

ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА В КОНСТРУКЦИЯХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА НК

© 2011 В. А. Фролов, А. И. Белоусов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Представлены конструкции лопаток компрессоров с демпфирующими устройствами, разработанные в научно-исследовательской лаборатории при кафедре «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов». Приведены результаты использования демпферов в ГТД НК-12, НК-14, НК-8, НК-16, изделиях «Е», «Р».

Компрессор, ротор, лопатка, диск, демпфер, вибрация, турбомашинa.

Проблема виброненадежности лопаток компрессоров всегда была в центре внимания генерального конструктора Н.Д. Кузнецова. Об этом свидетельствует тот факт, что многие конструкции лопаток с демпферами разрабатывались применительно к двигателям семейства НК.

Об этом может свидетельствовать также и тот факт, что Н.Д. Кузнецов в некоторых своих докладах использовал материалы, полученные сотрудниками лаборатории кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

В данной работе показаны наиболее яркие результаты исследований, проведенные в КуАИ-СГАУ в научно-исследовательской лаборатории «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов» в период 1961-2000 гг. под руководством и личным участием доцента кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» В.А. Фролова.

Опыт создания и доводки конструкций с демпферами лопаток может быть востребован и в настоящее время, особенно с появлением блисков и блингов [1].

1. Двигатель НК-12 (рис. 1 - 2)

Авиационный ТВД НК-12 выпускается серийно с пятидесятых годов прошлого столетия, однако его параметры и многие конструктивные решения актуальны до настоящего времени. На его базе появились двигатели НК-12МА, НК-12МВ, конвертируемые

для наземных целей НК-12СТ, НК-14, НК-14Э.

Вместе с тем до настоящего времени на многих ступенях 14-ступенчатого компрессора фиксируются разрушения как рабочих лопаток, так и лопаток направляющих аппаратов, обусловленные их повышенной вибронпряженностью.

Особо следует отметить, что резервы традиционных методов борьбы (отстройка, воздействие на уровень возбуждающих сил и др.) с опасной вибрацией лопаток практически себя исчерпали.

В связи с этим в качестве радикального решения проблемы использован метод конструкционного демпфирования. Сложность применения этого метода в конструкциях данных двигателей состояла в том, что они находились в серийном производстве с отлаженной технологией и существенно изменять конструкцию, что было необходимо для установки демпферов, не разрешалось. Поэтому изыскивались нетрадиционные подходы к решению проблемы.

1.1. Рабочее колесо 1-й ступени компрессора
В процессе эксплуатации двигателей НК-12МА, НК-12МА происходило разрушение рабочих лопаток первой ступени компрессора. Стендовое тензометрирование показало, что уровень вибронпряжений в лопатках по основному тону достигает критического значения (120-220 МПа). Аналогичное наблюдалось и на конвертируемом двигателе НК-12СТ.

Классическим критерием оценки эффективности разрабатываемых вибропрочных конструкций является значение декремента колебаний (коэффициент поглощения), так как его величина определяет уровень вибронпряжений в конструкции. Поэтому параметр принят для оценки мероприятий по демпфированию.

1.1.2. Демпфирование в замковом соединении

Демпфирующие свойства лопаток с посадкой в диск с натягом соизмеримы с величиной внутреннего трения материала пера.

Поэтому для увеличения сил трения в замке использованы различные демпфирующие устройства, располагаемые в замковом соединении (рис.1).

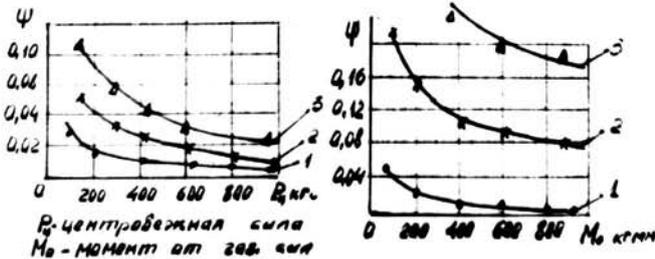
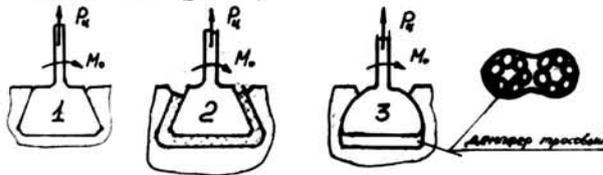


Рис. 1. Декремнты колебаний различных вариантов замков под действием поля центробежных (P_c) и газовых (M_o) сил: 1-исходный вариант; 2- с демпфером в замке; 3- скругленный замок с демпфером

Демпфер может представлять:

- 1) пакет гладких пластин; 2) пакет гладких пластин, контактные поверхности которых покрыты твердой смазкой MoS_2 ; 3) пакет гофрированных пластин, чередующихся с гладкими; 4) элементы из троса; 5) элементы троса, заневоленные в оболочку, и другие элементы трения.

Габариты и параметры демпфера (жесткость, коэффициент поглощения) для конкретной конструкции замка выбираются такими, чтобы он был способен эффективно выполнять свои функции на допускаемых замком микросмещениях.

Тензометрирование лопаток с некоторыми подобными устройствами показало,

что уровень опасных вибронпряжений снижается на 12-15%. При этом наибольшую эффективность дает применение тросовых демпферов.

Однако следует признать, что возможность демпфирования в замках крайне ограничена и в поле центробежной силы резко снижается.

Особо следует отметить «экзотическое» крепление лопаток с хвостовиком, имеющим скругленные опорные поверхности (рис.1, вариант 3). С таким креплением демпфирование в замке в 3-5 раз выше по сравнению традиционным.

1.1.3. Тросовое бандажирование (рис. 2.)

Тросовое бандажирование рабочего колеса может служить альтернативой полочному. При этом, как показала практика, трудозатраты снижаются на порядок при высокой вибронадежности.

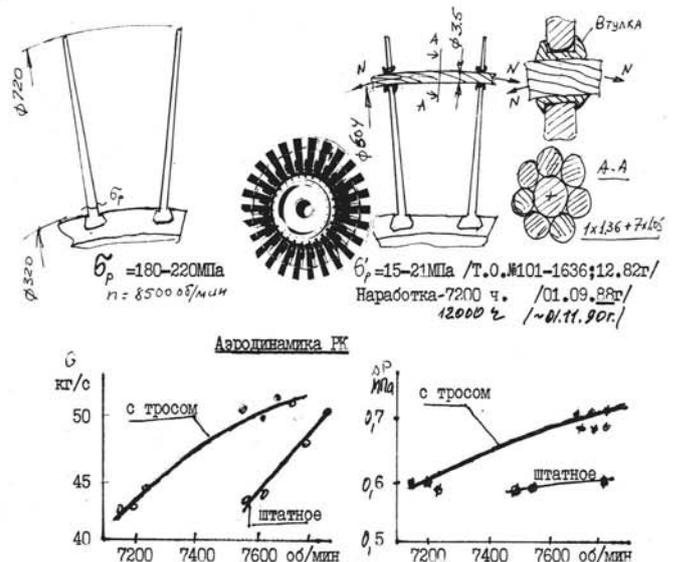


Рис. 2. Бандаж рабочего колеса первой ступени компрессора НК-12СТ тросом

Конструкция основана на новых технологических приемах, позволяющих для набора лопаток колеса свить кольцо со стыком по одной проволоке (отсутствует стык по живому сечению кольца), используя для этой цели одну проволоку промышленного троса. При сборке колеса технологическим приспособлением может быть создано предварительное сжимающее напряжение в пера лопатки. В поле центробежных сил трос освобождает лопатки и растягивающие напряже-

ния в пере уменьшаются на величину сжимающих

Следует отметить, что несмотря на введение в тракт дополнительного сопротивления аэродинамика колеса улучшена (рис. 2). По-видимому, это связано со стабилизацией углов атаки лопаток.

По сравнению с традиционным полочным бандажированием тросовое бандажирование, выполненное на основе оригинального конструктивно-технологического решения, обладает следующими преимуществами:

- является самонесущим кольцом, не имеющим стыка по живому сечению, не нагружает лопатки дополнительными центробежными силами;

- высокое внутреннее трение в тросе обеспечивает эффективное гашение вибрации лопаток;

- оригинальная технология сборки позволяет устанавливать его на любую ступень, при этом в отлаженный технологический процесс не требуется вводить значительных изменений;

- может служить альтернативой полочному бандажированию при меньших трудовых и временных затратах на изготовление колес (примерно в два раза);

- может использоваться в паровых и газовых турбинах стационарного типа вместо других видов бандажирования;

- может быть использовано на любой стадии жизненного цикла двигателя (при проектировании, изготовлении опытного образца, при доводке, на стадии серийного);

- может служить промежуточным вариантом при доводке прочности основной конструкции.

Разработаны конструкции и изготовлены опытные образцы рабочих колес 1-й ступени компрессора НК-12 СТ, проведены вибрационные испытания на стендах предприятия и в эксплуатации (с наработкой более 10 000 ч). Результаты испытаний изложены в технических отчетах СКБМ.

Тензометрирование лопаток при стендовых испытаниях показало, что уровни вибронапряжений в лопатках снижены более чем в 10 раз по сравнению со штатной конструкцией. На фиксированный момент нара-

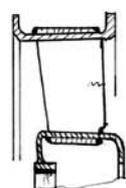
ботка в эксплуатации (НК-12СТ) составила более 12 000 часов.

1.2. Лопатки направляющих аппаратов (рис. 3 - 5)

На двигателях НК-12МА, НК-12МВ при разной наработке обнаруживались трещины на лопатках 14 направляющего аппарата. Исследование показало, что происхождение трещин носит усталостный характер при колебании лопаток по основному тону (частота- 4300-4600Гц). Устранение дефекта традиционными методами (отстройка, повышение предела выносливости пера) положительного результата не дали. Поэтому в данной конструкции решено использовать методы демпфирования.

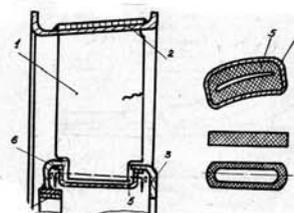
В одном из вариантов использовался демпфер из МР с покрытием его поверхностей композицией $\text{Ф4}+\text{MoS}_2$ (фторопласт 4 и двухсернистый молибден) (рис. 3.) В другом варианте применялся пакет пластин (рис. 4).

Н.А. исходный



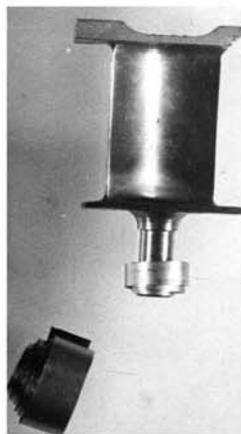
Декремент-0,01-0,03

Н.А. с демпфером



Декремент- 0,06-0,09

Доработка- удлинен хвостовик на 3,5Мм
увеличена просечка в кольце на 0,5



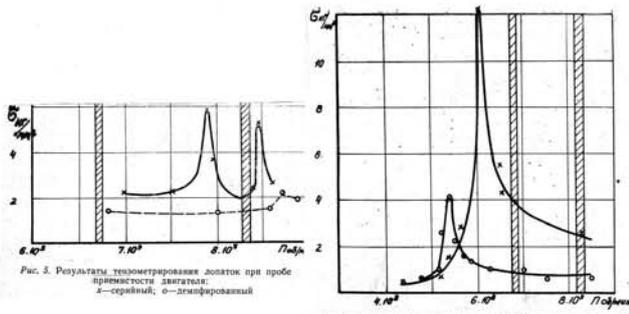
Демпфер ленточный / 1Х18Н9Т, толщина- 0,08/ Демпфер из МР с покрытием $\text{MoS}_2+\text{Ф}_4$

Декремент - 0,2-0,3

Декремент- 0,1-0,15

Рис. 3. Варианты повышения вибропрочности направляющего аппарата 14-й ступени НК-12

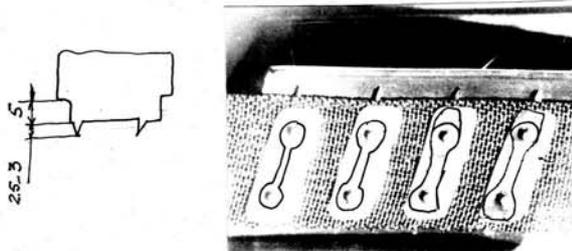
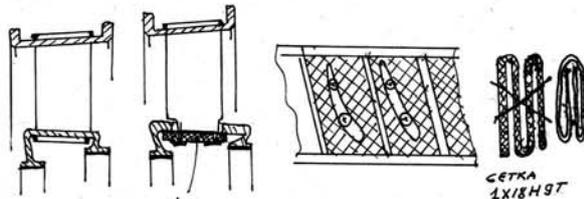
На двигателе НК14-СТ дефекты лопаток направляющих аппаратов проявились практически на всех ступенях компрессора.



Результаты тензометрирования

Наработка на двигателе /стендовая/ составила 4000 часов. Дефектов не обнаружено.

Рис. 4. Применение набора пластин в направляющем аппарате 14-й ступени НК-12 и результаты



Результаты тензометрирования /т.о. №15-83ст, №101-1636, 264-87мп/

	проходной режим			примечания
	δv, МПа	запас	норма	
серийный	108 - 95	1.5	2.4	декремент исходн. - 0,02-0,05
демпфер	24,1 - 3,40	3.9		
серийный	80 - 22,5	5.8	3.0	декремент с демпфером - 0,2...0,4.
демпфер	27 - 18,5	8.1	3.0	

Наработка в эксплуатации 05.04.15 г. № 4 (1000 часов)

Рис. 5. Демпфер сетчатый направляющего аппарата 8-й ступени НК-12СТ и результаты сравнительных испытаний

Варианты, представленные на рис.3,4, имели конструктивный недостаток- демпфер

устанавливался на каждую лопатку, что представляло технологические трудности для серийного производства. Поэтому для компрессора НК14-СТ была разработана конструкция, в которой демпфер представлял собой ленту, располагаемую на хвостовиках (шипях) лопаток и прикрепляемую по внутреннему кольцу между лопатками (рис. 5).

В качестве демпфера использовалась оригинальная композиция из многослойной стальной сетки серийного производства.

Результаты многократных стендовых тензометрирований направляющих аппаратов с таким демпфером показали их высокую вибропрочность при длительной наработке, что позволило использовать конструкцию для серийного производства

2. Двигатель ТРДД НК-8 (рис.6)

2.1. Направляющий аппарат

На ТРДД НК8 при разной стендовой наработке (от 260 до 2300 часов) происходили разрушения лопаток 2-го внутреннего направляющего аппарата по второй изгибной и первой крутильной формам колебаний.

Проблема состояла в том, что двигатель прошел государственные испытания за исключением 2-го внутреннего направляющего аппарата (отчет №001.053).

Поэтому Н.Д. Кузнецов обратился к заведующему кафедрой конструкции двигателей А.М. Сойферу с просьбой оказать содействие в решении проблемы.

А.М. Сойфер вызвал из отпуска доцента В.П. Иванова, аспиранта В.А. Фролова, с.н.с. В.Н. Бузицкого и созвал совещание, на котором присутствовали:

от КуАИ: А.М. Сойфер, В.П. Иванов, В.А. Фролов, В.Н. Бузицкий;

от предприятия: начальник отдела прочности В.И. Цейтлин, начальник бригады прочности В.М. Бышин, начальник конструкторского отдела компрессоров Гасилин. Руководителем работ был назначен В.П Иванов, ответственным и непосредственным исполнителем - В.А. Фролов.

На совещании была выработана общая концепция решения проблемы при помощи разработки демпфирующих устройств лопаток.

В процессе исследований разработана оригинальная конструкция и технология изготовления как демпфера, так и направляющего аппарата, позволившая с минимальными отклонениями от штатного варианта конструкции и технологии, обеспечить осевую и радиальную жесткость внутреннего кольца (расположен лабиринт), а также высокий уровень демпфирования.

Результаты испытаний представлены на рис. 6, они свидетельствуют, что разработанная конструкция имеет повышенный уровень демпфирования, прошла без дефектов длительные эквивалентные испытания на пятикратный ресурс. Это подтверждается отчетом по результатам испытаний (рис. 7).

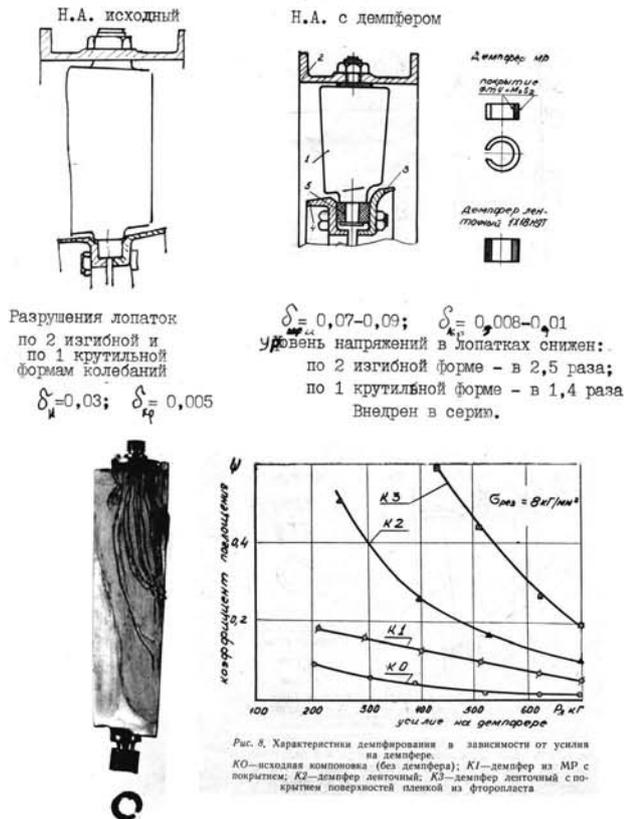


Рис. 6. Конструкция и результаты испытаний демпфированного НА 3-а ступени ТРДД НК-8

Следует отметить, что в рамках этой работы кроме демпфера из МР были исследованы и другие. В частности, так называемый «ленточный», когда на цапфу лопатки наматывалась гладкая или многослойная лента. Демпфирование такой конструкции

НА возрастало в несколько раз по сравнению с демпфером из МР.

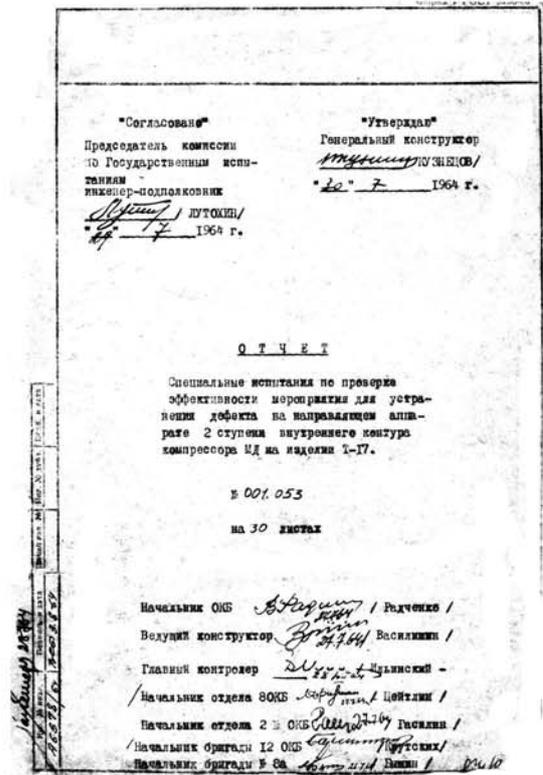


Рис. 7. Титульный лист отчета, утвержденный Кузнецовым и согласованный с председателем ГИ инженер-подполковником Лутухиным

Однако времени на детальную проработку этого варианта не было, поэтому был внедрен демпфер из МР, который представлял собой втулку из композиции пресованной спирали с покрытием поверхностей фторопластом и двухсернистым молибденом (по специальной технологии).

Такой вариант втулки может служить опорой регулируемых направляющих аппаратов (вариант разрабатывался для изделий предприятия «Сатурн»).

3. Двигатель НК-16 (рис. 8)

На энергоустановке НК-16СТ происходило изнашивание полок лопаток направляющих аппаратов и ответных пазов статора. При ремонте заменяли или комплект лопаток, или статор. В ряде случаев приходилось заменять корпус компрессора полностью.

Дефект был связан с повышенной вибрацией. Для исключения дефекта разработан демпфер с использованием тросовых элементов, заневоленных в стальную оболочку.

При этом доработка колец НА позволила в серийном производстве установить демпфирующие устройства.

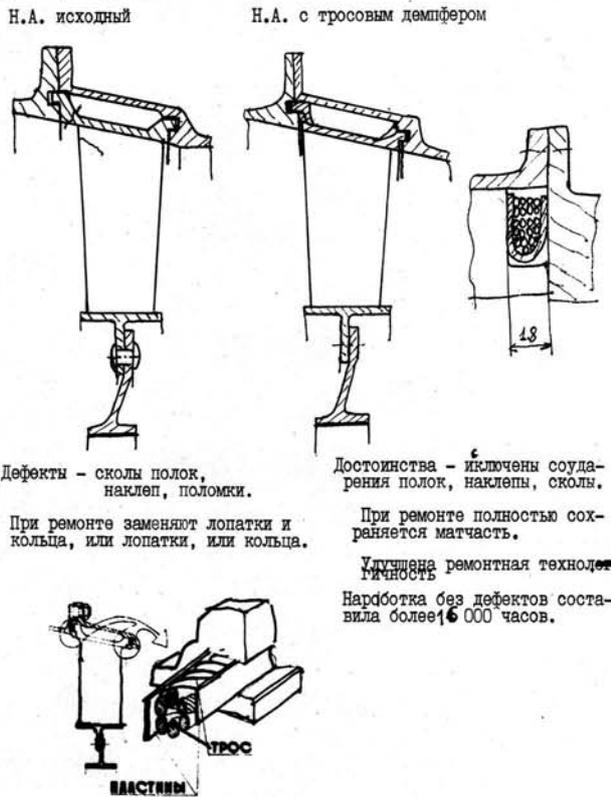


Рис. 8. Демпфирование направляющих аппаратов НК-86 по полкам

4. Двигатели ТРДД изделия «Е», «Р»

4.1. Спрямяющие аппараты наружного контура (рис.9, 10).

На изделиях происходило разрушение лопаток спрямляющего аппарата, расположенного в наружном контуре на выходе из компрессора НД. Было установлено, что разрушение лопаток происходило по основной форме колебаний, некоторые фрагменты которых сгорали в форсажной камере и приводили к нестабильной работе створок сопла.

Для решения проблемы конструкторами использовались различные приемы, в том числе и демпфирование в замковом соединении (рис. 9).

Конструктивные решения дали положительные результаты, однако эффект демпфирования оказался ниже ожидаемого (снижение вибронпряжений составляло около 10-15% от исходного уровня, что не удовлетворяло требованиям).

Поэтому была разработана и изготовлена конструкция НА с кольцевой упруго-демпферной связью (рис. 10).

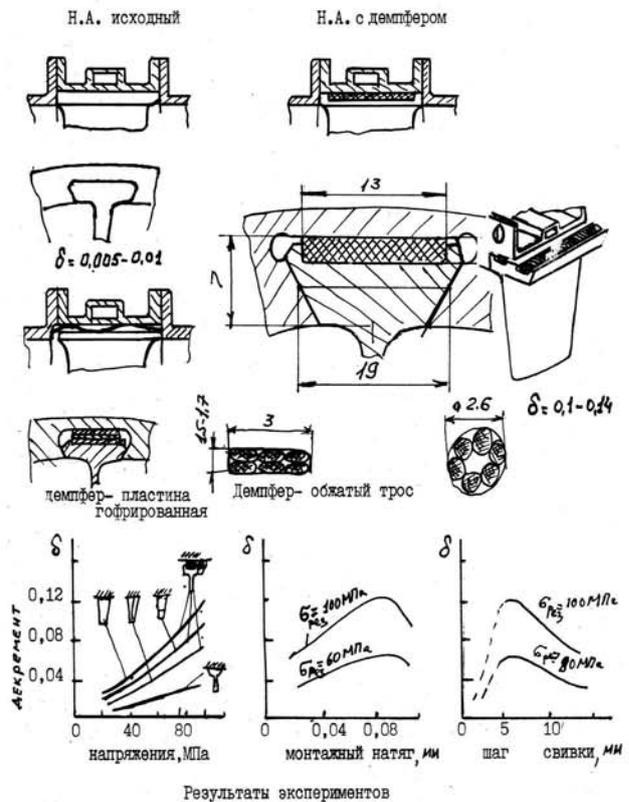


Рис. 9. Демпфирование в узлах крепления консольных лопаток



Рис. 10. Спрямяющий аппарат с демпферной связью

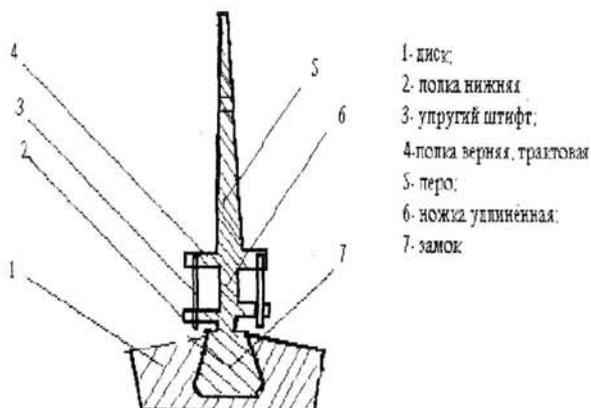
Испытания на изделии показали, что вибронпряжения в лопатках снижены в 3,0-3,5 раза и стендовая ресурсная наработка составила 500 часов, что соответствовало техническим требованиям.

4.2. Рабочее колесо КВД (рис. 11 - 14)

На рабочих лопатках 8 -й и 9 -й ступеней изделий «Е» и «Р» при тензометрировании фиксировались повышенные уровни вибронпряжений. Традиционные методы снижения их уровня к желательному результату не привели.

Поэтому был использован метод конструкционного демпфирования с сохранением основных параметров проточной части (сохранение штатной конструкции пера и замка крепления, что позволило сохранить отработанный технологический процесс изготовления пера лопатки, замка крепления и пазов диска).

С этой целью диаметр диска был уменьшен и лопатка спроектирована с удлиненной ножкой и оригинальным хвостовиком (рис.11). Такое решение позволило установить демпфер на лопатку.



- 1- диск;
- 2- полка нижняя
- 3- упругий штифт.
- 4- полка верхняя, трактовая
- 5- перо;
- 6- ножка удлиненная;
- 7- замок

Рис. 11. Конструктивная схема лопатки со штифтовым демпфером

В этой конструкции лопатка содержит удлиненную ножку 6, на концах которой имеются полки: трактовая 4 и полка у основания замка 2. Между этими полками установлен штифт 2 с осевым разрезом. Один конец штифта запрессован в одну из полок, другой конец штифта помещен с упругим (контролируемым) натягом в отверстие другой полки, образуя демпфер сухого трения в виде скользящей пары "стержень - отверстие". При резонансных колебаниях лопатки этот конец штифта перемещается в отверстии и в результате работы сил сухого трения осуществляется демпфирование колебаний. Основная конструктивная проблема

заключается в выборе параметров удлиненной ножки, демпфера и усилия контакта (натяга) между упругим штифтом и поверхностями скользящей пары "стержень - гнездо". Оптимальным решением проблемы обеспечивается заданный уровень вибронпряжений лопатки по исследуемой форме колебаний.

На рис. 12 - 14 представлены фрагменты рабочего колеса, лопатки и результаты сравнительного тензометрирования.

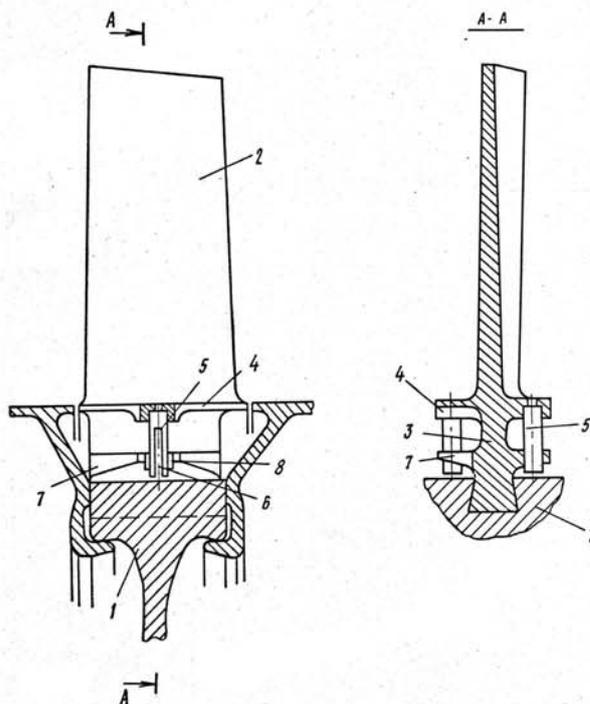


Рис.12. Фрагмент рабочего колеса со штифтовым демпфером 8-й ступени

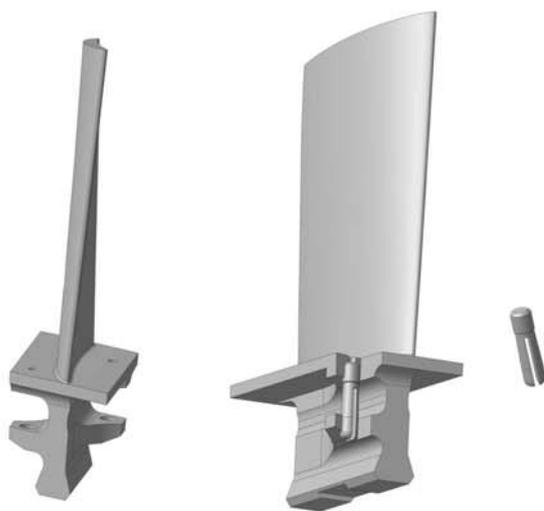


Рис.13. Рабочая лопатка 8-й ступени компрессора с демпфером штифтовым (оригинальная конструкция)

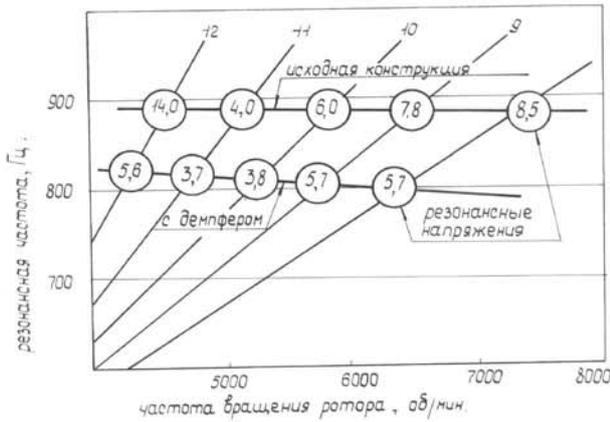


Рис. 14. Частотная диаграмма 8-й ст. компрессора КВД в исходной и оригинальной конструкции (кружками показаны вибронпряжения в кг/мм² при резонансе с соответствующей гармоникой возбуждения)

Последние свидетельствуют, что уровни вибронпряжений в лопатках существенно снижаются в оригинальной конструкции колеса по сравнению с исходной.

Другие экзотические варианты также были экспериментально исследованы в лаборатории и некоторые из них представлены на рис. 15.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЕКРЕМЕНТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЕМПФЕРОВ

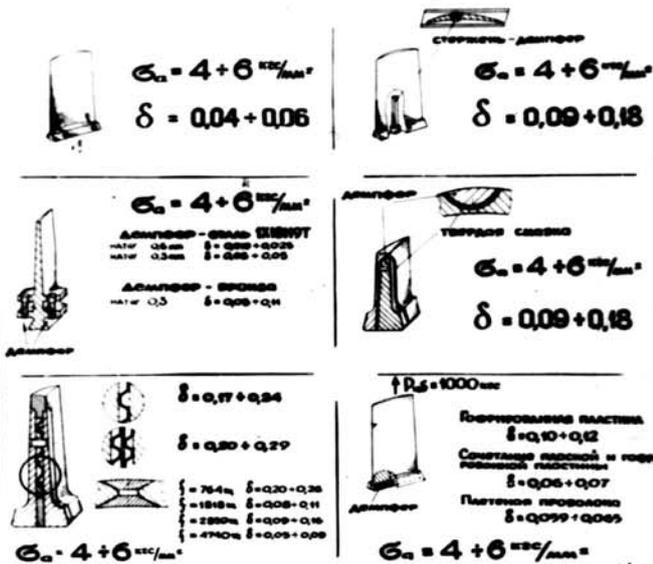


Рис. 15. Из доклада Н.Д. Кузнецова. Использованы результаты работ по демпфированию лопаток, проведенные в лаборатории КуАИ - СГАУ

Таким образом, Николай Дмитриевич Кузнецов являлся одним из тех руководителей, который понимал важное значение механического демпфирования лопаточной системы турбомашин.

Работы по демпфированию лопаток проводились в творческом сотрудничестве с отделами конструкторов и прочности СНТК им. Н.Д. Кузнецова, СКБМ и др. предприятий. В докладе использованы материалы технических отчетов отраслевой лаборатории кафедры, предприятий СНТК им. Н.Д. Кузнецова, ККБМ (СКБМ).

Библиографический список

1. Новые технологические процессы и надежности ГТД [Текст]. Вып. 1. ЦИАМ. М.: 1999.
2. Специальные испытания по проверке эффективности мероприятия для устранения дефекта на направляющем аппарате 2 ступени внутреннего контура компрессора МД на изделии Т-17 [Текст]: отчет №001.053., КМЗ, 1964.
3. Фролов, В.А. Проблемы вибрационной прочности лопаточных венцов авиационных ГТД [Текст]/ В.А. Фролов, Жуков, А.С. Сердотецкий // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: сб. науч. тр.; КуАИ, Куйбышев, 1978, Вып. 8,- С.41-47.
4. Фролов, В.А. Концептуальные подходы к решению проблемы вибропрочности лопаток турбомашин (концепция классификации и ее роль в решении проблемы) [Текст] / В.А. Фролов. Вестн. СГАУ. Сер.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения, 1998. Ч. 1, -С.102-109.
5. Старцев, Н.И. Демпфирование колебаний лопаток турбокомпрессора ГТД - современный взгляд [Текст]/ Н.И. Старцев, В.А. Фролов, А.М. Мишин// Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сб. статей Международной научно-технической конференции – СГАУ.- Самара, 1996. Ч. 2.- С. 204.

DAMPING DEVICES IN THE CONSTRUCTION OF COMPRESSOR VANES OF ENGINES OF THE "NK" FAMILY

© 2011 V. A. Frolov, A. I. Belousov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Here, I present the designs of compressor vanes with a damping device, developed in a research laboratory at the Department of "Construction and design of aircraft engines". The results of the use of dampers in GTD NK-12, NK-14 and NK-8, "E" and "P" products, are shown.

Compressor, rotor, blade, disk, damping, vibration, turbomachine.

Информация об авторах

Фролов Виталий Афанасьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 338-07-26. Область научных интересов: конструкция двигателей, конструкционное демпфирование колебаний.

Белоусов Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 263-34-57. Область научных интересов: конструкция двигателей, конструкционное демпфирование, динамика элементов ГТД и ЖРД.

Frolov Vitaly Afanasievich, Candidate of technical sciences, Associate Professor at the Department of "Construction and design of aircraft engines", Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University) of the Samara State Aerospace University. Research interests: design of engines, structural damping of the oscillations.

Belousov Anatoly Ivanovich, Doctor of technical sciences, Professor at the Department of "Construction and design of aircraft engines", Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Research interests: design of engines, structural damping, dynamics of elements of GTE and LRE.