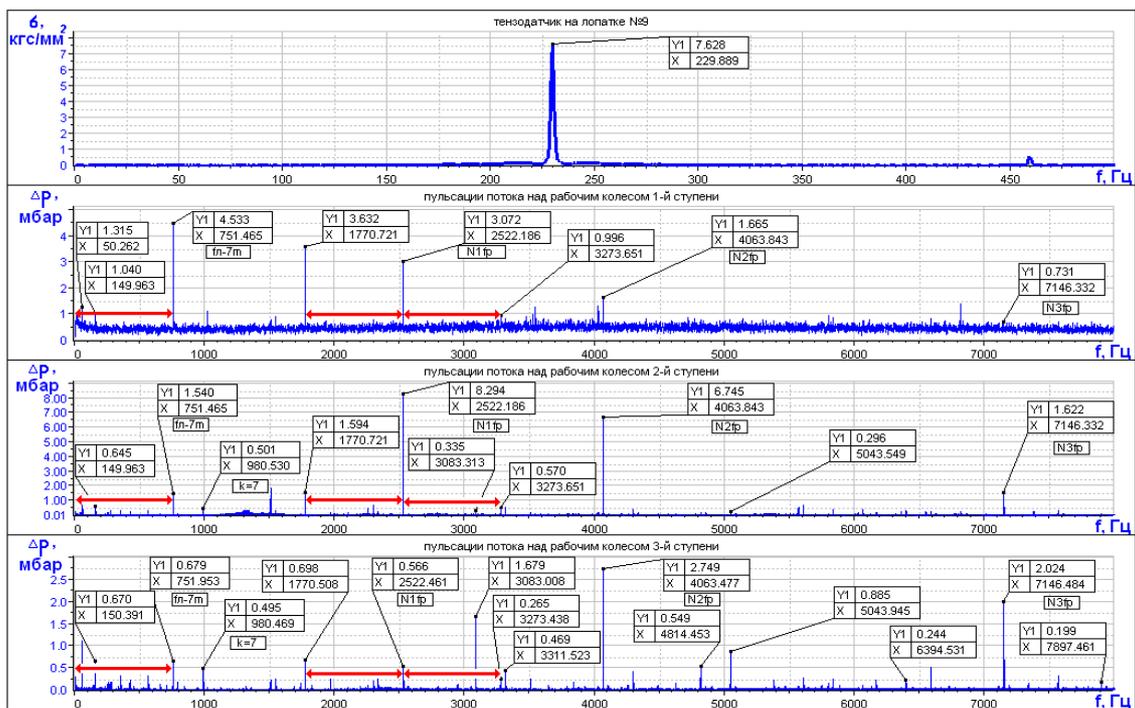


Рис. 5. Спектр колебаний лопатки и пульсаций потока над 1, 2 и 3-й ступенями в процессе дросселирования по напорной характеристике

Для подтверждения последнего положения были определены сдвиги фаз колебаний между рабочими лопатками 1-й ступени (рис. 6,7). Между соседними лопатками, с нумерацией в направлении вращения колеса, сдвиг фаз оказался отрицательным, а в целом экспериментальная зависимость сдвигов фаз от разности порядковых номеров лопаток оказалась весьма близкой к теор-

ретической для бегущей против вращения волны деформации с количеством узловых диаметров $m = 7$ в однородном колесе. С учетом этого обстоятельства для частоты f_l в спектре пульсаций потока и частоты f_n в спектре колебаний лопаток в соответствии с [3] выполняется следующее соотношение:

$$f_l = f_n - 7f_p = 230 - 7 \cdot 140,1 = -751 \text{ Гц.}$$

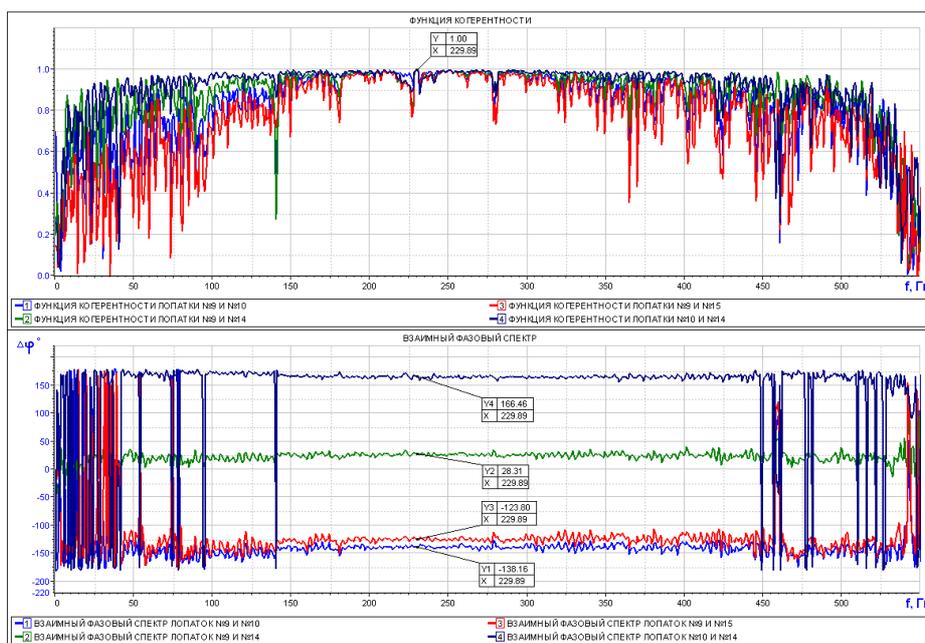


Рис. 6. Значения функции когерентности и сдвигов фаз колебаний между лопатками

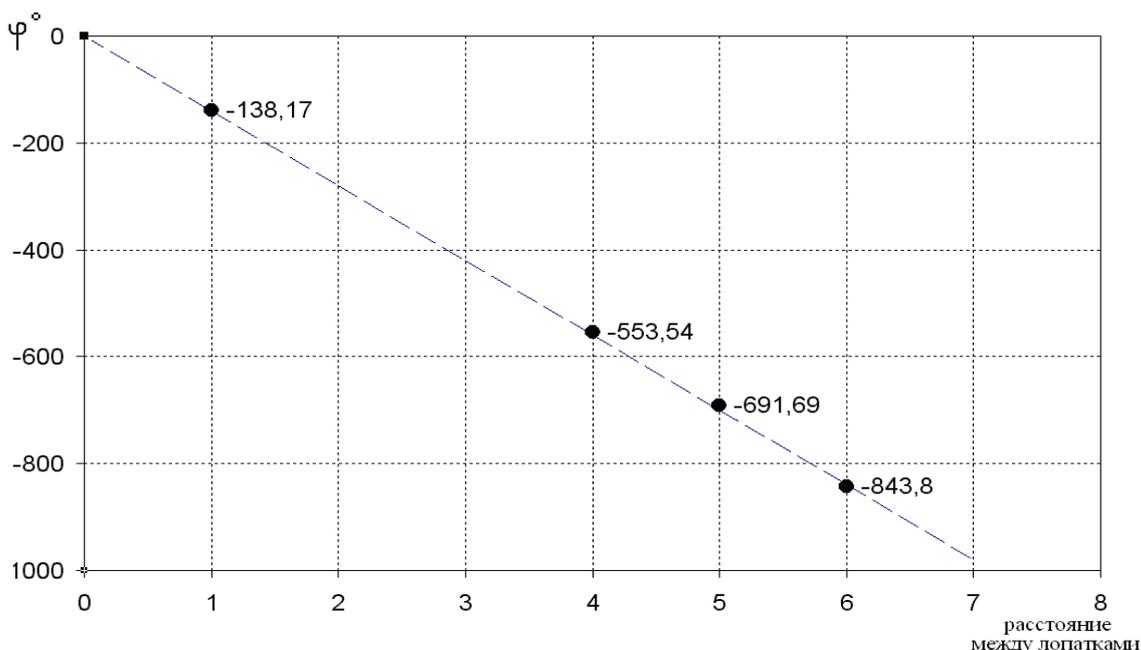


Рис. 7. Зависимость сдвигов фаз от расстояния между лопатками:
 --- теоретическая зависимость для $m=-7$;
 • - экспериментальные значения

Таким образом, в настоящем исследовании выявлены следующие особенности колебаний лопаток:

–наличие не очень сильного срывного обтекания с невысоким уровнем напряжений в лопатках;

–резкое увеличение амплитуды колебаний лопаток при достижении некоторого порогового значения положения рабочей точки на напорной характеристике вентилятора и исчезновение в этот момент слабого вращающегося срыва;

–строгая синхронность колебаний лопаток на частоте, близкой к частотам первой формы изолированных лопаток;

–наличие сдвига фаз колебаний между лопатками, соответствующего определенной диаметральной форме колебаний колеса;

- появление в потоке в момент возникновения колебаний лопаток диагностических спектральных составляющих, соотношения между которыми указывают на существование в потоке волны деформации, бегущей против вращения колеса. Перечисленный перечень особенностей колебаний лопаток позволяет их трактовать как решётчатый флаттер на режиме дозвукового срывного обтекания. Все известные до настоящего времени случаи решётчатого флаттера с волной деформации, бегущей по вращению ко-

леса, соответствовали безотрывным режимам обтекания лопаток. В настоящей работе получены результаты экспериментального исследования флаттера лопаток в срывной области. В связи с этим имеются основания считать, что существует два вида дозвукового решётчатого флаттера: бессрывной флаттер, которому соответствует волна деформации, бегущая по вращению, и срывной флаттер, при котором волна деформации бежит против вращения. Очевидно, что мероприятия по устранению этих видов флаттера должны быть разными.

Библиографический список

1. Хориков, А.А. К вопросу влияния механической связанности лопаток на устойчивость однородного компрессорного колеса к флаттеру [Текст] / А.А. Хориков // Аэроупругость лопаток турбомашин. Вып. 2. (Тр. ЦИАМ; №1064) – ЦИАМ, 1983. – С.234-254.
2. Снайдер, К. Сверхзвуковой безотрывный флаттер в роторах вентиляторов: теория и эксперимент [Текст] / К. Снайдер, Коммерфорд // Энергетические машины и установки (пер. Trans ASME. Ser.A). – 1974. - №4. – С. 57-67.
3. Kurkov, A. Synthesis of blade flutter vibratory patterns using stationary transducers. / A.

Kurkov, J. Dicus // ASME Publ. NGT-160, 1978.

4. Сачин, В.М. Исследование фазовых характеристик связанных колебаний лопаток компрессоров в потоке [Текст] / В.М. Сачин, А.А. Хориков, А.Г. Шатохин // Аэроупругость лопаток турбомашин (Тр. ЦИАМ; №953) – ЦИАМ, 1981. – С.287-296.

5. Пат. № 2111469 РФ. Способ диагностики колебаний рабочего колеса турбомшины. [Текст] / А.А. Хориков.

6. Хориков, А.А. Метод и система диагностики аэроупругих колебаний рабочих лопаток компрессоров датчиками пульсаций [Текст] / А.А. Хориков // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. – Харьков: ИПМ, 1997. – С.323-332.

RESEARCH OF THE FAN BLADES FLUTTER ON THE STALLING AIRFLOW MODE

© 2011 A. A. Khorikov, S. Y. Danilkin

Central Institute of Aviation Motors, Moscow

Results of a dynamic condition experimental research of the modern three-stage blisk fan designs, designed on new calculated technologies are resulted. Features of rotor blades fluctuations are revealed at research of a flutter in stalling area. As a result of the carried out experimental research the conclusion that there are two kinds of a subsonic cascade flutter is made: without-stalling flutter to which there corresponds the wave of deformation running on rotation and a stalling flutter at which the wave of deformation runs against rotation.

Flutter, rotating stall, stalling airflow, fan, rotor blades, waves of deformation, flow pulsation.

Информация об авторах

Хориков Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел.: (495) 552-46-11. E-mail: khorikov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, расчетно-экспериментальный анализ.

Данилкин Сергей Юрьевич, начальник сектора Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел.: (495) 552-97-26. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

Khorikov Anatoliy Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of department of P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow. Phone: (495) 5524611. E-mail: khorikov@rtc.ciam.ru. Area of research: strength, dynamics, experiment-calculated analysis.

Danilkin Sergey Yurievich, chief of group of P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow. Phone: (495) 5529726. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Area of research: strength, dynamics, digital signal processing.