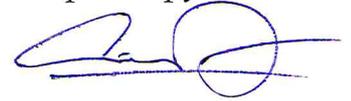


На правах рукописи



САУБАНОВ ОСКАР МАРАТОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УДАЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ ШТАТНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность: 2.8.5. – «Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Валеев Анвар Рашитович

Официальные оппоненты: **Науменко Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет» / кафедра
«Радиотехнические устройства и системы
диагностики», профессор

Кишалов Александр Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет» /
кафедра «Авиационная теплотехника и
теплоэнергетика», доцент

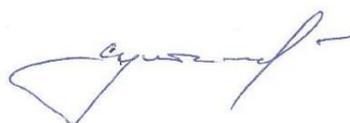
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится «22» сентября 2022 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03, созданного при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день в газовой промышленности России возникла насущная необходимость реконструкции парка основного технологического оборудования компрессорных станций (КС) - газоперекачивающих агрегатов (ГПА), - поскольку около 61% из них уже выработали, а еще около 18% дорабатывают назначенный производителем ресурс (на примере одного из дочерних газотранспортных Обществ ПАО «Газпром»).

Но поскольку темпы технического перевооружения в течение ближайших 10 лет будут недостаточными, необходимо обеспечивать надежность нагнетательного оборудования с околоресурсным и сверхресурсным сроком эксплуатации. Дополнительным фактором актуальности решения данной задачи является существенный рост стоимости ремонта агрегатов (газотурбинных двигателей) переработавший назначены ресурс, чем выше наработка агрегата, тем выше стоимость его ремонта, транспортных услуг и запасных частей. Затраты на обслуживание и ремонт являются одним из важнейших эксплуатационных показателей любой технической системы. Их оптимизация в тех случаях, когда система является ремонтпригодной, практически невозможна без эффективного контроля, мониторинга и диагностики технического состояния (ТС) системы.

В современных средствах мониторинга и диагностики роторных машин, основным видом анализируемых процессов становится корпусная вибрация. Вибрационные методы контроля эффективнее других, так как их можно осуществить в любое время без вмешательства в нормальную работу агрегата. Это означает, что именно системы вибромониторинга и диагностики в силу специфики временных вибрационных сигналов несут основную ответственность за общий контроль механического состояния оборудования и предотвращение аварийных отказов, связанных с развитием различных механических дефектов. Данные положения позволяют использовать нетрадиционные методы анализа вибрационных сигналов с целью создания эффективных алгоритмов и критериев

обнаружения зарождающихся эксплуатационных неисправностей узлов агрегата и критериев, нечувствительных к малоинформативным изменениям, которые могут иметь место, как при его нормальном состоянии, так и при развитии в нем дефектов. Поэтому поиск и разработка новых подходов к повышению надежности и эффективности диагностирования ГПА на основе создания и внедрения систем удаленного вибромониторинга технического состояния являются актуальной научной проблемой, решение которой имеет важное теоретическое и практическое значение.

Степень разработанности темы

Изучению вопроса разработки методов определения технического состояния компрессорного оборудования посвящены работы Акимова В.И., Балицкого Ф.Я., Баркова А.В., Байкова И.Р., Биргера И.А., Бесклетного М.Е., Васильева Ю.Н., Генкина М.Д., Гольдина А.С., Дубинского В.Г., Зарицкого С.П., Игуменцева Е.А., Карасева В.А., Костюкова В.Н., Китаева С.В., Куменко А.И., Лопатина А.С., Науменко А.П., Писаревского В.М., Полякова В.А., Русова В.А., Соловьева А.Б., Сидоренко М.К., Соловьевой А.Г., Тухбатуллина Ф.Г., Ширмана А.Р., Шаммазова А.М., Явленского К.Н. и др. Из иностранных ученых вопросами технической диагностики занимаются Randall R.B., Smith D.M., Steward R.M., Braun S.

Несмотря на большое количество публикаций по данной тематике, стоит отметить, что недостаточно работ, в которых разрабатывались методики полосового анализа уровня вибрации, реализуемые на штатном оборудовании компрессорных станций в условиях ограниченной информации.

Цель диссертационной работы

Повышение надежности газоперекачивающих агрегатов за счет разработки и внедрения системы удаленного мониторинга и диагностики вибрационных сигналов в режиме реального времени.

Основные задачи исследований

1 Анализ современного опыта контроля технического состояния газоперекачивающего оборудования, оценка эффективности применяемых подходов к выявлению дефектов газотурбинных двигателей (ГТД). Анализ

перспектив перехода на обслуживание ГПА по техническому состоянию с применением стационарных систем вибромониторинга.

2 Разработка методики удаленного полосового анализа вибрационного сигнала ГПА в режиме реального времени, реализуемой на базе штатного оборудования компрессорных станций.

3 Разработка и апробация системы вибромониторинга газотурбинных двигателей и центробежных компрессоров ГПА с возможностью удаленного полосового анализа вибрационных сигналов на базе штатной системы виброконтроля агрегатной автоматики. Анализ результатов экспериментальных данных при апробации разрабатываемой системы на газотурбинных двигателях в условиях КС.

4 Создание вибрационных моделей дефектов газотурбинных двигателей судового и авиационного типов с указанием полосовых норм и дефектных признаков. Разработка критериев оценки технического состояния указанных приводов путем совершенствования имеющихся заводских методик вибрационного контроля и проведения статистического анализа на основе исторических данных вибрационных обследований парка двигателей.

Научная новизна

1 Доказана возможность реализации удаленного полосового частотного анализа вибрационных сигналов ГПА средствами только штатного оборудования КС, а также разработаны методы, позволяющие расширить их функциональные диагностические возможности и повысить полноту диагностирования в 3,5 раза.

2 На основе проведенных исследований установлены закономерности изменения величин виброскорости в полосах частот в зависимости от степени поврежденности узлов ГТД, на основе которых предложены вибрационные критерии дефектного состояния судового ДР59Л и авиационного АЛ-31СТ типа приводных газотурбинных двигателей, отличающиеся тем, что сформированы поузловые нормы вибрации 23 узкополосных составляющих спектра, а также критерии оценки технического состояния по вибросигналу в режиме реального времени.

Теоретическая значимость

1 Разработаны методики удаленного полосового анализа корпусной вибрации газотурбинных двигателей в реальном масштабе времени по уровню известных нормативных значений и статистически определенных для конкретного ГТД величин вибрации в заданных полосах частот, позволяющие оценить техническое состояние узлов, определить изменения вибрации в выделенных полосах частот и выполнить оценку вибросостояния по приближению к предупредительным уровням, свидетельствующим об ухудшении технического состояния узла двигателя.

2 Разработана методика удаленного мониторинга вибрации подшипниковых опор центробежных компрессоров ГПА, основанная на контроле за отклонением их вибрационных характеристик, зависящих от частоты вращения вала относительно эталонной базовой линии. По данным отклонениям составлен перечень возможных дефектов ЦБК, вызвавших рост вибрации.

3 Предложена методика проведения удаленного контроля уровня вибрации ГПА с использованием штатного оборудования КС.

4 Установлены закономерности изменения величин вибрации в полосах частот в зависимости от изменения состояния узлов ГТД, которые определены вероятностно-статистическим методом принятий решений при научном обосновании полос контроля вибрации, что позволило получить пороговые значения виброскорости в 23 узкополосных составляющих спектра вибрации, соответствующие дефектному состоянию подконтрольного узла газотурбинного двигателя АЛ-31СТ с известной вероятностью пропуска опасного состояния.

Практическая значимость

Предложены схемы и алгоритмы реализации системы удаленного вибромониторинга газотурбинных двигателей типа ДР59Л и АЛ-31СТ на базе штатной системы виброконтроля типа ИВ-Д-ПФ в составе системы автоматического управления и регулирования (САУиР) ГПА типа МСКУ-СГ. На основе сравнения с поверенными виброанализатором типа АСДО-ВА-04 экспериментально установлено, что вибродатчики штатной системы

виброконтроля ГПА данного типа могут применяться для удаленного полосового анализа вибрации и корректной оценки текущего технического состояния ГПА в режиме реального времени. Разработан и апробирован блок спектрального анализа (БСА) интегрированный в штатную систему виброконтроля. Успешно проведены эксплуатационные 72-часовые испытания БСА в составе САУиР ГПА ст. № 33 КС-19А «Шаран» (ГПУ-10-01), показавшие корректность применения вибросигнала от штатной системы виброконтроля для реализации удаленного вибрационного мониторинга и оценки технического состояния судового привода типа ДР59Л.

Интегрированный в штатную систему виброконтроля БСА позволил реализовать удаленный полосовой анализ вибросигналов ГПА без внедрения аналогичных дорогостоящих и сложных коммерческих систем вибромониторинга и диагностики. За счет данного внедрения расширены функциональные диагностические возможности штатной системы вибромониторинга, при этом ее полнота диагностирования увеличена в 3,5 раза по сравнению с действующими подходами диагностического обслуживания ГПА. Полученные в результате обработки экспериментальных данных полосовые нормы вибрации двигателя АЛ-31СТ реализованы в системе удаленного трендового контроля параметров работы двигателя в виде отдельной подсистемы вибромониторинга.

Разработанная система вибромониторинга АЛ-31СТ успешно проходит опытно-промышленную эксплуатацию на КС ООО «Газпром трансгаз Уфа». Результаты анализа узкополосных составляющих спектра корпусной вибрации со штатных датчиков, предшествующих трем аварийным отказам на ГПА КС «Москово» позволил выявить перечень дефектных признаков и типовой характер изменения вибрации отдельных составляющих спектра фиксируемых системой. Данный опыт был применен при интерпретации дефекта типа «расцентровка роторов компрессора и турбины низкого давления (КНД и ТНД)» на ГПА ст. № 12 КС-5 «Москово» до момента разрушения узлов газотурбинного двигателя.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» и представлены в учебном пособии «Техническая диагностика нефтегазоперекачивающего оборудования» при подготовке бакалавров по направлению 131000 «Нефтегазовое дело» и магистров по направлению 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы вибрационного диагностирования, теория колебаний роторных машин, спектральный-корреляционный анализ данных, аналитические и экспериментальные исследования влияния дефектов на амплитудные характеристики в полосах частот, а также вероятностно-статистические методы принятий решений. Дополнительным источником информации для статистической обработки стали данные, полученные в результате работы систем вибромониторинга ГТД, реализованных на штатном оборудовании компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Уфа».

Положения, выносимые на защиту

- 1 Разработанная методика нормируемого и ненормируемого полосового анализа вибросигнала ГПА, реализуемая на штатном оборудовании КС.
- 2 Структурные алгоритмы систем вибромониторинга ДР59Л/АЛ-31СТ на базе штатной виброаппаратуры типа ИВ-Д-ПФ с использованием промышленных каналов связи.
- 3 Результаты экспериментальных исследований по апробации разработанного блока спектрального анализа, внедренного в состав штатной виброаппаратуры САУиР ГПА в условиях КС.
- 4 Полосовые частотные диапазоны контроля и нормы вибрации, полученные расчетным методом при обработке массива статистических данных вибрационных обследований парка ГТД на различных циклах их эксплуатации.
- 5 Вибрационные критерии технического состояния узлов газотурбинных двигателей ДР59Л и АЛ-31СТ полученные в результате доработки заводской методики поузлового вибрационного диагностирования ГТД в условиях

эксплуатации и построения среднестатистических масок спектра усредненных по парку двигателей в штатных точках замера уровня вибрации предусмотренных технической документацией.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, строго обоснованы математическим аппаратом, теории вероятности и математической статистики, средствами технических измерений и контроля, а также принципами системного подхода. Отдельные результаты исследования подтверждены контрольными испытаниями ГПА на КС ООО «Газпром трансгаз Уфа».

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих мероприятиях: Международная конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2013, 2014), Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2013, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), Научно-техническая конференция молодежи АО «Транснефть-Урал» (г. Уфа, 2015), Производственно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Уфа» (г. Уфа, 2015, 2017, 2018), Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (нефть, газ, энергетика)» (г. Москва, 2015, 2019), Юбилейная 70-я международная молодежная научно-практическая конференция «Нефть и газ» приуроченной к III Национальному нефтегазовому форуму (г. Москва, 2016), Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде (г. Уфа, 2016), Международная конференция «Динамика и виброакустика машин» (г. Самара, 2016), Международная научная конференция посвященная 100-летию Республики Башкортостан «Современные проблемы истории естествознания в области химии, химической технологии, и нефтяного дела» (г. Уфа, 2017), Международная молодежная научная конференция «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса» (г. Уфа, 2018).

Основные результаты диссертационной работы получены лично автором и при его непосредственном авторском надзоре на всех этапах исследования: при

постановке конкретных задач, разработке технологических схем доработки штатной виброаппаратуры САУиР ГПА, критериев оценки технического состояния ГПА, проведении всех экспериментов, обработке, анализе и обобщении полученных данных. Совместные результаты представлены с согласия соавторов.

Публикации

По теме диссертационной работы имеется 22 публикации, в том числе 1 учебное пособие, 4 публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 публикации в изданиях, индексируемые в Scopus и/или Web Of Science, 1 патент РФ на полезную модель.

Различные части диссертационной работы выполнялись при поддержке грантов: программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» – договор №9438ГУ/2015, грант УГНТУ для аспирантов, обучающихся по приоритетным направлениям подготовки (приказ УГНТУ от 05.03.2018 № 232-1).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы из 137 наименований и 4 приложений; изложена на 187 страницах машинописного текста и содержит 42 рисунка и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Первая глава посвящена обзору и анализу существующих и перспективных методов и средств оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

Основополагающие научные разработки в области создания методов и средств оценки технического состояния ГПА представлены трудами Тухбатуллина Ф.Г., Зарицкого С.П., Лопатина А.С., Бесклетного М.Е., Васильева Ю.Н., Микаэляна Э.А. и др.

Произведен анализ текущего технического состояния ГПА, конвертированных газотурбинными двигателями судового и авиационного типа.

Оценены показатели надежности агрегатов типа ГПА-16Р «Уфа», ГПУ-10 и ГТК-10 находящихся в эксплуатации на КС ООО «Газпром трансгаз Уфа» за десятилетний период. Выявлено, что повышение нагрузки на выработавших ресурс ГПА с большой наработкой влечет за собой снижение их показателей надежности и повышает количество отказов, в том числе с разрушением узлов и деталей. Статистика показала, что при увеличении годовой наработки парка ГПУ-10 на 12,7%, наработка на отказ по механической части уменьшилась на 31%, при этом количество отказов увеличилось на одну единицу. Аналогичная ситуация наблюдалась и в отрасли, так, если суммарная наработка ГПУ-10 с двигателя ДР59Л в ПАО «Газпром» в 2017 году увеличилось на 16% по сравнению с 2016 годом, количество досрочно снятых аварийных двигателей (ДСД) возросло с одного до шести, а наработка на ДСД сократилась практически в пять раз. Наряду с этим, прогнозируется сохранение загрузки газотранспортной системы (ГТС) ООО «Газпром трансгаз Уфа» на уровне проектных показателей до 2030 года. Учитывая преобладающее большинство ГПУ-10 в парке ГПА, нагрузка на данный тип длительно эксплуатируемых агрегатов останется на прежнем высоком уровне, что повышает риск аварийных остановов с разрушением.

Отмечено, что применяемые на сегодняшний день подходы к диагностическому обслуживанию ГПА, основанные на периодическом ручном вибрационном диагностировании в совокупности со штатными системами контроля вибрации САУ ГПА, не позволяют дать исчерпывающую информацию о текущем техническом состоянии узлов агрегата и прогнозировать ориентировочные сроки выхода агрегата из строя. В связи с чем, отказы ГПА, как правило, имеют внезапный характер. Данная научная проблема является актуальной для трубопроводного транспорта газа. Решением данной проблемы могла бы стать интеграция коммерческих стационарных систем вибродиагностики в АСУ ТП КС, однако, как показала практика, данное решение малоэффективно в виду их дороговизны, сложности в использовании и обслуживании, несовместимости протоколов передач данных и вопросам

информационной безопасности. Отсюда, наиболее оптимальным решением данной проблемы может стать создание систем удаленного полосового вибромониторинга ГПА на базе штатного оборудования и каналов связи КС.

Во **второй главе** предложена методика проведения удаленного полосового анализа вибрации ГПА на штатном оборудовании КС. Методика включает в себя разработку нормируемого и ненормируемого полосового анализа исследуемых газотурбинных двигателей, а также анализ максимальных отклонений виброхарактеристик подшипников ЦБК в зависимости от частоты вращения вала. Под нормируемым полосовым анализом понимается мониторинг вибросостояния на базе утвержденных заводом-изготовителем (разработчиком) двигателя полосовых норм в виде методик, стандартов или рекомендаций.

Разработанная методика нормируемого полосового анализа включает в себя анализ статистических данных по проведенным виброобследованиям предаварийных двигателей; поиск признаков дефектов согласно заводским методикам-рекомендациям; разработку алгоритмов контроля вибросостояния узлов ГТД на основе анализа спектра или полос частот; расчет подшипниковых частот; разработку перечня характерных дефектных признаков ГТД, адаптированных под заводскую методику; разработку алгоритмов диагностирования и идентификации дефектов, адаптированных под функциональные возможности штатной системы виброконтроля; проверку технической возможности реализации методики на базе штатных систем виброконтроля; разработку дополнительного вторичного преобразователя для спектрального анализа сигналов и передачи результатов в диагностические системы верхнего уровня САУиР ГПА по промышленным каналам передачи данных RS-485/Modbus RTU.

В разработанной методике ненормируемого полосового анализа проводится спектральный анализ в заданных полосах по результатам виброобследований парка ГТД за несколько лет эксплуатации. Далее на основе метода минимального риска теории вероятностно-статистического подхода принятий решений рассчитываются предельные амплитудные значения виброскорости,

соответствующие дефектному состоянию контролируемого узла двигателя, в каждой из исследуемых полос по следующей формуле:

$$V_d = \frac{\sigma_1^2 \bar{V}_2 + \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{\ln \frac{(C_{12} - C_{22}) P_2 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + (\bar{V}_1 + \bar{V}_2)^2 - \sigma_2^2 \bar{V}_1}{(C_{21} - C_{11}) P_1}}}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}, \quad (1)$$

где \bar{V}_1 и \bar{V}_2 – средние значения виброскорости в полосе, соответствующие исправному и неисправному (дефектному) состоянию ГТД, мм/с; $\sigma_{1,2}$ – среднеквадратическое отклонение значений виброскорости при исправном и неисправном состоянии, мм/с; P_1, P_2 – вероятности работоспособного и неработоспособного состояния узла ГТД, %; C_{12} – стоимость пропуска дефекта, равная стоимости аварийно-восстановительного ремонта двигателя вследствие разрушения узлов и деталей, тыс. руб.; C_{21} – стоимость ложной тревоги, равная стоимости внепланового технического обслуживания ГТД, необходимого для выявления причин вынужденного останова ГПА, тыс. руб.; C_{11}, C_{22} – цены правильных решений, $C_{11} = C_{22} = 0$.

Дополнительно к этому рассчитываются вероятности ложной тревоги и пропуска дефекта, а также средний риск (ожидаемая величина потери).

Далее определяются пороговые значения виброскорости в полосах, характеризующие предупредительные уровни вибросостояния узлов ГТД (начальная стадия развития дефекта), по следующей формуле:

$$V_B = \bar{V}_{пв} + 3\sigma_{пв}, \quad (2)$$

где $\bar{V}_{пв}$ – среднее значение виброскорости в полосах по замерам, проведенным при плановых виброобследованиях, мм/с; $\sigma_{пв}$ – среднеквадратическое отклонение значений виброскорости при плановых виброобследованиях, мм/с.

Пороговые значения виброскорости в полосах, характеризующие допустимые (нормальные) уровни вибросостояния узлов ГТД (бездефектное состояние узла ГТД), определяются по следующей формуле:

$$V_H = \bar{V}_{пр} + 3\sigma_{пр}, \quad (3)$$

где $\bar{V}_{пр}$ – среднее значение виброскорости в полосах, по замерам, проведенным на ГТД прошедших капитальный или восстановительный ремонт в течение первых

72-360 часов работы, мм/с; $\sigma_{\text{пр}}$ – среднеквадратическое отклонение значений виброскорости в полосах контроля на отремонтированных ГТД, мм/с.

По полученным значениям уровней в каждой полосе контроля строится маска спектра для каждого штатного вибродатчика. Далее проводится анализ влияния оборотной частоты на значение амплитуд в полосах, производится расчет подшипниковых частот, формируются диагностические признаки полосового анализа на основе полученных результатов. По имеющимся статистическим данным отказов ГПА рассчитывается полнота контроля разрабатываемой системы вибромониторинга. Отмечено, что разработанные и апробированные полосовые нормы должны быть согласованы с заводом-изготовителем (разработчиком) двигателя или его представителем (ремонтным предприятием).

Помимо полосового анализа вибрации ГТД, на базе реальных промышленных данных формируемых в АСУ ТП КС предложена методика удаленного вибромониторинга центробежного компрессора ГПА по отклонению виброхарактеристик подшипников ЦБК от базовой линии и разработан соответствующий перечень диагностирующих признаков.

Третья глава посвящена практической реализации методики удаленного полосового анализа вибросигнала ГПА на базе штатного оборудования в виде разработки системы вибромониторинга двигателей ДР59Л и АЛ-31СТ.

На основе положений из Главы 2, была разработана методика полосового анализа для ГПА КС-19А «Шаран» ООО «Газпром трансгаз Уфа» со штатными датчиками системы виброконтроля типа ИВ-Д-ПФ в составе САУиР, в том числе реализована структурная схема системы удаленного вибромониторинга конвертированного судового газотурбинного двигателя ДР59Л (Рисунок 1).

В рамках реализации разработанной методики спроектирован и реализован прототип блока спектрального анализа (БСА), предназначенный для спектральной оценки вибросигналов с возможностью передачи результатов в диагностические системы верхнего уровня САУиР ГПА (Рисунок 2, а). Прототип БСА откалиброван на поверенном вибростенде типа ТИК-VV (производства НПП «ТИК» г. Пермь). В ходе лабораторных исследований выявлено, что отклонения

значений СКЗ блока на заданных амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) рабочей частоты 80 Гц от эталонных стендовых значений не превышают 3%.

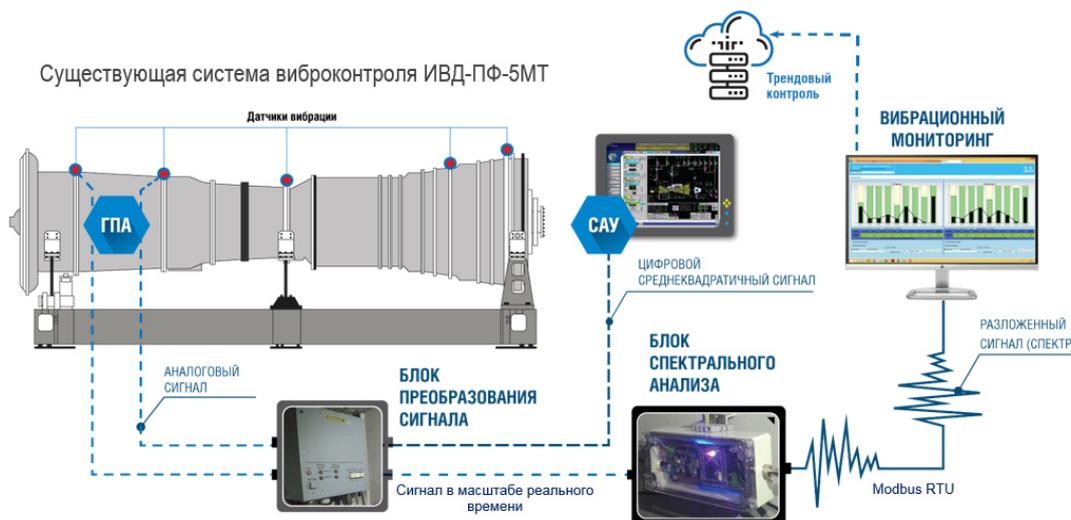
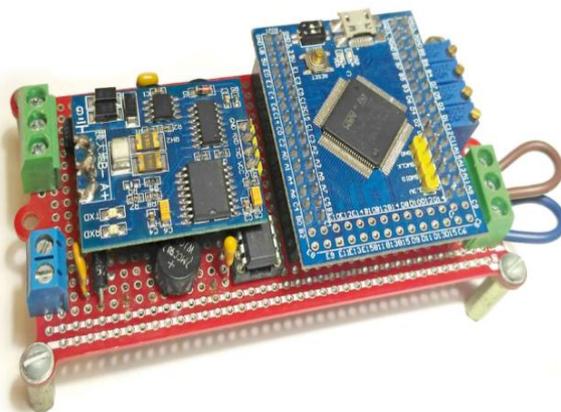


Рисунок 1 – Структурная схема разработанной системы удаленного вибромониторинга ДР59Л

а)



б)



1 – блок преобразования сигнала БЭ-38 (в составе ИВД-ПФ-5МТ); 2 – БСА
Рисунок 2 – Прототип (а) и опытный образец БСА (б) интегрированный в штатную систему виброконтроля САУиР ГПА ст. № 33 КС-19А «Шаран»

С целью проверки корректности работы БСА в условиях КС были проведены эксплуатационные 72 часовые испытания на ГПА ст. № 33 КС-19А «Шаран» с последующим снятием вибросигнала с двигателя зав. № Д00298557 и выводом полученных результатов в систему трендового контроля (Рисунок 2, б). Корректность работы системы проверялась путем сравнения полученных СКЗ виброскорости в восьми полосах контроля с результатами аналогичных замеров

переносным виброанализатором типа АСДО-ВА-04 в одной и той же точке контроля уровня вибрации (передняя и задняя опора компрессора низкого давления). Отклонения амплитудных характеристик оборотных частот в диапазоне 10-400 Гц составили не более 2,2%. Соответственно установлено, что штатная система виброконтроля, доработанная БСА, может применяться для первичного вибромониторинга и диагностирования двигателей ДР59Л с целью раннего выявления ухудшения их технического состояния.

Таким образом, интегрированный в САУиР ГПА блок спектрального анализа расширил функциональные возможности штатной системы виброконтроля на счет внедрения дополнительной спектральной оценки временных сигналов вибрации, удаленной передачей диагностических данных и возможности проводить полосовой мониторинг и диагностику ГТД.

На основании результатов апробации системы удаленного вибромониторинга судового газотурбинного двигателя ДР59Л разработана аналогичная система для перспективных авиационных двигателей типа АЛ-31СТ, входящих в состав ГПА-16Р «Уфа». В результате практической работы весь парк двигателей АЛ-31СТ (17 ед.) ООО «Газпром трансгаз Уфа» укомплектован БСА. Дополнительно к этому разработана подпрограмма для вибромониторинга двигателей в системе трендового контроля с возможностью удаленной передачи результатов спектрального анализа.

В ходе практического применения системы, проведен анализ 23 дискретных составляющих спектра вибрации штатных датчиков, предшествующих трем аварийным остановам на ГПА КС «Москово». В результате анализа выявлены дефектные признаки и типовой характер изменения вибрации отдельных составляющих спектра, фиксируемых системой в момент отказа. Данный опыт был применен при идентификации дефекта типа «расцентровка роторов КНД и ТНД» на газотурбинном двигателе АЛ-31СТ в составе ГПА-16Р «Уфа» на КС-5 «Москово» до момента разрушения узлов и сопутствующего аварийного останова.

В четвертой главе разработаны вибрационные модели дефектов ГТД типа ДР59Л и АЛ-31СТ. Вибрационные модели включает в себя полосовые нормы вибрации, критерии оценки технического состояния, а также алгоритмы выявления эксплуатационных дефектов.

Для двигателей ДР59Л вибрационная модель строилась путем доработки и совершенствования имеющейся заводской методики полосового виброконтроля. Предложены три уровня (критерия) оценки технического состояния ГТД средствами разработанной системой вибромониторинга.

Первый уровень контроля заключается в контроле следующих параметров:

$$\begin{cases} V_{\text{общ}} < V_{\text{н}}^4; \\ V_{\text{общ}} < V_{\text{кр}}^4 + 5 \text{ мм/с}; \\ V_4 < 11 \text{ мм/с}; \end{cases} \quad (3)$$

где $V_{\text{общ}}$ – СКЗ общего уровня вибрации ГТД; $V_{\text{кр}}^4$ – эталонное значение СКЗ виброскорости в 4-й полосе после капитального ремонта; V_4 – текущее значение СКЗ уровня вибрации в 4-й полосе.

Второй уровень контроля ТС включает в себя качественный анализ спектра или заданных полос, а именно контроль отсутствия превышения уровня 1 полосы относительно 3-й полосы; 1-й относительно 4-й; 6-й относительно 3-й; 7-й относительно 4-й; 8-й относительно 4-й; 8-й относительно 7-й (Рисунок 3).

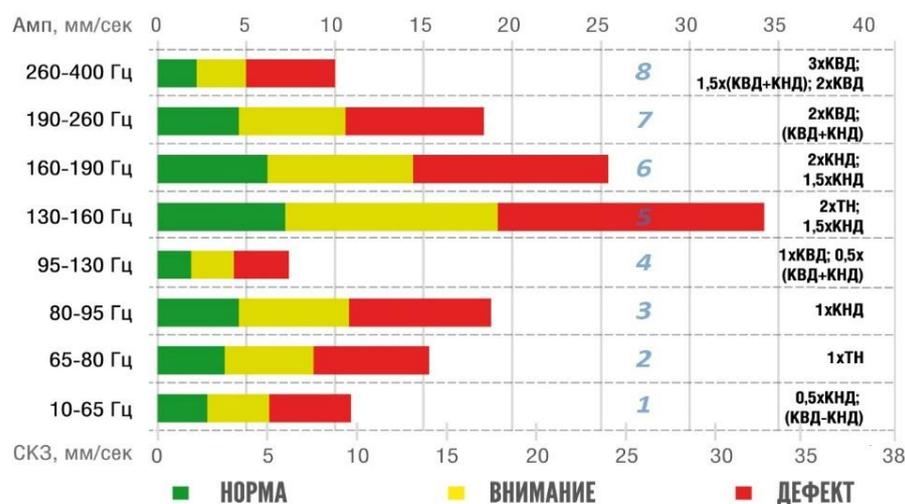
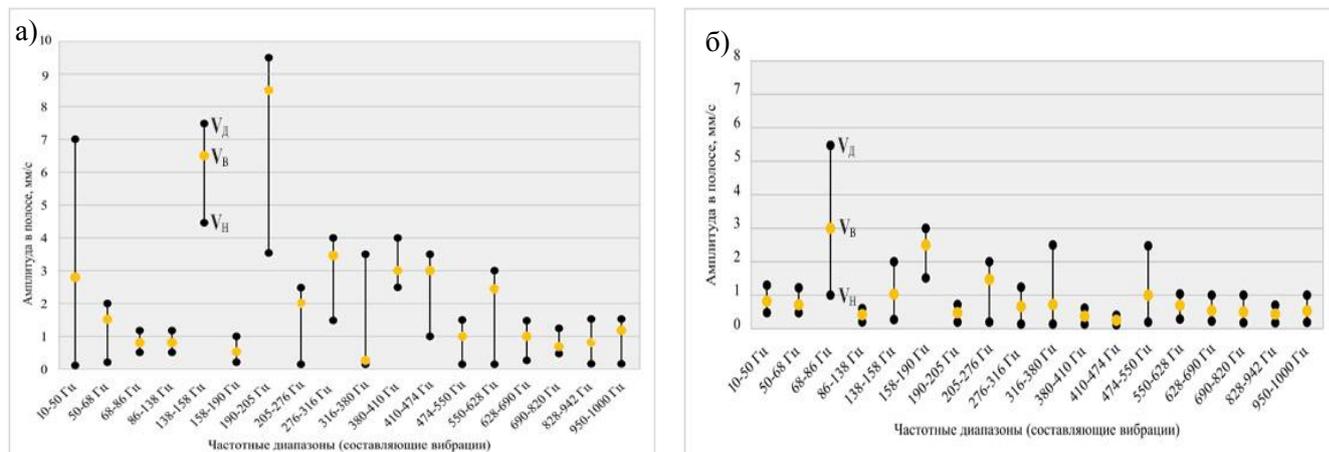


Рисунок 3– Полосовой анализ вибрации двигателя ДР59Л

Третий уровень контроля ТС предусматривает разработку системы определяющих критериев неисправностей, основанных на рекомендациях завода-изготовителя, практическом опыте диагностирования двигателей в эксплуатации и базовых правилах выявления дефектов по вибросигналу. Дополнительно к алгоритмам основных механических дефектов произведен расчет подшипниковых частот двигателя существенно расширяющих базу дефектов двигателя.

Основой для разработки вибрационной модели дефектов двигателя АЛ-31СТ стал статистический анализ диагностических данных, полученных при 154 расширенных виброобследованиях на различных этапах эксплуатации в период с 2016 по 2019 гг. по всему парку (17 ед.) на КС ООО «Газпром трансгаз Уфа».

По результатам расчета пороговых значений виброскорости в каждой полосе контроля (формулы 1-3) построены маски спектра датчиков вибрации модуля газогенератора (ГГ) и силовой турбины (СТ) (Рисунок 4).



Максимальные значения виброскоростей (V_d) соответствуют развитому «дефектному» состоянию конкретного узла, минимальные (V_n) – «бездефектному», среднее (V_b) – начальной стадии развития дефекта.

Рисунок 4 – Маски спектров исторических данных по корпусу ГГ (а) и СТ (б) газотурбинного двигателя АЛ-31СТ

Проведенный статистический анализ виброобследований парка ГТД, спектральный анализ предаварийных двигателей, расчет подшипниковых частот, а также полученные опытно-расчетным методом полосовые нормы вибрации, позволяют систематизировать дефектные признаки двигателя и формализовать

его вибрационную модель дефектов (вибропаспорт) газогенератора и силовой турбины (Таблица 1).

Таблица 1 – Установленные амплитуды составляющих вибрации для проведения контроля параметров вибрации АЛ-31СТ

Диапазон частот, Гц	Расчетная частота $f_{\text{КОНТ}}$, Гц	Виброскорость, мм/с			Тип дефекта
		Норма ($V_{\text{н}}$)	Внимание ($V_{\text{в}}$)	Дефект ($V_{\text{д}}$)	
Газогенератор АЛ-31СТ					
50-68	f_{FTF1}	0,3	1,7	2,0	Разрушение подшипника задней опоры КНД
68-86	f_{FTF2}	0,3	0,7	1,2	Разрушение подшипника передней опоры КВД
86-138	f_{FTF3}	0,5	0,7	1,2	Разрушение подшипника передней опоры ТНД
138-158	f_1	4,5	6,5	7,5	Дисбаланс РНД, дефект опор РНД
158-190	$f_{\text{ЦС}}$	0,2	0,5	1,0	Дефект маслосистемы двигателя
190-205	f_2	3,5	8,5	9,5	Дисбаланс РВД, дефект опор РНД
205-276	$1,193 \times f_2$	1,5	2,0	2,5	Дефект центральной конической передачи, дефект навесного агрегата двигателя
276-316	$2 \times f_1$	1,5	3,5	4,0	Расцентровка РНД
380-410	$2 \times f_2$	2,5	3,5	4,0	Расцентровка РВД, низкая загрузка РВД (аэродинамический дисбаланс)
410-474	$3 \times f_1$	1,0	3,0	3,5	Ослабление опор РНД
550-628	$3 \times f_2$	1,0	2,5	3,0	Ослабление опор РВД
628-690	f_{BSF1}	0,3	1,0	1,5	Повреждения подшипника задней опоры КНД
690-820	f_{BSF2}	0,3	0,7	1,5	Повреждения подшипника передней опоры КВД
Силовая турбина АЛ-31СТ					
10-50	f_{FTF1}	0,5	0,8	1,3	Разрушение роликового подшипника задней опоры СТ
50-68	f_{FTF2}	0,5	0,7	1,2	Разрушение шарикоподшипника задней опоры СТ
68-86	f_3	1,0	3,0	5,5	Дисбаланс СТ, дефект опор СТ
158-190	$2 \times f_3$	2,0	2,5	3,0	Расцентровка РСТ
205-276	$3 \times f_3$	0,5	1,5	2,0	Ослабление опор СТ
276-316	f_{BSF2}	0,5	0,7	1,2	Повреждения шарикоподшипника задней опоры СТ
550-628	f_{BSF1}	0,2	0,5	1,0	Повреждения роликоподшипника задней опоры СТ
628-690	f_{BPFO1}	0,2	0,5	1,0	Повреждения шарикоподшипника задней опоры СТ
690-820	f_{BPFO2}	0,2	0,5	1,0	Повреждения шарикоподшипника задней опоры СТ
950-1000	$3,77 \times f_2$	1,0	2,0	3,0	Помпажные явления в КВД

Таким образом, контроль технического состояния опор и роторов ГТД АЛ-31СТ осуществляется непрерывным контролем за 23 разработанными параметрами узкополосных составляющих вибрации в режиме реального времени.

Определено, что внедрение системы вибромониторинга в штатное оборудование КС позволит повысить полноту диагностирования в 3,5 раза по сравнению с действующими методами контроля вибрации ГТД.

Статистический анализ данных показал, что существующие предельные нормы вибрации значительно выше среднестатистических расчетных. Эксплуатация двигателя при повышенных нормах вибрации снижает ресурс ГПА и может привести к внезапному аварийному останову на различных стадиях эксплуатации, что часто наблюдается на практике. В связи с этим на основе полученных статистических данных по методу минимальных рисков рассчитаны предельные значения вибрации по общему (широкополосному) уровню виброскорости (Таблица 2).

Таблица 2 – Скорректированные нормы вибрации

Обозначение	Наименование параметра	Нормы СКЗ виброскорости, мм/с		
		Допустимо	Требуется принятия мер	Недопустимо
$V_{\text{сумм}}$	Общий уровень вибрации (широкополосный)	20	24	28

Предложенные нормы вибрации на 48% ниже норм СКЗ, указанных в документации на двигатель. Таким образом, сокращается время срабатывания аварийной сигнализации на 51%, что снижает риск разрушения узлов и потери работоспособности ГПА.

При дальнейших исследованиях, разработанные и внедренные системы вибромониторинга ДР59Л и АЛ-31СТ могут стать основой для перехода на обслуживание ГПА по техническому состоянию, а предложенные полосовые нормы вибрации могут быть использованы в составе отраслевого стандарта по контролю вибросостояния исследуемых типов ГТД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ опыта эксплуатации ГПА в условиях работы сверх назначенного заводского ресурса и высокой производительности показал, что для обеспечения надежной работы оборудования требуется повышение эффективности диагностики, снижение вероятности пропуска дефекта и ложного срабатывания при сохранении уровня информационной безопасности. В связи с этим решением данной проблемы может стать разработка новых методик и систем удаленного диагностирования ГПА (ГТД) на базе штатного оборудования КС.

2 Разработаны методики нормируемого и ненормируемого удаленного полосового анализа вибрационного сигнала ГПА с любым типом ГТД (в том числе эксплуатируемого сверх назначенного ресурса), реализуемые на базе имеющихся вычислительных ресурсов КС. В рамках разработанных методик предложены алгоритмы создания полосовых норм на основе статистических данных вибрационных обследований парка ГТД. Предложена методика удаленного вибромониторинга центробежного компрессора ГПА по отклонению вибрационных характеристик подшипников ЦБК от базовой линии, и разработан соответствующий перечень диагностирующих признаков.

3 Для апробации разработанных методик нормируемого и ненормируемого удаленного полосового анализа вибрационного сигнала ГПА в условиях КС на базе предложенных структурных схем и алгоритмов реализации вибромониторинга двигателей ДР59Л и АЛ-31СТ спроектирован и изготовлен блок спектрального анализа, интегрированный в штатную систему виброконтроля типа ИВ-Д-ПФ. По результатам апробации установлено, что разработанные системы вибромониторинга без глубокой модернизации позволяют проводить удаленный поузловой контроль технического состояния опор и роторов ГТД мониторингом 23 параметров узкополосных составляющих вибрации и 8 полос контроля, выполнять оценку вибросостояния и выявлять первичные признаки 9 основных дефектов двигателя ДР59Л и 23 основных механических дефектов привода АЛ-31СТ на ранних стадиях развития. Во время опытно-промышленной

эксплуатации разработанная система позволила заблаговременно идентифицировать дефект типа «расцентровка роторов КНД и ТНД» на газотурбинном двигателе АЛ-31СТ в составе ГПА-16Р «Уфа» на КС-5 «Москово» до момента разрушения узлов и сопутствующего аварийного останова, что привело к экономическому эффекту в 25,3 млн. руб.

4 Установлены вибрационные критерии дефектного состояния ГТД типа ДР59Л и АЛ-31СТ. В частности, определены определяющие критерии неисправностей узлов ГТД типа ДР59Л, адаптированные под полосовые нормы заводской методики вибрационного контроля для оценки его технического состояния в режиме реального времени. Дополнительно к этому разработана база данных механических дефектов, адаптированных как под функциональные возможности штатной системы виброконтроля, так и под требования утвержденной методики. Для ГТД типа АЛ-31СТ на основе статистического анализа разработана вибрационная модель, включающая полосовые нормы вибрации по 23 узкополосным составляющим спектра вибрации газогенератора и силовой турбины двигателя, а также перечень поузловых дефектных признаков (правила определения неисправностей), характеризующих рост вибрации в двигателе.

Предложенные методики удаленного полосового анализа вибрационного сигнала ГПА в режиме реального времени на базе штатного оборудования позволили расширить функциональные диагностические возможности, увеличить полноту диагностирования штатной системы виброконтроля в 3,5 раза, снизить средние значения вероятностей ложной тревоги в полосах контроля до 5,8%, пропуска дефекта до 0,2%, и риска (ожидаемой величины потери) до 6% по сравнению с существующей системой диагностирования ГПА.

По теме диссертационного исследования опубликованы 22 научные работы:

учебное пособие:

1. Валеев, А.Р. Техническая диагностика нефтегазоперекачивающего оборудования: учебное пособие / А.Р. Валеев, М.М. Велиев, Э.М. Велиев, О.М. Саубанов, Т.А. Хакимов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. -90 с.

- статьи в изданиях, индексируемых в Scopus:

2. Saubanov O. The Monitoring System of an Actual Technical Condition for Pumping Units with Frequency Analysis / Saubanov O., Valeev A. // Procedia Engineering, Volume 176, 2017, 144-149

3. Saubanov O. Developing a Complex Approach to the Definition of a Technical Condition of Pump-and-Compressor Equipment., Saubanov O., Valeev A., Akimov V. International science and technology conference "Earth Science". IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 459-2020-237-244 p.

патент РФ:

4. Пат. 2644646 РФ, МПК G01M 15/00. Способ диагностики технического состояния роторного оборудования / А.Р. Валеев, О.М. Саубанов, Р.М. Харисов (РФ). - № 2017117320; Заявл. 18.05.2017, Оpubл. 13.02.2018. Бюл. №17.

статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования:

5. Саубанов, О. М. Перспективы внедрения автоматизированной системы контроля фактического состояния насосного оборудования / А.Р. Валеев, О. М. Саубанов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 2014. - № 4. - С. 19-23.

6. Романенков, П.Г. Селективный подбор рабочих лопаток турбины высокого давления авиационных приводов с учетом частот собственных колебаний / П. Г. Романенков О.М. Саубанов [и др.]. // Газовая промышленность. - 2017. - № 11. - С. 62-66.

7. Саубанов, О. М. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насосно-компрессорного оборудования / О. М. Саубанов [и др.] // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 2019. - № 2. - С. 30-35. - DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10206.

8. Саубанов, О. М. Апробация вероятностно-статистического метода принятий решений при составлении полосовых норм корпусной вибрации газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов / А. Р. Валеев, В.И. Акимов, О.М. Саубанов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 2021. - № 4. - С. 5-11. - DOI: 10.24412/0131-4270-2021-4-5-11.

- тезисы конференций:

9. Саубанов, О. М. Способы устранения вибрации на нефте- и газоперекачивающих агрегатах / О. М. Саубанов // Актуальные проблемы науки и техники: Сб. тр. V Междунар. заоч. науч.-практ. мол. ученых, ноябрь 2012 г. / УГНТУ. - Уфа, 2012. - Т.1. - С. 149-150.

10. Саубанов, О. М. Основные средства защиты от вибрации на объектах перекачки нефти и газа / О. М. Саубанов // Актуальные проблемы науки и техники: VI междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы для молодежи / УГНТУ. - Уфа, 2013. - Т.1. - С. 45-46.

11. Саубанов, О. М. Система контроля фактического технического состояния газоперекачивающего агрегата с элементами частотного анализа / О. М. Саубанов // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): тез. докл. одиннадцатой Всерос. конф. молодых ученых, специалистов и студентов, 20-23 окт. 2015 г. / РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. - М., 2015. - С. 277.

12. Саубанов, О. М. Перспективы внедрения автоматизированной системы контроля фактического технического состояния насосного оборудования / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // 66-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. материалов конф. / УГНТУ. - Уфа, 2015. - Кн. 3. - С. 186-187.

13. Саубанов, О. М. Перспективы внедрения автоматизированной системы контроля фактического технического состояния насосного оборудования / О. М. Саубанов // Трубопроводный транспорт-2016: материалы XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. - Уфа, 2016. - С. 135-136.

14. Саубанов, О. М. Разработка комплексной системы непрерывного контроля и диагностики технического состояния насосно-компрессорного оборудования / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти

академика А. Х. Мирзаджанзаде : сб. тез., Уфа, 16-18 ноября 2016 г. / УГНТУ. - Уфа, 2016. - С. 146-147.

15. Саубанов, О. М. Перспективы внедрения автоматизированной системы контроля фактического технического состояния насосного оборудования / О. М. Саубанов; рук. работы А. Р. Валеев // Нефть и газ-2016: сб. тез. юбилейн. 70-й Междунар. молодеж. науч. конф. / РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. - М., 2016. - Т. 1. - С. 450.

16. Саубанов, О. М. The Monitoring System of an Actual Technical Condition for Pumping Units with Frequency Analysis / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // Procedia Engineering. - Самара, 2017. - Vol. 176: материалы третьей междунар. науч.-техн. конф., 29 июня-1 июля 2016 г. Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines. - С. 144-149.

17. Саубанов, О. М. Совершенствование системы комплексного контроля и диагностики фактического технического состояния насосно-компрессорного оборудования / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // Трубопроводный транспорт-2017: тез. докл. XII Междунар. учеб.-науч.-практ.-конф. / УГНТУ. - Уфа, 2017. - С. 174-176.

18. Саубанов, О. М. История развития методов и средств диагностики и мониторинга технического состояния газоперекачивающего оборудования / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // Современные проблемы истории естествознания в области химии, химической технологии и нефтяного дела: материалы XV Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию Республики Башкортостан, Уфа, 25 окт. 2017 г. / УГНТУ. - Уфа, 2017. - С. 166-167.

19. Саубанов, О. М. Разработка методики определения оптимальной периодичности промывки проточной части осевых компрессоров газотурбинных приводов в составе ГПА / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // Трубопроводный транспорт-2018 : тез. докл. XIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. - Уфа, 2018. - С. 117-119.

20. Яппаров, Т. Ф. Разработка вибродиагностических признаков длительно эксплуатируемых газоперекачивающих агрегатов (установок) на основе статистического анализа / Т. Ф. Яппаров, Т. В. Дмитриева, О. М. Саубанов // Трубопроводный транспорт-2018 : тез. докл. XIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. - Уфа, 2018. - С. 152-154.

21. Саубанов, О. М. Оценка технического состояния газотурбинных двигателей с продленным назначенным ресурсом / О. М. Саубанов, А. Р. Валеев // Научно-технологические решения проблем нефтегазового комплекса: материалы VIII Междунар. молодеж. науч. конф., Уфа, 10-14 дек. 2018 г. / БашГУ. - Уфа, 2018. - Ч. 1. - С. 264-268.

22. Яппаров, Т. Ф. Разработка вибродиагностической модели длительно эксплуатируемых газоперекачивающих агрегатов (установок) на основе статистического анализа / Т. Ф. Яппаров, О. М. Саубанов // Трубопроводный транспорт - 2019: тез. докл. XIV Междунар. учеб.-науч.-практ. конф., 23-24 мая 2019 г. / УГНТУ. - Уфа, 2019. - С. 424-425.