

М 484781

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ
Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ПОНОМАРЕВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК 621.08:658.562

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Специальность 08.00.20 - "Стандартизация и управление
качеством продукции"

05.04.06 - "Компрессорная и вакуумная
техника"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1988

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

ВИНОГРАДОВ А.Н.

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
НЕВЕДОВ В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ШИЛЯРСКИЙ Л.Ф.
кандидат технических наук, доцент
МОРОЗОВ Б.М.

Ведущая организация: Всесоюзный научно-исследовательский
Институт по нормализации в машино-
строении

Защита состоится "10" 09 1989г. в 1430 часов
на заседании специализированного Совета К 053.15.16 в Московском
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

ке МВТУ им.

Н.Э

ю, просим

нап

M 484781

АДОВСКАЯ

с
К
Т
П

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года"; принятых на XXVII съезде КПСС, ставится задача повышения технического уровня и качества продукции машиностроения.

Эта задача весьма актуальна в энергомашиностроении; на долю которого приходится до 15% всей продукции машиностроения, и в частности, для центробежных турбокомпрессоров, предназначенных для наддува комбинированных двигателей внутреннего сгорания больших мощностей, применяемых для привода тепловозов, кораблей, судов, буровых и других энергетических установок. Возрастающее значение в народном хозяйстве железнодорожного транспорта увеличивает потребность в производстве двигателей внутреннего сгорания и элементов турбонаддува, которые должны отличаться высокой надежностью, экономичностью, малой энергоемкостью и металлоемкостью, стабильностью основных показателей качества.

В настоящее время качество отечественных центробежных турбокомпрессоров по параметрам, которые определяют показатели надежности и безотказности, уровни вибрации не всегда соответствует возрастающим требованиям энергетики и уступает лучшим зарубежным образцам.

Отклонение показателей качества от расчетных значений во многом определяется выбором и обеспечением величин зазоров между лопатками и корпусом в компрессоре и турбине, зазоров в уплотнениях и подшипниках жидкостного трения, отклонений от соосности подшипниковых узлов, а также амплитуд колебаний лопаток рабочего колеса центробежного турбокомпрессора. Однако, несмотря на то, что на заводах точность изготовления деталей и сборочных единиц по параметрам, определяющим величину и точность зазоров, строго регламентирована, имеет место значительное количество отказов турбомашин.

Анализ литературных и производственных данных показывает, что одним из важнейших конструктивных параметров, регламентирующих надежность турбомашин и двигателя в целом, является отклонение от соосности подшипниковых узлов. Однако на заводах-изготовителях допуск на величину отклонения от соосности подшипниковых узлов не установлен.

Необходимость значительного повышения технического уровня

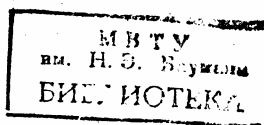
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1484781

Пономарев Н.Н. Разработка и



и стабильности показателей качества выдвигает задачу разработки научно-обоснованных методов повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров. Разработка таких методов позволяет выявить и реализовать значительный резерв улучшения качества центробежных турбокомпрессоров, что и определяет актуальность рассматриваемой проблемы.

Целью работы является исследование и разработка точностных методов повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров на стадии проектирования, позволяющих уменьшить рассеяние выходных показателей качества за счет назначения рациональной точности конструктивных параметров деталей и сборочных единиц.

Методы исследований. При проведении исследований были использованы основные положения теории точности, теории надежности, теории прочности, теории вероятности и математической статистики; теории дифференциальных уравнений, гидродинамическая теория смазки.

Расчеты проводились на ЭВМ ЕС 1020 с использованием современных методов программирования.

Измерения точностных геометрических параметров деталей и сборочных единиц центробежного турбокомпрессора, выходных параметров проводились с использованием современной измерительной техники.

Научная новизна. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлены закономерности формирования качества и разработаны методы повышения технического уровня центробежных турбокомпрессоров.

Разработаны теоретические методы расчета траекторий движения центра ротора с учетом погрешностей расположения подшипниковых узлов центробежных турбокомпрессоров.

Разработана математическая модель формирования качества центробежных турбокомпрессоров, позволяющая на стадии проектирования определить поле рассеяния единичного показателя качества центробежного турбокомпрессора в зависимости от отклонений конструктивного параметра.

Разработаны методики экспериментальных исследований по определению траекторий движения центра ротора, по измерению величин отклонений от соосности деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров.

Разработана методика и внедрены средства измерения амплитуд колебаний лопаток рабочего колеса центробежных турбокомпрессоров.

Практическая ценность работы и ее реализация. На основании проведенных исследований разработаны методы повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров комбинированных двигателей внутреннего сгорания, включающие методику точностных расчетов деталей и сборочных единиц с учетом технологических погрешностей изготовления, а также силовых и температурных деформаций.

Результаты работы положены в основу СТП: "Функциональная взаимозаменяемость деталей турбокомпрессоров типа 6ТК", позволяющего практически решать проблему повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров.

Внедрение теоретических и экспериментальных исследований на ПО "Коломенский завод" им. В.В.Куйбышева позволило получить годовой экономический эффект в сумме 234 тыс. рублей, за счет увеличения средней наработки до отказа на 15%, а также за счет сокращения времени расчетных работ при конструировании и времени доводки центробежных турбокомпрессоров при изготовлении.

Апробация работ. Результаты работы доложены и обсуждены на V Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции, посвященной 150-летию МВТУ им. Н.Э.Баумана /1979г./ и на научно-методических семинарах кафедры "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ им. Н.Э.Баумана /1980-1987 гг./

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 4 статьях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 88 названий и приложений. Основной текст диссертации содержит 92 страницы машинописного текста, 42 рисунка, 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дается характеристика центробежных турбокомпрессоров, анализ литературных и производственных данных по повышению качества изделий машиностроения и формируются основные задачи исследования.

Основные теоретические положения и практические рекоменда-

ции по управлению качеством в машиностроении, разработанные советскими учеными Бойцовым В.В., Ткаченко В.В., Якушевым А.И. и др., указывают на необходимость создания оптимального соотношения между различными показателями качества изделий с целью получения максимального экономического эффекта от их эксплуатации и потребления. Отмечается, что проектирование является одной из важнейших стадий "жизненного цикла" изделий. Методы управления качеством на этой стадии, разработанные советскими учеными Балакиным Б.С., Бородачевым Н.А., Тайцем Б.А., Якушевым А.И. и др. требуют изучения качественных и количественных взаимосвязей точности конструктивных параметров деталей и сборочных единиц с показателями качества при эксплуатации изделий.

Развитию этих положений в области энергомашиностроения посвящены работы Калитенко В.Г., Виноградова А.Н. и др. авторов, в которых сделана попытка создания единой методики нормирования точности конструктивных параметров изделий компрессоростроения, исходя из требуемых показателей качества. Однако, до настоящего времени не созданы и не стандартизованы типовые методы расчета точности конструктивных параметров по показателям качества в компрессоростроении, в том числе и для центробежных турбокомпрессоров.

Качество функционирования центробежных турбокомпрессоров, кроме надежности и безотказности, характеризуется выходными параметрами, к которым относятся: траектории движения центра ротора, уровни вибрации и температура антифрикционного слоя подшипников скольжения. Конструктивные параметры подшипниковых узлов не только оказывают существенное влияние на выходные параметры, но и определяют среднюю наработку до отказа самих подшипников, специфика работы которых характеризуется значительной пульсирующей нагрузкой, переменной по направлению и высокими частотами вращения /до 2250 рад/с/. Анализ литературных источников показал, что применяемые в настоящее время методы расчетов подшипников центробежного турбокомпрессора не учитывают действия таких факторов, как погрешностей расположения, износа и старения посадочных мест подшипников. Вопросы влияния погрешностей расположения на несущую способность подшипника скольжения изучались в работах Коровчинского М.В., Поздова И.Н. и др. авторов. Однако полностью использовать их рекомендации для оценки выходных параметров центробежных турбокомпрессоров не представляется возможным. Вследствие этого

методика расчета выходных параметров требует своего дальнейшего развития и совершенствования.

Одной из особенностей развития современных методов расчета является требование оценки безотказности изделия, как одного из основных свойств надежности, которое характеризует процесс изменения функционального состояния центробежного турбокомпрессора во времени.

Теоретические основы и методы оценки надежности изделий машиностроения, разработанные Гнеденко Б.В., Кордонским Х.В., Прониковым А.С. и др. позволяют применить их основные положения для оценки безотказной работы как функции времени и скорости изменения конструктивного параметра. Однако, разработанные методы не в полной мере отражают специфику формирования показателей качества функционирования центробежных турбокомпрессоров, что требует дальнейшего совершенствования методов расчета надежности изделий при учете изменения точности деталей и сборочных единиц в процессе эксплуатации.

Проведенная автором статистика отказов показала, что значительная часть турбомашин выходит из строя в результате вибрационных поломок лопаток. Анализ литературных данных показал, что причиной поломок лопаток являются их резонансные колебания, вызванные переменными аэродинамическими силами. Изучением этих колебаний занимались Жирицкий Г.С., Скубачевский Г.С. и другие авторы. Однако, до настоящего времени проблема изучения амплитуд колебаний лопаток в отечественном компрессоростроении не решена. В силу этого разработка эффективного метода измерения амплитуд колебаний лопаток рабочих колес является насущной задачей компрессоростроения.

Наряду с исследованием взаимосвязей показателей надежности и безотказности с конструктивными параметрами деталей и сборочных единиц одной из основных задач является дальнейшая разработка методов и средств измерения величин отклонений от соосности.

Анализ работ Розенберга Э.И., Эфроса И.Е. и др. авторов по средствам измерения величин отклонений от соосности показал, что они не универсальны, а применяемый на заводах отрасли метод контроля с использованием калибров не позволяет измерить действительное значение отклонения от соосности подшипниковых узлов центробежных турбомашин, а только проверить собираемость деталей и сборочных единиц. Отсутствие контроля точности выпускаемых цент-

робежных турбомашин приводит к тому, что эксплуатирующим организациям поставляют продукцию с низким уровнем качества, что приводит к неоправданным эксплуатационным затратам.

На основании вышеизложенного в настоящей работе ставятся следующие задачи исследований:

1. Разработать методы повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров до уровня требований, предъявляемых комбинированными двигателями внутреннего сгорания;

2. Исследовать влияние величины отклонения от соосности на выходные параметры центробежных турбокомпрессоров;

3. Разработать расчетную математическую модель для прогнозирования величины и стабильности показателей качества на этапе проектирования с учетом изменения точности конструктивного параметра в процессе эксплуатации.

4. Провести измерения траекторий движения центра ротора, температуры антифрикционного слоя подшипников, уровней вибраций центробежного турбокомпрессора.

5. Разработать методику и внедрить средства измерения амплитуд колебаний лопаток рабочего колеса центробежных турбокомпрессоров.

6. Внедрить средства измерения отклонений от соосности деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров.

7. Разработать и внедрить рекомендации по назначению точности конструктивных параметров в производство центробежных турбокомпрессоров.

Во второй главе приведены результаты теоретического исследования влияния конструктивных параметров на качество функционирования центробежных турбокомпрессоров и разработки математической модели функционирования.

Исследование влияния точности конструктивных параметров на погрешность показателей качества функционирования системы проводилось при помощи структурной модели, разработанной с применением системного подхода.

В соответствии с иерархической структурой системы повышения качества, целью управления является обеспечение стабильности показателей качества. Размер показателей качества системы в свою очередь определяется размерами параметров ее элементов и функциональными связями между ними. В общем виде зависимость показателя качества функционирования центробежного турбокомпрессора

ра от указанных параметров может быть выражена следующим уравнением:

$$F_j = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_N) \quad (1)$$

где $F_j, X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_N$ — соответственно показатель качества функционирования системы и параметры ее элементов.

Установлено, что влияние точности конструктивных параметров деталей и сборочных единиц на показатели качества центробежных турбокомпрессоров осуществляется через изменение выходных параметров. Анализ процесса функционирования центробежного турбокомпрессора позволил установить, что на выходные параметры оказывают влияние одни и те же конструктивные параметры, например, величина отклонения от соосности подшипниковых узлов.

Определение оптимального значения функции F_j позволяет установить и рекомендовать для изготовления пределы наиболее рациональных значений величин отклонений от соосности $\Delta \xi$, которые обеспечивают заданные отклонения показателя качества функционирования, а именно:

$$F_{jmin} \leq F_j \leq F_{jmax}$$

где F_{jmin}, F_{jmax} — допустимые значения j -го показателя качества функционирования системы.

Для определения взаимосвязи конструктивного параметра с показателем качества функционирования выполнен анализ процесса изменения функционального состояния центробежного турбокомпрессора до отказа по одному из выходных параметров — траектории движения центра ротора. Исходными для гидродинамического расчета подшипников скольжения являются уравнения движения центра ротора:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\epsilon\omega^2 \cos\omega t - P_e \cos\gamma - P_f \sin\gamma + mg \\ m\ddot{y} = m\epsilon\omega^2 \sin\omega t - P_e \sin\gamma + P_f \cos\gamma \end{cases} \quad (2)$$

где: m — масса ротора; ω — частота вращения; γ — угол отклонения линии центров от вертикали; P_e, P_f — текущие значения реакций масляной пленки; ϵ — эксцентриситет центра тяжести шипа.

Так как при отклонении от соосности подшипниковых узлов нагрузка на подшипник скольжения концентрируется вблизи торцевой кромки подшипника, то система уравнений (2) решалась для данного сечения, а гидродинамические силы, действующие на ротор, определялись из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{\mu \Delta^3 R}{2S^2} \left[\frac{2x^2(\omega - 2j)}{(1-x^2)^2} + \frac{\pi x(1+2x^2)}{(1-x^2)^{3/2}} \right] \\ P_f &= \frac{\mu \Delta^3 R}{2S^2} \left[\frac{\pi x(\omega - 2j)}{2(1-x^2)^{3/2}} + \frac{4x^2}{(1-x^2)^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

где Δ - величина отклонения от соосности подшипниковых узлов;

После подстановки выражений P_e и P_f в уравнение системы (2) была получена система уравнений, которая затем приводилась к четырём уравнениям первого порядка и решалась на ЭМ ЕС 1020 методом Рунге-Кутты, в результате чего были произведены численные расчёты траекторий движения центра ротора.

Проведенные расчёты позволили установить возрастание абсолютных значений амплитуд колебаний примерно в 2 раза в зависимости от величин отклонений от соосности подшипниковых узлов. Реализация программы на ЭМ позволяет прогнозировать величину и стабильность выходных параметров на стадии проектирования по заданной точности изготовления деталей и сборочных единиц турбомашин.

На основе методов математического описания колебательных процессов и ранее полученных соотношений для гидродинамических реакций масляной пленки были получены уравнения, позволяющие установить математическую взаимосвязь величины отклонения от соосности с вибрациями корпуса. Полученные уравнения позволяют разработать расчетную модель по назначению рациональной точности конструктивного параметра.

Для управления точностью величин отклонений от соосности подшипниковых узлов, как основного функционального параметра центробежного турбокомпрессора, исследовано влияние на него важнейших технологических и эксплуатационных факторов. С этой целью разработана расчетная математическая модель, отражающая процесс изменения точности величин отклонений от соосности подшипниковых узлов в процессе эксплуатации под воздействием указанных факторов и определяющая единичный показатель безотказности изделия - среднюю наработку до отказа.

При построении математической модели были приняты следующие допущения:

- элементы системы находятся в одном из двух несовместимых состояний: работоспособном и неработоспособном;

- отказы элементов системы - независимые случайные события;

- распределение наработки до отказа элементов системы подчинено нормальному закону.

Математическое ожидание случайного процесса изменения диаметра гнезд подшипниковых узлов аппроксимировалось линейной функцией времени. Проверка гипотез о нормальности случайного процесса и об однородности дисперсий в сечениях случайного процесса проводилась с помощью критериев согласия Пирсона χ^2 и Кочрена G .

Анализ статистических данных по износу деталей и сборочных единиц турбомашин в процессе эксплуатации подтверждает правильность разработанной математической модели реальным процессам, позволяющей оценить влияние точности функционального параметра на показатель надежности и безотказности, обоснованно назначать точность функционального параметра, исходя из допустимого рассеяния основных показателей при проектировании центробежных турбомашин.

В третьей главе представлены методика и результаты экспериментальных исследований влияния величин отклонений от соосности подшипниковых узлов на выходные параметры центробежных турбомашин.

При проектировании центробежных турбокомпрессоров считается, что величина отклонения от соосности подшипниковых узлов в процессе эксплуатации имеет постоянное значение. Однако, вследствие наличия неизбежных погрешностей изготовления и сборки, температурных и силовых деформаций функциональные параметры изменяются, что приводит к изменению выходных параметров турбомашин. Методика экспериментальных исследований предусматривала изучение влияния величин отклонений от соосности подшипниковых узлов на выходные параметры турбомашин.

Экспериментальные исследования проводились на центробежном турбокомпрессоре типа БТК, установленном на испытательном стенде производственного объединения "Коломенский завод" им. В.В.Куйбышева.

В ходе эксперимента определялись выходные параметры турбомашин в широком диапазоне изменения частот вращения и величин отклонений от соосности.

Для этой цели были проведены измерения: траекторий движения центра ротора в двух плоскостях при помощи индуктивных преобразователей перемещения/ИПП/, температурных полей рабочих поверхностей подшипников скольжения, уровней вибраций корпуса центробеж-

ного турбокомпрессора в горизонтальной и вертикальной плоскостях с использованием виброакустической аппаратуры "Брюль и Кьер".

Экспериментальные исследования были разделены на четыре этапа. Изменение отклонения от соосности подшипниковых узлов проводилось за счет смещения в вертикальной плоскости опорного подшипника скольжения, при этом величина отклонения от соосности достигала 400% от допуска на диаметр подшипника, что соответствовало максимальному значению величины отклонения от соосности в процессе эксплуатации, частота вращения ротора турбокомпрессора изменялась в эксплуатационных пределах от 628 до 2250 рад/с, температура газа на выходе в турбину при различных частотах вращения выдерживалась в пределах от 823 до 923 К.

Траектория движения центра ротора фиксировалась с помощью регистрирующей фотокамеры с экрана катодного осциллографа С 1-48. Измерения величин отклонений от соосности подшипниковых узлов проводилось прибором модели 8535-4014.

Тарировка ИПП осуществлялась на собранном турбокомпрессоре с помощью специально сконструированных "фальш"-вала и "фальш"-втулок. "Фальш"-вал был изготовлен таким образом, что образовывал практически беззазорное соединение с подшипниками скольжения. На каждый подшипник устанавливалось по четыре ИПП под углом 90° друг к другу, которые соединялись между собой по дифференциальной схеме. Тарировка производилась на собранном турбокомпрессоре с помощью "фальш"-вала, "фальш"-втулок и блока концевых мер длины. Это давало возможность определить величину отклонения луча на осциллографе, соответствующую действительному зазору с учетом всех перекосов и смещений осей подшипниковых узлов. Тарировка производилась несколько раз подряд, и во всех случаях получалось полное совпадение сигналов для каждого из углов поворота.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при изменении параметров режима работы компрессора увеличение величины отклонения от соосности подшипниковых узлов приводило к возрастанию амплитуды колебаний, что объясняется резким перераспределением нагрузок на подшипниковые узлы, сопровождающихся большими ударными воздействиями, которые создают дополнительные вибрации как в самом подшипнике скольжения, так в компрессоре в целом и могут привести к режиму ударной нагрузки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало их удовлетворительную сходимость.

оть.

На основании проведенных экспериментальных исследований были получены зависимости температуры антифрикционного слоя подшипников скольжения и уровня вибраций центробежного турбокомпрессора, от указанного параметра, возникающего при эксплуатации.

Исходя из динамического и температурного состояния подшипниковых узлов и турбокомпрессора в целом установлена допустимая величина отклонения от соосности подшипниковых узлов, которая составила 45 мкм или 353% от допуска на диаметр подшипника.

Значение допустимой величины отклонения от соосности подшипниковых узлов, рассчитанное на основании данных зависимостей, внесено в математическую модель прогнозирования надежности и безотказности центробежных турбокомпрессоров.

Таким образом по результатам экспериментальных исследований установлена возможность снижения уровня вибраций и температуры антифрикционного слоя подшипников скольжения, возникающих при эксплуатации компрессоров, за счет назначения рациональной точности величины отклонения от соосности в сопряжениях подшипниковых узлов.

При работе центробежного турбокомпрессора на испытательном стенде на каждом установившемся режиме, помимо основных выходных параметров, измерению подлежали:

- температура масла на входе в турбокомпрессор и на выходе из него;

- расход масла через турбокомпрессор;
- частота вращения ротора турбокомпрессора;
- давление масла на входе в турбокомпрессор;
- статическое давление газа на входе в турбину и выходе из нее;

- статическое давление воздуха на выходе из компрессора и др.

В четвертой главе представлены методика и результаты экспериментального исследования амплитуд колебаний лопаток рабочего колеса центробежных турбокомпрессоров.

Для определения рациональной точности и обоснованного выбора допусков на амплитуды колебаний лопаток было проведено теоретическое исследование влияния возмущающих сил на такие важней-

шие характеристики рабочих колес, как амплитуда колебаний лопаток рабочего колеса. Исходными для расчета амплитуд колебаний лопаток явились уравнения моментов количества движения воздуха, поступающего в межлопаточный канал.

Измерение колебаний лопаток проводилось по методике Центрального института авиационного моторостроения им. П.И. Баранова с помощью разработанного дискретно-фазового метода /ДФМ/.

Сущность ДФМ состояла в том, что относительные перемещения лопаток измерялись не непрерывно, а в отдельные моменты времени. Затем по полученным дискретным значениям исходный процесс колебаний лопаток "восстанавливался" и производилась оценка колебательного процесса. Основным прибором ДФМ являлось электронно-лучевое устройство, реализованное в виде прибора ЭЛУРА - электронного-лучевого устройства регистрации амплитуд.

Для оценки фактической точности амплитуд колебаний лопаток рабочего колеса в диапазоне частот вращения ротора турбокомпрессора было проведено экспериментальное исследование на испытательном стенде Производственного объединения "Коломенский завод" им. В.В. Куйбышева.

Для регистрации амплитуд колебаний лопаток в окружном направлении применялось электронно-лучевое устройство ЭЛУРА-5. Фотографирование амплитуд колебаний лопаток производилось на частотах вращения ротора турбокомпрессора соответствующих всплескам колебаний лопаток, причем на каждой частоте дважды.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что всплеск колебаний лопаток наблюдался при $\omega = 1651, 1706, 1957, 2055, 2113$ рад/с, а величина амплитуды колебаний находилась в пределах $0,204-0,652$ мм. Наибольшая амплитуда колебаний лопаток в окружном направлении наблюдалась при $\omega = 2055$ рад/с.

Проведенные исследования позволяют на стадии проектирования назначать рациональную точность на амплитуды колебаний лопаток, исходя из требуемой функциональной надежности энергетической машины, что значительно сокращает сроки проектных работ.

Пятая глава посвящена вопросам практического использования разработанных методов повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров комбинированных двигателей внутреннего сгорания, внедрению в промышленность результатов теоретических и экспериментальных исследований, стандартизации методов расчета

точности величин отклонений от соосности подшипниковых узлов, внедрению новых средств измерения и контроля величин отклонений от соосности деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров, расчету экономической эффективности.

Теоретические исследования и разработанные методы расчета основных функциональных параметров турбомашин, проверенные экспериментально, были положены в основу создания стандарта предприятия СТП "Функциональная взаимозаменяемость деталей турбокомпрессоров типа БТК". В СТП изложены общие принципы повышения качества, методика установления взаимосвязи точности выходных параметров турбомашин с точностью конструктивных параметров деталей и сборочных единиц. Выявлены основные конструктивные параметры деталей и сборочных единиц, лимитирующие надежность и безотказность центробежных турбокомпрессоров.

Таким образом, разработанные методы расчета позволяют обеспечить уровень качества центробежных турбокомпрессоров близкий к оптимальному за счет расчета и нормирования рациональной точности основных конструктивных параметров деталей и сборочных единиц.

Расчетные методы могут быть использованы как составные части системы управления качеством на заводах-изготовителях в масштабе отрасли, а также при создании и совершенствовании компрессоров других типов.

Для оценки фактической точности конструктивных параметров деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров автором был апробирован и внедрен новый прибор для измерения отклонений от соосности.

Прибор модели 8535-40I4, разработанный Украинским научно-исследовательским институтом станков и приспособлений, отличается высокой точностью, надежностью и простотой в эксплуатации. Конструкция прибора позволяла получить на базовых измерительных наконечниках малые измерительные усилия, что уменьшало погрешность измерения, которая не превышала 0,5 мкм. Продолжительность одного измерения составляла 60 с.

Применение данного прибора, обладающего преимуществом по сравнению с известными, позволило измерять и контролировать первоначальную точность изготовления и сборки деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров, а также изменение указанной точности под действием температурных и силовых деформаций

при проведении ремонтно-профилактических работ:

На основании теоретических и экспериментальных исследований были разработаны рекомендации по повышению качества центробежных турбокомпрессоров. В частности, для увеличения их безотказности точность расположения поверхностей подшипниковых узлов необходимо ограничить значением величины отклонения от соосности подшипниковых узлов, которая не должна превышать 45 мкм или 353% от допуска на диаметр подшипника.

В настоящее время на Производственном объединении "Коломенский завод" им. В.В.Куйбышева — разработчике и изготовителе комбинированных двигателей внутреннего сгорания внедрены следующие методики и рекомендации:

- рекомендации по допустимым отклонениям расположения подшипниковых узлов турбокомпрессоров;
- методика измерения температурных и вибрационных характеристик центробежных турбокомпрессоров;
- методика измерения величин отклонений от соосности деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров;
- методика измерения амплитуд колебаний лопаток центробежных турбокомпрессоров.

Внедрение результатов исследований позволило значительно улучшить основные показатели качества центробежных турбокомпрессоров. Так, по данным Производственного объединения "Коломенский завод" им. В.В.Куйбышева безотказность компрессоров повысилась на 15%.

Экономический эффект от внедрения результатов исследований на предприятиях Производственного объединения "Коломенский завод" им. В.В.Куйбышева составил 234 тыс. рублей в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Анализ литературных и производственных данных показал, что надежность и экономичность комбинированных двигателей внутреннего сгорания в значительной степени определяются качеством функционирования центробежных турбокомпрессоров. В свою очередь качество функционирования /безотказность, уровни вибрации и др./ зависят от точности изготовления и сборки, применяемых средств технического контроля, а также температурных и силовых деформаций деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров.

2. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что погрешность изготовления деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров приводит к изменению параметров и к рассеянию основных показателей качества центробежных турбокомпрессоров.

3. На основании гидродинамической теории смазки получены аналитические зависимости для выходных параметров центробежных турбокомпрессоров с учетом влияния погрешностей расположения подшипниковых узлов. Проведенные на ЭЭМ расчеты позволили определить возрастание абсолютных значений амплитуд колебаний ротора примерно в 2 раза в зависимости от величины отклонений от соосности подшипниковых узлов. Применение методики позволяет управлять качеством сопряжений подшипниковых узлов посредством регламентирования величин отклонений от соосности, обеспечивающих минимальные амплитуды колебаний ротора при эксплуатации центробежного турбокомпрессора.

4. В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы повышения качества функционирования центробежных турбокомпрессоров, основанные на рациональном назначении точности конструктивных параметров деталей и сборочных единиц и техническом контроле точности. Указанные методы могут быть рекомендованы для повышения технического уровня компрессоров других типов.

5. На основании теоретических исследований получена расчетная математическая модель, позволяющая назначать точность величин отклонений от соосности подшипниковых узлов, исходя из требуемых единичных показателей качества центробежных турбокомпрессоров.

6. В результате экспериментальных исследований по определению фактической точности изготовления деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров и точностной надежности средств измерения были разработаны рекомендации по выбору рациональных измерительных средств, внедрение которых позволяет повысить качество функционирования центробежных турбокомпрессоров.

7. Разработаны методика и средства измерения траекторий движения центра ротора /максимальное давление в слое смазки 0,4 МПа; суммарная относительная погрешность измерения 3-5% / одновременно в двух подшипниковых опорах центробежного турбокомпрессора в режиме эксплуатации. Исследованиями установлено появление нестационарной круговой прецессии, источником которой яв-

ляются погрешности расположения подшипниковых опор. Применение методики позволяет управлять качеством функционирования центробежных турбокомпрессоров на этапе проектирования.

8. Разработана методика и внедрены средства измерения амплитуд колебаний лопаток рабочего колеса центробежных турбокомпрессоров. Применение разработанной методики позволяет обеспечить необходимый запас надежности лопаток рабочего колеса в течение эксплуатационного периода центробежных турбокомпрессоров.

9. Обоснованность использования результатов исследований проверена и подтверждена при разработке и внедрении стандарта предприятия СТП "Функциональная взаимозаменяемость деталей турбокомпрессоров типа БТК" на основе которого даны экономически-обоснованные рекомендации по нормированию конструктивных параметров деталей и сборочных единиц центробежных турбокомпрессоров.

10. Результаты исследований внедрены на Производственном объединении "Коломенский завод" им. В. В. Куйбышева. Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований, рассчитанный на основании отчета ЦНИИ МПС I/8-7-76 "Повышение моторесурса, экономии тепловых деталей, дизель-генераторов, турбокомпрессоров, холодильных установок до уровня лучших современных образцов" и "Методики определения экономической эффективности стандартизации" составил 234 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Нефедов В. А., Пономарев Н. Н. Основные направления в исследовании повышения качества подшипников жидкостного трения // Тез. докл. У Всесоюз. межвуз. науч.-техн. конф., посвященной 150-летию МВТУ им. Н. Э. Баумана. - М., 1979. - С. 8-10

2. Пономарев Н. Н. Новый метод измерения величины отклонения от соосности подшипниковых узлов турбомашин // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. - 1980. - №10. - С. 146-147

3. Пономарев Н. Н. Влияние отклонения от соосности подшипников на вибрацию турбомашин // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. - 1980. - №12. - С. 86-87

4. Пономарев Н. Н. Отклонения от соосности подшипниковых узлов турбомашин в процессе эксплуатации // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. - 1981. - №2. - С. 154-155

handwritten signature

