

На правах рукописи

Карташов Алексей Леонидович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРИ
УПРАВЛЕНИИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИМИ ТУРБОУСТАНОВКАМИ**

Специальность 05.04.12 - Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт–Петербург - 2005

Работа выполнена в Государственном общеобразовательном учреждении общего профессионального образования «Брянский государственный технический университет

Научный руководитель: Засл. деят. науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Буглаев Владимир Тихонович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бродов Юрий Миронович,
кандидат технических наук
Гаев Валерий Дмитриевич

Ведущая организация Инженерно-технический центр
«Оргтехдиагностика» ДООАО «Оргэнергогаз»,
г. Москва

Защита состоится «04» октября 2005 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.06. ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. ____

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2005 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.229.06.
докт. техн. наук, профессор

Кортиков Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Переход на прогрессивную систему технического обслуживания и эксплуатации газотурбинных газоперекачивающих агрегатов по фактическому состоянию возможен только при наличии эффективных методов и средств диагностирования технического состояния ГПА на всех стадиях жизненного цикла, образующих в совокупности единую систему комплексного диагностирования и прогнозирования, функционирующую совместно и во взаимосвязи с системами технического обслуживания и ремонта (ТОиР), а также управления технологическим процессом транспорта газа. Значение развития диагностирования ГПА трудно переоценить, что предопределено объективными тенденциями развития газовой отрасли, сопровождающимися непрерывным увеличением парка агрегатов, расширением их номенклатуры, усложнением и разнообразием конструкций, различием условий и стратегий эксплуатации.

Внедрение методов и средств диагностирования и прогнозирования технического состояния на всех стадиях жизненного цикла ГПА позволяет обеспечить поэтапный и непрерывный контроль процесса создания ГПА, включая предпроектное прогнозирование выходных показателей, проектирование, изготовление, проведение цикла доводочных работ в процессе стендовых и натурных испытаний, что дает возможность обеспечивать соответствие паспортных выходных показателей агрегатов нормальному уровню на период начала их серийного выпуска. Появляется возможность перехода от традиционной системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что снижает вероятность внезапных отказов и тем самым повышается безопасность работы; получить информацию о фактическом состоянии парка ГПА и о характеристиках агрегатов в процессе эксплуатации; обеспечить необходимые условия для решения одной из основных проблем экономики энергомашиностроения – определения оптимального распределения средств между сферами проектирования, производства, стендовой доводки и эксплуатации. Все это дает возможность говорить об актуальности темы диссертации.

Целью диссертационной работы является обследование, анализ материалов, наработка и совершенствование методики диагностирования ГПА в условиях эксплуатации с использованием результатов экспериментально-аналитических исследований газотурбинных двигателей и их составляющих.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие задачи:

1. Исследование газотурбинной установки как объекта эксплуатации с разработкой практических рекомендаций по совершенствованию системы технической эксплуатации (СТЭ) ГПА при транспортировке газа.
2. Рассмотрение и анализ структуры методов и алгоритмов для решения основных задач управлением ГПА на основе многофакторной диагностики.
3. Обоснование методических разработок построения и совершенствования системы диагностирования газотурбинных двигателей.

4. Разработка перспективных методов диагностики элементов проточной части ГПА на основе результатов экспериментальных исследований с моделированием протекающих в них физических явлений.

Методы исследований. В основу проводимых исследований были положены сведения о результатах влияния геометрических факторов и дефектов в элементах проточной части газотурбинных установок (ГТУ) на их рабочие характеристики и нагруженность их деталей; анализа существующих рекомендаций по совершенствованию средств и систем контроля, а также методов диагностирования ГПА в условиях эксплуатации.

Научная новизна работы. На основе анализа СТЭ ГПА выявлены возможности повышения её эффективности за счёт совершенствования процесса углублённого диагностирования. Обоснована необходимость мониторинга величин радиальных зазоров в проточной части газовых турбин, который может быть положен в основу эффективных процедур функционального диагностирования газотурбинных двигателей. Разработана программа мониторинга влияния величин радиальных зазоров в ступенях проточной части ГПА по результатам локальных экспериментальных исследований на диагностическом стенде.

Практическая значимость работы. По экспериментальным данным о влиянии меняющегося радиального зазора в проточной части на работоспособность ГТУ построена методика для процесса эксплуатации ГПА. Предложена к реализации разработанная функциональная схема системы управления техническим состоянием и использованием парка однотипных ГПА.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Международном семинаре – конференции «Методы совершенствования теплоэнергетических установок» в г. Брянске (БГТУ) в октябре 2004 г., научных семинарах кафедры «Турбины и теплоэнергетика» БГТУ и Санкт-Петербургского технического университета (2004-2005г.г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 5 научных статей в различных технических изданиях РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 83 наименований и приложения. Она содержит 131 страниц текста, 37 рисунков, 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены направление и цели исследований, показана научная и практическая значимость решаемой задачи.

В первой главе обсуждаются проблемы повышения эффективности управлением парков ГПА на основе рассмотрения методов технической эксплуатации ГПА и системы диагностирования, как важнейшего резерва её совершенствования. Для постановки задач оптимизации СТЭ ГПА из условий обеспечения надёжности и эффективности использования ГПА необходима

систематизация представлений и соответствующих исследований рассматриваемой системы. СТЭ позволяет реализовывать качества, заложенные в объект эксплуатации при его проектировании и производстве, и является совокупностью взаимодействующих между собой объектов и средств эксплуатации, исполнительной и нормативно-технической документации (НТД). Целевой функцией СТЭ является обеспечение заданного режима работы объектов эксплуатации в условиях, оговоренных НТД.

Анализ СТЭ элементов оборудования магистральных газопроводов показал, что наиболее важными, наряду с трубопроводами линейной части, являются ГПА. В качестве основного признака, характеризующего стратегию технического обслуживания объектов, целесообразно принять характер информации об их надёжности и техническом состоянии, которая используется при назначении периодичности регламентных работ. Известные недостатки стратегии «по ресурсу» не обеспечивают требуемой надёжности и не позволяют повышать эффективность использования агрегатов. В связи с этим отечественные и зарубежные специалисты (работы: Ахмедзянова А.М., Биргера И.А., Бикчентая Р.Н., Зарицкого С.П., Лопатина А.С., Микаэляна Э.А., Епифанова С.В., Поршакова Б.П., Тунакова А.П., Черкеза А.Я. и др.) сходятся на том, что следует использовать новые принципы обслуживания и ремонта, ориентированные на максимальное использование фактической надёжности агрегатов.

Для ГПА большого ресурса наиболее совершенной является комбинированная система (смешанная стратегия) обслуживания и ремонта. Контроль уровня надёжности совокупности однотипных изделий осуществляется статистическими методами. Данным видом контроля охватывается, как правило, большинство агрегатов и узлов независимо от применяемой к ним стратегии ТОиР. Однако, только для стратегии технического обслуживания с контролем уровня надёжности, этот вид контроля является основным механизмом в управлении надёжностью изделий.

Стратегия ТОиР по состоянию с контролем параметров представляет собой совокупность правил по определению режимов и регламента диагностирования изделий и принятию решений о необходимости их обслуживания, замены или ремонта на основе информации о фактическом техническом состоянии. При данной стратегии изделия и системы эксплуатируются (используются) до предотказного состояния. Степень применения технического диагностирования определяет глубину и качество оценки технического состояния изделий, а значит, правильность и эффективность принимаемых решений и самой стратегии. Экономическая эффективность эксплуатации достигается выбором оптимальной стратегии ТОиР, обеспечивающей экстремальные значения целевой функции (минимум удельной стоимости ТОиР и максимум коэффициента использования ГПА) при заданном уровне надёжности функциональных систем и изделий.

Эффективное управление работой газоперекачивающего агрегата и компрессорного цеха в целом невозможно без знания достоверной информации о функционально-техническом состоянии основных узлов ГПА –

газотурбинном двигателе и центробежном компрессоре. Такую информацию можно получить лишь в результате диагностических обследований оборудования.

Диагностирование, являющееся основой распознавания классов состояний агрегатов, следует выполнять на базе комплексного подхода, состоящего в анализе их текущего положения и кинематики в едином многомерном пространстве разнородных характеристик состояния: критериев, получаемых по данным контроля геометрических, термогазодинамических, вибрационных и других групп параметров объекта диагностирования.

На современном этапе эффективное диагностирование невозможно без развития автоматизированных систем, предназначенных для решения режимно-технологических задач в масштабе реального времени. Причём оценка эффективности эксплуатации производится не только по измеряемым, но и по рассчитанным параметрам фактического режима. Несмотря на то, что на современных ГПА успешно внедряются системы оперативного диагностирования в режиме реального времени, достаточно актуальными являются вопросы совершенствования системы диагностирования на основе анализа экспериментально-исследовательских разработок, создания стендов и прогрессивных методов диагностирования, использования опыта отраслевых экспериментальных лабораторий. На основе изложенного, а также обзора литературных источников, сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе работы рассматриваются проблемы диагностирования как основы управления техническим состоянием ГПА. Основанием для выбора воздействий по управлению состоянием агрегатов является вид его технического состояния, что является основной задачей технической диагностики. Базой создания систем диагностирования являются классификаторы состояний конкретных типов ГПА, которые могут быть составлены на основании анализа эксплуатационной технологичности, контролепригодности и безотказности данного типа агрегатов.

Снижение эффективности работы ГПА в процессе эксплуатации характеризуется рядом технологических, диагностических и надёжностных показателей, к которым можно отнести снижение подачи газа нагнетателем, увеличение расхода топливного газа по ГТУ, снижение мощности агрегата, времени наработки на отказ и т.д. Анализ неисправностей ГПА показывает, что их можно классифицировать по следующим признакам:

Принадлежности к отдельным узлам агрегата.

Влиянию на работоспособность установки: а) неисправности, приводящие к снижению ресурса узлов и деталей; б) неисправности, приводящие к изменению характеристик функционирования.

Характерные признаки: а) неисправности, диагностические параметры которых определяются прямым измерением; б) неисправности, диагностируемые по косвенным признакам; в) неисправности, оцениваемые по условиям, приводящим к их возникновению.

Перечень возможных неисправностей ГПА в процентном отношении, полученный по статистическим результатам работы ГПА в производственной

системе ОАО «Газпром» – предприятия «Мострансгаз» за последние 7÷10 лет их эксплуатации, представлен в табл.1.

Таблица 1.

Перечень эксплуатационных неисправностей ГПА
компрессорных станций

№ п/п	Наименование места неисправности	Число неисправностей от общего количества, %
1.	Элементы проточной части ГТУ	48,4
2.	Элементы камеры сгорания	5,6
3.	Элементы проточной части ЦБН	46,0

Из многолетнего опыта эксплуатации агрегата ГТК-10 следует, что основными причинами снижения технико-экономического состояния являются, в частности, изменения размеров радиальных зазоров в проточной части компрессора, турбины, нагнетателя, а также в уплотнениях. В процессе эксплуатации происходит значительное изменение радиальных зазоров в проточной части газовых турбин.

Многочисленные статистические данные свидетельствуют о том, что:

- увеличение радиальных зазоров в проточной части осевого компрессора (ОК), турбины высокого (ТВД) и низкого (ТНД) давления и в уплотнениях рабочего колеса нагнетателя (ЦБН) вследствие эрозии и коррозии, связано с соответствующим снижением мощности и КПД ГТУ и ЦБН (увеличение среднего радиального зазора ОК на 1 мм снижает мощность турбоагрегата на 9%, КПД – на 5% (относительных); такое-же изменение для ТВД соответственно на 5 и 2,5%; ТНД – соответственно на 1 и 0,8%);

- увеличение зазоров в уплотнениях рабочего колеса на 1 мм в ЦБН типа 280 и 370 ведет к снижению относительного КПД на 1,4%, а типа 520 – на 1%.

Классификаторы состояний ГПА обычно разрабатываются на основании анализа возможных управляющих воздействий по устранению отказов. При назначении критериев оценки технического состояния ГПА по контролируемым параметрам одним из главных вопросов является определение допусков на эти параметры. Для реализации подхода к назначению допусков на изменение контролируемых параметров необходимо располагать представительным экспериментальным материалом об отказах ГПА. Такой материал можно получить при проведении специальных испытаний двигателей до «отказа» в стендовых условиях.

В газовой отрасли, до настоящего времени, эффективность работы и техническое состояние ГПА определялось при проведении их теплотехнических испытаний на компрессорных станциях. При этом определяются коэффициенты технического состояния по мощности и к.п.д. ЦБН и ГТУ, а также по топливному газу ГТУ. В получаемых результатах испытаний, кроме этих материалов, приводятся расчетные и паспортные характеристики политропного к.п.д. от приведенной объемной производительности нагнетателя, расхода топливного газа и к.п.д. ГТУ от

приведенной мощности. Рассчитываемые коэффициенты технического состояния постоянны для всего диапазона приведенной объемной производительности, а фактические характеристики ГТУ и ЦБН достаточно удовлетворительно определяются исходя из предположения о «прямом» сдвиге этих характеристик относительно паспортных. В таком эксперименте объемная производительность ЦБН рассчитывается по информации датчика перепада давления на сужающем устройстве ЦБН, а эффективная мощность на муфте ГТУ по температуре и давлению продуктов сгорания газа на выходе из ТНД. Погрешность вычисления объемной производительности и эффективной мощности достигает 20% и более.

Использование коэффициентов технического состояния не даёт достаточного научного обоснования и часто приводит к большим ошибкам в определении фактических характеристик ГПА. Экспериментальные данные испытаний ГПА свидетельствуют о том, что коэффициенты технического состояния носят переменный характер для каждой из замеренных точек фактических характеристик. Поэтому в настоящей работе предлагается выбрать в качестве параметров диагностирования ГПА фактические приведенные характеристики. Функционально-техническое состояние ГПА следует оценивать по отклонению рассчитываемых приведенных характеристик относительно паспортных. Таким образом, в основу диагностирования проточной части закладывается положение об изменении ее состояния в зависимости от развития некоторого конечного множества типовых неисправностей. При этом система диагностирования подкрепляется возможностью проверки правильности поставленных диагнозов путем независимых измерений геометрических характеристик деталей. В этих условиях может быть весьма полезна информация о динамике изменения зазоров в проточной части двигателей, что позволяет обосновывать наиболее ответственные решения о дальнейшей их эксплуатации и служит основой уточнения алгоритма диагностирования по материалам дефектации двигателей в процессе их ремонта. В работе предложен алгоритм диагностирования проточной части по оценке уровней типовых неисправностей.

В третьей главе приводится обоснование системы мониторинга величин радиальных зазоров в проточной части турбин ГПА по результатам экспериментальных исследований на диагностическом стенде. Методы и способы диагностирования, основанные на мониторинге величин радиальных зазоров высокотемпературных газовых турбин, являются несколько необходимыми, настолько и технически трудно осуществляемыми. В связи с этим, для апробации данного метода диагностирования, его совершенствования и отработки рекомендаций по внедрению в эксплуатирующих ГПА предприятиях, разработан и изготовлен экспериментально-диагностический стенд на базе модельной ступени газовой турбины. Механическая часть стенда выполнена традиционной, характерной для испытательных стендов, и используемых Брянским государственным техническим университетом, С.-Петербургским государственным политехническим университетом и др. (см.рис. 1).

Измерительный комплекс включает в себя приборы для измерения расхода газа, крутящего момента, оборотов вала, давления, температуры в проточной части ступени, а также датчиков измерения радиальных зазоров. В качестве приборов для определения расхода газа используется автоматизированный комплекс «Superflow-II» с выводом результатов на ЭВМ. Относительная погрешность измерений комплекса не превышает 0,5%. Величина радиального зазора в турбинной ступени контролировалась посредством токовихревых датчиков и соответствующей аппаратурой с выводом сигнала на ЭВМ.

Таким образом, современная автоматизированная диагностическая аппаратура позволяет проводить постоянный мониторинг изменения величин радиальных зазоров в проточной части ступеней турбины, а использование результатов экспериментальных исследований влияния величин зазоров на эффективность и надежность работы газотурбинных двигателей служит основой разработки и использования диагностических математических моделей.

При эксплуатации ГПА изменения радиальных зазоров ведут как к снижению к.п.д. компрессора и турбины, так и возможности задевания элементами вращающегося ротора о неподвижные элементы статора агрегата. В компрессорах это обстоятельство наряду с загрязнением элементов проточной части является фактором, приводящим к снижению экономической эффективности его работы. Однако, если существуют отработанные конструкции статора компрессора, которые позволяют сохранять малые радиальные зазоры в проточной части без постоянного контроля за их состоянием, то высокий уровень температур и интенсивное охлаждение в газовых турбинах, требует активного вмешательства в регулирование величин радиальных зазоров и диагностирования происходящего процесса. Радиальные зазоры в турбине в процессе эксплуатации значительно изменяются, в сравнении с расчетными, при этом они оказываются часто неравномерными по окружности.

Опыт показывает, что неравномерность величины зазора может возникнуть вследствие износа периферийных частей рабочих лопаток, всплывания ротора в подшипниках скольжения, а также деформации ротора и статора, других причин.

Окружная неравномерность радиальных зазоров в обандаженных ступенях сопровождается изменением размера перекрыш рабочих и направляющих лопаток. Данное явление вызывает нарушение осесимметричности протечек через надбандажные уплотнения и ведет к возникновению неуравновешенных аэродинамических сил, которые обуславливают возникновение вибрации ротора. При этих обстоятельствах значительно снижается экономичность турбины. Анализ экспериментальных исследований влияния эксцентриситета ротора обандаженной турбинной ступени показал значительную зависимость к.п.д. ступени от расцентровки ротора и статора. Так при эксцентриситете ротора $\bar{e} = 0,87$ относительный внутренний к.п.д. ступени на оптимальном режиме работы по u/C_0 снизился на

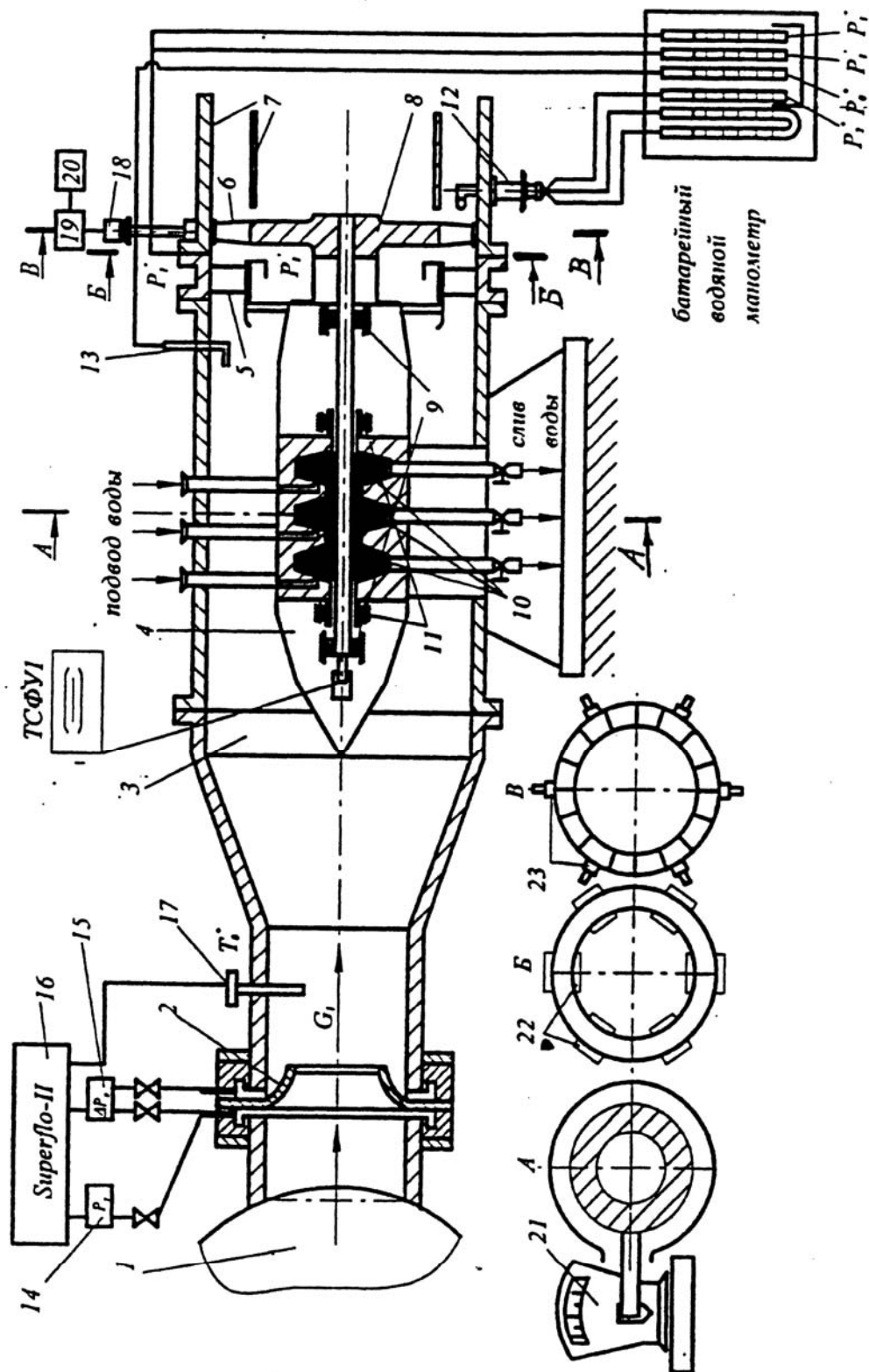


Рис. 1 Схема установки и измерений одноступенчатой экспериментальной воздушной турбины

- 1 - ресвер; 2 - расходомерное солено; 3 - подводный нагнетатель; 4 - ходовая часть; 5 - направляющий аппарат; 6 - рабочее колесо;
7 - выходные ограничивающие кольца; 8 - вал турбины; 9 - подшипники вала турбины; 10 - диски гидромолота;
11 - подшипники внешнего корпуса гидромолота; 12 - 3-Х капальный зонд; 13 - трубка манного давления; 14 - датчик давления;
15 - датчик перепада давления; 16 - измеритель расхода Superflo-II; 17 - датчик температуры; 18 - корпус взрывозащитного преобразователя;
19 - блок согласования; 20 - процессор; 21 - измеритель крутящего момента; 22 - коллекторы статического давления;
23 - датчик взрывозащитного преобразователя - измерителя радиального изгиба.

3%. Аналогичные явления происходят и в безбандажных турбинных ступенях. Изменение величины радиального зазора в исследовании (с равномерным по окружности радиальным зазором) производилось расточкой обоймы над рабочим колесом ступени, а величина положительной перекрыши во всех опытах оставалась постоянной ($\Delta'' = 0,6$ мм). Диапазон изменения радиального зазора исследовался в пределах $\delta = 0,5 \dots 3$ мм, ($\bar{\delta} = \delta / \lambda = 0,7 \dots 4,2\%$), где λ - высота рабочей лопатки.

На рис. 2(1) представлена картина изменения зависимости внутреннего к.п.д. ступени от величины относительного радиального зазора на периферии рабочего колеса при равномерном зазоре по окружности.

Темп снижения η'_{oi} при малых зазорах ($\bar{\delta} = 0,7 \div 2\%$) несколько выше, чем в диапазоне зазоров ($\bar{\delta} = 2 \div 4,2\%$). Это приводит к противоречивому, на первый взгляд, но подтвержденному последующими результатами исследований выводу. При смещении периферийного кольца (эксцентрично к оси ротора) к.п.д. ступени должен был не снижаться, а возрастать (при сохранении постоянной величины перекрыши Δ''), так как уменьшение радиального зазора на одной стороне окружности приводит к увеличению к.п.д. (из-за снижения утечки) в большей степени, чем падение к.п.д. вследствие увеличения зазора на противоположной стороне окружности.

Однако в условиях эксплуатации искажение формы обоймы имеет зачастую такую форму, при которой величина радиального зазора может изменяться не по всей окружности, а на локальном участке дуги. Поэтому в следующей серии опытов при изменении величины радиальных зазоров с сохранением минимальной величины зазора ($\bar{\delta} = 0,7\%$) в одной части окружности имело место значительное увеличение зазора (до $\bar{\delta} = 6,2\%$) на противоположной части окружности. На рис. 2(2) представлена зависимость внутреннего к.п.д. ступени в зависимости от величины относительного радиального зазора на периферийной части рабочего колеса. Форма периферийного обвода представляет фигуру в виде эллипса при неизменяющемся зазоре $\bar{\delta}_{\min} = 0,7\%$ - на одной стороне эллипса и изменяющемся зазоре $\bar{\delta}_{\max} = 2; 4,2; 6,4\%$ - на противоположной.

Характер зависимости 2(2) по сравнению с 2(1) имеет более пологий вид при малых зазорах (до $\bar{\delta} = 2\%$) и более крутой - для зазоров ($\bar{\delta} > 2\%$).

В зависимости рис. 2(2) принимались осредненные величины зазоров

$$\bar{\delta}_{\text{ср}} = \frac{\bar{\delta}_{\min} + \bar{\delta}_{\max}}{2} .$$

Увеличение радиального зазора приводит к существенному повышению интенсивности концевых вихрей и уровня протечек рабочего тела вдоль внешнего обвода ступени. Снижение давления закрученного потока у периферии при увеличении радиального зазора оказывает влияние на характер радиального равновесия, что вызывает снижение реакции по высоте облопачивания. (см. рис. 3). Установлено, что зависимости $\rho = f(\bar{\delta})$ в

безбандажных ступенях имеют больший градиент, чем в обандаженных ступенях (рис. 4.) В обандаженных ступенях увеличение радиального зазора не оказывает существенного влияния на интенсивность концевых вихрей в рабочем колесе, а уровень надбандажных протечек рабочего потока при повышенных радиальных зазорах ограничивается течением через открытый осевой зазор в ступени, сохраняющийся неизменным.

Как следствие, изменение радиального зазора от его расчетной величины в ступенях без бандажа влечет к более резкому изменению эффективности работы всей ступени. В исследовании также проводится анализ влияния неравномерного зазора по окружности на распределение параметров потока по высоте проточной части за рабочими лопатками, степени реактивности и, как следствие, делается вывод неравномерных по окружности венцовых сил, влияющих на осевые нагрузки ротора, а также вибрационное состояние динамической системы.

Обычно диагностика состояния радиальных зазоров осуществляется при кратковременных остановках машин через отверстия, выполняемые в корпусе и обоймах для эндоскопических осмотров. Развитие технической диагностики и внедрение автоматизированных диагностических систем дают возможность проводить измерения изменений радиальных зазоров в проточной части турбины без останова машины на установившихся и переходных режимах прямым или косвенным путём.

Проведенные исследования по выявлению влияния изменения величины радиальных зазоров в проточной части газовой турбины позволяют сделать заключение об определенной информативности данного параметра о состоянии турбины в системе газотурбинной установки. Знание состояния двигателя важно как для оценки эксплуатационной эффективности, так и диагноза ухудшения его надежности, а его раннее прогнозирование позволяет значительно повысить экономичность работы установки, а также снизить затраты на проведение ремонтных работ ГПА в соответствии со стратегией технического обслуживания «по состоянию».

Кроме того, моделирование различных неисправностей на экспериментальных турбинах позволяет вводить дополнительную информацию в термодинамические модели двигателей, отражающую многообразие эксплуатационных и режимных факторов. Несмотря на то, что анализ тенденций изменения показателей ГПА является полезным и необходимым методом, причина ухудшения состояния двигателя не всегда очевидна. Поэтому анализ тенденции изменения показателей ГПА и диагностирование, например, динамики изменения величин осевых и радиальных зазоров в проточной части теплоэнергетических установок следует рассматривать как дополняющие друг друга, а не как взаимно исключающие методы.

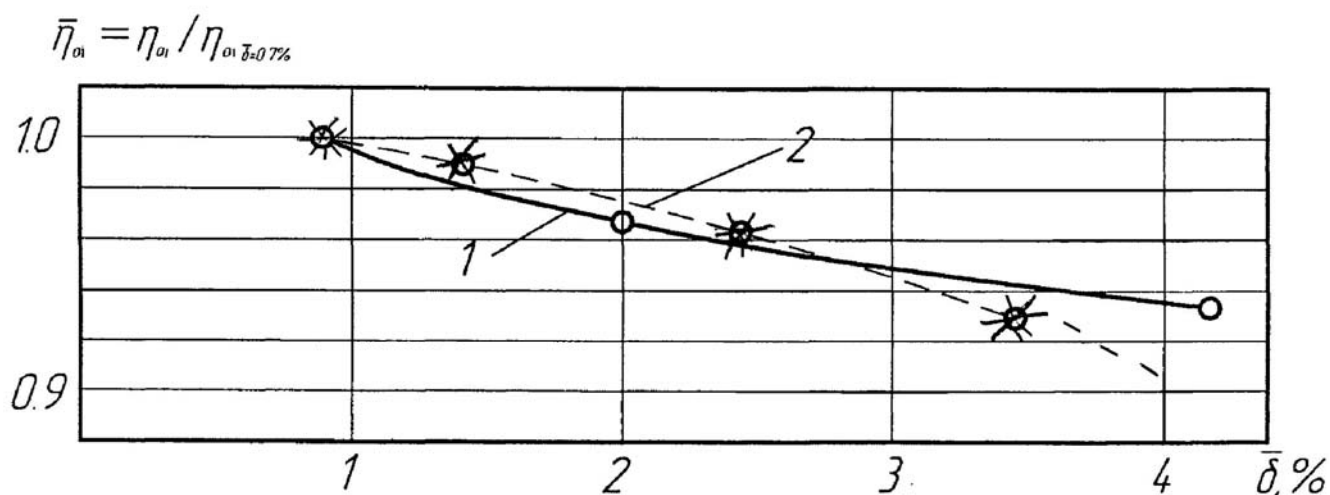


Рис.2 Зависимость $\bar{\eta}_{oi} = f(\bar{\delta})$ при оптимальном режиме по u/C_0

1 - зависимость относительного внутреннего КПД. ступени от равномерного по окружности относительного радиального зазора над рабочими лопатками – о;

2 - то же, для неравномерного зазора (средние значения $\bar{\delta} = (\delta_{\min} + \delta_{\max})/2$) - *

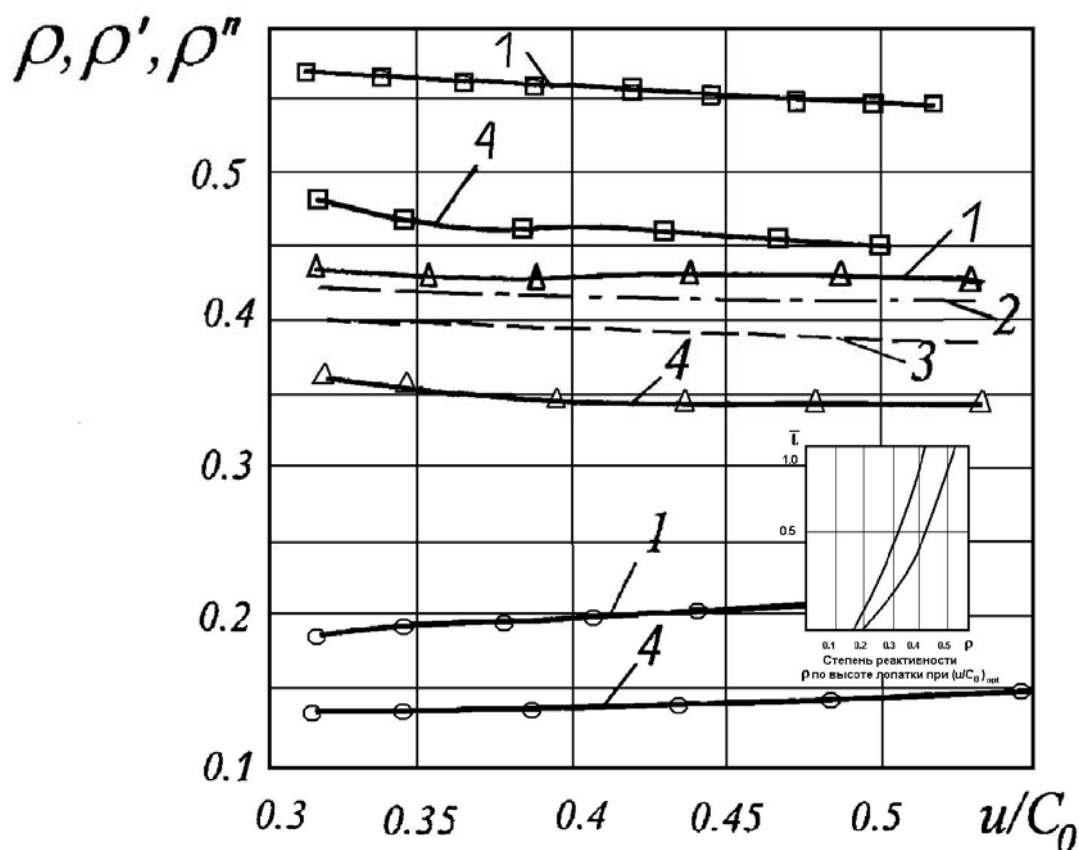
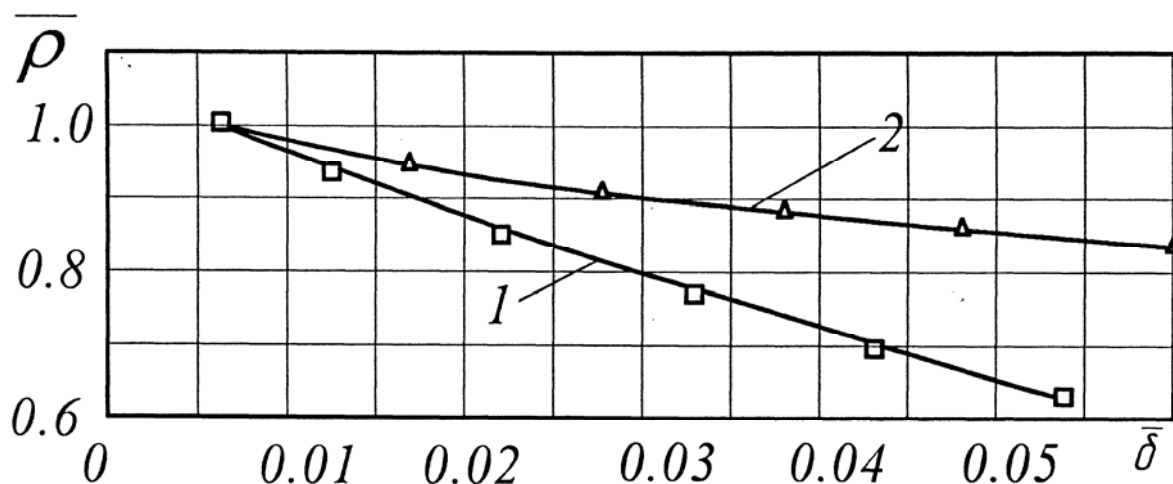


Рис.3 Изменение реактивности в зоне наименьшего и наибольшего зазоров у корня, периферии и в среднем сечении ступени

—○— корень —□— периферия —△— среднее значение

1- $\bar{\delta}_1 = \bar{\delta}_2 = 0.7\%$; 2- $\bar{\delta}_1 = 0.7\%, \bar{\delta}_2 = 2\%$; 3- $\bar{\delta}_1 = 0.7\%, \bar{\delta}_2 = 4.2\%$; 4- $\bar{\delta}_1 = 0.7\%, \bar{\delta}_2 = 6.2\%$



*Рис.4 Зависимость относительных значений степени реактивности $\bar{\rho}$ степени на среднем диаметре от относительного радиального зазора $\bar{\delta}$ в рабочих ступенях:
1 – с бандажом ; 2 - безбандажа.*

В четвертой главе рассматриваются апробированные организационно-технические мероприятия по внедрению системы диагностирования в практику эксплуатационных предприятий с целью совершенствования системы их технической эксплуатации. Анализ современного состояния систем диагностики парков технологического оборудования компрессорных станций и требований к ним, которые возникают из потребностей эффективного управления эксплуатацией оборудования (его техническим состоянием и использованием), позволяет заключить, что при планировании их развития основное внимание следует уделять разработке и внедрению процедур централизованной оперативной диагностики (мониторинга). В данной диссертации предложена функциональная схема системы управления техническим состоянием и использованием парка однотипных элементов технологического оборудования компрессорной станции, сущность которой состоит в общности целей различных сфер деятельности: использования и технического обслуживания оборудования компрессорных станций (рис.5). В общем случае эффективная система диагностики некоторого парка технологического оборудования компрессорных станций должна обеспечивать реализацию относительно него определенного комплекса оперативных, периодических и разовых диагностических процедур, первые из которых целесообразно выполнять дистанционно из центра оперативной диагностики предприятия.

Большие возможности представляет использование на КС комплексных систем диагностики, выполняемых по единой архитектуре, оценивающих состояние оборудования по единым критериям и с применением одних и тех же алгоритмов. Проведенным анализом показано, что такой подход в полной мере позволяет использовать накопленную статистику, первичные вибрационные и параметрические паспорта двигателей для выявления «зарождающихся» дефектов и прогнозирования остаточного ресурса. Установлено, что в состав разрабатываемых систем для проведения оценки технического состояния ГПА должны входить объекты параметрического контроля и диагностики, предполагающие постоянный мониторинг рабочих характеристик агрегатов с помощью различных диагностических методов и алгоритмов, а также соотношения и сравнения с данными вибрационного контроля.

Важнейшей задачей мониторинга ГПА является не только отображение текущих показателей работы, но и контроль оценки состояния, диагностики текущего состояния и прогнозирования на перспективу. При этом диагностика как процедура идентификации фактического состояния объекта с некоторым модельным состоянием по ряду признаков может рассматриваться как одна из подсистем комплексной системы развития мониторинга. Таким образом, цель мониторинга, как и диагностики, заключается в выявлении аномалий в работе агрегатов на стадии, когда эти изменения ещё не приводят к значительному ущербу. Оперативный мониторинг изменения зазоров в проточной части турбомашин направлен на решение указанной задачи. В работе предложены рекомендации по разработке и реализации экспериментально-диагностического стенда на базе ГПА ГТК-10-4 с максимальной автоматизацией процесса измерений параметров. Особенностью измерительного комплекса является применение следующих систем:

- измерения расхода топливного газа (комплекс «Superflow – II»);
- использования измерителя крутящего момента (типа БИКМ М-106М);
- использования токовихревых датчиков радиальных зазоров в турбине и компрессоре;
- использования приборов для газодинамических исследований в проточной части турбины и компрессора.

В заключительном разделе диссертации предложен алгоритм централизованного оперативного диагностирования парка ГПА на основе регистрации параметров и функционирования их технического состояния. Комплексный подход реализуется за счёт оперативных, периодических и разовых диагностических процедур, каждая из которых имеет методическое, техническое, программное, кадровое и организационное обеспечение.

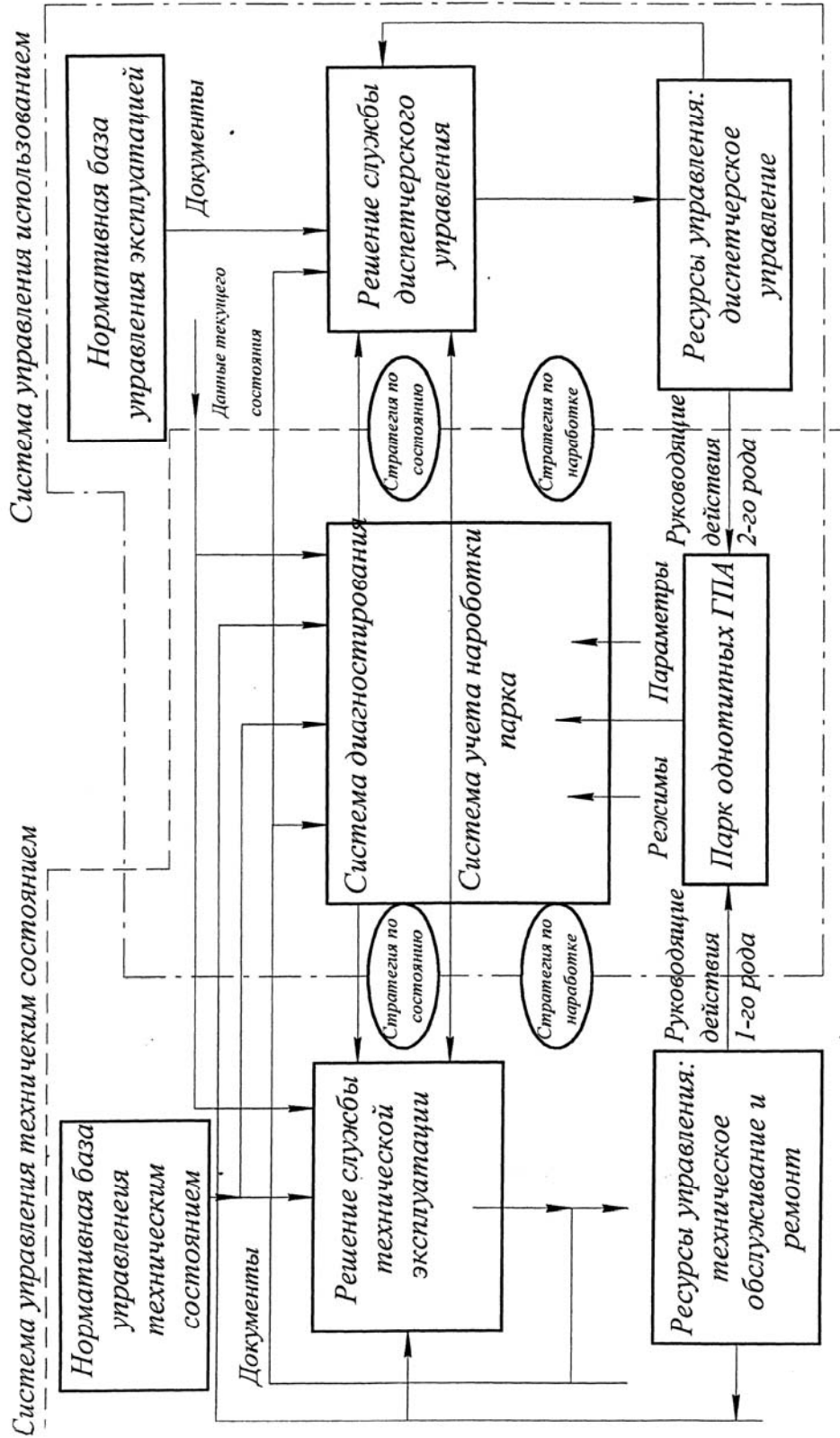


Рис.5. Функциональная схема системы управления техническим состоянием и использованием парка однотипных элементов технологического оборудования

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Определены методологические основы создания и совершенствования системы диагностирования парков ГПА, заключающиеся в использовании для построения реализуемых ею диагностических процедур следующих трех источников данных:

- статистический анализ результатов эксплуатации парков агрегатов;
- математическое моделирование процессов функционирования, а также нагружения и разрушения материалов конструктивных элементов агрегатов;
- экспериментальные исследования проходящих в ГПА теплогидродинамических процессов.

2. Обоснована целесообразность создания экспериментальных стендов, пригодных для изучения влияния типовых неисправностей элементов проточной части двигателей и нагнетателей ГПА на происходящий в них рабочий процесс и нагруженность отдельных деталей, а также для отладки процедур мониторинга развития указанных неисправностей в условиях эксплуатации парков агрегатов.

3. Создан оснащенный современными измерительно-информационными средствами стенд, пригодный для обоснования и отладки методического обеспечения процедур функционального диагностирования элементов проточной части газовых турбин и компрессоров.

4. Выполнены экспериментальные исследования влияния величин и окружной неравномерности радиальных зазоров газовой турбины на ее функциональную характеристику и структуру потока в проточной части; результаты исследований могут составить основу эффективных процедур функционального диагностирования проточной части газотурбинных двигателей.

5. Разработан алгоритм распознавания классов технического состояния (ТС) ГПА, основанный на обосновании наблюдаемых системой диагностирования отклонений критериев ТС от базовых значений.

6. Разработана и предложена к реализации функциональная схема системы управления техническим состоянием и использованием парка однотипных ГПА.

**Основные результаты диссертационной работы
отражены в следующих публикациях**

1. Карташов А.Л. Диагностирование радиальных зазоров в проточной части газовых турбин в процессе эксплуатации. Магистральные и промышленные трубопроводы. Проектирование, строительство, эксплуатация и ремонт./ А.Л. Карташов, В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев // Научно-технический сборник, №4, 2004.- С.21-24.
2. Карташов А.Л. Целесообразность непрерывного мониторинга для диагностирования радиальных зазоров в проточной части газовых турбин / А.Л. Карташов, В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев // Известия Академии Промышленной Экологии, №1, 2005.-С.15-19.
3. Карташов А.Л. Выбор параметров и способов диагностирования ГПА с целью совершенствования системы транспорта газа. / А.Л. Карташов, В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев // Тяжелое машиностроение, № 7, 2005.-С.16-20.
4. Карташов, А.Л. Совершенствование системы эксплуатационного сопровождения парка газоперекачивающих агрегатов / А.Л. Карташов, В.Т. Буглаев, П.В. Королёв, В.Т. Перевезенцев // Вестник Брянского государственного технического университета, №2(6), 2005.-С.47-50.
5. Карташов, А.Л. К выбору параметров диагностирования газоперекачивающих агрегатов/ А.Л. Карташов, В.Т. Буглаев, А.В. Осипов, В.Т. Перевезенцев // Инженерный журнал. Справочник.-2005.- № 9. С.26-30.