

КОСТАРЕВА СВЕЛАНА НИКОЛАЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ  
АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО  
МОНИТОРИНГА**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа - 2004

Работа выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Байков Игорь Равильевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Коршак Алексей Анатольевич;

кандидат технических наук  
Файзуллин Саяфетдин Минигуллович.

Ведущая организация Центр энергосберегающих технологий  
Республики Татарстан при Кабинете  
Министров Республики Татарстан.

Защита диссертации состоится « 22 » октября 2004 года в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » сентября 2004 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Матвеев Ю.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы работы

ОАО «Газпром» - крупнейшая в мире газодобывающая, газотранспортная и газоперерабатывающая компания. Одним из главных условий устойчивого развития газовой отрасли является обеспечение надёжности и эффективности эксплуатации газотранспортных предприятий.

Проблемы повышения надёжности и эффективности эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА) тесно связаны с задачей снижения производственных затрат на проведение ремонтно-восстановительных мероприятий. Значительное повышение стоимости ремонтно-восстановительных работ и запасных частей диктует необходимость внедрения новых современных технологий технического обслуживания оборудования компрессорных станций (КС).

В этих условиях резко возрастает необходимость в научных разработках, направленных на решение неотложных задач, связанных с совершенствованием методов и средств диагностирования технического состояния газоперекачивающего оборудования. Современные системы диагностирования достаточно совершенны с технической точки зрения. Однако интерпретация результатов диагностирования по-прежнему остается серьезной проблемой.

Важная роль в решении задач по повышению эффективности и надёжности газотранспортных предприятий отводится оперативному, достоверному мониторингу эксплуатационных параметров газоперекачивающих агрегатов. При этом на этапе становления и развития систем производственного мониторинга (вибрационного, экологического, теплотехнического и т.д.) действующие информационно-измерительные системы должны дополняться расчетными методами мониторинга параметров эксплуатации ГПА.

Разработка методов решения перечисленных задач должна строиться с учетом возросшего уровня компьютеризированной обработки, хранения и передачи диагностической информации на предприятиях газовой отрасли.

## **Цель работы**

Разработка методов диагностирования технического состояния газоперекачивающих агрегатов, позволяющих повысить надежность и эффективность их эксплуатации.

## **Задачи исследований**

- 1 Повышение достоверности диагностирования подшипниковых узлов газоперекачивающих агрегатов на основе анализа данных вибромониторинга.
- 2 Прогнозирование уровня вибрации газоперекачивающих агрегатов в межремонтный период на основе статистических методов.
- 3 Разработка способов количественной оценки состава выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов.
- 4 Разработка методов диагностирования технического состояния газоперекачивающих агрегатов по содержанию оксидов азота и углерода в выхлопных газах.
- 5 Изучение влияния технологических параметров газоперекачивающих агрегатов на концентрации оксидов азота и углерода в выхлопных газах.
- 6 Разработка расчетных методов мониторинга выбросов оксидов азота и углерода газоперекачивающими агрегатами.

## **Методы решения задач**

При решении поставленных задач и обработке экспериментальных данных использовались вероятностно-статистические методы, метод асимптотических координат, элементы теории динамических систем.

## **Научная новизна**

- 1 Предложены дополнительные диагностические признаки для оценки технического состояния ГПА на основе анализа данных виброобследования газоперекачивающего оборудования.
- 2 Предложен комплексный показатель  $K_p$ , позволяющий определять динамику изменения содержания оксидов азота и оксида углерода в выхлоп-

ных газах газоперекачивающего агрегата на переменных режимах его работы.

- 3 Разработан метод расчета коэффициента технического состояния по мощности для диагностирования газоперекачивающих агрегатов на основе количественной характеристики выбросов оксидов азота и углерода и температуры рабочего тела.
- 4 Получены математические модели для оценки концентраций оксидов азота и углерода по комплексу технологических параметров газоперекачивающих агрегатов.

**На защиту выносятся** методы и модели диагностирования технического состояния газоперекачивающего оборудования, основанные на результатах исследований и данных производственного мониторинга на компрессорных станциях.

#### **Практическая ценность работы**

Предложенные в диссертационной работе методы анализа данных систем вибромониторинга апробированы в Шаранском линейном производственном управлении магистральных газопроводов ООО «Баштрансгаз» и используются как дополнительные методы оценки технического состояния ГПА.

Разработанный метод расчета коэффициента технического состояния по мощности на основе количественной характеристики выбросов оксидов азота и углерода апробирован в Дюртюлинском ЛПУ МГ ООО «Баштрансгаз» и рекомендован для оперативной оценки технического состояния ГПА.

Полученные в диссертационной работе математические модели для оценки концентраций оксидов азота и углерода по комплексу технологических параметров газоперекачивающих агрегатов используются в учебном процессе УГНТУ при курсовом и дипломном проектировании.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертации доложены и обсуждены:

- на 51-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ в апреле 2000 г.;

- Межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли» в г. Уфе 14 декабря 2000 г.;
- Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов в г. Уфе в апреле 2002 г.;
- III Энергетическом форуме «Уралэнерго-2003» в г. Уфе 21-24 октября 2003 г.;
- VIII Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса» в г. Уфе 2-5 марта 2004 г.;
- Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные технологии» в г. Уфе 19 мая 2004 г.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 2 статьи и 10 тезисов докладов.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций; содержит 163 страницы машинописного текста, в том числе 14 таблиц, 47 рисунков, список использованной литературы из 153 наименований и 3 приложения.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи, научная новизна и практическая ценность результатов проведенных исследований.

**Первая глава** диссертации посвящена исследованию основных диагностических методов контроля технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

В первом разделе дается обзор современных методов моделирования технических систем газотранспортных предприятий. Показано, что для диагностирования газотранспортного оборудования широкое применение получили ана-

литические и статистические модели. Аналитические модели подробно рассмотрены в работах Дубинского В.Г., Микаэляна Э.А., Поршакова Б.П., Седых А.Д. и других авторов. Разработке статистических моделей в трубопроводном транспорте нефти и газа посвящены работы Мирзаджанзаде А.Х., Байкова И.Р., Шаммазова А.М., Галлямова А.К., Гольянова А.И., Гумерова А.Г., Зарицкого С.П., Смородова Е.А., Тухбатуллина Ф.Г. и других авторов.

В последнее время все более широкое применение в диагностике технического состояния сложных систем находят методы теории динамического хаоса, разрабатываемые Байковым И.Р. с сотрудниками. В качестве диагностических признаков предлагается использовать такие величины, как корреляционная размерность аттрактора, показатель Хаусдорфа, показатель Херста.

Широкое внедрение периодических и автоматических систем производственного мониторинга на предприятиях нефтегазовой отрасли позволит накопить обширный массив данных по измерениям текущих технологических параметров. Методы обработки временных рядов в настоящее время хорошо разработаны и широко применяются как для целей прогнозирования, так и в диагностике технического состояния оборудования. Одним из традиционно применяемых методов обработки временных рядов является спектральный анализ - основа вибродиагностических методов оценки технического состояния механизмов.

В последние несколько лет большой интерес проявляется к нейронным сетям. Они вошли в практику везде, где нужно решать задачи прогнозирования, классификации, анализа данных, поскольку нейронные сети применимы практически в любой ситуации, когда имеется связь между входными и прогнозируемыми переменными, даже если эта связь имеет очень сложную природу. Моделирование при помощи нейронных сетей может использоваться независимо или же служить дополнением к традиционным методам статистического анализа.

Во втором разделе рассмотрены основные методы диагностики технического состояния газоперекачивающего оборудования (трибодиагностика, виб-

родиагностика и параметрическая диагностика); показано, что они не обладают требуемой достоверностью. Современные вибродиагностические системы позволяют получить достоверность диагноза до 80%. Анализ результатов вибрационного диагностирования газоперекачивающих агрегатов показал, что во многих случаях развитие дефектов не распознается с помощью существующих методов обработки вибросигналов. Параметрическая диагностика, например, по мощности или расходу топливного газа также не всегда позволяет достоверно и оперативно оценить изменение технического состояния ГПА. Причина этого заключается, прежде всего, в сложности определения фактического расхода рабочего тела по тракту ГТУ или отсутствии штатных измерений необходимых для расчетов параметров.

Проведенный анализ методов диагностики позволил сделать вывод о необходимости разработки дополнительных диагностических признаков и методов обработки данных производственного мониторинга на КС, позволяющих повысить достоверность оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

Одним из направлений решения этой задачи, как показано в третьем разделе главы, является учет состава выхлопных газов в диагностировании ГПА. Проведен обзор работ Я.Б. Зельдовича, П.М. Канило, Р.С. Кашапова, А.М. Постникова, А.Д. Седых, А.В. Сударева, А.Г. Тумановского, Ф.Г. Тухбатуллина, В.А. Щуровского, В.А. Христич и других авторов, посвященных изучению выбросов оксидов азота и углерода. Показана необходимость изучения влияния технологических параметров и технического состояния газоперекачивающих агрегатов на концентрации CO и NO<sub>x</sub> и разработки методов диагностирования технического состояния ГПА на основе количественного состава выхлопных газов.

**Вторая глава** посвящена разработке дополнительных способов анализа данных систем вибромониторинга, способных повысить достоверность диагностирования технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

Как было отмечено выше, достоверность вибродиагностики зависит не только от совершенства техники измерения и регистрации сигналов, но и от математических методов, которые применяются при их анализе.

В первом разделе рассматривается возможность оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов на основе фрактальных характеристик виброспектров. Применительно к задаче оценки технического состояния подшипников газокompрессорной установки (ГКУ) на основе анализа данных вибромониторинга спектр представляется в виде последовательности значений амплитуд виброскорости в диапазоне частот 10-1200 Гц. Полученный ряд представляет собой фрактальное множество, для описания которого в теории динамических систем используется показатель Херста  $H$ , количественно характеризующий меру хаотичности значений амплитуд в частотном ряду спектра.

Исследование возможности диагностирования дефектов подшипников скольжения на основе изменения показателя Херста проводилось нами на базе газокompрессорной установки, состоящей из двух редукторов, компрессора низкого давления с частотой вращения ротора  $100 \text{ с}^{-1}$ , компрессора высокого давления с частотой вращения ротора  $178 \text{ с}^{-1}$  и электродвигателя мощностью 2,1 МВт. Экспериментальную базу составили более 300 спектров, зарегистрированных за три года эксплуатации ГКУ.

В качестве примера на рисунке 1 представлены тренды показателя Херста для вертикальных и горизонтальных колебаний в контрольной точке на подшипнике редуктора компрессора высокого давления, где 2.09.1998г. произошла авария из-за разрушения 80% поверхности антифрикционного вкладыша. Проведенное за день до аварии виброобследование установки показало, что традиционный параметр уровня вибрации – среднеквадратическое значение виброскорости находилось в допустимых пределах.

Анализ динамики изменения показателя Херста  $H$  (рисунок 1) показывает, что уже за 2 месяца до аварии наблюдается возрастание величины  $H$  вплоть до максимальных значений ( $H \sim 0,92$ ), а после замены подшипника и этапа его

приработки показатель Херста уменьшается до средних значений ( $H \sim 0,84 \div 0,86$ ), характерных для нормальной эксплуатации агрегата.

Увеличение показателя  $H$  при развитии дефекта подшипника можно объяснить увеличением амплитуд целой гаммы оборотных гармоник с номерами до 10, а также появлением большого количества дробных гармоник с кратностью  $\frac{1}{2}$  от оборотной частоты вращения вала. Это приводит к упорядочению значений амплитуд в частотном ряду, а значит, к увеличению детерминированности спектра виброскорости.

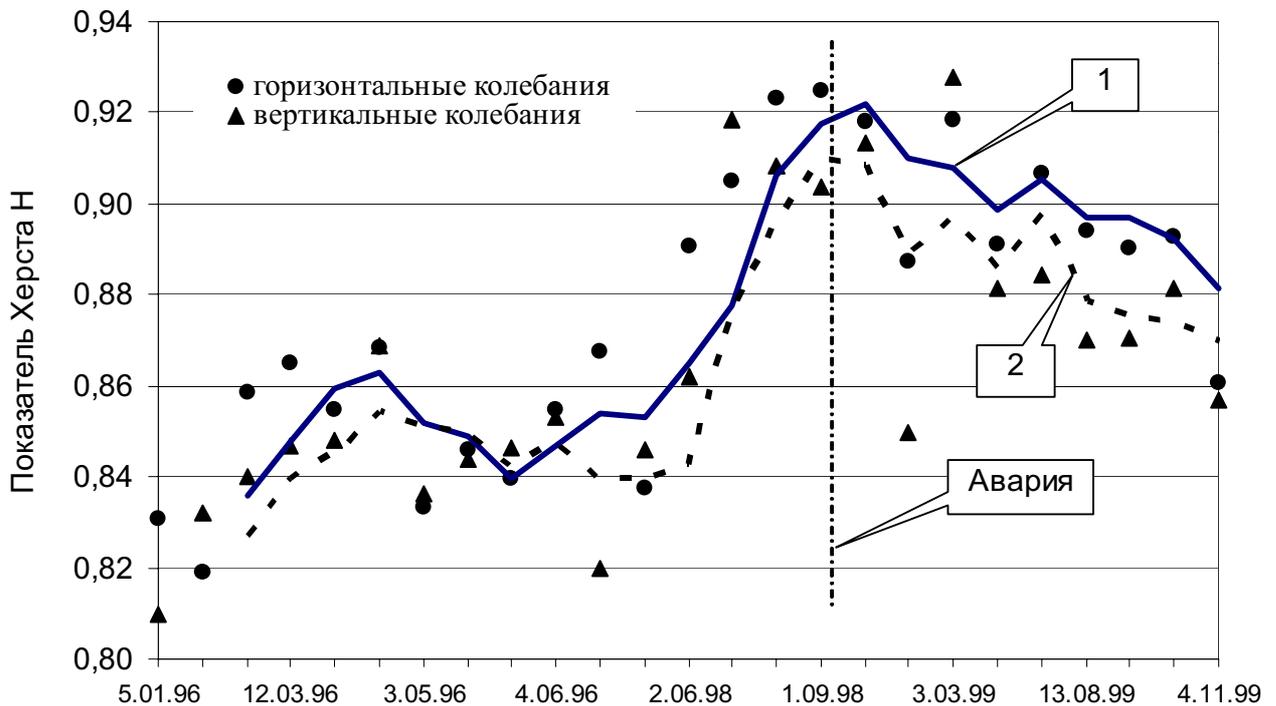


Рисунок 1- Динамика показателя Херста в контрольной точке для горизонтальных 1 и вертикальных 2 колебаний

В результате статистической обработки экспериментальных данных было установлено, что для бездефектного подшипника распределение показателя Херста подчиняется нормальному закону. Для аварийного подшипника экспериментальные данные противоречат гипотезе о нормальном распределении показателя  $H$ , т.е. изменение закона распределения показателя Херста может слу-

жить дополнительным критерием зарождения и развития дефекта, приводящего к наступлению отказа ГКУ.

Во втором разделе в качестве дополнительного информативного признака при анализе спектров вибрации в контрольной точке подшипников роторов ГПА предлагается использование коэффициента Джини  $K_d$ . При построении рисунка 2, поясняющего смысл коэффициента Джини, амплитуды виброскорости предварительно ранжировались по величине относительно вклада в суммарный уровень амплитуд в определенном диапазоне частот. Фактическое распределение амплитуд в частотном ряду спектра описывается кривой, подобной ADC (с той или иной степенью кривизны), которая носит название кривой Лоренца. Геометрически коэффициент Джини равен отношению площади ABCDA к площади треугольника ACE. Очевидно, что если бы все амплитуды виброскорости были идентичны по значению, то огибающая ADC выродилась бы в биссектрису соответствующего координатного угла, а коэффициент  $K_d$  был бы равен нулю.

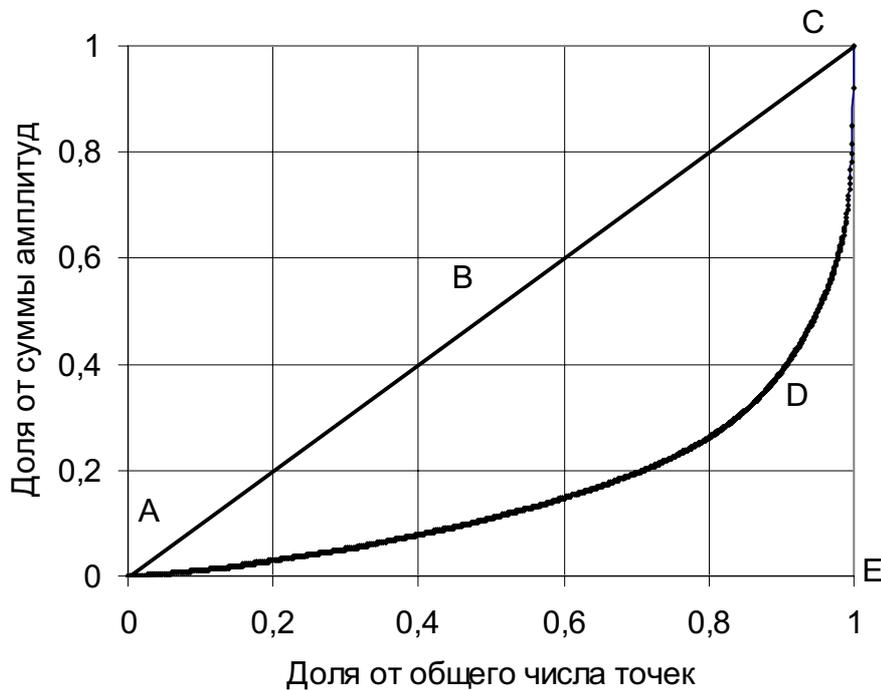


Рисунок 2 - Кривая Лоренца для спектра вибрации

Информативность коэффициента Джини рассматривается на примере обработки виброспектров колебаний в контрольной точке на корпусе подшипника качения газоперекачивающего агрегата ГПУ-10 «Волна». Традиционные методы обработки вибросигнала по среднеквадратическому значению виброскорости и по характерной частоте дефекта того или иного элемента подшипника не позволили идентифицировать разрушение задней опоры КВД. Однако, учитывая, что при углублении дефекта подшипника структура спектра становится более равномерной, мы предположили, что коэффициент Джини при этом будет уменьшаться.

На рисунке 3 представлена динамика коэффициента Джини, рассчитанного для спектров виброскорости в диапазоне подшипниковых частот, включающих частоту наружного кольца, частоту внутреннего кольца и частоту тел качения. Анализ результатов обработки виброспектров показал, что снижение коэффициента Джини до значений менее 0,5 свидетельствует об ухудшении состояния подшипника и требует принятия мер.

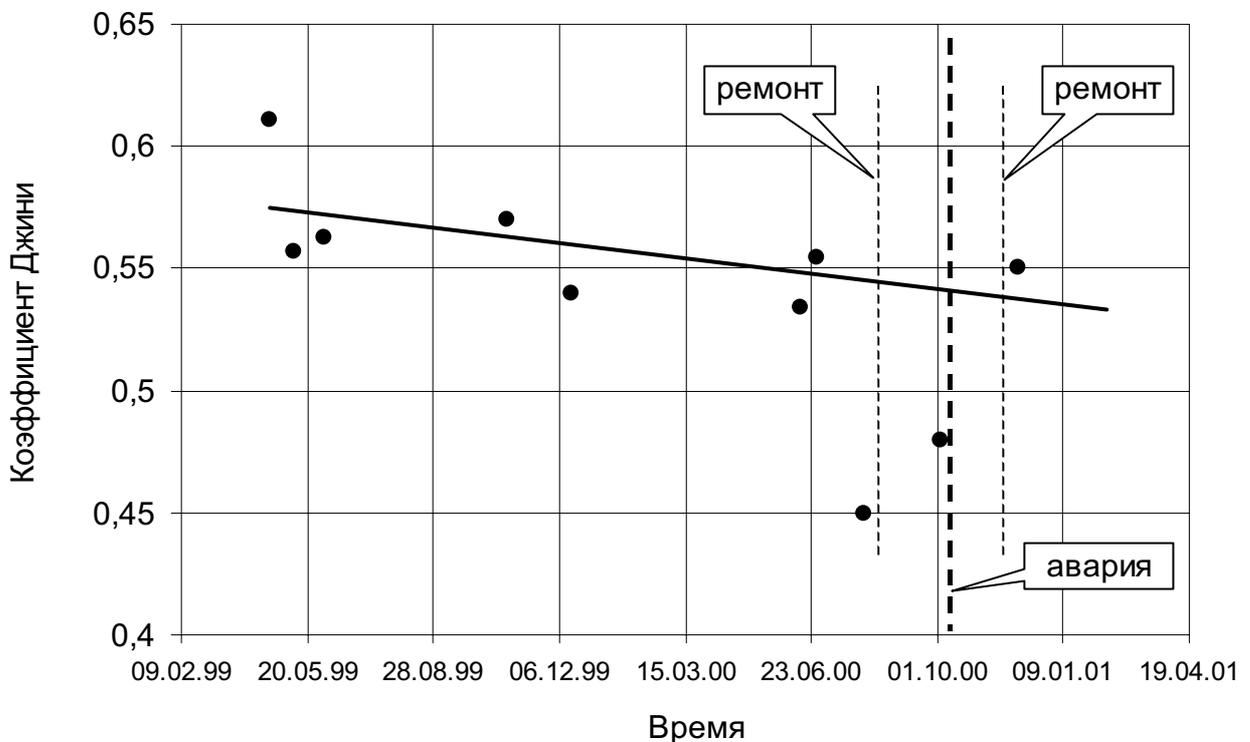


Рисунок 3 - Динамика коэффициента Джини

В третьем разделе главы показано, что количественно оценить изменение виброспектра во времени можно при помощи ранговых критериев. Для этого были определены коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла для установления степени соответствия полученных при виброобследовании спектров спектру виброскорости заведомо бездефектного подшипника.

В качестве примера характерного поведения предлагаемого диагностического параметра рассмотрена временная динамика порядковых статистик, определенных по виброспектрам колебаний корпуса подшипника задней опоры КВД ГПА ГПУ-10 «Волна» в горизонтальном направлении. Ретроспективный анализ особенностей эксплуатации данного агрегата показал, что среднеквадратическое значение виброскорости за несколько дней до аварии находилось в области допустимых значений. Изменение коэффициента Спирмена во времени с учетом имевших место ремонтов и аварии приведено на рисунке 4.

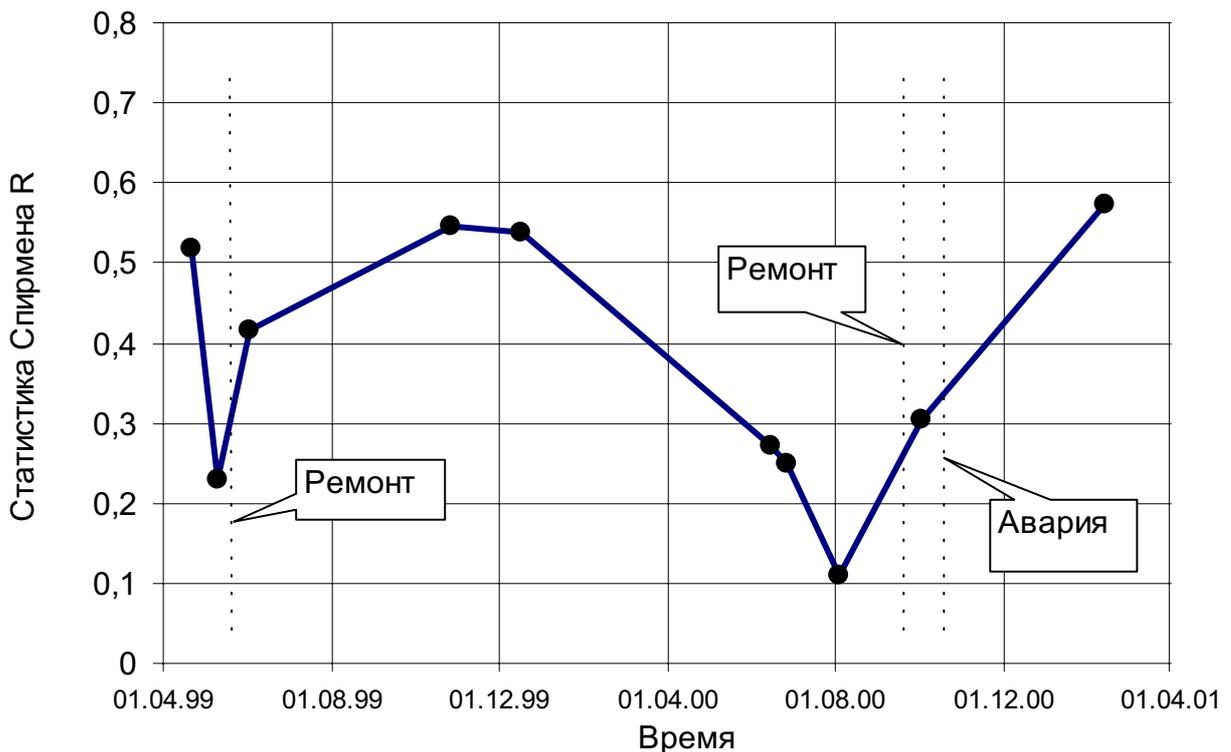


Рисунок 4 - Динамика коэффициента ранговой корреляции Спирмена

Как следует из рисунка, снижение ранговых статистик в  $2\div 5$  раз свидетельствует о наличии существенных различий в спектрах виброскорости и, следовательно, об ухудшении технического состояния подшипника.

В заключении второй главы сделан вывод о том, что показатель Херста, коэффициент Джини и ранговые статистики характеризуют структуру виброспектров и позволяют прогнозировать такие аварийные ситуации, которые не распознаются стандартными методами спектральной вибродиагностики, и могут быть рекомендованы в качестве дополнительных диагностических признаков при оценке технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

**Третья глава** посвящена исследованию и разработке методов диагностирования газоперекачивающих агрегатов на основе количественного состава выхлопных газов.

Задачи комплексного диагностического обслуживания оборудования компрессорных станций требуют развития, наряду с вибродиагностикой, методов оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов по технологическим параметрам их работы.

Известно, что «старение» газоперекачивающего агрегата всегда сопровождается необратимыми процессами ухудшения его технического состояния, интенсивность которых зависит от условий эксплуатации, режима работы, качества ремонта и влияния внешней среды. При этом изменяются не только теплотехнические характеристики ГПА, но и, как показали проведенные нами исследования, экологические параметры, характеризующие содержание оксидов азота и углерода в продуктах сгорания.

В первом разделе третьей главы приводится количественная характеристика выхлопных газов ГПА.

В результате анализа данных мониторинга вредных выбросов на КС было установлено, что фактические концентрации оксидов азота и углерода существенно отличаются от номинальных и варьируют в широких пределах. Так, выборочное значение коэффициента вариации  $\nu$  концентраций  $\text{NO}_x$  для ГТК-10-4 составляет 39,6 %, для ГПУ-10 «Волна» -18,5 % и для ГПА-12Р «Урал» - 8,6 %.

Выборочное значение коэффициента вариации  $\nu$  концентраций CO для ГТК-10-4 составляет 31,8 %, для ГПУ-10 – 34,0 %, и для ГПА-12Р - 31,2 %.

Для того чтобы определить влияние технического состояния агрегата на уровень выбросов, были получены экспериментальные зависимости концентраций продуктов сгорания от температуры рабочего тела. Было установлено, что концентрации CO и NO<sub>x</sub> для отдельных ГПА различаются в 1,1÷2,5 раз. С учетом того, что эксперименты проводились при одинаковых условиях работы агрегатов, это можно объяснить лишь их различным техническим состоянием.

Сделан вывод о том, что процессы старения и износа узлов и элементов ГПА сопровождаются изменением концентраций оксидов азота и углерода в продуктах сгорания, а потому величина уровня выбросов CO и NO<sub>x</sub> может использоваться как дополнительный критерий при оценке технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

Однако оценка динамики изменения параметров выбросов по результатам измерений продуктов сгорания осложняется тем, что содержание оксидов азота и углерода в уходящих газах зависит не только от технического состояния, но и от режима работы агрегата. Для решения этой задачи нами предложен комплексный показатель – индекс концентрации  $K_p$ , позволяющий определять динамику изменения содержания оксидов азота и углерода в выхлопных газах газоперекачивающего агрегата на переменных режимах его работы, независимо от загрузки. Индекс концентрации  $K_p$  рассчитывается по формуле

$$K_p = \frac{C'_{NO_x}}{C_{NO_x}^{ном}} + \frac{C'_{CO}}{C_{CO}^{ном}}, \quad (1)$$

где  $C'_{NO_x}$ ,  $C'_{CO}$  - концентрации оксидов азота и углерода соответственно в выхлопных газах, мг/нм<sup>3</sup>, приведенные к условной концентрации кислорода 15 %;

$C_{NO_x}^{ном}$  - номинальная приведенная концентрация оксидов азота, мг/нм<sup>3</sup>;

$C_{CO}^{ном}$  - номинальная приведенная концентрация оксида углерода, мг/нм<sup>3</sup>.

Приведенная концентрация загрязняющего вещества (к условному содержанию кислорода 15 % в сухих продуктах сгорания) определяется по формуле

$$C'_i = C_i^{\text{факт}} \cdot \frac{21 - 15}{21 - O_2}, \quad (2)$$

где  $C_i^{\text{факт}}$  – фактическая концентрация вредного вещества в сухих продуктах сгорания, мг/нм<sup>3</sup>;

$O_2$  – фактическое содержание кислорода в сухих продуктах сгорания, %;

21 – содержание кислорода в атмосферном воздухе, %.

Как показывают экспериментальные исследования выхлопных газов ГПА различных типов, диапазон изменения индекса концентрации составляет в среднем от 0,6 до 3,0 в зависимости от эмиссионной характеристики камеры сгорания, технического состояния агрегатов и наработки с начала эксплуатации и после капитального ремонта.

Во втором разделе для решения задачи оценки технического состояния ГПА на основе количественного состава выхлопных газов представлена серия кривых в плоскости ( $K_{Ne}$ ,  $T_{ТНД}$ ), имеющих, как видно на рисунке 5, качественно сходный характер, что позволило для установления вида функциональной зависимости  $K_{Ne} = F(K_p, T_{ТНД})$  воспользоваться методом асимптотических координат.

В результате реализации данного метода получена аналитическая зависимость коэффициента технического состояния ГПА по мощности  $K_{Ne}$  от температуры газа за ТНД и индекса концентрации  $K_p$ , количественно характеризующего выбросы оксидов азота и углерода:

$$K_{Ne}(K_p, T_{ТНД}) = (-0,46 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ТНД}^2 + 0,059 \cdot T_{ТНД} - 17,65) \cdot (0,77 \cdot \exp(-0,28 \cdot K_p) - 1,08 \cdot \exp(-0,21 \cdot K_p)) + 1,08 \cdot \exp(-0,21 \cdot K_p). \quad (3)$$

Данная математическая модель была апробирована для оценки технического состояния ГПА ГТК-10-4, находящихся в реальных условиях эксплуатации.

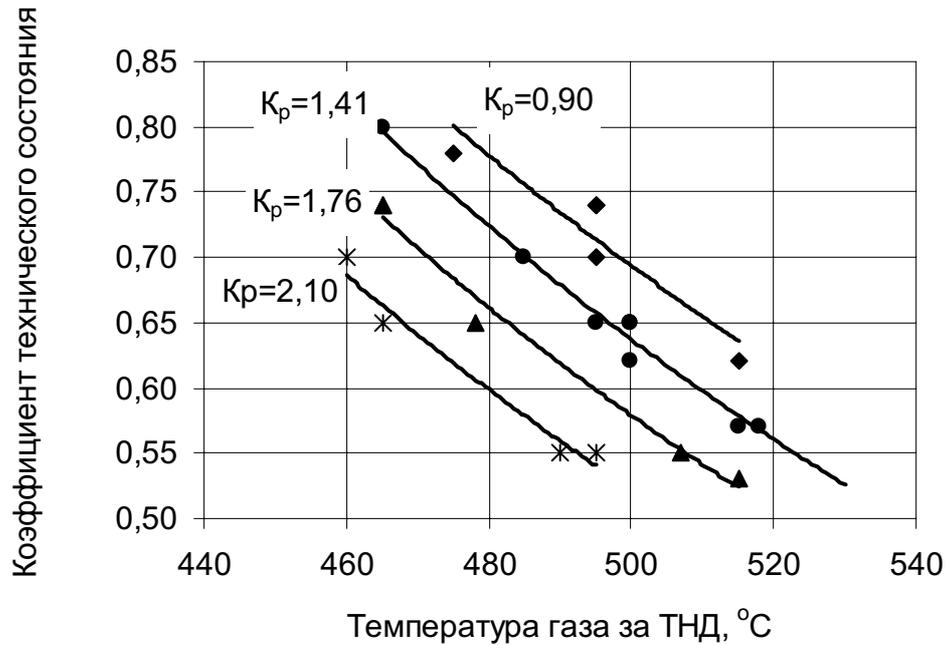


Рисунок 5 - Разделение экспериментальных данных на кластеры по величине индекса концентрации  $K_p$

Сравнение фактических коэффициентов технического состояния по мощности, определенных на основе теплотехнических испытаний и рассчитанных по формуле (3), показало, что средняя ошибка в оценке ТС агрегатов составила около 5 %.

В предлагаемом методе нет необходимости выводить агрегат в базовый режим работы и проводить сложные дорогостоящие испытания с привлечением специальных инженерных кадров для определения технического состояния ГПА. Особенность данного метода заключается также в том, что он позволяет оперативно определять техническое состояние ГПА во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок по фактическим данным анализа продуктов сгорания и температуре рабочего тела.

Третий раздел главы посвящен моделированию динамики изменения уровня выбросов оксидов азота и оксида углерода.

Временная динамика выбросов, характеризуемых индексом концентрации, получена в результате исследований более 30-ти агрегатов ГТК-10-4, с

различным техническим состоянием и различной наработкой после капитального ремонта.

На рисунке 6 представлена зависимость индекса концентрации  $K_p$  от наработки  $t$  в течение межремонтного периода. Вид эмпирической зависимости  $K_p = f(t)$  получен в результате обработки экспериментальных данных методом порядкового приближения с использованием рангов  $K_p$  и  $t$  как случайных величин.

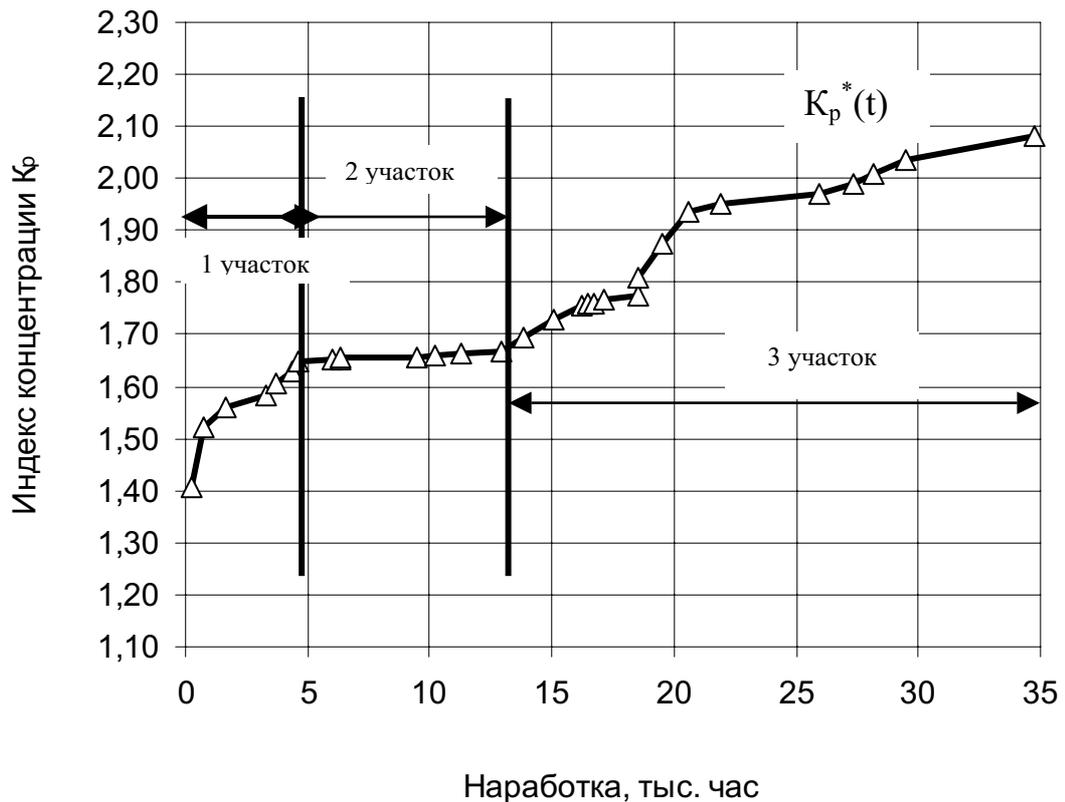


Рисунок 6 - Зависимость индекса концентрации от наработки агрегатов в межремонтный период

Установлено, что в период нормальной эксплуатации ГПА состав выхлопных газов достаточно стабилен (изменение  $K_p$  в этот период не превышает 5 %). Ухудшение технического состояния газоперекачивающего агрегата приводит к заметному увеличению индекса концентрации - на 20 % и более, а в отдельных случаях, как показали исследования, в 2-3 раза.

Следует отметить, что момент перехода к периоду «старения» газоперекачивающего агрегата зависит от ряда причин, например качества предыдущего

ремонта, условий эксплуатации, уровня технического обслуживания оборудования и т.д., и потому должен устанавливаться для каждого агрегата отдельно. В связи с этим для контроля динамики изменения уровня выбросов оксидов азота и углерода требуется проведение мониторинга выхлопных газов в процессе эксплуатации газоперекачивающего агрегата.

**Четвертая глава** посвящена разработке расчетных методов мониторинга выбросов оксидов азота и углерода, основанных на постоянно действующей системе измерений технологических параметров работающих агрегатов.

В первом разделе приводятся результаты корреляционного анализа данных мониторинга на КС, включающих в себя измерения содержания оксидов азота, оксида углерода и кислорода в выхлопных газах ГПА, а также сопутствующие режимные параметры и внешние условия. Целью анализа является ранжирование технологических параметров по их влиянию на состав продуктов сгорания. Установлено, что концентрации оксидов азота и углерода в выхлопных газах газоперекачивающих агрегатов на базе судовых и авиационных двигателей имеют тесную корреляционную связь с такими технологическими показателями, как температура рабочего тела, частота вращения роторов и температура воздуха на входе в осевой компрессор. Для ГПА ГТК-10-4 давление воздуха за компрессором также имеет значимую взаимосвязь с выбросами продуктов сгорания. С учетом данного вывода методом множественного регрессионного анализа исходных данных получены статистически значимые модели для мониторинга выхлопных газов ГПА ГПА-12Р «Урал» по комплексу технологических параметров:

$$C_{NO_x} = -449 + 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,182 \cdot T_{OK} + 0,399 \cdot T_{CT} + 6,35 \cdot 10^{-2} \cdot N_{CT}; \quad (4)$$

$$C_{CO} = 12,7 + \exp(50,9 + 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1,12 \cdot T_{OK} - 6,36 \cdot 10^{-2} \cdot T_{CT} - 2,92 \cdot 10^{-3} \cdot N_{CT}). \quad (5)$$

Уравнения (4)...(5) представляют математическую модель взаимосвязи концентраций CO и NO<sub>x</sub> в уходящих газах ГПА с такими технологическими параметрами, как наработка t, температура воздуха на входе в двигатель T<sub>OK</sub>, температура газа T<sub>CT</sub> и частота вращения ротора свободной турбины N<sub>CT</sub>.

Сопоставление фактических и расчетных данных показывает, что полученные модели позволяют оценить содержание  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах ГПА-12Р «Урал» с ошибкой до 4,2 % и содержание  $\text{CO}$  с ошибкой до 8 % (между тем, погрешность применяемых в настоящее время зависимостей выбросов только от температуры рабочего тела составляет 8 % и 16,2 % соответственно).

Для приведения расчетных концентраций оксидов азота и углерода к условному содержанию  $\text{O}_2$  15% было получено уравнение регрессии, позволяющее определять содержание кислорода в выхлопных газах ГПА-12Р «Урал» с погрешностью не более 1 %:

$$C_{\text{O}_2} = -31,3 + \exp(4,03 - 0,024 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,525 \cdot 10^{-3} T_{\text{ок}} - 0,279 \cdot 10^{-3} \cdot N_{\text{ст}}) \quad (6)$$

На основе экспериментальных данных, представляющих собой результаты измерений концентраций оксидов азота и углерода в продуктах сгорания ГТУ типа ГПУ-10 «Волна» и ряда технологических параметров работы агрегатов за период с января 2000 г. по сентябрь 2003 г., были построены нейросетевые модели для оценки количественного состава выхлопных газов с погрешностью около 7 %.

Полученные модели позволяют реализовывать расчетные методы производственного мониторинга на КС и на этой основе диагностировать техническое состояние газоперекачивающих агрегатов в текущем режиме работы.

Следует заметить, что представленные во втором разделе уравнения регрессии и нейросетевые модели позволяют адекватно оценивать содержание оксидов азота и углерода в уходящих газах на тех компрессорных станциях, по которым была сформирована экспериментальная выборка, но предложенный подход к моделированию выбросов продуктов сгорания может быть использован и для других типов газоперекачивающих агрегатов.

Необходимым условием повышения качества диагностического обслуживания агрегатов является прогнозирование контролируемых системами производственного мониторинга параметров ГПА. В заключении четвертой главы представлена модель для прогнозирования динамики изменения уровня вибрации в межремонтный период эксплуатации агрегата с погрешностью около 6%,

полученная на основе анализа временного ряда СКЗ виброскорости колебаний контрольной точки подшипника передней опоры КВД методом экспоненциального сглаживания (рисунок 7). Реализация предложенного метода позволит обоснованно определять сроки проведения виброобследования газоперекачивающего агрегата.

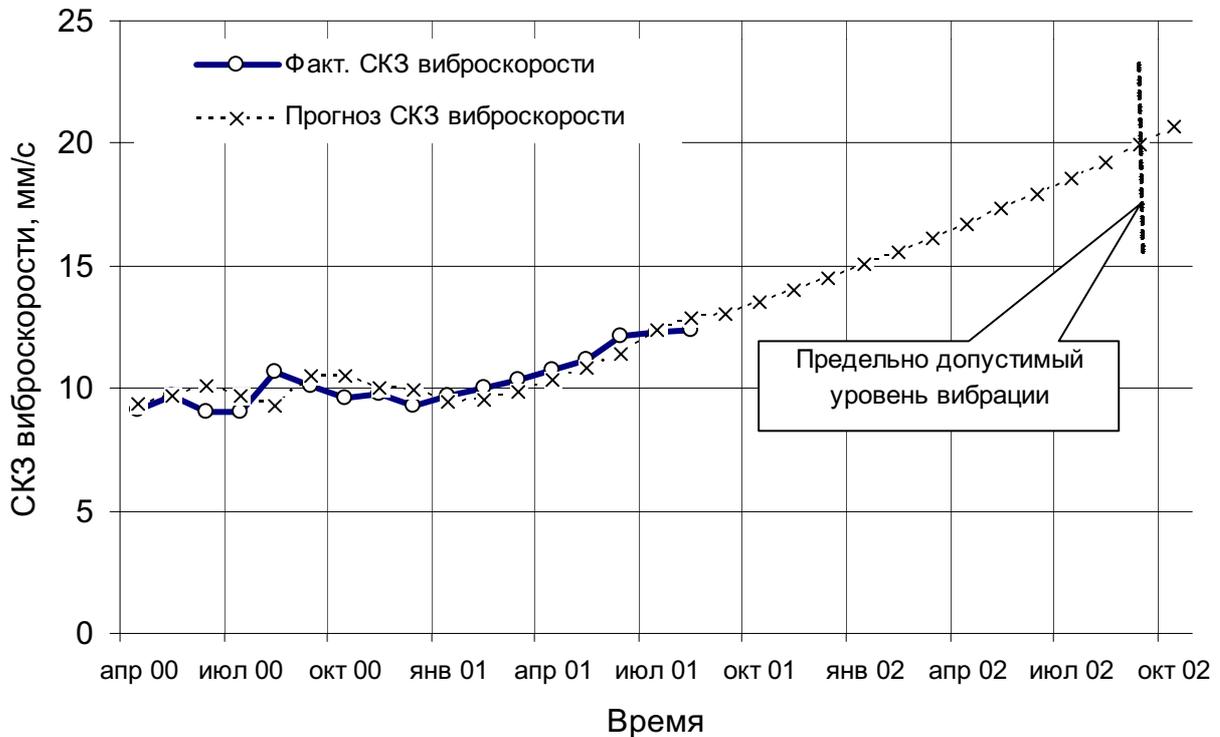


Рисунок 7 - Прогноз уровня вибрации ПО КВД ГПУ-10 «Волна»

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

- 1 В качестве критериев диагностирования технического состояния подшипников ГПА предложены фрактальные характеристики виброспектров, коэффициент Джини и ранговые статистики Спирмена и Кендалла. Предложенные методы позволяют повысить достоверность диагностирования подшипниковых узлов за счет прогнозирования таких аварийных ситуаций, которые не распознаются стандартными методами спектральной вибродиагностики, и могут быть рекомендованы в качестве дополнительных при оценке технического состояния ГПА.

- 2 Разработана модель прогноза вибрационного состояния газоперекачивающих агрегатов в межремонтный период на основе анализа временных рядов СКЗ виброскорости методом экспоненциального сглаживания. Показано, что погрешность прогнозной модели не превышает 6 %.
- 3 Для количественной характеристики выхлопных газов предложен комплексный показатель  $K_p$ , позволяющий определять динамику изменения содержания оксидов азота и углерода в выхлопных газах газоперекачивающего агрегата на переменных режимах его работы. Это дает возможность установить взаимосвязь между техническим состоянием газоперекачивающего агрегата и уровнем выбросов оксидов азота и углерода, а также определять динамику изменения состава выхлопных газов в процессе эксплуатации ГПА.
- 4 Предложен способ оценки технического состояния ГПА ГТК-10-4 на основе количественной характеристики выхлопных газов. Полученная математическая модель расчета  $K_{Ne}$  имеет среднюю ошибку около 5 %. Предлагаемый метод позволяет оперативно определять техническое состояние ГПА во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок по фактическим данным анализа продуктов сгорания и температуре рабочего тела.
- 5 Установлено, что в период нормальной эксплуатации газоперекачивающего агрегата уровень выбросов оксидов азота и углерода достаточно стабилен. Увеличение индекса концентрации  $K_p$  на 20 % и более свидетельствует о переходе к периоду «старения» агрегата и может служить диагностическим признаком ухудшения технического состояния ГПА.
- 6 Построены статистические модели для мониторинга выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов по комплексу технологических параметров. Полученные модели позволяют диагностировать техническое состояние ГПА в текущем режиме работы на основе количественной характеристики выбросов оксидов азота и углерода.

**Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:**

- 1 Байков И.Р., Костарева С.Н., Китаев С.В. Уточнение необходимого объема информации для достоверной оценки технического состояния газокompрессорного оборудования//Тезисы докладов 51-й научно-технической конференции УГНТУ. - Уфа, 2000.-С.82.
- 2 Байков И.Р., Костарева С.Н., Китаев С.В. Оценка технического состояния газокompрессорной установки с помощью фрактальных характеристик виброспектров// Тезисы докладов 51-й научно-технической конференции УГНТУ. - Уфа, 2000.-С.78.
- 3 Гольянов А.И., Китаев С.В., Костарева С.Н. Уточнение методики расчета показателей работы двухвальной ГТУ//Тезисы докладов 51-й научно-технической конференции УГНТУ. - Уфа, 2000.-С.81.
- 4 Китаев С.В., Костарева С.Н., Смородова О.В. Использование вибрационных характеристик ГТУ при планировании очисток проточных частей осевых компрессоров// Тезисы докладов 51-й научно-технической конференции УГНТУ. - Уфа, 2000.-С.79.
- 5 Байков И.Р., Костарева С.Н., Китаев С.В.Применение фрактальных характеристик виброспектров для диагностики подшипников качения//Проблемы нефтегазового комплекса: Тезисы докладов межрегиональной научно-методической конференции. - Уфа, 2000.- С.36-37.
- 6 Китаев С.В., Костарева С.Н. Диагностирование технического состояния газоперекачивающих агрегатов на основе контроля температуры аппаратов воздушного охлаждения масла//Проблемы нефтегазового комплекса: Тезисы докладов межрегиональной научно-методической конференции.- Уфа, 2000.-С.82-83.
- 7 Китаев С.В., Костарева С.Н. Параметрический контроль технического состояния газоперекачивающих агрегатов//Проблемы нефтегазового комплекса: Тезисы докладов межрегиональной научно-методической конференции.- Уфа, 2000.-С.84-85.

- 8 Байков И.Р., Смородов Е.А., Костарева С.Н. Оценка технического состояния ГКУ с помощью вибродиагностики//Газовая промышленность.-2001.-№4.-С.15-17.
- 9 Байков И.Р., Смородова О.В., Костарева С.Н. Оценка технического состояния газоперекачивающих агрегатов при помощи нейронных сетей// Уралэнерго-2003: Сборник материалов III Энергетического форума. - Уфа: GreenFish Studio, 2003.-С.43.
- 10 Байков И.Р., Смородова О.В., Костарева С.Н. Прогностическая модель эмиссии вредных веществ в выхлопных газах ГТУ//Известия ВУЗов. Проблемы энергетики.-2004.-№1-2.-С.122-128.
- 11 Байков И.Р., Смородова О.В., Костарева С.Н. Экологическая оценка выхлопных газов компрессорных станций//Проблемы строительного комплекса: Материалы VIII Международной научно-технической конференции. - Уфа, 2004.-С.171.
- 12 Байков И.Р., Путенихин А.Ю., Костарева С.Н. Диагностирование технического состояния газоперекачивающих агрегатов на основе количественной характеристики выхлопных газов//Энергоэффективные технологии: Тезисы докладов научно-практической конференции. - Уфа, 2004. - С. 58-62.