

На правах рукописи

МЕДВЕДЕВ Станислав Данилович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ
СИСТЕМЫ «КОНВЕРТИРОВАННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
– НАГНЕТАТЕЛЬ ПРИРОДНОГО ГАЗА»**

Специальность: 05.07.05 – Тепловые,
электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Самара 2010г.

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва» (национальный исследовательский университет) на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов и в ООО «Газпром трансгаз Самара»

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор

С.В.Фалалеев

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

Д.С. Еленевский

доктор технических наук,
профессор

Ю.А.Равикович

доктор технических наук,
профессор

Г.В.Смирнов

Ведущая организация: ОАО «Самарское конструкторское бюро машиностроения», г. Самара

Защита состоится "24" сентября 2010г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королёва по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ).

Автореферат разослан " __ " _____ 2010г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

А.Н.Головин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в аэрокосмической отрасли накоплен огромный потенциал, который при конвертировании может найти применение в газовой промышленности. В ОАО «Газпром» разрабатываются критерии оценки технического состояния газотранспортной системы (ГТС) с целью обеспечения прогнозирования ее безопасной работы, а также планирования реконструкции и технического перевооружения в связи с дальнейшим интенсивным моральным и физическим старением объектов транспорта газа. Необходимо системно рассмотреть использование технологий, разработанных для авиационных двигателей и космических силовых установок, для реконструкции компрессорных станций (КС), в том числе экономические аспекты. При использовании передовых конвертируемых технологий нужно адаптировать их к условиям эксплуатации в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА), а также усовершенствовать в связи с предъявляемыми высокими требованиями по ресурсу (более 100 тыс.ч).

В настоящее время в ОАО «Газпром» эксплуатируется более 4000 ГПА, из них более 1300 – с авиационными приводами. На ГПА с приводами такого типа приходится около 45% всех отказов, при этом их наработка на отказ составляет около 5000 ч. По этому показателю они уступают стационарным ГПА и агрегатам с судовыми приводами, вследствие чего особое значение придается обеспечению надёжности ГПА с авиационными приводами и снижению затрат на их ремонт.

Повышение эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» требует выявления критических элементов в условиях реального нагружения и разработки научно обоснованных технических и технологических решений для совершенствования существующих и создаваемых ГПА. Особо следует выделить лопатки и диски турбин, а также элементы опорно-уплотнительных узлов ротора. Перспективно использование и дальнейшее развитие технологий из аэрокосмической отрасли: гидродинамических демпферов (ГДД) и электромагнитных подвесов (ЭМП) для опор, систем торцовых газодинамических уплотнений (ТГДУ) для герметизации полости нагнетателя, термопластического упрочнения (ТПУ) деталей турбин и др.

При создании изделий общего машиностроения длительность доводочных испытаний может достигать до 80% от общего времени разработки конструкции. Поэтому исключительную важность представляют разработка и применение методов ускоренных испытаний элементов, направленных на сокращение сроков доводки ГПА до требуемых показателей надёжности. Это требует разработки соответствующего системного научного подхода и специального стендового оборудования.

Необходимость разработки теоретических основ для решения отмеченных проблем является весьма актуальной и определяет поставленные цель и задачи исследования.

Цель работы. Повышение эксплуатационной надёжности и эффективности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» газоперекачивающих агрегатов при их модернизации в условиях эксплуатации на основе развития конвертированных авиационных технологий.

Задачи исследования:

1) разработать методологические основы комплексного использования технологий, разработанных для авиационных двигателей и космических силовых установок, при реконструкции ГТС;

2) провести исследование эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» и выявить её критические элементы; рассмотреть возможность и целесообразность использования конвертированных авиационных технологий (ускоренные испытания, гидродинамические демпферы, электромагнитные подвесы, уплотнения с газовой смазкой; термопластическое упрочнение деталей);

3) разработать комплекс методов и средств повышения эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» и её элементов за счет развития конвертированных авиационных технологий, включающий:

- метод оценки эксплуатационной надёжности;
- метод ускоренных испытаний;
- метод прогнозирования ресурса колеса центробежного компрессора;
- метод повышения прочностной надёжности лопаток и дисков турбин;
- метод повышения надёжности системы ТГДУ;
- систему автоматизированного сбора, учёта и обработки информации о состоянии эксплуатации и отказах;
- научно обоснованные рекомендации для служб эксплуатации по оценке и обеспечению показателей надёжности;
- научно обоснованные рекомендации по выбору параметров ЭМП и ГДД;
- оборудование для испытаний;

4) разработать методологические основы для внедрения в серийное производство ТПУ дисков и лопаток турбин, а также систем ЭМП и ТГДУ.

Методы исследований. Общий методологический подход к решению проблемы базируется на комплексном анализе и математическом моделировании процессов, протекающих в элементах системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа». Для решения задач использовались методы математического анализа, теорий вероятности, гидро- и газодинамики, колебаний с представлением зависимостей в безразмерном (критериальном) виде.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной физической и математической постановкой задач, строгостью использованного математического аппарата, сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными на разработанных оригинальных стендах и натурных изделиях, а также положительным опытом крупномасштабного практического внедрения результатов диссертации.

Объекты исследования – динамические, тепловые и гидрогазодинамические процессы в элементах роторной системы ГПА с авиационным приводом, а также при ТПУ.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые получены следующие результаты:

1. Разработаны методологические основы комплексного использования конвертированных авиационных технологий при реконструкции ГТС.

2. Создан метод исследования и проведена оценка эксплуатационной надёжности ГПА с авиационным приводом мониторингом параметров в процессе натурных испытаний с использованием статистических методов обработки информации. Разработана система автоматизированного сбора, учёта и обработки информации о состоянии эксплуатации и отказах на примере ГПА-Ц-16 с авиационным приводом НК-16СТ, позволяющая определять законы и параметры распределения вероятности безотказной работы его основных элементов.

3. Модернизирован метод ускоренных испытаний системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» и её элементов (основные этапы: исследование нагруженности в условиях эксплуатации, исследование эксплуатационной надёжности, анализ характера и причин отказов, создание моделей элементов ротора для проведения исследований, выбор и оптимизация режимов ускоренных испытаний). Создана методология испытаний и доводки элементов данной системы на специальных стендах и в условиях эксплуатации.

4. Разработан метод прогнозирования ресурса рабочего колеса центробежного компрессора с использованием методик «доламывания» и имитационного моделирования реального процесса нагружения, а также расчёта предела выносливости с учётом реального полигармонического нагружения.

5. Усовершенствован метод повышения прочностной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» за счет использования ТПУ лопаток и дисков турбин. Разработаны научные основы для разработки промышленных образцов оборудования ТПУ.

6. Создан метод повышения надёжности системы ТГДУ, включающий организационные, научные, экспериментальные, технологические и эксплуатационные аспекты. Усовершенствована математическая модель ТГДУ, учитывающая статические, динамические и тепловые воздействия.

7. По результатам экспериментальных и теоретических исследований выявлены закономерности динамических характеристик роторной системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» с электромагнитными подшипниками и гидродинамическими демпферами, а также взаимное влияние ЭМП, ГДД и ТГДУ.

8. Созданы и защищены патентами динамические испытательные стенды для ТГДУ, способ и технологическая установка для ТПУ лопаток и дисков турбин авиационных и стационарных приводов.

Практическая ценность заключается в следующем:

- разработанный комплекс методов и средств позволяет обеспечить эксплуатационную надёжность, а также является основой для разработки конструкций более совершенных систем «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа»;

- выявлены элементы и узлы, лимитирующие надёжность системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» в реальных условиях эксплуатации, и разработаны методологические основы исследования их нагруженности; получены результаты параметрического, вибро- и тензометрического обследования эксплуатационной нагруженности ГПА Ц-16 с авиационным приводом НК-16СТ на различных режимах работы изделия;

- сформулированы научно обоснованные рекомендации для служб эксплуатации об оптимальных режимах загрузки ГПА, разработаны нормативные документы, регламентирующие объём и последовательность работ по оценке и обеспечению показателей надёжности ГПА с авиационным приводом;

- разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору параметров ЭМП и ГДД для роторной системы ГПА с авиационным приводом;

- созданы методологические основы создания высоконадёжных ТГДУ, что позволило модернизировать нагнетатели с консольным расположением рабочего колеса;

- разработаны научно обоснованные технологии ремонта лопаток и дисков турбин методом ТПУ, которые могут быть применены как для авиационных, так и стационарных приводов.

Реализация работы на практике.

1. Разработанные диссертантом научный подход и технико-экономическое обоснование реконструкции ГТС на основе использования конвертированных авиационных технологий легли в основу концепции реконструкции газотранспортной системы ООО «Газпром трансгаз Самара».

2. Впервые при непосредственном участии автора в ОАО «Газпром» были внедрены «сухие» нагнетатели НЦ-16 с авиационным приводом НК-16СТ, оснащенные ЭМП и ТГДУ. Внедрены гидродинамические демпферы в опору свободной турбины двигателя НК-14СТ.

3. Впервые в практике отечественного и зарубежного машиностроения на основе принципиально нового метода доводки удалось внедрить ТГДУ на нагнетателе Н-370-18-1 с консольным расположением рабочего колеса. В настоящее время на такие уплотнения в ООО «Газпром трансгаз Самара» переоборудованы 43 нагнетателя.

4. Впервые в отечественной промышленности внедрены в серийное производство в ООО «Газпром трансгаз Самара» технологии и оборудование по термопластическому упрочнению дисков и лопаток турбин авиационных и стационарных приводов.

5. Разработанные методы и методики проектирования и доводки системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» и её элементов внедрены на ряде предприятий РФ. Результаты проведённых исследований использованы при реконструкции и создании новых ГПА. Основополагающие материалы диссертации используются в учебном процессе СГАУ.

Апробация работы. Результаты диссертации доложены, обсуждены и одобрены на 26 научно-технических конференциях (НТК), совещаниях (НТС) и симпозиумах: НТК «Повышение эффективности и надёжности машин и аппаратов в основной химии» (Сумы, 1989 г.); НТК «Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса» (Сумы, 1989 г.); НТК «Стандартизация контроля качества и надёжности промышленной продукции» (Горький, 1989 г.); НТК «Методы и средства обработки измерительной информации» (Челябинск, 1990 г.); НТК «Новые технологии в газовой промышленности» (Москва, 1997 г.); Международная НТК (МНТК), посвящённая 55-летию СГАУ «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе» (Самара, 1997г.); НТК «Актуальные проблемы состояния и разви-

тия нефтегазового комплекса России» (Москва, 1997г.); МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2003г., 2006г., 2009г.); 11-я МНТК «ГЕРВИКОН - 2005» (Украина, Сумы, 2005г.); ЛП научно-техническая сессия РАН по проблемам газовых турбин, работающих в промышленности и энергетике (Самара, 2005г.); МНТК «Актуальные проблемы трибологии» (Самара, 2007г.); МНТК «Hervikon-2008» (Poland, Kielce, 2008 г.); НТС СНПО им.М.В.Фрунзе и ООО «Газпром трансгаз Самара»; отраслевые совещания ОАО «Газпром».

Публикации. По теме диссертации опубликована 1 монография, 37 статей (из них 10 в журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией), 10 тезисов докладов, 6 изобретений. Суммарный объем принадлежащего автору опубликованного материала 21,5 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Работа изложена на 390 страницах, включает 206 рисунков, 31 таблицу. Список литературы содержит 185 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, проведен анализ особенностей работы и отказов ГПА с авиационными приводами. Также даётся краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния вопроса модернизации ГПА и предложена методология реконструкции объектов ГТС.

Проведенный научно обоснованный анализ критериев и путей реконструкции ГТС показал, что наиболее оптимальным для модернизации ГПА является использование конвертированных авиационных технологий. Проведенное технико-экономическое обоснование показало, что в зависимости от экономической целесообразности модернизации могут подвергаться как целые цеха, так и отдельные агрегаты или их узлы.

Всесторонний анализ характера и причин отказов систем «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа» ГПА, эксплуатирующихся на магистральных газопроводах страны, позволил определить перечень основных узлов, лимитирующих надёжность агрегатов, и показал, что наиболее подвержены повреждениям роторы нагнетателей, соединительные муфты (торсионный вал, зубчатая обойма), главные масляные насосы, опорные и упорные подшипники скольжения, а также масляные уплотнения опор роторов. Из всех имевших место отказов преобладают два вида: износосвые, т.е. вызванные разрушением пар трения, и вызванные усталостными разрушениями. Использование установленных в диссертационной работе критериев отказов и предельных состояний позволяет исключить возможность доведения узла до разрушения.

Разработаны научно обоснованные рекомендации по модернизации узлов системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа». Показано, что для повышения эксплуатационной надёжности роторов и их опор возможно использовать конвертированные авиационные технологии: ТПУ элементов ротора (валов, дисков и лопаток); газодинамические уплотнения опор; гидродинамические демпферы и электромагнитные подшипники ротора; методы ускоренных испытаний.

В диссертационной работе проведён критический анализ публикаций по тематике диссертации. Среди публикаций, посвященных вопросам конвертирования авиационных технологий, в частности, газотурбинных двигателей, особо следует выделить работы сотрудников ОАО «СНТК им.Н.Д.Кузнецова» и ОАО «СКБМ» Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, Г.В.Зарова, А.М.Идельсона и Д.Г.Федорченко. При разработке методики эквивалентных испытаний ГПА следует опираться на работы В.М.Акимова, И.А.Биргера, А.С.Гишварова, Р.С. Кинасошвили, Н.Д.Кузнецова, В.И.Цейтлина и др. Большой вклад в разработку метода ТПУ внесли В.А.Барвинок, Б.Л.Кравченко с учениками и др. Теорией гидродинамического демпфирования успешно занимались ученые СГАУ под руководством А.И.Белоусова и МАИ под руководством Д.В.Хронина. Вопросами использования ЭМП в ГПА занимались в ВНИИЭМ и ООО «Газхолодтехника». Теория ТГДУ развивалась учеными нескольких научных школ: в Самаре А.И.Белоусовым, С.В.Фалалеевым, В.А.Зреловым; в Москве А.И.Голубевым, В.А.Мельником и др.; в Сумах В.А.Марцинковским, К.В.Лисицыным, Г.А.Бондаренко и др.; в Казани В.А.Максимовым и др.; в Минске Э.П.Кревсуном и др.; в Санкт-Петербурге Ю.Я. Болдыревым, Г.А. Лучиным, Г.Н. Деном и др. Исследованию уплотнений с газовой смазкой посвящено много работ зарубежных исследователей, таких как H.S. Cheng, I. Etsion, A.O. Lebeck, L.P. Ludwig, J. Zuk и др. Подавляющее большинство исследований уплотнений данного типа принадлежит сотрудникам фирм «John Crane» (Великобритания), «Feodor Burgmann» (Германия), «Flowserve» (США), «Трейс» (Украина).

Вторая глава посвящена исследованию эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель - нагнетатель природного газа». Для анализа надёжности была разработана система учёта, обработки и анализа информации об отказах ГПА-Ц-16 с авиационным приводом НК-16СТ. В основе построения информационных блоков базы данных лежит разработанный классификатор отказов. Он необходим для размещения поступающей информации об отказах в соответствии с их конструктивной принадлежностью к какому-либо узлу или системе. Комплекс программ на ЭВМ, позволяет выполнять сортировку отказов по вызвавшим их причинам, объединять выборки по цехам, компрессорным станциям, газопроводам и в целом по газотранспортным объединениям.

Программа расчёта показателей надёжности позволяет получить: вероятность безотказной работы; функцию распределения; среднюю наработку до отказа; нижнюю и верхнюю границы вероятности безотказной работы и γ %- наработку до отказа.

На основании статистической обработки информации об эксплуатационной надёжности структурных элементов ГПА были получены параметры теоретических распределений и определены функции вероятности безотказной работы, которые приведены в табл.1. Исходя из представленных зависимостей, можно определить для каждого узла и системы в целом вероятность безотказной работы на рассматриваемом участке времени работы.

Структурная схема надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» представляет собой последовательное соединение узлов. Если наработки узлов распределены по известным в статистике

законам или по одинаковым законам, то средняя наработка на отказ ГПА в целом определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{T}_{0i}}},$$

где \bar{T}_{0i} - средняя наработка на отказ i -го узла (системы).

Таблица 1. Надёжность составных частей ГПА Ц-16 с авиационным приводом НК-16СТ

№ п/п	Наименование детали (сборочной единицы) и вероятность безотказной работы	Показатели надёжности				Параметры распределения
		Наработка до отказа Тср, ч	Среднее время восстановления, Тв, ч	Ресурс до текущего ремонта, Трт, ч	Установленная безотказная наработка (80%) Ту, ч	
1	Ротор (рабочее колесо) $P(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{\tau_i}{9963}\right)^{1,8}\right]$	9963	168	6000	3449	Вейбулла в=1,8 а=9963,ч
2	Торсионный вал $P(\tau) = \exp(-1,06 \cdot 10^{-4} \tau_i)$	9443	96	2000	2682	Экспоненциальное $\lambda=1,06 \cdot 10^{-4}, 1/ч$
3	Упорный подшипник $P(t) = \exp(-8,9 \cdot 10^{-5} \tau_i)$	11290	48	2000	4414	Экспоненциальное $\lambda=8,9 \cdot 10^{-5}, 1/ч$
4	Опорный подшипник $P(t) = \exp(-1,11 \cdot 10^{-4} \tau_i)$	8989	48	2000	2353	Экспоненциальное $\lambda=1,11 \cdot 10^{-4}, 1/ч$
5	Уплотнения масляные $P(t) = \exp(-8,68 \cdot 10^{-5} \tau_i)$	11520	60	2000	4667	Экспоненциальное $\lambda=8,68 \cdot 10^{-5}, 1/ч$
6	Система смазки $P(t) = \exp(-1,10 \cdot 10^{-4} \tau_i)$	9058	36	8000	2148	Экспоненциальное $\lambda=1,10 \cdot 10^{-4}, 1/ч$
7	Блок маслонасосов $P(t) = \exp(-9,08 \cdot 10^{-5} \tau_i)$	11010	72	8000	3986	Экспоненциальное $\lambda=9,08 \cdot 10^{-5}, 1/ч$
8	Главный насос смазки $P(t) = \exp(-1,18 \cdot 10^{-4} \tau_i)$	8505	36	4000	2302	Экспоненциальное $\lambda=1,18 \cdot 10^{-4}, 1/ч$
9	Система уплотнений $P(t) = \exp(-2,06 \cdot 10^{-4} \tau_i)$	4848	48	4000	493	Экспоненциальное $\lambda=2,06 \cdot 10^{-4}, 1/ч$
10	ГПА в целом $P(t) = \exp(-4,57 \cdot 10^{-4} \tau_i)$	2187	300	6000	867	Экспоненциальное $\lambda=4,57 \cdot 10^{-4}, 1/ч$

Анализ дефектов уплотнений энергетических установок ООО «Газпром трансгаз Самара» за период с 01.01.2000г. по 31.12.2004г. показал, что средняя наработка на отказ за год ТГДУ в составе нагнетателя НЦ-16 составила от 12975ч до 16537 ч, а масляных уплотнений – от 5736 до 5891 ч. Этот результат свидетельствует, что уровень надёжности ТГДУ выше, чем у масляных уплотнений. Анализ

отказов по масляным уплотнениям показал, что большое их количество связано с системами регулирования.

Анализ работы уплотнений нагнетателя Н-370-18-1 показывает, что средняя годовая наработка масляных уплотнений на отказ составляет от 5736 до 15821 ч. Средняя наработка на отказ по цеху составляет 12345 ч. На нагнетателях Н-370-18-1 с ТГДУ за это время отказы отсутствовали.

Другим важным частным показателем надёжности является вероятность безотказной работы. Для её расчёта была выделена дополнительно информация о работе указанных выше нагнетателей с определением наработки от ремонта до отказа. Анализ графиков (рис. 1 и 2) и полученного распределения показывает, что гипотеза экспоненциального распределения вероятности подтверждается на отдельных участках по наработке. По разработанной методике оценки надёжности ГПА определено, что для обеспечения наработки на отказ ГПА 5000 ч требуемая наработка на отказ системы ТГДУ в год должна составлять не менее 8600 ч.

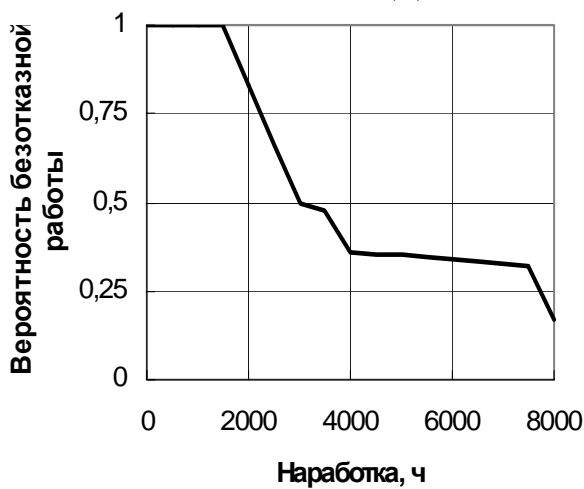


Рис.1. Зависимость вероятности безотказной работы от наработки

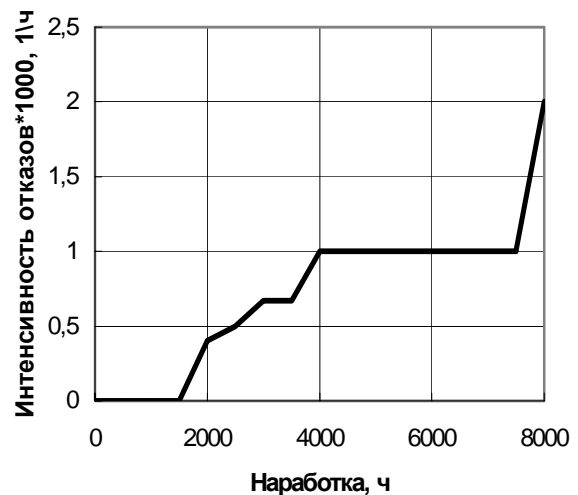


Рис.2. Зависимость интенсивности отказов от наработки

Был проведён также анализ надёжности опорных узлов авиационного привода НК-14СТ и показано, что разрушение переднего подшипника свободной турбины (СТ) составляет до 30% всех дефектов по механической части. По данным эксплуатации была рассчитана наработка подшипника до вероятности безотказной работы $P(\tau) = 0,95$, которая составила около 2600 ч, что не соответствует межремонтному ресурсу двигателя (15000 ч). Отсюда сделан вывод о необходимости доработки конструкции опор СТ введением ГДД.

Для определения факторов, определяющих работоспособность элементов, лимитирующих надёжность ГПА с авиационным приводом НК-16СТ, проведены исследования их условий работы. Установлены временные зависимости параметров работы ГПА от их суммарной наработки за двухлетний период эксплуатации. Результаты анализа представлены на рис. 3. Определено, что 80% времени приходится на частоты вращения 440 – 500 рад/с, при этом ГПА работает 90% времени с давлением на входе в нагнетатель $P_{вх} = 4,5 - 5,5$ МПа и степенью повышения давления $\pi = 1,2 - 1,4$. Таким образом, получены фактические диапазоны работы ГПА на магистральных газопроводах. Они будут определяющими при подсчете расходования ресурса узлов и деталей, лимитирующих надёжность ГПА.

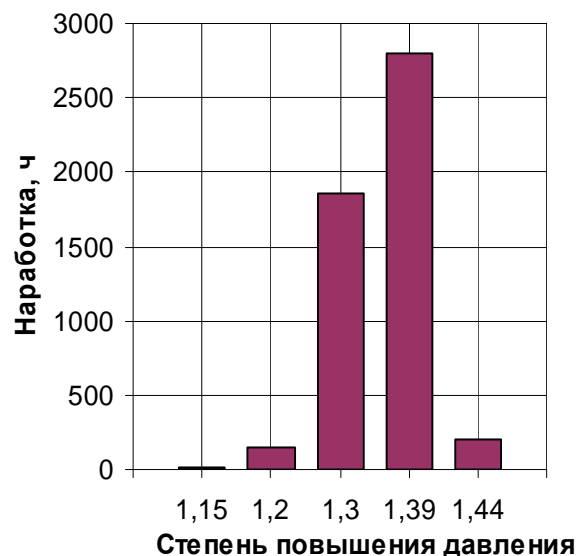


Рис.3. Статистические данные по наработке ГПА-Ц-16 с авиационным приводом НК-16СТ

Вибрационное состояние оценивалось экспериментально. Исследованию подвергались агрегаты, имеющие различную наработку и на различных режимах. На рис. 4 представлен спектральный анализ сигнала, на котором четко видна основная составляющая на оборотной частоте 75 Гц и на кратных оборотной частоте гармониках. Учитывая то, что каждая из гармоник несет определенную информацию о вкладе соответствующих динамических процессов работы нагнетателя в общее вибрационное состояние изделия, то в дальнейшем при анализе вибрационного состояния и режимной работы нагнетателя сделан вывод о вкладе каждого из эксплуатационных факторов в этот процесс.

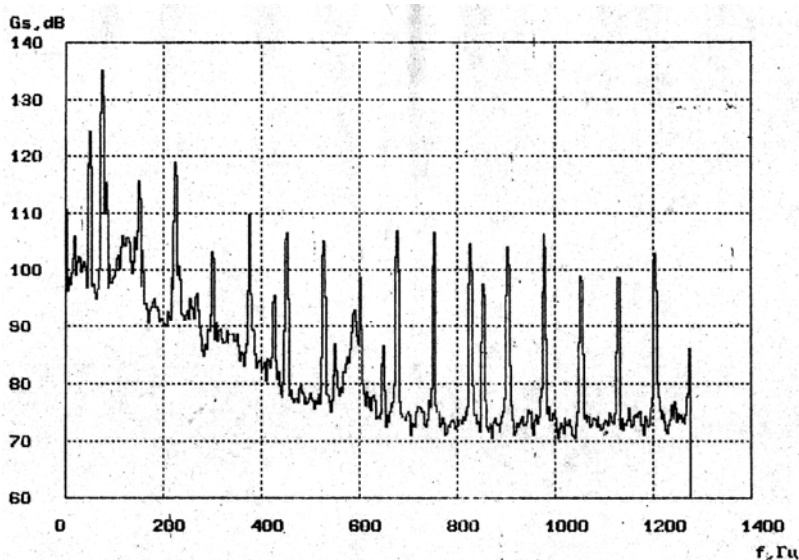


Рис. 4. Спектральный анализ сигнала

Создание системы ускоренных испытаний ГПА требует выявления основных эксплуатационных факторов, влияющих на вибрационное состояние нагнетателя. Это позволит определить ускоряющие факторы, форсирующие появление отказа. Для определения, от каких именно входных параметров работы нагнетателя зависят уровни вибрации ротора нагнетателя, был произведен регрессионный анализ сигнала виброперемещения при работе нагнетателя в реальных условиях эксплуатации и определено уравнение регрессии, которое в общем виде можно записать в следующем виде:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n,$$

где a_0 - константа; a_1, a_2, \dots, a_n - коэффициенты регрессии; x_1, x_2, \dots, x_n - входные параметры работы нагнетателя.

В качестве входных параметров уравнения регрессии были использованы: n - число оборотов нагнетателя, об/мин; $P_{вх}, P_{вых}$ - соответственно давление газа на входе в нагнетатель и выходе из него, МПа; $t_{вх}, t_{вых}$ - соответственно температура газа на входе в нагнетатель и выходе из него, $^{\circ}\text{C}$; π - степень повышения давления нагнетателя; $P_{ГД}$ - перепад давления «масло-газ» системы уплотнения, МПа; $P_{НМ}$ - давление масла на входном коллекторе системы нагнетателя, МПа; $t_{НМ}$ - температура масла на входном коллекторе системы нагнетателя, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ПО}$ - температура масла на выходе из передней опоры нагнетателя, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ЗО}$ - температура масла на выходе из задней опоры нагнетателя, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ВП}$ - температура масла на выходе из упорного подшипника, $^{\circ}\text{C}$. В качестве выходных параметров принимались следующие величины: OS - осевое смещение вала ротора нагнетателя, мм; PP, PL - виброперемещение вала ротора на передней опоре, мкм; ZG, ZV - виброперемещение вала ротора на задней опоре, мкм.

Проверка согласия выполнялась с использованием критерия Фишера. Таким образом, проверяется корреляционная зависимость переменной Y от каждого из входных параметров, перечисленных выше. В случае выполнения условия по критерию Фишера этот входной параметр принимается в качестве определяющего. В частности, для зависимой переменной PL установлено, что она находится в корреляционной зависимости от параметров $n, P_{вых}, t_{ПО}, t_{НМ}$, и уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$PL = 88 + 0,0132n - 12,1P_{вых} + 10,37t_{ПО} - 0,41t_{НМ}.$$

Следовательно, любой из определенных выше входных параметров может использоваться как форсирующий фактор, т.к. он определяет выходной параметр PL - вибросмещение вала ротора на передней опоре нагнетателя. Аналогично выполняется анализ и для других зависимых переменных.

Третья глава посвящена разработке мероприятий по повышению эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа». Одним из способов повышения надёжности двигателя НК-14СТ, применяющегося в качестве привода для ГПА Ц-6,3, является применение ГДД в передней опоре СТ. Для определения характеристик ГДД был проведён расчёт динамики роторной системы «НК-14СТ — Н6,3Ц» (рис.5). Расчёты собственных частот и вынужденных колебаний системы проводились методом начальных параметров с использованием динамически эквивалентной модели ротора, в которой ротор представляется в виде последовательности элементов, состоящих из узлов обладающих массово-инерционными характеристиками, и невесомых податливых участков. Расчёты показали, что первая собственная частота лежит вблизи режима малого газа. Это может неблагоприятно сказываться на вибросостоянии ротора СТ, поэтому необходимо проработать методы демпфирования колебаний ротора. В качестве критериев оптимизации коэффициента демпфирования выбраны амплитуда колебаний на резонансе, ограниченная зазорами в лабиринтах и равная 0,2 мм, и минимальный коэффициент передачи усилия на рабочем режиме. Результаты расчётов вынужденных колебаний представлены на рис.6.

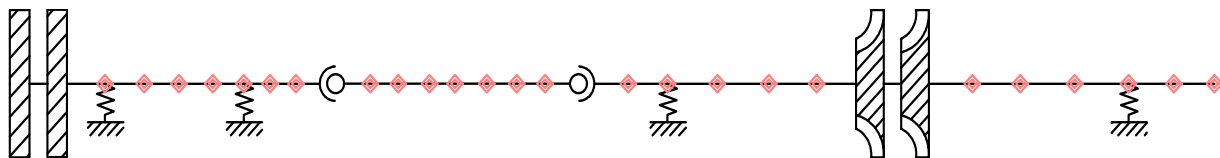


Рис. 5. Динамическая модель роторной системы «НК-14СТ — Н-6,3Ц»

Амплитуда колебаний на критической частоте изменяется обратно пропорционально демпфированию. Особенно сильно влияет демпфирование в передней опоре, т.к. она более податлива. Для обеспечения приемлемых амплитуд колебаний ротора, вызванных искусственным дисбалансом 750 г·см, достаточно иметь коэффициент демпфирования в передней опоре 57 кН/с/м. При этом коэффициент передачи усилия от узла, содержащего СТ, на переднюю опору на рабочей частоте равен 0,9. Конструкция спроектированного ГДД показана на рис.7.

Для оценки повышения долговечности опоры СТ при снижении коэффициента передачи предлагается метод, основанный на использовании кривых усталости (кривых Велера). Согласно этому методу снижение виброскорости на корпусе СТ в 1,4 раза за счет применения гидродинамического демпфера дает увеличение запаса по долговечности как минимум в 3,8 раза.

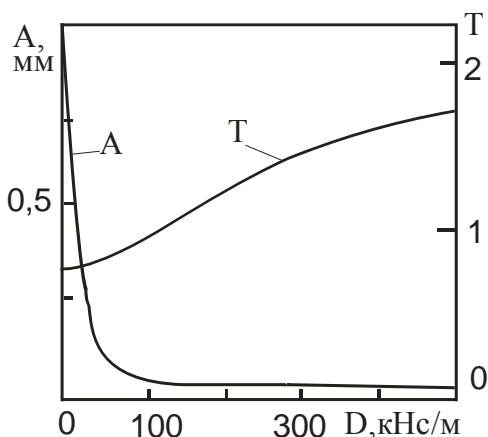


Рис.6. Влияние демпфирования на амплитуду колебаний (А) и коэффициент передачи (Т)

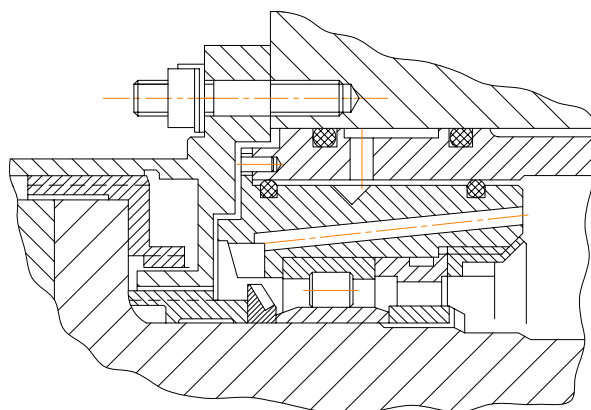


Рис. 7. ГДД передней опоры СТ

Следующим примером повышения эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель — нагнетатель природного газа» является применение ЭМП в опорах нагнетателей. Использование ЭМП в ГПА позволяет выполнять их «сухими», то есть без применения смазки в опорах ротора. ЭМП принципиально отличается от подшипников всех других типов отсутствием механического контакта между движущейся и опорной частями. Это обуславливает ряд преимуществ: отсутствие изнашивания; высокие рабочие скорости; низкие уровни вибрации, трения и нагрева; управляемость характеристиками жёсткости и демпфирования; возможность работы в вакууме, агрессивных и чистых средах, потоке жидкости; снижение трудоемкости и стоимости обслуживания.

Принцип действия ЭМП заключается в подвеске ротора машины на электромагнитах, ток в которых регулируется электронной аппаратурой. Это позволя-

ет обеспечивать устойчивость и центровку ротора в зазоре, а также получать заданные характеристики по жёсткости и демпфированию опор.

Жёсткость опоры определяется как значение передаточной функции регулирующей части канала ЭМП, которое в упрощенном виде может быть представлено выражением

$$W = W_{дат} \cdot W_{рег} \cdot W_{ум} \cdot W_{эм},$$

где $W_{дат}$, $W_{рег}$, $W_{ум}$, $W_{эм}$ - передаточные функции, соответственно, датчика положения и усилителя, регулятора, усилителя мощности канала, электромагнита.

Передаточная функция канала имеет вид: $W = K + \tau \cdot p$, где K - статический коэффициент передачи канала управления (от смещения ротора к силе, развиваемой подшипником); τ - постоянная времени дифференцирующего звена в регуляторе; p - оператор Лапласа.

На рис. 8 приведены характеристики вибрации ротора (нагнетатель НЦ-16) при увеличении степени сжатия и постоянной частоте вращения. При приближении к помпажному режиму наблюдается резкий рост вибраций, в особенности по осевому каналу. Увеличение жёсткости подшипника, необходимое для «парирования» силовых воздействий на ротор в этих режимах, требует увеличения частоты токов электромагнитов, соответствующих частотам возмущений.

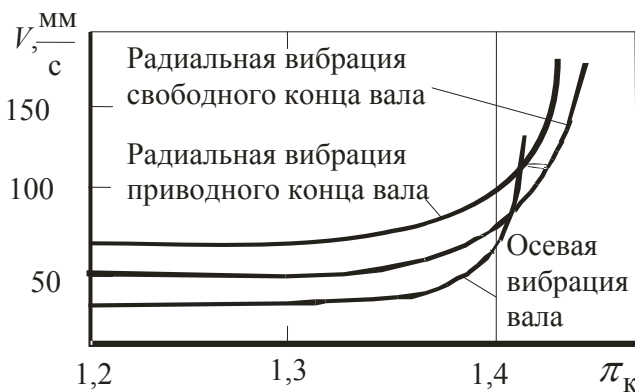


Рис. 8. Зависимость вибрации ротора нагнетателя НЦ-16 от степени повышения давления π_k при скорости вращения ротора нагнетателя 5200 об/мин

Анализ опытной эксплуатации «сухих» нагнетателей показал, что использование электромагнитных подвесов в ГПА требует оптимизации их жесткостных характеристик. Выявлены основные факторы, влияющие на жёсткость магнитного подшипника при наличии конструктивных ограничений и проведён анализ работы «сухого» нагнетателя в предпомпажном режиме. Это позволило сформулировать научно обоснованные рекомендации по выбору жёсткости магнитных подшипников с учётом комплекса эксплуатационных свойств нагнетателя.

В частности, допустимый уровень вибрации определяется возможностями ТГДУ. Проведённый сравнительный анализ аналоговой и цифровой систем управления магнитными подшипниками показал однозначно перспективность последней. Результаты испытаний модернизированной системы магнитного подвеса ротора нагнетателя НЦ-16 подтвердили правильность выбранных принципов построения перспективных систем магнитного подвеса и аппаратуры управления. В результате проведённой работы проблемы вибрации роторов «сухих» нагнетателей в ООО «Газпром трансгаз Самара» отсутствуют, осевая и радиальная вибрация ротора не превышает 50 мкм, а на предпомпажных режимах – 120 мкм.

Проведённые исследования показали, что ТГДУ относятся к «высоким технологиям» и позволяют получать значительную экономическую эффективность. К ним можно не только предъявлять высокие требования по надёжности, но и обеспечивать их в серийном производстве. Правильно спроектированное ТГДУ обла-

дает гарантированной смазочной пленкой, которая в основном определяет его надёжность и герметичность. Неточно определенные характеристики смазочного слоя и, как следствие, определяющие динамику уплотнения параметры могут привести к существенным ошибкам при проектировании, значительным утечкам во время эксплуатации и преждевременному выходу уплотнения из строя. При создании высокоэффективных уплотнений современных турбомашин различного назначения необходим новый подход, требующий большого объема расчётных и экспериментальных исследований.

Комплекс вопросов, возникающих при проектировании торцовых уплотнений с газовой смазкой, требующих обширного расчётного исследования, представлен на рис. 9. В диссертации рассмотрены методические основы комплексного их решения и сформулированы требования к материалам пары трения ТГДУ.

Усовершенствованная математическая модель ТГДУ включает в себя следующие модули: расчёта газодинамических процессов в щели уплотнения; определения силовых деформаций уплотнительных колец; расчёта теплового состояния уплотнения и температурных деформаций уплотнительных колец; расчёта динамического состояния уплотнения; оценки надёжности уплотнения; расчёта эксплуатационных характеристик уплотнения; расчёта режимных параметров динамического стенда при эквивалентных испытаниях ТГДУ с использованием модельного газа. Для разработки модулей данной математической модели использовались теоретические основы расчёта течения газа в тонких щелях, программный комплекс «ANSYS» на основе МКЭ, а также другие методы определения модельных параметров при проведении эквивалентных испытаний. Ее использование позволило учесть все происходящие в ТГДУ физические процессы, а также конструктивные параметры уплотнения.

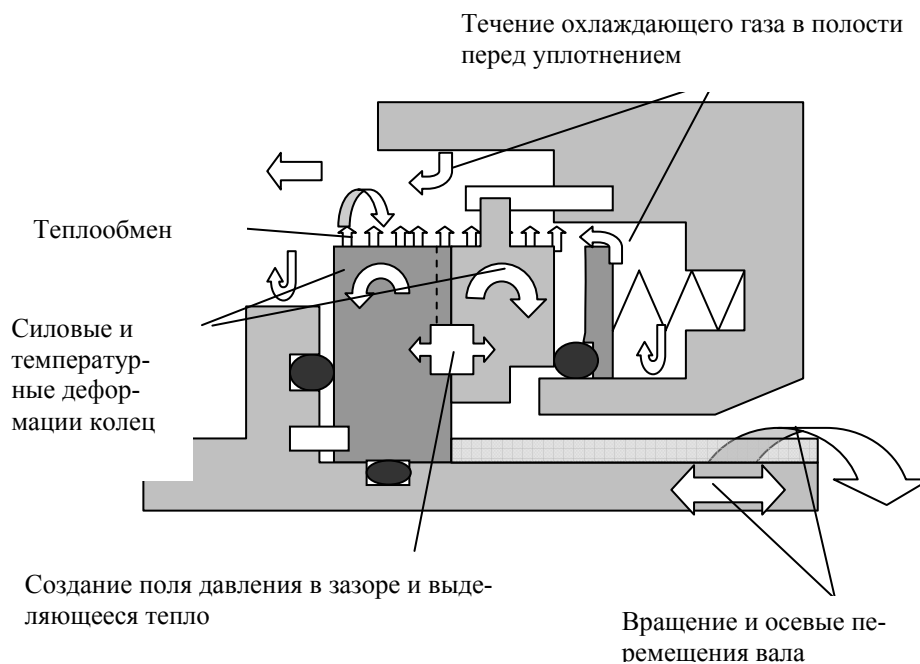


Рис. 9. Схема ТГДУ и решаемые задачи при его проектировании

Задача определения характеристик ТГДУ сводится к интегрированию уравнения распределения давления по ширине уплотнительного пояска при определенных условиях, зависящих от геометрической формы уплотнительных поверх-

ностей и способа подачи газа в зазор. Статическими характеристиками ТГДУ являются зависимости утечек m , несущей способности W , жёсткости слоя C и изгибающего момента $M_{изг}$ от параметров уплотнения и величины зазора h_{min} .

В газодинамической математической модели, в отличие от общепринятой, при определении распределения давления по ширине уплотнительного пояса берётся не осреднённое по радиусу значение параметра сжимаемости

$$\lambda = \frac{6\mu\omega r^2}{p_2 h_{min}^2},$$

а его зависимость от радиуса. Здесь: μ - коэффициент динамической вязкости; ω - частота вращения ротора; r - радиус; p_2 - давление уплотняемого газа. Это позволяет точнее определять характеристики ТГДУ за счёт учёта зависимости теплофизических свойств газа от давления и температуры.

Использование усовершенствованной математической модели ТГДУ позволило повысить надёжность и запасы прочности ТГДУ, выбрать оптимальные материалы, выявить предельные технологические монтажные отклонения, создать метод доводки ТГДУ и методику эквивалентных испытаний ТГДУ на динамическом стенде с использованием модельного газа. Так, учёт изменения теплофизических свойств газа от текущих значений давления и температуры в зазоре уплотнения позволяет до 8% повысить точность расчёта величины зазора, однозначно определяющего все эксплуатационные характеристики ТГДУ, и до 23% - точность расчёта утечек газа.

Были выявлены конструктивные, технологические и эксплуатационные причины увеличения утечек через ТГДУ (наиболее существенные – разрушение элементов передачи крутящего момента, перекос вала, выпадение осадка из газа, разрушение вторичного уплотнения), а также разработаны обоснованные расчётами конструктивные пути повышения надёжности критических элементов узла уплотнения. Разработаны рекомендации по оценке состояния ТГДУ при плановых остановках ГПА, что позволит в дальнейшем перейти на эксплуатацию ТГДУ по техническому состоянию и существенно сократить затраты на ремонт.

К числу деталей, определяющих ресурс газотурбинного двигателя, относятся лопатки и диски турбины и компрессора. В условиях рынка проблема увеличения срока эксплуатации наиболее ответственных и дорогостоящих деталей ГТД должна решаться не только за счёт постановки на изделия новых деталей взамен изношенных, но и путем разработки и внедрения в производство научно обоснованных технических решений, которые обеспечивали бы эффективное восстановление вышедших из строя деталей.

В диссертации была исследована эффективность использования процесса ТПУ для повышения эксплуатационных характеристик деталей ГПА. Этот метод защищен патентами РФ и наиболее приемлем для деталей типа турбинных дисков. Он заключается в прогреве детали до температуры начала термопластических деформаций и фазо-структурных превращений с последующим ускоренным (водяным душем) охлаждением. Образующийся в результате температурный перепад в тонком поверхностном слое обеспечивает создание температурных напряжений, превышающих по величине предел текучести упрочняемого материала.

После окончательного охлаждения всей детали в ее поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения.

Проведённые сравнительные исследования упрочненных лопаток и дисков турбин (рис. 10, 11) подтвердили, что разработанный для авиадвигателестроения процесс ТПУ является наиболее эффективным методом повышения их эксплуатационной надёжности при ремонте. Для внедрения ТПУ в газовую промышленность требуется решение ряда технических и организационных проблем. Анализ результатов усталостных испытаний образцов позволил выявить наиболее оптимальную технологию их обработки при наличии трещины. При этом выносливость образцов с заваренными трещинами с последующим ТПУ не уступает новым образцам.

С целью проверки эффективности применения процесса ТПУ для увеличения долговечности новых и восстановления работоспособности дисков турбины ГПА ГТК-10-4, отработавших ресурс, были проведены сравнительные испытания серии образцов для исследования температурных полей, остаточных напряжений и усталости. Все образцы вырезались непосредственно из диска первой ступени турбины из жаропрочной стали 20Х12ВНМФ (ЭИ 893), снятого с изделия ГТК-10-4. Исследования проводились методом послойного стравливания с непрерывной регистрацией величины деформации образца.

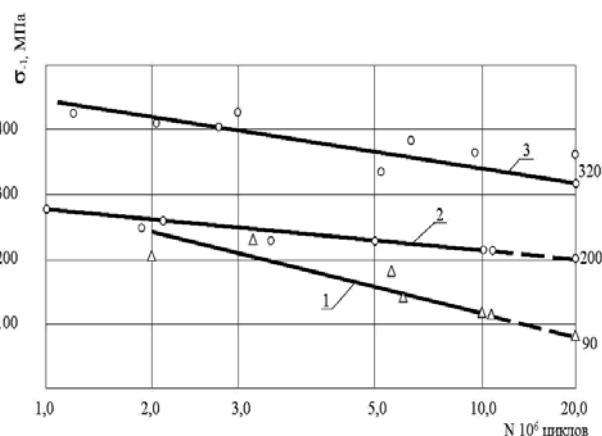


Рис. 10. Усталостные испытания лопаток: 1. Исходные (новые) после наработки $\tau = 6000-10000$ ч; 2. После наработки $\tau = 6000-10000$ ч и упрочнения УЗД; 3. Новые после наработки $\tau = 6000-10000$ ч, упрочненные ТПУ с последующей наработкой $\tau = 10200$ ч

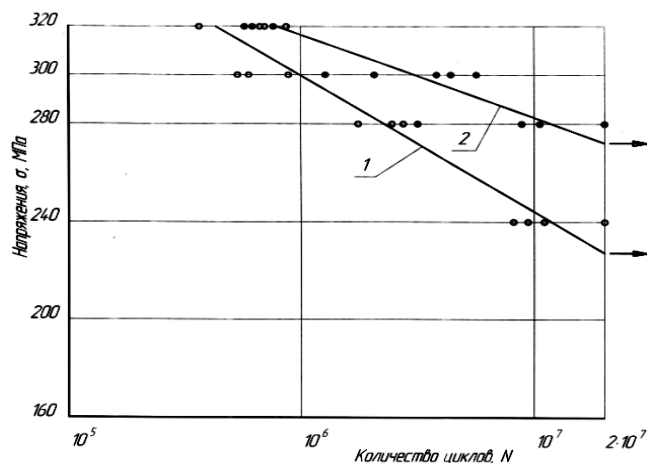


Рис. 11. Усталостная прочность плоских образцов, обработанных по вариантам: 1—отжиг (исходный); 2—отжиг+ТПУ ($T=650+20^\circ\text{C}$, $P_{\text{охл}}=480-500$ кПа, $\tau=13$ мин)

Расчёт остаточных напряжений проводился по методу акад. Н.Н. Давиденкова с использованием формулы, предложенной И.А. Биргером для прямоугольного сечения. Результаты свидетельствуют о том, что максимальные остаточные напряжения расположены на поверхности и составляют $\sigma_{\text{ост}}^{\text{max}}=500-520$ МПа. Глубина их залегания $\Delta h \geq 300$ мкм. Выносливость образцов, подвергнутых термоупрочнению после сварки, составляет $\sigma_{-1, 2 \cdot 10^7}=220$ МПа, что на 30% больше, чем у неупрочненных образцов ($\sigma_{-1, 2 \cdot 10^7}=170$ МПа). Усталостные испытания проведёны в соответствии со стандартной методикой СНИЦ АПИД. В настоящее время в эксплуатации находится 16 дисков турбин и более 1500 лопаток ТНД и ТВД.

Анализ эксплуатационных данных показал, что наиболее массовым является дефект в виде усталостной трещины на верхней впадине выступа зуба, который интенсивно проявляется через 50...60 тыс.ч наработки ГПА. Поэтому было рекомендовано подвергать все турбинные диски ТПУ после 35...40 тыс. ч эксплуатации. Для этого необходима разработка принципиальных основ создания установок для ТПУ.

В четвёртой главе разработаны научные основы применения методов ускоренных испытаний для повышения эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» с учетом её особенностей (назначенный ресурс более 100 тыс.ч, однорежимность работы). Создана методология организации и проведения испытаний системы и её элементов как на специальных модельных стендах, так и в условиях эксплуатации. На рис.12 приведена предложенная автором классификация эквивалентных ускоренных испытаний.

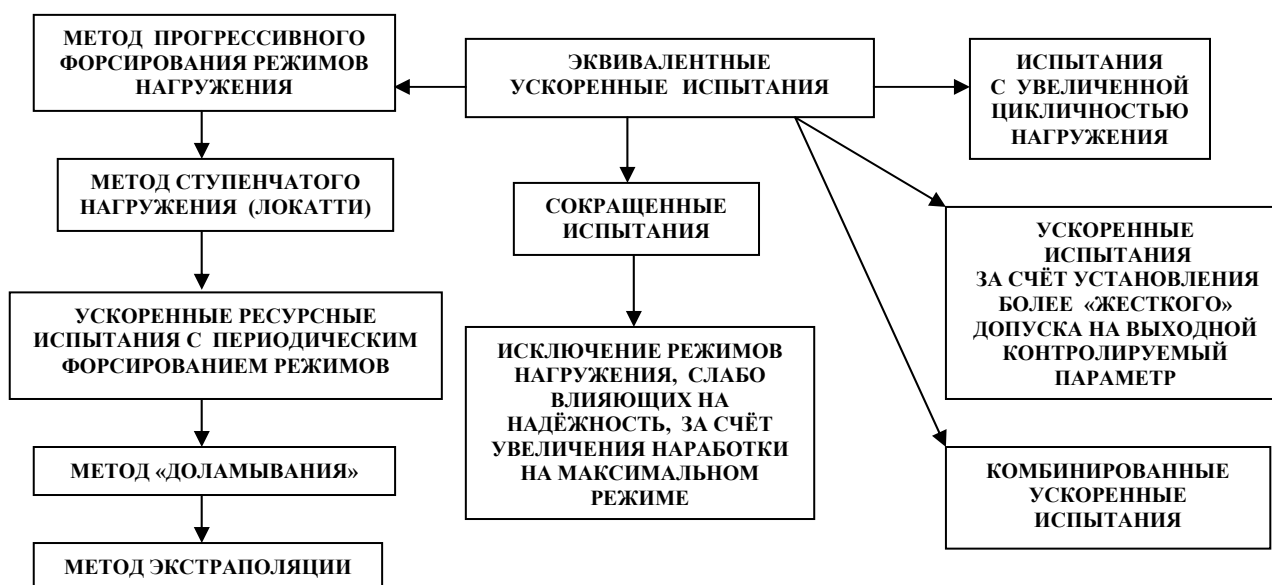


Рис. 12. Классификация эквивалентных ускоренных испытаний

Рассмотрены основные этапы исследований: определение нагруженности элементов в условиях эксплуатации, исследование эксплуатационной надёжности, анализ характера и причин отказов, выбор и оптимизация режимов ускоренных испытаний. Разработана и внедрена методика исследований физической модели объекта с обеспечением имитационного моделирования реального процесса нагружения. Изложен подход и реализован пересчёт процесса полигармонического нагружения к эквивалентному одночастотному, а также схематизация процесса нагружения по методу полных циклов, что позволило создать методику расчёта предела выносливости специального образца.

Автором предложена методика прогнозирования ресурса рабочего колеса центробежного компрессора с использованием метода «доламывания». Принцип "доламывания" (рис. 13) заключается в том, что изделия, имеющие некоторую эксплуатационную наработку в нормальном режиме, доводят до отказа (предельного состояния) в форсированном режиме ("доламывают"). Представлен алгоритм

оценки ожидаемого ресурса ротора нагнетателя по его наиболее слабому звену - рабочему колесу. По результатам проведенных ускоренных испытаний специальных Т-образных образцов (рис. 14) выполнена оценка ожидаемого ресурса ротора нагнетателя с использованием метода "доламывания". Полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчёта показателей надёжности ротора нагнетателя.

Предложена структурная схема оценки показателей надёжности на основании нормативных документов, разработанных во ВНИИкомпрессормаш с участием автора. Получены зависимости для прогнозирования показателей безотказности циклически нагруженных деталей расчётно-экспериментальным методом. Показатели безотказности определялись на основании стендовых (лабораторных) испытаний образцов и замеров напряжений во время натурных испытаний изделия и его составных частей.

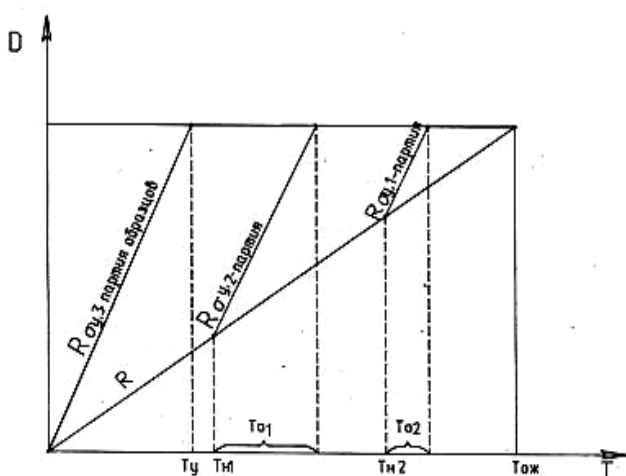


Рис. 13. Схема использования принципа «доламывания» для определения ресурса изделия

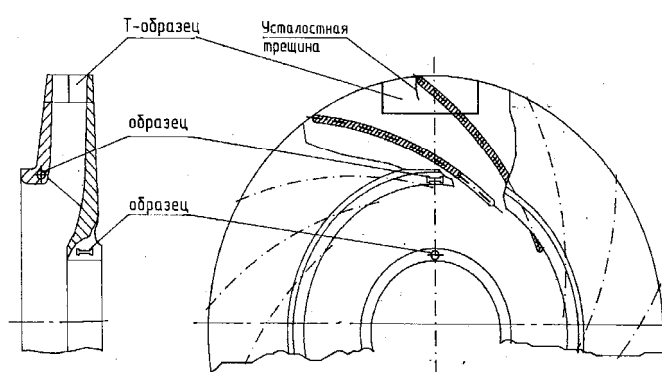


Рис. 14. Места выреза Т-образных образцов

Для определения такого показателя безотказности, как наработка до отказа циклически нагруженных деталей, на основании кратковременных натурных испытаний изделия получена зависимость

$$T_{100} = T_{0a} \cdot \frac{\omega_a \cdot \sigma_a^{m_a} \cdot 10^{(c_d - c_a)}}{\omega_d \cdot \sigma_d^{m_d}},$$

где ω_a, ω_d - число циклов нагружения аналога и детали; σ_a, σ_d - амплитудные приведенные напряжения аналога и детали, МПа; m_a, m_d, c_a, c_d - параметры левой части кривой усталости аналога и детали, определяемые по эмпирическим формулам $m = 0,0273\sigma_R + 1,367$ и $c = 0,0823\sigma_R + 5,9$, σ_R - предел выносливости аналога (детали), МПа.

Предел выносливости детали определяется на основании предела выносливости аналога по формулам

$$\sigma_{Rd} = \sigma_{Ra} / K_d; \quad K_d = \left(\frac{K_{\sigma_d} \cdot \varepsilon_{\sigma_a} + \beta_a - 1}{K_{\sigma_a} \cdot \varepsilon_{\sigma_d} + \beta_d - 1} \right) \cdot \frac{\beta_{yn.a} \cdot \beta_{кор.a}}{\beta_{yn.d} \cdot \beta_{кор.d}},$$

где K_d - коэффициент, учитывающий концентрацию напряжения и масштабный фактор;

K_σ - эффективный коэффициент концентрации напряжения; ε_σ - масштабный фактор; β , $\beta_{уп}$, $\beta_{кор}$ - коэффициенты влияния состояния поверхности, поверхностного упрочнения и коррозии, соответственно.

Для определения показателей безотказности - вероятности безотказной работы до первого отказа циклически нагруженной детали, полученной на основании стендовых испытаний образцов, имитирующих напряжённое состояние, и макетов, которые по напряжённому состоянию в опасных сечениях или геометрии отличаются от натуральных деталей, получены соответственно зависимости:

$$P(\tau) = \exp \left[- \left(\frac{60 \cdot \sigma_\sigma^{m_\sigma} \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\nu} \right) \cdot \omega_\sigma \cdot \tau}{10^c} \right)^\nu \right]; P(\tau) = \exp \left[- \left(\frac{\omega_\sigma \cdot 10^{(c_a - c_\sigma)} \sigma_\sigma^{m_\sigma} \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\nu} \right) \cdot \tau}{\omega_a \cdot T_{oa} \cdot \sigma_a^{m_a}} \right)^\nu \right],$$

где σ_σ - амплитудное приведённое напряжение в опасных сечениях деталей; Γ - Гамма-функция; ν - параметр формы распределения Вейбулла (определяется в зависимости от коэффициента вариации долговечности аналогов или результатов испытания образцов).

Сформирован подход по выбору и оптимизации режимов ускоренных испытаний, определены факторы, определяющие ресурс основных деталей и виды испытаний в ускоренной эквивалентной программе.

С учётом полученного опыта разработана методика эквивалентных испытаний ТГДУ на модельном газе. Предложенные автором способы моделирования характеристик ТГДУ показаны в табл. 2. В диссертации приведены найденные критериальные комплексы для каждого способа. Так, использование критериального комплекса $\mu\omega$ позволяет моделировать величину зазора, критериальный комплекс $\mu^2\omega^3$ можно использовать при моделировании объёмного расхода газа.

Таблица 2. Способы моделирования характеристик ТГДУ

Исследуемые явления	Возможные способы моделирования характеристик
Газодинамические характеристики уплотнения	За счет подбора определяющих параметров: P_2, ω, T
Тепловое состояние пары трения, температурные деформации колец пары трения	За счет подбора определяющих параметров: ω, T, a
Силовые деформации колец пары трения	Создание рабочего значения P_2
Динамическое состояние уплотнения	Моделированием осевых вибраций за счет создания торцового биения δ
Ресурсные показатели (время работы, пуски-остановы)	Моделирование необходимого числа пусков-остановов, подбор циклограммы работы, воссоздание времени работы τ с моделированием эксплуатационных нагрузок

Для исследования и доводки ТГДУ были созданы уникальные по воспроизводимым параметрам стенды для динамических испытаний (табл. 3).

Динамические стенды позволяют проводить испытания как отдельных узлов (СУ-1), так и комплекта из двух уплотнений (СУ-2) (рис. 15) в ручном, а также в

автоматизированном режиме (стенд СУ-2, используется программный продукт LabView компании National Instruments).

Таблица 3. Сравнительные характеристики стендов СУ-1 и СУ-2

	Стенд СУ-1	Стенд СУ-2
Давление воздуха (азота)	12 МПа	12 МПа
Обороты ротора	до 15000об/мин	до 9 000 об/мин
Диаметр вала	50...200 мм	50...200 мм
Диаметр корпуса	150...350 мм	150...350 мм
Количество испытуемых узлов	1	2
Управление стендом и сбор данных	Вручную	Полная автоматизация цикла испытаний
Длительность испытаний	1 ч	24 ч и более
Дополнительные возможности	Моделирование перекосов вала	Замеры крутящего момента и температуры Моделирование нестационарных процессов

С участием автора разработана и внедрена в ООО «Газпром трансгаз Самара» типовая программа и методика проведения испытаний ТГДУ в стендовых условиях и в условиях КС, что создало основу для внедрения систем ТГДУ в нагнетатели природного газа.

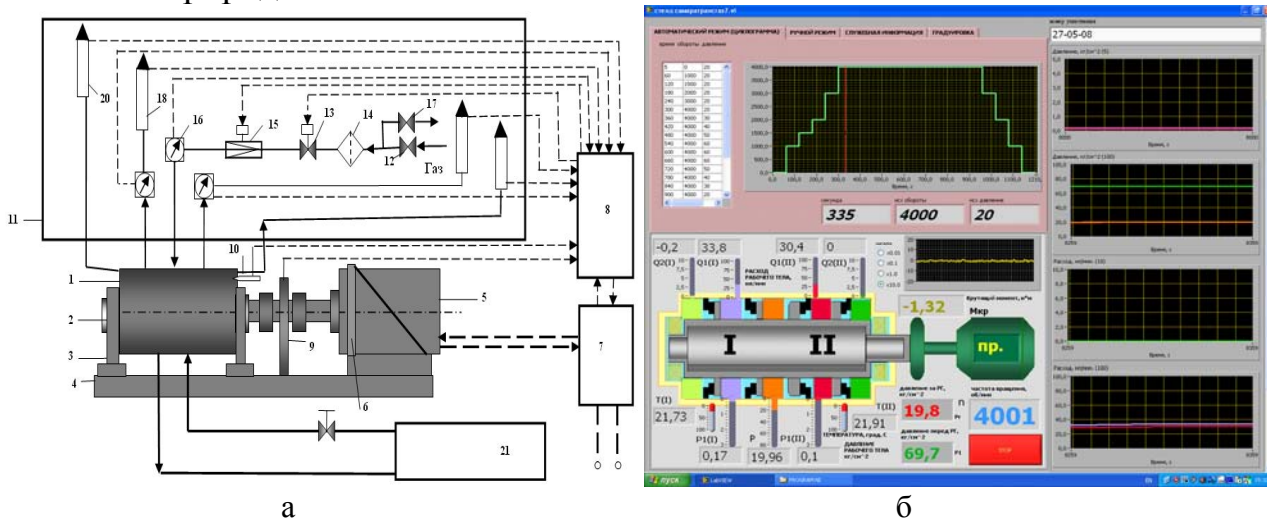


Рис. 15. Стенд для динамических испытаний комплекта ТГДУ СУ-2: а - схема; б - экран монитора при автоматической работе стенда

На основе проведённых исследований электромагнитных и температурных полей при нагреве диска в щелевом индукторе (рис. 16) разработаны теоретические основы синтеза процесса ТПУ и созданы установки и ремонтные технологии термопластического упрочнения лопаток и дисков турбин (рис.17 и 18).

Применение этих установок в промышленных масштабах позволяет увеличить в несколько раз срок эксплуатации дорогостоящих дисков и лопаток турбин и получить значительный экономический эффект.

Экономический эффект от разработки и внедрения системы ускоренных испытаний получен за счет снижения приведенных затрат. Расчёт годового экономического эффекта выполнен в соответствии с действующими на момент расчёта нормативными документами и составляет более 380 тыс.руб. на одно изделие с учётом затрат на проведение научно-исследовательских работ.

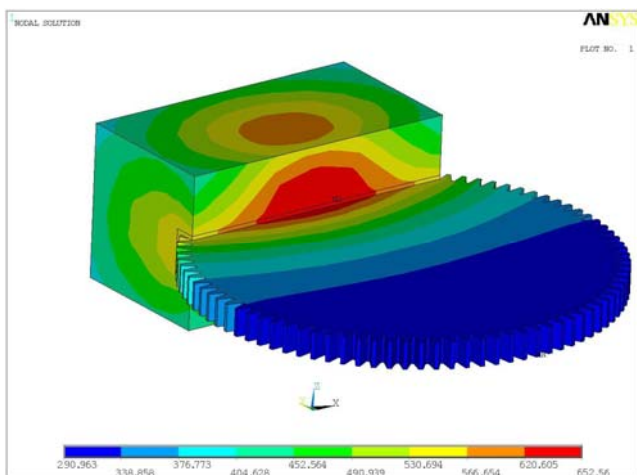


Рис. 16. Распределение температуры в расчётной модели



Рис. 17. Фото монтажного места вала с диском турбины при ТПУ

В пятой главе рассмотрено создание ТГДУ для нагнетателей природного газа. В отличие от уплотнений авиационных двигателей ТГДУ ГПА должны быть работоспособны при высоких перепадах давления (5...20 МПа), значительных биениях ротора (до 0,3 мм) в течение длительного ресурса (100 тыс.ч). Применение технологии ТГДУ позволяет существенно повысить надёжность ГПА при соблюдении разработанных в диссертации рекомендаций по созданию и эксплуатации ТГДУ. Полученный автором опыт разработки ТГДУ и переоборудования нагнетателей с «масляным гидрозатвором» на ТГДУ позволил разработать метод создания высоконадёжных систем ТГДУ, включающий концепции разработки и доводки их на заданные параметры, состоящий из 24 этапов. Все этапы обеспечены специально разработанной методической и организационной документацией, позволившей успешно провести модернизацию ряда нагнетателей.

Процесс экспериментальной доводки ТГДУ целесообразно разделить на этапы: исследование работоспособности уплотнительного узла при низких перепадах давления, определение уровня температурных деформаций, оптимизация газодинамических сил; статическая доводка уплотнительного узла; динамическая доводка уплотнительного узла. Во время динамической доводки проводится исследование влияния торцовых и радиальных биений вала, радиального смещения корпуса, оценка динамической устойчивости узла, выбор типа вторичного уплотнения, определение расходных характеристик уплотнительного узла, испытание системы обвязки, определение потребного количества воздуха на охлаждение, испытание эффективности масляных уплотнений (отсутствие попадания масла в ТГДУ), проверка систем защит. Параметры динамических воздействий определяются динамикой ротора с учетом характеристик опор (ЭМП и ГДД).

В диссертации рассмотрены аспекты применения ТГДУ в нагнетателях природного газа с учётом особенности их конструкции. ТГДУ обладает следующими основными характеристиками: конструкция уплотнения ремонтпригодная; наработка на отказ не менее 12000 ч; межремонтный ресурс - 12000 ч; назначенный ресурс - 100 000 ч; утечки газа не более 90 нормол/мин; потери мощности в узле ТГДУ не более 2 кВт. ТГДУ выполнены по схеме «двойные последовательные уплотнения» с подачей буферного газа для продувки полости перед уплотнением и

барьерного воздуха для разделения масляной полости подшипника и полости отвода утечек газа. ТГДУ являются продуктом высокоточной технологии и требуют особого внимания при изготовлении, монтаже и эксплуатации. При анализе работы ТГДУ необходимо рассматривать его в составе системы, а не как отдельное уплотнение. В диссертации разработаны рекомендации для этапа проектирования системы подачи буферного газа в ТГДУ с учётом эффекта Джоуля-Томсона и фазовой диаграммы для перекачиваемого природного газа. Модернизированная конструкция масляного подшипника и барьерного лабиринтного уплотнения успешно эксплуатируется на ряде нагнетателей ООО «Газпром трансгаз Самара».

При функциональном отказе ТГДУ очень важно в минимальные сроки идентифицировать его причину. Использование системного подхода к анализу факторов, определяющих работоспособность систем ТГДУ, позволило вскрыть критические элементы в конструкции уплотнения и масляного подшипника, подводе буферного газа и барьерного воздуха, а также установить причины дефектов. Разработанные научно обоснованные рекомендации и конструктивные решения повысили надёжность и обеспечили диагностику вероятных дефектов.

Для широкого внедрения ТГДУ необходимо определить их эксплуатационные возможности. В диссертации было оценено влияние монтажных технологических отклонений системы «ротор - корпус нагнетателя» на динамическую работу ТГДУ с «широкой» ($\Delta_r = (R_2 - R_1) / R_1 = 0,2 \dots 0,25$) и «узкой» ($\Delta_r = 0,05 \dots 0,1$) парами трения, что является актуальным для нагнетателей консольной схемы. Здесь R_2 и R_1 - наружный и внутренний радиусы уплотнительного пояса, соответственно.

При радиальном смещении ротора спиральные канавки располагаются с эксцентриситетом по отношению к графитовому кольцу, которое в итоге деформируется неравномерно по окружности (рис. 19). В результате проведённого статического и динамического анализа ТГДУ были выявлены однозначные преимущества «широкой» пары трения.

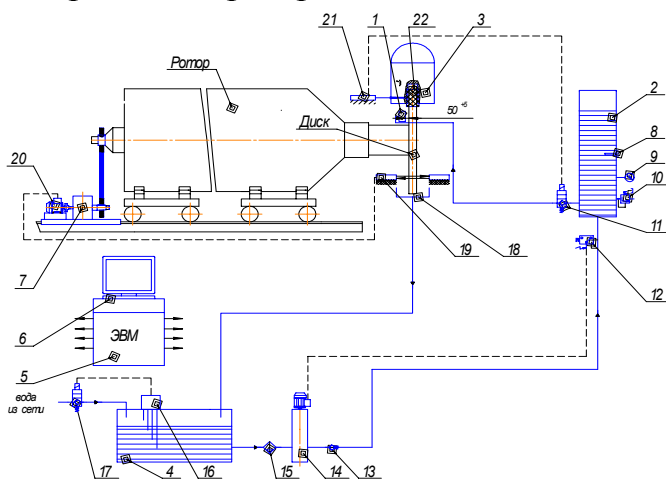


Рис. 18. Функциональная схема установки ТПУ дисков газовых турбин

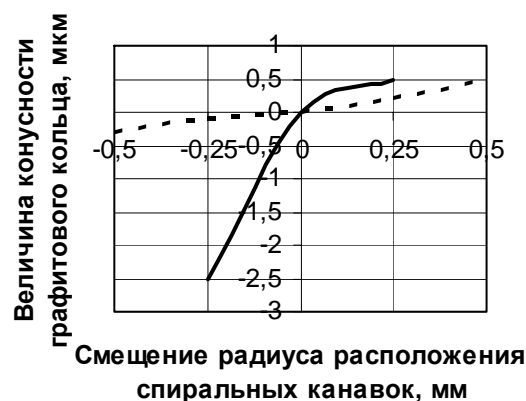


Рис. 19. Изменение величины деформации уплотнительной поверхности графитового кольца при радиальном смещении ротора:

--- - широкая пара трения;
 — - узкая пара трения

Проблема вибрации является исключительно важной для уплотнений современных турбомашин. Проведённые исследования динамических характеристик с учётом различных видов возбуждения и реальной геометрии позволяют более

обоснованно выбирать параметры создаваемых уплотнений. Рис. 20 демонстрирует расчётные результаты динамики исследуемых типов уплотнений при перепаде давления 7 МПа и частоте вращения ротора 567 рад/с. Так, ТГДУ с «узкой» парой трения (нагнетатель НЗ70-18-1) удовлетворительно работает до биения ротора в 100 мкм. ТГДУ с «широкой» парой (нагнетатель НЦ-16М с авиационным приводом ПС-90СТ) нормально работает даже при биении ротора в 150 мкм, что было подтверждено экспериментально. Расчётная и экспериментальная расходные характеристики показаны на рис. 21. Проведённый анализ ТГДУ показал, что «узкая» пара трения может быть применена только в уплотнениях нагнетателей с радиальными смещениями и биениями ротора, соответствующими техническим требованиям. Поэтому при монтаже ТГДУ необходимо строго контролировать монтажные технологические отклонения.

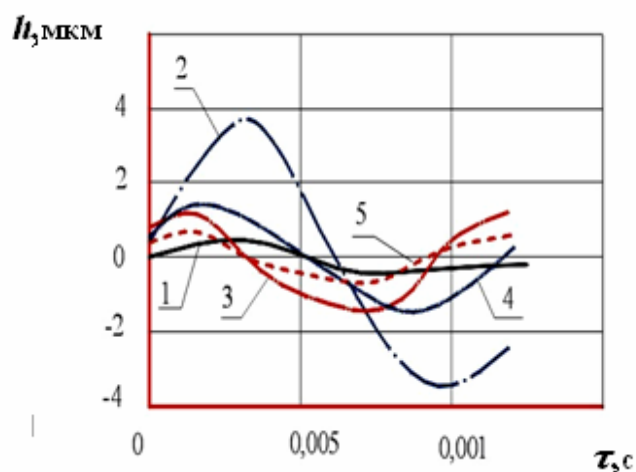


Рис. 20. Изменение величины минимального зазора в зависимости от времени при различных величинах биения вала: 1 - 10 мкм (370-18-1); 2- 150 мкм (370-18-1); 3 – 150 мкм (НЦ-16М); 4 – 100 мкм (370-18-1); 5 – 100 мкм (НЦ-16М)

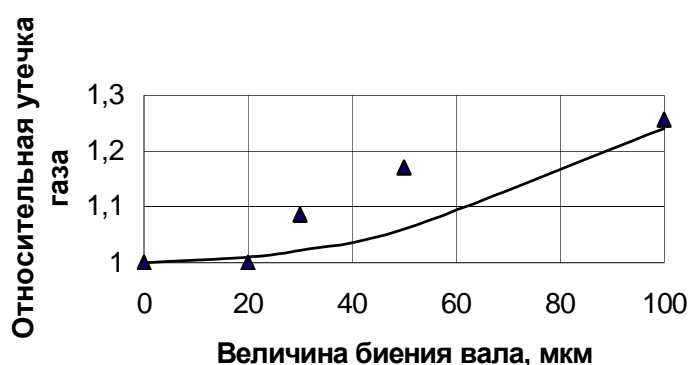


Рис. 21. Зависимость отношения утечек газачерез ТГДУ нагнетателя Н-370-18-1 с наличием торцового биения вала и без него от величины биения

В технической литературе отсутствуют сведения о пусковых характеристиках ТГДУ. В процессе теоретико-экспериментальных исследований (рис. 22 и 23) были получены рекомендации по выбору геометрии спиральных канавок, обеспечивающей более легкий запуск.

Проведённые исследования ТГДУ в статике, динамике и при запуске ГПА позволили выявить границы их применимости при использовании в нагнетателях с технологическими отклонениями и определить оптимальные параметры. Благодаря этому впервые в мировой практике создано ТГДУ для нагнетателя с консольным расположением рабочего колеса (Н-370-18-1).

Для контроля надёжности ТГДУ необходимо уделять особое внимание разработке системы обеспечения его функционирования, которая выполняет следующие функции: подвод и очистку буферного газа и барьерного воздуха, замер и отвод утечек газа из ТГДУ, контроль давления и утечек газа, а также предупредительной и аварийной сигнализации. В диссертации разработаны научно обоснованные технические решения по созданию высоконадёжной стойки контроля и управления ТГДУ.

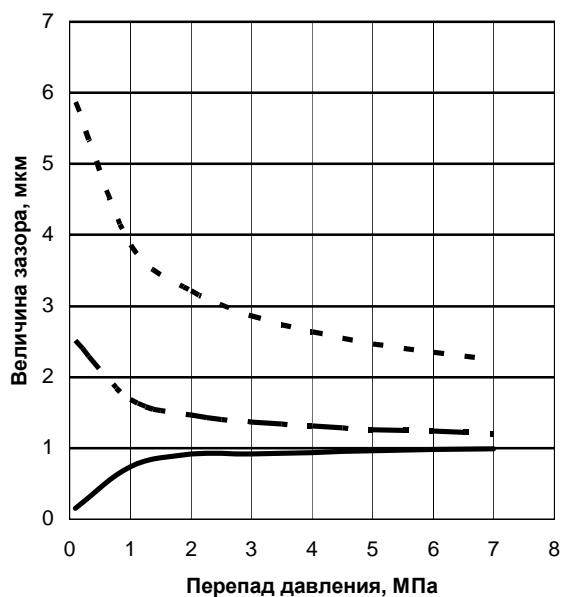


Рис. 22. Зависимость величины зазора в реверсивном ТГДУ от перепада давления газа и частоты вращения ротора: — - $n=0$; — ■ — - $n=500$ об/мин; ■ ■ ■ - $n=5500$ об/мин

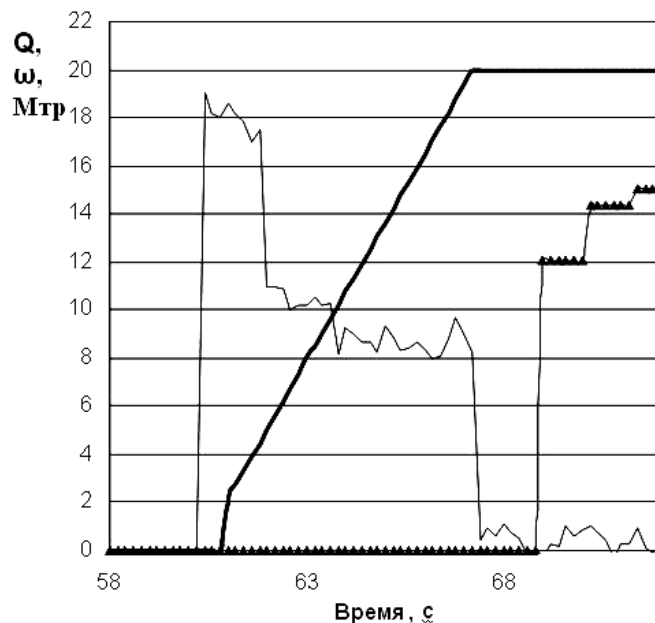


Рис. 23. Экспериментальные пусковые характеристики ТГДУ: ▲▲▲ - утечки Q , л/мин; — - частота вращения вала ω , 10 рад/с; — - момент трения $M_{тр}$, Нм

Проведён анализ влияния материалов уплотнительных колец на прочность, надёжность и экономичность ТГДУ. Рассмотрены требования к материалам пар трения, характеристики материалов, конструктивные особенности уплотнений с различными парами трения (BK15-Нигран В, WC-GAI, SiC-GAI, SiC-SiC). Выбор комбинации материалов зависит от давления газа, диаметра колец и частоты вращения вала. Переход с карбида вольфрама на карбид кремния в качестве материала вращающихся уплотнительных колец позволил упростить конструкцию ТГДУ. Применение графита с пропиткой сурьмой и, особенно, карбида кремния для изготовления аксиально-подвижных уплотнительных колец обеспечивает снижение зазора во вторичном уплотнении и исключает выдавливание вторичного уплотнения в зазор, а также даёт возможность использовать уплотнение при более высоких перепадах давления.

Проведённый всесторонний анализ характеристик пар трения из различных материалов показал высокую работоспособность ТГДУ с кольцами из карбида кремния при действии силовых, тепловых и динамических нагрузок. Напряжения в кольце из карбида кремния в 5 раз ниже, чем в кольце из карбида вольфрама. Экспериментальные исследования ТГДУ с кольцами из карбида кремния на динамическом стенде подтвердили меньший разогрев уплотнения.

Применение комбинации «SiC – SiC» обеспечивает устойчивую форму уплотнительного зазора и более благоприятное распределение температуры. Однако с целью получения необходимых пусковых характеристик уплотнения кольца покрываются твердым и одновременно хорошо скользящим алмазным покрытием. Была поставлена задача - найти альтернативное решение, позволяющее производить ремонт таких уплотнений, используя технологии, существующие в нашей стране. Было исследовано 5 вариантов покрытий, выполненных в СГАУ плазменным напылением: хром и молибден; графит и незначительная часть титана; смесь

1-го и 2-го вариантов; нитрид титана; нитрид алюминия. Первый вариант покрытия позволил осуществить 10 пусков-остановов ТГДУ.

Проведённые исследования прочности важнейших элементов ТГДУ при действии различных эксплуатационных факторов (выделяющееся в зоне трения тепло, центробежные силы, перепад давления) позволили выбрать материалы для пары трения и вторичного уплотнения, обеспечивающие работоспособность ТГДУ в течение заданного ресурса. Выявлено, что в качестве вторичного уплотнения необходимо использовать резиновые кольца с твердостью 70...75 единиц и диаметром жгута 3...3,5 мм. Была получена оптимальная форма канавки под резиновое кольцо.

В связи с тем, что в Самаре было открыто серийное производство систем ТГДУ и в газовой отрасли стали одновременно использоваться узлы зарубежного и отечественного производства, в ОАО «ГАЗПРОМ» с участием автора были разработаны «Типовые технические требования к газодинамическим уплотнениям центробежных нагнетателей природного газа и системам, обеспечивающим их работоспособность». При разработке ТГДУ для компрессоров с масляными подшипниками автором был сформулирован ряд дополнительных условий, которые успешно используются в ООО «Газпром трансгаз Самара».

В ООО «Газпром трансгаз Самара» в настоящее время эксплуатируется 43 ГПА, в том числе 38 переоборудованных путем модернизации маслосистемы и замены масляных уплотнений на разработанные с участием автора ТГДУ (со спиральными и реверсивными канавками). ООО «Газпром трансгаз Самара» совместно с учеными СГАУ непрерывно совершенствуют ТГДУ с учётом опыта эксплуатации, получая при этом новые научные и практические результаты. Созданы технология проектирования, изготовления и ремонта ТГДУ и, что особенно важно, метод их доводки на заданные параметры. На созданном стендовом оборудовании можно испытывать все типоразмеры эксплуатируемых в ОАО «Газпром» ТГДУ. Совместно с ООО «ВНИИГАЗ» разработана «Типовая программа и методика по проведению испытаний ТГДУ для нагнетателей природного газа в условиях КС». Параметры разработанных ТГДУ приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры ТГДУ

	Наименование нагнетателя природного газа						
	Н-370-18-1	НЦ-16/76-1,44М	Н-16-76-1,44(1,35)	Н-235	НЦ-6,3Б(В)	ГЦ 2-580 ГПА «Нева-25НК»	СПЧ 370 ГПА-12Р «Урал»
Частота вращения ротора, об/мин	4700	4900	6200	5500	8300	5250	5250
Перепад давления, МПа	7,5	5,3	6	5,3	5,3	5,3	6
Диаметр вала, мм	140	150	140	139	116	180	160
Утечки, нл/мин	30	25	45	35	45	40	40

На базе ПТП СГЭР (подразделение ООО «Газпром трансгаз Самара») создана производственная и экспериментальная базы. В настоящее время предприятие готово ремонтировать все ТГДУ для нагнетателей природного газа, эксплуатируемых в ОАО «Газпром». Общая наработка нагнетателей, укомплектованных ТГДУ производства ПТП СГЭР, составляет более 300,0 тыс.ч, при этом наработка лидерного ТГДУ составила 27,6 тыс.ч. Сокращение затрат на эксплуатацию систем ТГДУ достигается двумя путями: увеличением ресурса ТГДУ; разработкой и внедрением эффективной системы технического обслуживания нагнетателей, оснащенных ТГДУ. В рамках первого направления удалось увеличить наработку до переборки ТГДУ до 12000 час. В рамках второго направления успешно ведётся разработка системы диагностирования ТГДУ. Выполнение данной работы позволит перейти в дальнейшем к эксплуатации системы ТГДУ в составе ГПА по техническому состоянию. Разработанная автором методология внедрения систем газодинамических уплотнений в центробежные нагнетатели позволила создать в Самарском регионе научно-производственный потенциал и накопить опыт создания высоконадёжных ТГДУ, что явилось основой для серийного производства российских ТГДУ как импортозамещающих технологий для ОАО «Газпром».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Решена крупная научная проблема повышения эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа», имеющая важное хозяйственное значение, за счет комплексного использования и развития технологий, разработанных для авиационных двигателей и космических силовых установок. Выявленные особенности работы важнейших элементов системы и разработанные рекомендации по их проектированию и модернизации создают предпосылки для совершенствования ГПА и обеспечения требуемых показателей их надёжности. Подводя итоги проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны методологические основы комплексного использования конвертированных авиационных технологий при реконструкции газотранспортной системы, обеспечивающие требуемые показатели прочности и надёжности ГПА.

2. Проведён всесторонний анализ характера и причин отказов элементов системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» на основе параметрического, вибро- и тензометрического обследования их эксплуатационной нагруженности на различных режимах работы. Выявлены критические элементы, лимитирующие надёжность данной системы: роторы нагнетателей, соединительные муфты, главные масляные насосы, опорные и упорные подшипники, а также масляные уплотнения опор роторов. Установлено, что применение модернизированных конструктивно-технологических решений из аэрокосмической отрасли позволяет существенно повысить надёжность ГПА. Выявлено, что наиболее эффективны модернизация опорно-уплотнительных узлов за счет использования ЭМП, ГДД и ТГДУ, применение ТПУ дисков, лопаток и валов турбин, а также методов ускоренных испытаний.

3. Разработан комплекс методов и средств обеспечения назначенного ресурса системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа», включающий:

- метод исследования и оценки эксплуатационной надёжности по данным эксплуатации и натурных испытаний с использованием статистической обработки информации, позволяющей получить параметры теоретических законов распределений для прогнозирования показателей надёжности вновь разрабатываемых ГПА с авиационным приводом;

- модернизированный метод ускоренных испытаний системы и её элементов на специальных стендах и в условиях эксплуатации, позволяющий сократить время доводки изделий в 2...3 раза;

- метод прогнозирования ресурса рабочего колеса центробежного компрессора с использованием методик «доламывания», проведения прочностных исследований физической модели объекта с обеспечением имитационного моделирования реального процесса нагружения и расчёта предела выносливости специального образца с учётом реального полигармонического нагружения; использование метода позволило увеличить ресурс рабочего колеса нагнетателя в 1,25 раза;

- модернизированный метод ТПУ лопаток и дисков турбин, предполагающий его многократное применение; срок окупаемости ТПУ составляет 3 года;

- метод создания высоконадёжной системы ТГДУ, основанный на комплексном рассмотрении организационных, научных, экспериментальных, технологических и эксплуатационных аспектов и на результатах математического моделирования поведения уплотнения при статических, динамических и тепловых воздействиях; использование метода позволило увеличить наработку ТГДУ на отказ почти в 2 раза, срок окупаемости при этом составил 1 год;

- систему автоматизированного сбора, учёта и обработки информации о состоянии эксплуатации и отказах на примере ГПА Ц-16 с авиационным приводом НК-16СТ;

- научно обоснованные рекомендации для служб эксплуатации об оптимальных режимах загрузки ГПА, а также нормативные документы, регламентирующие объём и последовательность работ по оценке и обеспечению показателей надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа»;

- научно обоснованные рекомендации по выбору параметров системы ЭМП и ГДД для роторной системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа», в результате чего амплитуда колебаний ротора нагнетателя на рабочем режиме не превышает 50 мкм, а виброскорость на корпусе свободной турбины авиационного привода была снижена в 1,4 раза;

- уникальное оборудование для реализации внедрения ТПУ лопаток и дисков турбин;

- уникальное стендовое оборудование, методическое обеспечение для испытаний и доводки ТГДУ.

4. Результаты работы по повышению прочностной и эксплуатационной надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» использованы при проектировании, изготовлении, испытании и реконструкции находящихся в эксплуатации ГПА, а также в учебном процессе СГАУ. На предприятиях газовой отрасли (ООО «Газпром трансгаз Самара», ЗАО «Газпром инвест Юг»), а также в МОО ПО РИА внедрены: план реконструкции газотранспортной системы; научный подход к разработке систем обработки инфор-

мации о состоянии эксплуатации ГПА с авиационным приводом; оборудование и технология ремонта дисков и лопаток турбин методом ТПУ; ЭМП для нагнетателя НЦ-16 и ГДД для свободной турбины авиационного конвертированного двигателя НК-14СТ с улучшенными параметрами; методология переоборудования масляных нагнетателей на систему ТГДУ; динамические стенды и технология для изготовления и ремонта ТГДУ; методика эквивалентных испытаний ТГДУ на динамическом стенде с использованием модельного газа; ТГДУ для семи типов нагнетателей (43 ГПА, переоборудованных на системы ТГДУ, находятся в эксплуатации).

Основные научные результаты диссертации изложены в следующих работах:

Монографии:

1. Медведев, С.Д. Повышение эксплуатационной надёжности ГПА развитием конвертированных авиационных технологий [Текст]/ С.Д. Медведев, С.В.Фалалеев, Д.К.Новиков, В.Б. Балякин. – Самара: СНЦ РАН, 2008.- 371с.

Статьи в рекомендованных ВАК РФ журналах:

2. Медведев, С.Д. Стенд для динамических испытаний «сухих» газовых уплотнений [Текст]/ С.Д.Медведев, Н.И.Россеев, А.В.Монахов, В.Б.Балякин, Д.К.Новиков, С.В.Фалалеев// Газовая промышленность, 2001, №4. – С.55-58.

3. Медведев, С.Д. Оценка эффективности эксплуатации НК-12СТ [Текст]/С.Д.Медведев, В.Б.Балякин, Д.К.Новиков, Н.И.Россеев // Газовая промышленность, 2001, №5. – С.54-55.

4. Медведев, С.Д. Динамика «сухих» уплотнений [Текст]/С.Д.Медведев, С.В.Фалалеев, В.Б.Балякин, Д.К.Новиков, Н.И.Россеев //Газовая промышленность, 2001, №10. –С.66-68.

5. Медведев, С.Д. Критерии оценки технического состояния объектов при реконструкции газотранспортной системы ООО «Самаратрансгаз» [Текст]/ С.Д. Медведев, О.А.Степаненко // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2006, №2 . Ч.2.-С. 276-280.

6. Медведев, С.Д. Пути реализации программы реконструкции газотранспортной системы ООО «Самаратрансгаз» [Текст]/ С.Д.Медведев// Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2006, №2 . Ч.2.-С. 280-286.

7. Медведев, С.Д. Демпфирование в опоре – эффективный путь увеличения ресурса двигателя НК-14СТ [Текст]/ С.Д.Медведев, В.Б.Балякин, И.С.Барманов, Д.К.Новиков// Известия СНЦ РАН. – Самара, 2007. –С. 671-684.

8. Медведев, С.Д. Разработка методики эквивалентных испытаний торцовых газодинамических уплотнений [Текст]/ С.Д.Медведев, С.В.Фалалеев// Известия СНЦ РАН. – Самара, 2008, том.10, №3. –С. 844-848.

9. Медведев, С.Д. Методология реконструкции компрессорных станций за счет использования конвертированных авиационных газотурбинных двигателей [Текст]/ С.Д.Медведев// Известия СНЦ РАН. – Самара, 2008, том.10, №3. –С. 688-693.

10. Медведев, С.Д. В поисках эффективности [Текст]/ С.Д.Медведев, В.А.Грабовец, А.Е.Лапин, Б.В.Иоффе //Газовая промышленность, 2008, №9. –С.35-36.

11.Медведев, С.Д. Использование конвертированных авиационных газотурбинных двигателей и технологий [Текст]/ С.Д.Медведев, В.Б.Балякин// Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2009, №3 . Ч.3.-С. 292-298.

Публикации:

12. Хорощенко, А.М. Усовершенствованное выхлопное устройство ГПА-Ц-6,3 [Текст]/ А.М.Хорощенко, В.П.Клисенко, С.Д.Медведев, М.Н.Удод // Газовая промышленность, 1985, № I. –С.23.

13. Комлык, Ю.Ф. Испытания модельных проточных частей нагнетателей природного газа [Текст]/ Ю.Ф.Комлык, А.М.Хорощенко, А.И.Апанасенко, С.Д.Медведев // Энергомашиностроение, 1985, №9. -С.18-19.

14. Криницкий, Е.В. Прогнозирование надёжности нефтеперерабатывающего оборудования [Текст]/ Е.В.Криницкий, С.Д.Медведев, А.Л.Тимин, В.С.Шубин // Надёжность оборудования, производств и автоматизированных систем в химических отраслях промышленности –М.: ЦИНТИХИМнефтемаш, 1987. –С.19-20.

15. А.С. 4149108/26-06 (160138). Отводчик жидкости/ Балаценко В.П., Медведев С.Д., Данилей-

ко В.И., Балащенко С.Л. Оpubл.: 30.05.1988, Бюл.№ 20.

16. Хорощенко, А.М. Ускоренные испытания узлов и систем турбокомпрессорных машин [Текст]/ А.М.Хорощенко, А.Н.Нацвин, С.Д.Медведев, И.И.Беловодский, Е.В.Криницкий// Химическое и нефтяное машиностроение, 1989, №2. -С. 28-29.

17. Хорощенко, А.М. Управление формированием надёжности компрессоров на стадиях создания [Текст]/ А.М.Хорощенко, Е.В.Криницкий, С.Д.Медведев, В.С.Шубин // Повышение эффективности и надёжности машин и аппаратов в основной химии. –Сумы, 1989. –С.168-169.

18. Криницкий, Е.В. Ускоренная оценка надёжности компрессорных машин [Текст]/ Е.В.Криницкий, С.Д.Медведев, В.С.Шубин // Повышение эффективности и надёжности машин и аппаратов в основной химии. –Сумы, 1989. –С.181-182.

19. Апанасенко, А.И. Исследования выхлопных патрубков газотурбинного привода компрессорного агрегата ГПА-Ц-16 [Текст]/ А.И.Апанасенко, В.П.Парафейник, С.Д.Медведев, М.Н.Удод // Химическое и нефтяное машиностроение, 1989, №1. –С.20-23.

20. Аронов, И.З. Метод формирования расслоенной выборки при испытаниях на надёжность машин на основе флуктуационной модели [Текст]/ И.З.Аронов, Г.И.Грозовский, М.В.Журцев, А.Э.Немеровская, С.Д.Медведев, А.П.Усатенко // Стандартизация контроля качества и надёжности промышленной продукции. -Горький, 1989. –С.10-11.

21. Поляков, С.Н. Выбор информативной системы эксплуатационных параметров в задаче оценки надёжности функционирования турбокомпрессорных агрегатов [Текст]/ С.Н.Поляков, С.Д.Медведев, В.С.Шубин// Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса. –Сумы, 1989. -С.60.

22. Медведев, С.Д. Информационно-измерительная система для анализа случайных и быстропеременных процессов [Текст]/ С.Д.Медведев, А.П.Усатенко // Методы и средства обработки измерительной информации. -Челябинск, 1990. –С.44.

23. Россеев, Н.И. Опыт эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с авиаприводом в ДП «Самаратрансгаз» и перспективы их совершенствования [Текст]/ Н.И.Россеев, С.Д.Медведев, В.С.Аверкиев // Новые технологии в газовой промышленности: тез. докл. 2-ой всеросс. конф. молод. уч. и спец. по проблемам газовой промышленности. -М.: ГАНГ им. И.М. Губкина, 1997. -С.26-27.

24. Кравченко, Б.А. Опыт эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с лопатками, обработанными методом термопластического упрочнения (ТПУ) [Текст]/ Б.А.Кравченко, В.Г.Круцило, С.Д.Медведев // Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России: тез. докл. 2-й научно-техн. конф. -М., 22-24 января 1997. -С.35.

25. Фалалеев, С.В. Разработка и результаты испытаний «сухого» газового уплотнения для нагнетателя 370-18-1 [Текст]/ С.В.Фалалеев, Д.К.Новиков, В.Б.Балякин, Н.И.Россеев, С.Д.Медведев, Ю.А.Клячин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: тез. докл. междуна. научно-техн. конф. –Самара: СГАУ, 1997, ч. 2. - С.357-360.

26. Новиков, Д.К. Снижение вибрации двигателя НК-12СТ в эксплуатации [Текст]/ Д.К.Новиков, В.Б.Балякин, Ю.А.Клячин, С.Н.Кулагин, С.Д.Медведев // Газовая промышленность. –М., 1998, №12. -С.36-37.

27. Фалалеев, С.В. “Сухое” газовое уплотнение для нагнетателя 370-18-1 [Текст]/ С.В.Фалалеев, Д.К.Новиков, В.Б.Балякин, Н.И.Россеев, С.Д.Медведев, Ю.А.Клячин // Газовая промышленность, 1998, №4. -С.55-57.

28. Наумов, Н. Бессмазочные нагнетатели природного газа [Текст]/ Н.Наумов, В.Подоровский, В.Верещагин, Н.Россеев, С.Медведев // Газовая промышленность, 1999, №7. -С. 59-60.

29. Медведев, С. Структурная модель многофункциональной ИИС газотранспортного предприятия [Текст]/ С.Медведев, Н.Россеев, В.Кузнецов // Современные информационно-управляющие системы газотранспортного предприятия: тематич. сб. статей. -М.:Изд-во Российской инженерной академии, 1999, Вып. №1. - С. 21-33.

30. Медведев, С. Информационный и надёжностный критерии для оценки эффективности иерархической структуры многофункциональной ИИС газотранспортного предприятия [Текст]/ С.Медведев, Н.Россеев, В.Кузнецов // Современные информационно-управляющие системы газотранспортного предприятия: тематич. сб. статей. -М.:Изд-во Российской инженерной академии, 2000, Вып. №2. - С. 28-35.

31. Россеев, Н. Математические модели измерительных преобразователей электропроводности для локальных систем контроля загрязнения сточных вод на территории промышленных предприятий [Текст]/ Н.Россеев, С.Медведев, В.Павловский // Современные информационно-управляющие системы газотранспортного предприятия: тематич. сб. статей. -М.: Из-во Российской инженерной академии. 2000, Вып. № 2. - С. 74-81.

32. Россеев, Н. Анализ погрешностей информационно - измерительных систем с функционально - связанными измерительными каналами методом стохастической линеаризации [Текст]/ Н.Россеев, С.Медведев, М.Дудин // Современные информационно-управляющие системы газотранспортного предприятия: тематич. сб. статей. -М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2000, Вып. № 2. –С. 90-100.
33. Россеев, Н. Корпоративная сеть ООО «Самаратрансгаз» - основа ИИУС газотранспортного предприятия [Текст]/ Н.Россеев, С.Медведев, В.Изосимов // Современные информационно-управляющие системы газотранспортного предприятия: тематич. сб. статей. -М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2000, Вып. № 3. –С.4-24.
34. Россеев, Н. Роль и задачи ИИС в системе транспорта газа при новом способе редуцирования газа на ГРС [Текст]/ Н.Россеев, С.Медведев, И.Романов // Современные информационно-управляющие системы газотранспортного предприятия: тематич. сб. статей. -М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2000, Вып. № 3. –С.24-40.
35. Свидетельство № 17958 на полезную модель. Стенд для испытаний торцовых газодинамических испытаний уплотнений роторов нагнетателей природного газа /Балякин В.Б., Медведев С.Д., Новиков Д.К., Россеев Н.И., Фалалеев С.В. Оpubл. 10.05.2001. Бюл.№13.
36. Патент №2171857. Способ восстановления циклической прочности деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на основе никеля /Кравченко Б.А., Россеев Н.И., Забродин Ю.В., Круцило В.Г., Медведев С.Д., Монахов А.В. Оpubл. 10.08.2001. Бюл.№22.
37. Патент №2170272. Установка для термопластического упрочнения лопаток /Кравченко Б.А., Россеев Н.И., Круцило В.Г., Медведев С.Д., Монахов А.В. Оpubл. 10.07.2001. Бюл.№19.
38. Патент России №2173423. Торцовое бесконтактное уплотнение/ Фалалеев С.В., Балякин В.Б., Новиков Д.К., Россеев Н.И., Медведев С.Д. Оpubл. 10.09.2001, Бюл.№25.
39. Патент России №2177572. Торцовое бесконтактное уплотнение (варианты)/ Фалалеев С.В., Балякин В.Б., Новиков Д.К., Россеев Н.И., Медведев С.Д. Оpubл. 27.12.2001, Бюл.№36.
40. Медведев, С.Д. Повышение надёжности деталей типа дисков турбины газоперекачивающего агрегата технологическими методами упрочнения [Текст]/ С.Д.Медведев, М.А.Вишняков, Б.А.Кравченко //Газотурбинные технологии. –Рыбинск, 2003, №2. – С.24-26.
41. Белоусов, Ю. Цифровая аппаратура управления магнитными подшипниками роторных машин [Текст]/ Ю.Белоусов, Д.Кочетов, Д.Кравцов, Е.Кравцова, С.Медведев, Н.Козлов // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, 2003, №5. – С.38-41.
42. Епейкин, Л. Повышение ресурса и прочностной надёжности двигателя НК-16СТ путем модернизации камеры сгорания с помощью конструктивных элементов, автоматически выходящих зазоры [Текст]/ Л.Епейкин, А.Маркушин, И.Канунников, О.Васин, С.Медведев, Ю.Забродин, И.Водбольский // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: тез. докл. междунар. научно-техн. конф. - Самара, 2003, Ч.2. -С.61-63.
43. Курбатов, В.П. МВИ ГПА-Ц1-10Б/76-1,35: дан старт серийному производству нового агрегата [Текст]/ В.П.Курбатов, В.Н.Овчинников, Н.С.Щербаков, С.Д.Медведев, И.Ю.Водбольский// Газотурбинные технологии, 2004, №5. -С.2-5.
44. Степаненко, О.А. Проблемы и перспективы применения «сухих» уплотнений в стационарных ГТУ [Текст]/ О.А.Степаненко, С.В.Фалалеев, С.Д.Медведев //ЛП научно-техн.сессия РАН по проблемам газовых турбин, работающих в промышленности и энергетике: Тез. докл. – Самара, 2005. –С.116-118.
45. Фалалеев, С.В. Проблемы создания и перспективы использования реверсивных торцовых газодинамических уплотнений для нагнетателей природного газа [Текст]/ С.В.Фалалеев, Д.К.Новиков, В.Б.Балякин, О.А.Степаненко, С.Д.Медведев // Гервикон-2005: Труды 11-ой междунар.научно-техн.конф. –Сумы, Украина:Вид-во СумДУ, 2005, т.3. –С.291-297.
46. Фалалеев, С.В. Создание математической модели ТГДУ ГПА для проведения их эквивалентных испытаний на динамическом стенде [Текст]/ С.В.Фалалеев, С.Д.Медведев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды междунар.научно-техн.конф. –Самара: РИО СГАУ, 2006, ч2. –С.163-164.
47. Новиков, Д.К. Динамические характеристики ротора двигателя НК-14СТ с демпфером [Текст]/ Д.К.Новиков, В.Б.Балякин, С.В.Фалалеев, С.Д.Медведев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды междунар.научно-техн.конф. –Самара: РИО СГАУ, 2006, ч.1. – С.4-5.
48. Степаненко, О.А. Критерии оценки технического состояния объектов при реконструкции газотранспортной системы ООО «Самаратрансгаз» [Текст]/ О.А.Степаненко, С.Д.Медведев//Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды междунар.научно-техн.конф. –Самара: РИО СГАУ, 2006, ч.1. –С.132-133.

49. Степаненко, О.А. Пути реализации программы реконструкции газотранспортной системы ООО «Самаратрансгаз» [Текст]/ О.А.Степаненко, С.Д.Медведев//Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды межд.научно-техн.конф. –Самара: РИО СГАУ, 2006, ч.1. – С.130-131.
50. Медведев, С.Д. Прочностные, динамические и надёжностные аспекты модернизации газоперекачивающих агрегатов при использовании конвертируемых узлов авиационных двигателей [Текст]/ С.Д.Медведев, С.В.Фалалеев, Д.К.Новиков, В.Б.Балякин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. - Самара: СГАУ, 2006.- Ч.2.- С.140-141.
51. Балякин, В.Б. Расчёт динамики ротора системы «НК-14СТ – ГПА-Ц6,3» с гидродинамическим демпфером [Текст]/ В.Б.Балякин, И.С.Барманов, С.Д.Медведев, Д.К.Новиков //Актуальные проблемы трибологии: Труды межд.научно-техн.конф. – М.:Машиностроение, 2007. –С.78-93.
52. Грабовец, В.А. Опыт разработки торцовых газодинамических уплотнений [Текст]/ В.А.Грабовец, С.Д.Медведев, В.В.Седов, С.В.Фалалеев// Мегапаскаль: специал. информационно-аналитич. журнал. – Рыбинск, 2008, №2. –С.20-22.
53. Белоусов, А.И. Проблемы разработки торцовых газодинамических уплотнений для газовой промышленности [Текст]/ А.И.Белоусов, С.В.Фалалеев, С.Д.Медведев // Hervikon-2008, V.2. – Kielce (Poland): Politechnika Svetokruzska, 2008. – pp. 45-54.
54. Медведев, С.Д. Создание экспериментальной базы для испытаний торцовых газодинамических уплотнений [Текст]/ С.Д.Медведев, В.В.Седов, С.В.Фалалеев, В.Б.Балякин, Д.К.Новиков, Д.С.Лежин // Мегапаскаль: специал. информационно-аналитич. журнал. – Рыбинск, 2008, №3. –С.14-16.

Личный вклад: Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоял в непосредственном участии во всех стадиях работы, начиная от постановки задач, выполнения теоретических и экспериментальных исследований до внедрения полученных результатов. В частности:

- в монографии автором получены научные результаты в области повышения надёжности системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» и проведено научное обоснование технических и технологических решений для повышения эффективности, прочности и надёжности ГПА;
- в работах 2,54 автором проведена разработка научно обоснованных рекомендаций для создаваемого стендового оборудования;
- в работах 3,7,26,47,51 автором проведено научное обоснование применения гидродинамических демпферов;
- в работах 4,8,45,46 автором усовершенствованы математические модели торцовых газодинамических уплотнений;
- в работах 5,10,11, 29-34,48-50 автором разработан научный подход и получены результаты модернизации ГПА с использованием конвертированных технологий, разработанных для авиационных двигателей и космических силовых установок;
- в работах 11,14,17,19,21,23,25,27,28,42-44,52,53 автором получены результаты повышения эффективности, прочности и надёжности ГПА с авиационным приводом;
- в работах 13,16,18,20,22 автором разработаны математические модели и получены экспериментальные результаты ускоренных испытаний элементов системы «конвертированный авиационный двигатель – нагнетатель природного газа» ГПА;
- в работах 24,40 автором проведено научное обоснование применения метода термопластического упрочнения для элементов турбин ГПА;
- в работе 41 автором проведено научное обоснование цифровой аппаратуры для электромагнитных подшипников, а также анализ результатов ее экспериментального исследования;
- в работах 15,35,36,37-39 автору принадлежат идеи запатентованных решений и результаты экспериментального подтверждения научной новизны.