

На правах рукописи

КУДАШЕВ ЭДУАРД РАЯНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ
АГРЕГАТОВ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтегазовой отрасли)

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень, 2005г.

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Иванов Вадим Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Чекардовский Михаил Николаевич

кандидат технических наук
Смирнов Валерий Александрович

Ведущая организация: **ООО «Уралтрансгаз»**

Защита состоится 20 января 2006 года в 14⁰⁰ часов.
на заседании диссертационного совета Д 212.273.08
при Тюменском государственном нефтегазовом университете
по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Тюменского государственного нефтегазового университета

Автореферат разослан 20 декабря 2005г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Пономарева Т.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение надежной работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА) требует создания универсальных методов достоверной оценки функционирования оборудования, как в текущий момент, так и на некоторых прошлых и будущих промежутках времени. Поэтому разработка эффективных методов контроля технологических параметров агрегата в период функционирования, выявление дефектов и неисправностей на ранней стадии их возникновения является весьма актуальной проблемой. Успех диагностирования в значительной мере обусловлен правильностью выбора информативных компонент для построения принципиальных диагностических моделей объекта и моделей распознавания и идентификации сигналов измерительных систем. Однако еще не решен вопрос распознавания трудноразличимых неисправностей по количественной и качественной оценке параметров колебательных процессов. Не менее важной задачей, в комплексной системе диагностики технического состояния газоперекачивающих агрегатов, представляется поиск неисправностей и зарождающихся дефектов в проточной части центробежного нагнетателя. Решение этой проблемы позволит своевременно выявлять опасные режимы эксплуатации агрегата, в случае их возникновения, что даст возможность оперативно осуществлять регулировку агрегата и, тем самым, предотвратить непредвиденные отказы и аварийные ситуации.

Состояние изученности темы. Исследованию задач повышения надежности трубопроводных систем, а также энергетического оборудования посвящены работы многих авторов. Наибольший вклад внесли Д.Т. Аксенов, В.Л. Березин, Р.Н. Бикчентай, А.И. Гриценко, В.В. Болотин, С.П. Зарицкий, В.А. Иванов, И.А. Иванов, Острейковский, А.С. Лопатин, Б.П. Поршаков, О.А. Степанов, А.Б. Шабаров, Е.И. Яковлев и др.

Решению задач по разработке упрощенных методов контроля и испытаний применительно к отдельным типам ГПА посвящены исследования, проводившиеся в РГУНиГ им. И.М. Губкина, ВНИИГАЗ, ПО “Союзэнергогаз”, ВНИИЭГазпром, ТюменНИИГИПРОгаз, ТюмГНГУ.

Цель работы. Разработка метода оценки технического состояния ГПА, основанного на комплексных факторах и параметрах работы агрегата.

Задачи исследования работы:

- обоснование и разработка методики построения иерархической структуры системы оценок надежности, риска и безопасности функционирования ГПА;
- разработка методов исследования текущего технического состояния газоперекачивающего агрегата в период эксплуатации;
- исследование закономерностей идентификации спектров вибрации сложной технической системы на основе метода «слабых резонансов»;
- создание математической диагностической модели анализа технического состояния газовоздушных трактов нагнетателей ГПА по термогазодинамическим параметрам.

Методы исследования и достоверность результатов. Для достижения цели использованы теория распознавания образов и методы инженерных приближений. Проведенные исследования базируются на теории надежности сложных систем. Обоснование методов идентификации технического состояния газовоздушных трактов нагнетателя базируется на основных закономерностях термогазодинамики и теории измерений.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Выполнен системный анализ проведения операций технической диагностики и разработаны основные принципы выбора оптимальных ме-

тодов оценки текущего технического состояния ГПА в период эксплуатации.

2. Научно обоснованы принципы и предложены методы качественного анализа работоспособности ГПА, позволяющие воздействовать на характеристики последних, при отсутствии точных данных о количественных значениях параметров отдельных компонентов.
3. Научно обоснованы критерии выбора информативных параметров на основе которых формируется математическая диагностическая модель состояния газового тракта центробежного нагнетателя.
4. Создана унифицированная методика математического моделирования идентификации технического состояния газового тракта центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Исследованы методы определения работоспособности ГПА магистральных газопроводов в период эксплуатации, что позволяет оптимизировать процессы технического обслуживания и ремонта технологического оборудования при наличии неплановых отказов и проведение плановых ремонтов по данным диагностического обследования. Создана, наиболее полная из известных на сегодняшний день, методика идентификации повреждений механических модулей центробежного нагнетателя, предназначенная для ГПА с любой конфигурацией функциональных блоков.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором, используются в учебном процессе при изучении дисциплин: «Диагностика систем трубопроводного транспорта» для специальности 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов, баз и хранилищ».

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались на третьей региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по

направлению «Проектирование, сооружение и эксплуатация систем транспорта и хранения нефти и газа» (Тюмень, 2003, 2004 гг.), на расширенном совещании кафедры «Сооружение и ремонт нефтегазовых объектов» (Тюмень, 2004 г.) и техническом совещании в ООО «Сургутгапром» (2003г.). По результатам исследований опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 77 наименований. Диссертация изложена на 158 страницах машинописного текста.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и основные задачи исследований, дана краткая характеристика работы.

В первом разделе проведен анализ основных технических показателей ГПА, классифицированы основные отказы ГПА; проведен анализ риска; рассмотрены особенности ГПА как объекта диагностирования.

Все отказы ГПА разбиты на три группы: **первая группа** - конструкционные отказы, являющиеся следствием дефектов конструкции, погрешностей технологии производства и эксплуатационно-технической документации; **вторая группа** - производственные отказы, которые вызваны случайным разбросом или ограниченностью сроков службы комплектующих элементов, неблагоприятными сочетаниями разбросов параметров отдельных элементов в пределах установленных допусков, неблагоприятными сочетаниями режимов работы или условиями эксплуатации и т.д.; **третья группа** - эксплуатационные отказы, происходящие в результате износа подвижных сопряжений и рабочих органов или вследствие длительного воздействия пульсирующих и знакопеременных нагрузок.

На первом этапе изучения последствий возникновения опасных ситуаций составляется гистограмма частот распределения различного вида отказов, отнесенных к общей схеме взаимосвязи подсистем, узлов и эле-

ментов для конкретного исследуемого типа оборудования. Следующим шагом является изучение статистики видов отказов по каждой подсистеме или элементу, входящих в изучаемую техническую систему. Далее, для большей детализации и выявления истинных причин происшествий и отказов необходимо по каждому выявленному блоку произвести анализ причинно-следственных связей (задачи «генеза»), вызвавших ту или иную опасную ситуацию. Результаты этого анализа и есть принципиальная основа формирования последовательности процедур технической диагностики.

Задача описания объекта диагностики зависит, в первую очередь, от объема располагаемой информации и состоит в получении достоверных экспериментальных данных, необходимых для определения состояния ГПА в каждый конкретный момент его эксплуатации. В практике диагностики при наличии значительного количества признаков, можно принять условие их независимости друг от друга, даже в случае сильных корреляционных связей между ними - принцип суперпозиции.

Второй раздел посвящен анализу методов диагностики газоперекачивающих агрегатов.

Проанализированы и классифицированы существующие методы диагностики в зависимости от точности идентификации, характера дефектов и неисправностей.

Рассмотрены следующие виды диагностирования газоперекачивающих агрегатов:

- 1) динамические методы - контроль вибраций, шумов, ПДК вредных выбросов, путевой контроль текущих параметров (параметрическая диагностика);
- 2) дефектоскопия - совокупность методов неразрушающего контроля, предназначенных для обнаружения и предупреждения появления дефектов или определенного типа разрушений таких как: на-

- рушение сплошности и однородности материала и изделия, испытания на герметичность, контроль за скоростью коррозии, эмиссией волны от нагрузки и т.д;
- 3) контроль загрязнений - метод определения присутствия продуктов износа в смазке, который соотносится качественно и количественно со степенью изнашивания того или иного элемента в парах трения;
 - 4) анализ тенденций - это прогнозирование развития обнаруженного дефекта (или неисправности) во времени с целью предупреждения возникновения критических ситуаций;
 - 5) анализ предпосылок - задачи «генеза», предупреждение появления возможных нежелательных событий в соответствии с разработанным деревом отказов, на основании «прецедентов», изучения технической и ремонтной документации, опыта эксплуатации.

Первые три метода можно отнести к активному (оперативному) контролю, остальные - к пассивному. Наилучшим образом задачи диагностики решаются при комплексном использовании различных методов.

В третьем разделе предложены методы оценки технического состояния центробежного нагнетателя по параметрам вибросостояния.

В работе, в качестве решения идентификации дефектов, предложен метод малого параметра. Этот метод основан на предположении, что случайный процесс $x(t)$, характеризующий движение анализируемой системы, мало отличается от некоторого процесса $x_0(t)$, статистические характеристики которого могут быть легко рассчитаны методами теории линейных систем. Тогда процесс, выраженный функцией $x(t)$, можно представить в виде ряда:

$$x(t) = x_0(t) + x_1(t)\varepsilon + \varepsilon^2 x_2(t) + \dots, \quad (1)$$

где ε - некоторый малый параметр.

Выбор нулевого приближения $x_0(t)$ может быть различным в зависимости от рассматриваемой конкретной задачи. Применение метода возмущений к нелинейным задачам связано во многих случаях с непосредственной линеаризацией нелинейности в окрестности нулевого приближения $x_0(t)$, т.е. с переходом к решению последовательности линейных задач с постоянными параметрами. Эти задачи могут быть исследованы при помощи обычных методов линейной статистической динамики. Вместе с тем, область применимости метода возмущений обычно оказывается весьма ограниченной из-за жестких требований малости параметра ε .

Для решения задач отыскания и идентификации неисправностей посредством спектрального анализа, основанного на том, что в ГПА существует основная деталь (ротор), оказывающая существенное воздействие на все остальные элементы изделия. Обратное воздействие элементов на роторную группу, характеризуемое некоторым параметром ε . То есть, в спектре колебаний ротора обязательно появляются частоты колебаний остальных частей, так называемых «субдеталей» (например, лопаток ротора). Это значит, что ротор может воздействовать на субдетали с вынуждающей силой, в спектре которой будут присутствовать частоты, совпадающие с их собственными частотами колебаний. Это может приводить к резонансным всплескам при колебаниях субдеталей. В частотном спектре такие всплески трудно идентифицировать с неисправностями («слабый резонанс»).

Идея предлагаемой методики состоит в том, что рассматривается система дифференциальных уравнений, обладающая похожим свойством, содержащая малый параметр ε , и резонанс у ее решения проявляется в членах асимптотического разложения по ε , при степенях больших нулевой. То есть не ставится задача полного моделирования реальной системы, а осуществляется имитация явления слабого резонанса.

Кроме ε , рассматриваемая система содержит еще два параметра A_j - это имитация количественного воздействия ротора на субдетали и a_j –

параметр обратной связи. Эти параметры определяются из получаемой системы линейных алгебраических уравнений, куда входят Фурье - гармоника колебательного спектра ротора и субдеталей. Используя в качестве этих гармоник данные реальных измерений, можно вычислить A_j и a_j . По изменению этих параметров предполагается судить о возникновении и характере неисправности j -ой субдетали.

Рассматривается математическая модель колебательной системы с $(n+1)$ степенями свободы. Координаты системы описываются основной компонентой q_0 , имитирующей смещения ротора, и q_i , ($i=1, \dots, n$) - смещения при колебаниях субдеталей. Связь между компонентами односторонне слабая, чем и объясняется введение малого параметра ε , его порядок указывает на количественный фактор - во сколько раз обратная связь слабее прямой.

В период зарождения повреждений, это влияние проявляется незначительно, а по мере развития и накопления дефектов и неисправностей оно усиливается настолько, что может существенно интенсифицировать модуляции амплитуд на основных, функциональных и сигнальных частотах. Ниже представлена линейная система уравнений с двумя внутренними параметрами A_j и a_j , значения которых заранее неизвестны.

$$\ddot{q}_0 + 2\delta_0\dot{q}_0 + \omega_0^2 q_0 = A \sin(\omega t + \varphi) + \varepsilon \sum_{j=1}^n a_j (\ddot{q}_j + \omega_j^2 q_j) \quad (2)$$

$$\ddot{q}_j + 2\delta_j\dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = A_j (\ddot{q}_0 + 2\delta_0\dot{q}_0 + \omega_0^2 q_0); j = 1, \dots, n \quad (3)$$

где δ_0 , ω_0 - декремент затухания и частота собственных колебаний ротора; A , ω , φ - амплитуда, частота и фаза вынуждающей силы; δ_j , ω_j - декремент затухания и частота собственных колебаний j -ой субдетали; a_j , A_j - параметры внутренних связей; \ddot{q}_0 , \dot{q}_0 - соответственно, вторая и первая производные по времени от смещения ротора; \ddot{q}_j , \dot{q}_j - вторая и первая производ-

ные по времени от смещения субдеталей; $\varepsilon = m/M$ - порядок параметров обратной связи.

Для отыскания решения используем разложение исходной зависимости в асимптотический ряд по малому параметру ε .

В пределе получаем систему уравнений для определения параметров A_j, a_j

$$\begin{cases} Q_j^c = \frac{\omega_0^2 - \omega_j^2}{a_j(\omega_0^2 - \omega_j^2)\varepsilon} \left(Q_{0j}^c + \frac{\varepsilon}{2\omega_j} Q_{0j}^s \right) - \frac{A_j Q_{0j}^c (\omega_0^2 - \omega_j^2)}{4\omega_j^2}, \\ Q_j^s = \frac{\omega_0^2 - \omega_j^2}{a_j(\omega_0^2 - \omega_j^2)\varepsilon} \left(Q_{0j}^s + \frac{\varepsilon}{2\omega_j} Q_{0j}^c \right) + \frac{A_j Q_{0j}^s (\omega_0^2 - \omega_j^2)}{4\omega_j^2}, \end{cases} \quad (4)$$

Это значит, что в составе спектра колебаний отдельной субдетали могут появиться субкомпоненты остальных частей.

В ряде случаев адекватная связь между параметрами спектра и неисправностями в изделии может оказаться весьма сложной для теоретического анализа. Поэтому вполне обосновано использование экспериментальных методов распознавания, базирующихся на наборе статистических данных, отражающих связь между дефектами, обнаруженными при разборке изделия и особенностями спектров, полученных до разборки или в результате испытаний с искусственно созданными неисправностями, связь которых с параметрами спектра изучается.

Построение алгоритма диагностирования базируется на многошаговых процедурах, на каждом шаге которых выполняется одна или несколько элементарных проверок, являющихся частичным решением поставленной задачи. Объединение этих фрагментов в одну систему контроля дает представление о техническом состоянии агрегата в целом.

Поэтому как при ручной обработке информации, так и в процессе разработки систем мониторинга используют некоторый набор программ диагностики каждого конкретного узла (или элемента), по которым, на ос-

новании результатов обследования, и выдается заключение о возможности дальнейшей эксплуатации ГПА.

Для эффективного проведения процедур диагностики, необходимо сложный объект диагностирования расчленить на такие составные части, с точностью до которых (на втором и третьем уровнях) целесообразно проводить поиск дефектов и неисправностей. В свою очередь, каждый выделенный узел (агрегат) следует рассматривать как информационный блок, в состав которого входят элементарные объекты. Исправное состояние определяет работоспособность технической системы в целом (третий уровень диагностики). Примерное дерево решений для анализа технического состояния компрессорных агрегатов с центробежными нагнетателями и различными видами приводов по параметрам вибрации представлено на рисунке 1.

Разбивка (классификация) агрегата на составные части позволяет идентифицировать колебания, по принадлежности к отдельным узлам. Удобство подобной классификации заключается в непосредственной связи вибрации с ее источником и возможностью прогнозирования в общих чертах структуры и характера вибрации. Такой системный подход позволит в реальных условиях, при наличии неизбежных ограничений, отклонений от заданного технологического режима, всевозможных помех и погрешностей измерительной аппаратуры, добиться наибольшей эффективности анализа технического состояния ГПА.

Поэтому вполне обосновано использование как математических, так и экспериментальных методов распознавания, базирующихся на наборе статистических данных, отражающих связь между дефектами, обнаруженными при разборке изделия и особенностями спектров, полученных до разборки или в результате испытаний с искусственно созданными неисправностями, связь которых с параметрами спектра изучается.

Рис. 1. Дерево решений для построения алгоритма диагностирования ГПА

Однако, данные, полученные на основании анализа спектров вибрации, не дают возможности составить полную картину состояния проточной части центробежного нагнетателя ГПА. Вследствие этого, возникает целесообразность рассмотрения технического состояния проточной части нагнетателя с точки зрения получения сведений о характере течения газового потока, то есть методами параметрической диагностики. Оценка состояния газодинамического тракта учитывает влияние динамических и термических воздействий потока газа на выходные параметры газокompresсорной установки, что дает возможность своевременного решения задач оптимального управления технологическими процессами газоперекачивающего агрегата.

Четвертый раздел посвящен разработке методики оценки технического состояния центробежного нагнетателя, а также осевого компрессора энергоустановки, по термогазодинамическим параметрам.

Сущность определения технического состояния нагнетателя, сводится к измерению контролируемых параметров, определению коэффициентов потерь и соотнесения полученных результатов с эталонными значениями. Количественный и качественный анализ рассматриваемых неисправных состояний зависит от требуемой глубины диагностирования.

Для определения неисправности центробежного нагнетателя (осевого компрессора) детально по узлам или элементам, диагностируемом объекте выполняются измерения ряда установленных диагностической моделью функциональных параметров. Эти же параметры рассчитываются по эталонной модели. Расхождение измеренных и эталонных параметров, определенных допуском пределов измерения, дает математическую модель текущего состояния газоздушного тракта нагнетателя. Результаты моделирования иллюстрируют степень критичности изменения технического состояния объекта диагностирования.

Предлагаемая методика может быть применена для газоперекачивающих агрегатов любой конфигурации оборудования с центробежными нагнетателями, без ограничения по срокам эксплуатации и вне зависимости от предыдущей наработки. Кроме того, ее можно использовать с некоторыми ограничениями для диагностики осевых компрессоров газотурбинных приводов. Это особенно важно для текущего анализа технического состояния конвертированных авиационных двигателей, используемых в качестве привода к центробежным нагнетателям. Она содержит необходимый минимум работ, исследований и испытаний, расчетов, позволяющих оценить работоспособность и определить безопасные сроки эксплуатации системы с учетом фактического технического состояния локальных потенциально опасных элементов.

Для упрощения задачи представим центробежный нагнетатель, как техническую систему, состоящую из набора однотипных, многократно повторяющихся элементов.

То есть, предположительно, имеется набор конструктивно адекватных, последовательно расположенных блоков, выполняющих одну задачу, но с различными входными и выходными термогазодинамическими характеристиками. Согласно этой схеме, методы расчета, выполненные для одной секции с предварительным охлаждением газа, справедливы и для последующих.

Для общей конструктивной принципиальной схемы центробежного нагнетателя считаем, что течение газовой смеси в газовоздушном тракте можно характеризовать как адиабатический неизэнтропический поток с подводом массы. В этом случае, решение соответствующих диагностических уравнений анализа технического состояния может быть получено в элементарных функциях, причем решение возможно представить в безразмерных величинах, что позволяет составить программное обеспечение для расчетов на ЭВМ.

Алгоритм диагностирования технического состояния нагнетателя состоит из трех основных компонент: алгоритма расчета диагностических параметров (АРДП); идентификации технического состояния; оценки погрешностей определения диагностических параметров.

Кроме того, в структуру алгоритма входят: нормативно- справочная информация, параметры перекачиваемого газа и параметры, зависящие от конструкции агрегата и база данных. Принципиальная блок-схема алгоритма диагностирования нагнетателя по термогазодинамическим параметрам с использованием математической модели проиллюстрирована на рисунке 2.



Рис. 2. Принципиальная блок-схема алгоритма диагностирования нагнетателя

АРДП – алгоритм расчета диагностических параметров; ОПИ – алгоритм оценки погрешностей определения диагностических параметров

На основании изучения научно-технического опыта в области диагностики нагнетателей природного и попутного газа, результатов экспериментальных работ в качестве расчетных диагностических параметров, характеризующих техническое состояние газовоздушного тракта, для математической модели, согласно методам определения значимости, были выбраны следующие основные формальные критерии (по секциям).

Политропический КПД. Исходя из условий, что реальное сжатие газа в проточной части компрессора осуществляется при наличии потерь, с достаточной степенью точности можно допустить, что сжатие происходит по политропе (теплоемкость газа не зависит от температуры).

Коэффициент мощности. Коэффициент мощности χ характеризует потери энергии в газовоздушном тракте нагнетателя, учитывает сопротивление элементов проточной части движению газового потока.

В качестве третьей характеристики принимаем **коэффициент напора** $\varphi < 1$ (безразмерная величина, которая зависит от коэффициента потери скорости, характеризующая уменьшение истинной скорости течения газовой смеси по сравнению с эталонной, зависящая от величины потерь энергии и КПД (φ не зависит от числа лопаток рабочего колеса)).

Приведенная степень сжатия $\varepsilon_{пр}$. В качестве дополнительной диагностической характеристики в алгоритм диагностирования включена степень сжатия на расчетных режимах работы ГПА приведенная к эталонным рабочим условиям.

Коэффициент недоохлаждения ψ характеризует недостаточность системы промежуточного (межступенчатого) охлаждения газа.

Построение алгоритма диагностирования начинается с создания блока нормативно-справочной информации (НСИ) обо всех физических характеристиках отдельных компонентов газовой среды, поступающей на приемные модули центробежного нагнетателя, конструктивных особенностях каждой машины и расчетных параметрах технологических режимов.

На этом этапе наиболее важно правильно определить качественный и количественный компонентный состав перекачиваемого газа $\sum Q_i, (i = 1, 2, \dots, f)$.

Принцип функционирования моделирующего алгоритма (АРДП) состоит из ряда последовательно реализуемых блоков:

- блок 1 предназначен для ввода исходных данных;
- блок 2 предназначен для расчета безразмерных коэффициентов, которые являются базой сравнения показателей эталонного и реального термогазодинамического процесса в проточной части нагнетателя;
- блок 3 предназначается для определения весового секундного расхода газа через нагнетатель;
- блок 4 выполняет операции по вычислению приведенной удельной производительности и мощности проточной части агрегата;
- блок 5 используется для приближенного вычисления потерь в системе промежуточного охлаждения газа.

Алгоритм расчета диагностических параметров формируется по обычному принципу: исходные данные объединяются в блок по функциональному признаку, выходные величины вводятся как исходные в следующий блок.

Алгоритм блока 5 реализуется идентично как для первой ступени охлаждения, так и для каждой последующей.

Принцип сравнения основан на том, что диагностическую информацию об изменении технического состояния проточной части центробежного нагнетателя содержат не абсолютные величины диагностических параметров, а их относительные отклонения S_{\ominus} , определяемые в процессе диагностирования.

Для определения изменения технического состояния проточной части за период диагностирования необходимо определить разность отклонений, которую обозначим через S_{Θ_i} :

$$S_{\Theta_i} = \delta\bar{\Theta}_i - \delta\bar{\Theta}_{ucx}; \quad (5)$$

Исходное отклонение $\delta\bar{\Theta}_{ucx}$ и подсчитанные в k -й момент времени значения $S_{\Theta_i} \in [S_{\eta_i}, S_{\lambda_i}, S_{\varphi_i}, S_{\psi_i}, S_{n_i}, S_{\rho_m \cdot \delta P_i}]$ заносятся в базу данных для изучения нагнетателя. Причем, все текущие значения помещаются в соответствующий массив $MS_{\eta_i}, MS_{\lambda_i}, MS_{\varphi_i}, MS_{\psi_i}, MS_{n_i}, MS_{\rho_m \cdot \delta P_i}$, состоящий из 30 измеренных за установленный период времени значений.

Полученные данные сравниваются с эталонными термогазодинамическими характеристиками нагнетателя. Эталонные термогазодинамические характеристики односекционного (или отдельной секции) компрессора и промежуточного газоохладителя (ПГО) представляют собой графические и таблично выраженные зависимости диагностических параметров от приведенной объемной производительности (для компрессора) и от весового расхода (для ПГО): $(\eta_s, \chi_s, \varphi_s) = f(Q_{np})$, $(\psi_s, \rho_m \delta P_s) = f(G)$.

Эталонные характеристики строятся по результатам термогазодинамических испытаний, проводимых на одной из машин каждого типа, находящейся в нормальном техническом состоянии, то есть после чистки и ремонта проточной части с восстановлением всех конструктивных размеров и зазоров до паспортных значений.

Параметры, задаваемые для идентификации: $S_{\eta}, S_{\lambda}, S_{\varphi}, S_{\psi}, S_n, S_{\rho_m \delta P_i}$ - отклонения диагностических параметров от эталонных значений, полученных по 30 последовательным измерениям; $\Pi_{\eta_i}, \Pi_{\lambda_i}, \Pi_{\varphi_i}, \Pi_{n_i}, \Pi_{\rho_m \delta P_i}$ - вычисленные погрешности измерения диагностических параметров, когда помехи или погрешности системы измерений сравнимы с колебаниями определяемой функции.

Считаем, что для решения задачи идентификации технического состояния проточной части компрессорного агрегата, любая характеристика $\varphi_i(x)$ объекта, заданная детерминированной математической моделью, полностью определяется вектором управляемых переменных \bar{x} . Модели являются детерминированными в том смысле, что характеристики функционирования технической системы $(\eta, \chi, \varphi, \psi, \rho_m \delta P)$ однозначно определяются измеряемыми параметрами.

Несмотря на различный физический смысл диагностических параметров и характеристик, ограничения на них можно записать в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, & j=1,2,\dots,n; \\ \varphi_i^- \leq \varphi_i \leq \varphi_i^+, & i=1,2,\dots,m; \end{cases} \quad (6)$$

где x_j^+ и x_j^- - значения j -ой управляемой переменной, характеризующей область ее возможных изменений, исходя из условий эксплуатации объекта; φ_i^+ и φ_i^- - предельные значения требований, налагаемых на i -ую характеристику.

Следующим этапом стоит вопрос о построении пространственного множества $\hat{M}_j \cap (MS_{\eta_i}, MS_{\chi_i}, MS_{\varphi_i}, MS_{\psi_i}, MS_{n_i}, MS_{\rho_m \delta P_i})$. Относительно множества \hat{M}_j предположим, что оно односвязано и замкнуто, в этом случае данная задача является структурой плоского программирования (наличие локальных экстремумов). Эта задача не имеет строгого математического решения, поэтому можно использовать эвристический алгоритм, основной принцип которого состоит в многократном применении некоторой модификации метода «отсекающих плоскостей». То есть будем считать, что некоторая область, принадлежащая плоскости множеств \hat{M}_j – является объединением конечного числа пространственных множеств M_j , причем

$$M = \bigcup_{j=1}^{\tau} M_j, \quad \text{где } j = 1, 2, \dots, \tau; \quad (7)$$

Области M_j могут быть заданы системой линейных неравенств:

$$M_j = \left\{ \begin{array}{l} \varphi(x_{S_i}) \leq B_{S_i} \\ \varphi(x_{S_i}) \geq B_{S_i} \end{array} \right\} \quad (8)$$

где B_{S_i} - представляют собой расчетные погрешности измерений соответствующего отклонения определяемой характеристики от эталонного значения. Так как Π_i (погрешности измерительной системы) рассчитываются не при каждом измерении, а с интервалами, равными интервалам поверки элементов измерительных систем, то за соответствующую нулевую отметку принимается вычисленная погрешность измерения каждого параметра или диагностического критерия. Для решения задачи методом «отсекающих плоскостей» в алгоритм решения вводится некоторый многогранник D_0 , содержащий допустимую область изменения переменных исходной задачи, то есть $\hat{M}_j \subset M_0$. Значения функций $S_{(\eta, \chi, \varphi, \psi, \rho_m \delta P)} \leq$ или $\geq \Pi_{(\eta, \chi, \varphi, \psi, \rho_m \delta P)}$ в каждой i -ой точке множеств M_j обозначим как: $x = S_\eta + \Pi_\eta$; $y = S_\chi - \Pi_\chi$; $z = S_\varphi + \Pi_\varphi$; $f = S_\psi - \Pi_\psi$; $\pi = S_{\rho_m \delta P} - \Pi_{\rho_m \delta P}$; $\xi = S_\eta - \Pi_\eta$; $\zeta = S_\varphi + \Pi_\varphi$. Тогда каждая функция, принадлежащая тестовому классу многомерных унимодальных функций, являясь реализацией случайного процесса, в соответствии с алгоритмом решения может быть отображена в графическом виде (рис.3...7) в соответствии с системами неравенств, то есть, на графиках отображен координатный угол, соответствующий условиям некоторой системы неравенств.

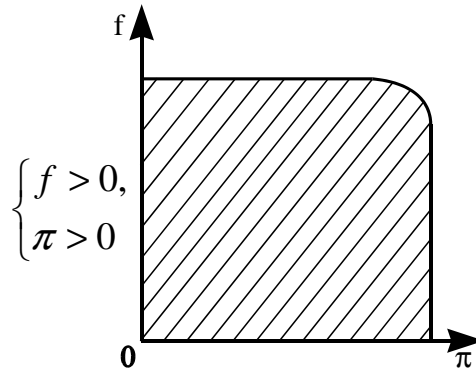


Рис. 3. Ухудшение процесса теплообмена промежуточного газового охладителя (ПГО), повреждения каналов газового тракта ПГО

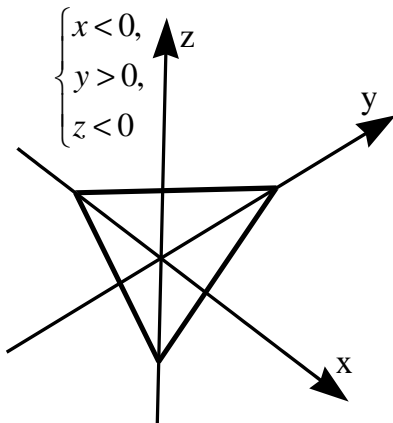


Рис. 4. Совокупность неисправностей j-ой секции проточной части центробежного нагнетателя

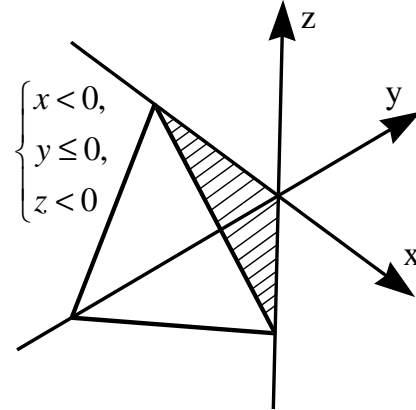


Рис. 5. Эрозия газового тракта центробежного нагнетателя

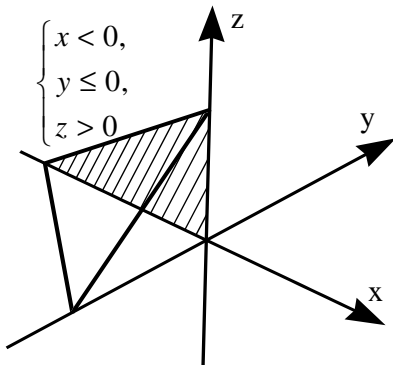


Рис. 6. Повреждение лопаток (эрозия, частичное разрушение)

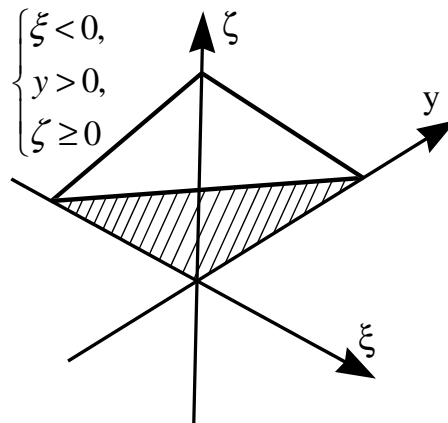


Рис. 7. Утечка газа через лабиринтные уплотнения

На основании априорной информации, исследования литературных источников и опыта эксплуатации найдены и проверены в натуральных испытаниях основные соотношения, характеризующие неисправности проточной части центробежного нагнетателя и общее ухудшение процесса течения газа.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании обобщения известных данных о методах определения работоспособности сложных технических систем и результатов теоретических и экспериментальных исследований, опыта эксплуатации газоперекачивающих агрегатов предложена методика системного анализа надежности, риска и безопасности функционирования основного оборудования компрессорных станций, которая может быть использована для оптимизации проведения технического обслуживания и ремонта.

2. Теоретически обосновано не исследовавшееся ранее явление «слабого резонанса» в колебательных процессах реальных технических систем, что позволило создать метод идентификации повреждений элементов объекта на основании анализа модуляций амплитуд низко-, средне- и высокочастотных спектров вибраций на информативных частотах.

3. На основании проведенных исследований, анализа диагностической информации, а так же обобщения опыта эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с центробежными нагнетателями разработаны научно обоснованные решения идентификации технического состояния газового тракта центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам и создана унифицированная методика, обеспечивающая не только качественный анализ характера течения газового потока, но и возможность прогнозирования развития отклонений технологических режимов от эталонных.

4. Разработаны основы формирования базы данных для алгоритма диагностирования технического состояния центробежного нагнетателя. Рассмотрены методы определения технического состояния центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам с использованием приемов математического моделирования, на основании которых автором разработана математическая модель диагностики ГПА, позволяющая идентифицировать вычисленные отклонения функциональных измеряемых

параметров от эталонных с основными видами неисправностей и изменений режимов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Новицкий Д.В. К вопросу исследования надежности нефтегазовых объектов / Д.В. Новицкий, А.Р. Кудашев // Сб. науч. тр. «Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов Западной Сибири. Выпуск 5». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – С. 106-111.

2. Кудашев Э.Р. Анализ основных принципов описание технического состояния газоперекачивающих агрегатов / Э.Р. Кудашев, А.С. Семенов // Сб. науч. тр. «Мегапаскаль. Выпуск 1». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – С. 45-47.

3. Кудашев Э.Р. Идентификация неисправностей газоперекачивающего агрегата методом «слабых резонансов» / Э.Р. Кудашев, В.А. Иванов, А.С. Семенов // Сб. науч. тр. «Мегапаскаль. Выпуск 1». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – С. 57-61.

4. Кудашев Э.Р. Особенности диагностирования газоперекачивающего агрегата / Э.Р. Кудашев, А.Р. Гимадутдинов // Сб. науч. тр. «Мегапаскаль. Выпуск 1». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – С. 61-63.

Подписано к печати ____ .12.2005 г.

Бум. писч. № 1

Заказ № _____

Уч. – изд. л. 1,00

Формат 60 × 84 ¹/16

Усл. печ. л. 1,00

Отпечатано на RISO GR 3750

Тираж 100 экз.

Издательство «Нефтегазовый университет»

Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52