М 311796

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СС

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

Бугрова Инесса Андреевна

На правах рукописи

# ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТЬЮ ДЕТАЛЕЙ И СОПРЯЖЕНИЙ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ.

Специальность 05.02.10 –
Стандартизация и управление качеством продукции
в энергетическом машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1977 г.

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

Бугрова Инесса Андреевна

На правах рукописи

# ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТЬЮ ДЕТАЛЕЙ И СОПРЯЖЕНИЙ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ.

Специальность 05.02.10 -
Стандартизация и управление качеством продукции
в энергетическом машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1977 г.

1311796

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1311796
Бугрова И.А. Исследование

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

Научный руководитель
к.т.н.доцент — А.Н.Виноградов

Научный консультант
Засл.деятель науки и техники РСФСР
д.т.н.профессор — А.И.Якушев

Официальные оппоненты

д.т.н.профессор — В.Д.Лубенец

к.т.н.ст.науч.сотр. — А.И.Кубарев

Ведущее предприятие Читинский машиностроительный з-д

Защита диссертации состоится " II " апреля 1977г. на заседании специализированного Ученого Совета К053.I5.0I по автоматизации в машиностроении МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу: Москва, I07005, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 1977г.

Ученый секретарь специализированного Ученого Совета
к.т.н.доцент — Г.Н.Мельников

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Л 79529 подп.к печати 4/3-77г. Объем I п.л. тип.МВТУ зак.486 тир.I00

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

# В В Е Д Е Н И Е

Актуальность проблемы. Десятым пятилетним планом развития народного хозяйства предусматривается всемерное повышение эффективности производства и качества выпускаемой продукции. Возрастающие темпы развития основных отраслей народного хозяйства требуют увеличения мощности компрессорного парка страны на основе прогрессивных и экономичных типов компрессоров, одним из которых являются винтовые компрессоры. Однако выпускаемые отечественной промышленностью винтовые компрессоры пока имеют более низкие показатели качества по сравнению с лучшими образцами, выпускаемыми за рубежом. Основные задачи по повышению качества винтовых компрессоров отражены в Перспективном плане развития компрессоростроения в СССР до 1985г., разработанном головной организацией по компрессоростроению ВНИИкомпрессормаш и в плане Государственной стандартизации на X пятилетку (раздел 3.2.7. "Машины, оборудование и инструмент").

Целью работы является повышение качества винтовых компрессоров за счет научно обоснованного нормирования и метрологического обеспечения контроля точности геометрических параметров деталей и сопряжений, а также разработки нормативно-технической базы комплексной стандартизации винтовых компрессоров.

Методы исследования. В работе применены теория точности механизмов, методы динамического программирования, теория вероятности и математической статистики, гармонический анализ, принципы комплексной стандартизации на базе функциональной взаимозаменяемости.

Научная новизна. Исследован комплекс вопросов, направленных на повышение качества винтовых компрессоров. Теория размерного анализа получила дальнейшее развитие благодаря учету реальных условий эксплуатации машин-температурных, силовых деформаций и пр, что повысило точность и достоверность результатов расчетов. Методом динамического программирования оптимизирован параметрический ряд компрессоров, исходя из потребностей в них народного хозяйства и определения функция стоимости. Для обеспечения взаимозаменяемости винтовых компрессоров при производстве и эксплуатации создана система допусков на детали и сопряжения. Исходя из точностных требований, установленных системой, разработаны специальные средства контроля деталей и сопряжений винтовых компрес-

соров.

Практическая ценность. Внедрение результатов проведенных исследований позволило сократить время на проектирование и доводку винтовых компрессоров. Применение на заводах специализированных средств контроля приведет к повышению его объективности и точностной надежности. Внедрение параметрического ряда винтовых компрессоров и размерного ряда винтов приведет к сокращению номенклатуры выпускаемых компрессоров, применяемых станков, режущего и измерительного инструмента. Проекты Государственных стандартов на винтовые компрессоры, разработанные МВТУ им. Н.Э.Баумана совместно с ПТО "Компрессор" и СКБ-К(г.Казань), при участии автора, положили начало комплексной стандартизации винтовых компрессоров.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на П-ой (г.Ленинград, 1968г.), Ш-ей (г.Казань, 1971г.). IУ-ой (г.Сумы, 1974г.) Всесоюзных научно-технических конференциях по компрессоростроению, УI-ой научно-технической конференции по взаимозаменяемости, точности и методам измерений (г.Ленинград, 1973г.), IУ-ой межвузовской научно-технической конференции по научным основам автоматизации производственных процессов (г.Москва, 1975г.).

Публикация. Основные результаты работы отражены в четырех печатных трудах.

Объем работы. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав и общих выводов. В работе содержится 85 рисунков, список литературы из 117 наименований, 9 приложений.

Глава I. Состояние вопроса и постановка задачи исследований.

Объектом исследований являются как опытные, так и серийно выпускаемые отечественной промышленностью винтовые компрессоры. К основным деталям винтовых компрессоров относятся роторы с винтовой нарезкой, корпус, подшипники, концевые уплотнения, шестерни связи.

Качество работы винтовых компрессоров характеризуется его эксплуатационными показателями, основными из которых являются объемная производительность, степень повышения давления, коэффициент подачи, потребляемая удельная мощность, к.п.д. и т.д. Высокий уровень эксплуатационных показателей винтовых компрессоров зависит от многих факторов, основными из которых являются степень совершенства конструкции, технология изготовления и сборки, метро-

логическое обеспечение производства, методы расчетов, стандартизация и унификация параметров деталей и составных частей. Наряду с этим, эксплуатационные показатели в значительной мере определяются величинами профильных зазоров в зацеплении винтов, радиальных и торцевых зазоров между винтами и корпусом, так как через эти зазоры происходят протечки газа.

Большой вклад в дело совершенствования конструкции винтовых компрессоров внесли Андреев П.А., Гринпресс Б.Л., Сакун И.А., Лисхольм, Нильсон и другие. Исследования этих авторов посвящены проблемам выбора оптимальных параметров рабочих органов, типа профиля, конфигурации и расположения кромок окон всасывания и нагнетания и т.п.

В области развития технологии производства винтовых компрессоров усилия ученых и производственников направлены на повышение точности изготовления, в первую очередь, наиболее ответственных и сложных деталей-винтов. Опыт, накопленный отечественной промышленностью при производстве ротационных компрессоров, воздуходувок, масляных и водяных винтовых насосов, позволил найти пути дальнейшего совершенствования важнейшей технологической операции для обеспечения высоких эксплуатационных показателей винтовых компрессоров - процесса образования винтовых пазов. Однако внедрение передовых методов обработки сдерживается отсутствием специализированных средств контроля и измерения таких специфических деталей, как винты. Так, при контроле винтов на заводах применяется только универсально-измерительный инструмент. Во многих случаях точность применяемых средств контроля не соответствует требованиям ГОСТ 8.051-73 "Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров от I до 500 мм", что приводит к возрастанию процента брака. Контроль сборочных зазоров в зацеплении винтов, осуществляемый щупами, не дает представления о фактическом распределении величин зазоров по линии контакта винтов.

Отступление геометрической формы зубьев винтов при обработке от теоретических очертаний объясняется погрешностями системы СПИД. Возникающие при этом погрешности размеров, формы и расположения поверхностей деталей сказываются на величинах полей рассеяния зазоров. Для научно обоснованного нормирования точности при проектировании винтовых компрессоров используется теория размерных связей, базирующаяся на теории точности. Основы теории точ-

ности механизмов были заложены академиком Н.Г.Бруевичем. Свое развитие и конкретное приложение в машиностроении теория точности нашла в трудах Б.С.Балакшина, Н.А.Бородачева, П.Ф.Дунаева, И.В.Дунина-Барковского, А.И.Якушева, А.С.Шевелева и др., в компрессоростроении- в работах В.Г.Калитенко, А.Н.Мартынова, А.Н.Виноградова. В этих работах решалась задача обеспечения точности при сборке. Обеспечение точности функционирования изделий на их рабочих режимах требует учета реальных условий эксплуатации.

До настоящего времени не установлены единые для всех отраслей промышленности, занимающихся производством винтовых компрессоров, параметрический и размерный ряды, что приводит к излишнему многообразию выпускаемых винтовых компрессоров, расширению номенклатуры станков, технологической оснастки, средств измерения и т.д. Отсутствие единой системы допусков для ряда винтовых компрессоров затрудняет обеспечение взаимозаменяемости при их производстве и эксплуатации, что вызывает увеличение объема подгоночных и регулировочных работ.

Учитывая изложенное, в настоящей работе ставятся следующие основные задачи исследований: 1. Провести классификацию погрешностей геометрических параметров деталей винтовых компрессоров в зависимости от конструктивных особенностей. Разработать единую для всех модификаций винтовых компрессоров методику точностного анализа размерных связей с учетом реальных условий эксплуатации. 2. Провести теоретические исследования по определению величин профильных и радиальных зазоров в условиях эксплуатации винтовых компрессоров. 3. С целью практической проверки теоретических выводов провести экспериментальные исследования по определению величин профильных и радиальных зазоров в условиях эксплуатации винтовых компрессоров. Разработать и исследовать метод и средства измерения зазоров в винтовых компрессорах в режиме эксплуатации. 4. Оптимизировать параметрический ряд винтовых компрессоров. Разработать систему допусков на детали и сопряжения винтовых компрессоров. На основании проведенных исследований разработать основные нормативно-технические документы на винтовые компрессоры. 5. Разработать и исследовать методы и средства комплексного и дифференцированного контроля геометрических параметров деталей и сопряжений винтовых компрессоров.

Глава 2. Теоретические исследования точности деталей и сопряжений винтовых компрессоров.

Как показал проведенный в диссертации анализ, разнообразие конструктивного исполнения винтовых компрессоров определяет структурный состав погрешностей составляющих звеньев размерных цепей. Эти погрешности были разделены на комплексные и дифференцированные, аналогично ГОСТ 10356-63"Отклонения формы и расположения поверхностей" и ГОСТ 1643-72"Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски". К комплексным показателям точности сборки винтовых компрессоров отнесены отклонения величин зазоров от их номинальных значений, к дифференцированным-элементарные погрешности геометрических параметров деталей. Классификация погрешностей составляющих звеньев в зависимости от конструктивных особенностей позволила установить, что примерно 60% всех погрешностей является векторными звеньями. В этом случае оказалось целесообразным применить при расчетах размерных цепей методику, разработанную А.С.Шевелевым. Развивая научные идеи Б.С.Балакшина, Н.А.Бородачева, А.И.Якушева и др., А.С.Шевелев предложил применять при теоретико-вероятностном суммировании погрешностей вместо эмпирических коэффициентов относительного рассеяния $\lambda_i$ и относительной асимметрии $\alpha_i$, для определения которых необходим большой объем эмпирических данных, предельные расчетные значения характеристик составляющих звеньев, определяемые по графикам. Однако эта методика не учитывала степени влияния составляющих звеньев на замыкающее звено и воздействия на него различных факторов, возникающих при эксплуатации машин (температурных и силовых деформаций деталей, всплытия цапф в масляном клине подшипников скольжения и т.д.). Действие указанных факторов вызывает смещение координаты середины поля рассеяния $E_c A_\Delta$ замыкающего звена (зазора), не изменяя величины поля рассеяния. Для суммирования погрешностей векторных и скалярных звеньев с учетом передаточных отношений получено уравнение:

$$TA_\Delta = K_\Delta \sum_{j=1}^{m} U_j TA_j + K_{\Delta\Delta} \sum_{i=1}^{n-1} U_i \widetilde{TA}_i \qquad (1),$$

где $TA_\Delta$ -допуск замыкающего звена, $K_\Delta, K_{\Delta\Delta}$-коэффициенты вероятностного суммирования, $U_j, U_i$-передаточные отношения составляющих звеньев, $TA_j, \widetilde{TA}_i$ -допуски скалярных и векторных погрешностей составляющих звеньев.

На основании проведенных исследований влияния указанных выше факторов на зазоры в винтовых компрессорах получено уравнение для определения координаты середины поля рассеяния замыкающего звена:

$$E_c A_\Delta = \sum_{j=1}^{m} U_j E_c A_j + \frac{U_j(\Delta_j^t + \Delta_j^c + \Delta_j^\rho + \Delta_j^\alpha)}{2} \qquad (2),$$

где $\vec{c}_{A_j}$ – координаты середины полей допусков составляющих звеньев, $\Delta_j^t$ –температурные деформации деталей, $\Delta_j^c$ –силовые деформации деталей, $\Delta_j^p$ –радиальные смещения винтов, $\Delta_j^{oc}$ – осевые смещения винтов.

Задача определения температурных деформаций деталей винтовых компрессоров является весьма сложной. В работах Сакуна И.А., Виноградова А.Н. приведены данные, позволяющие принять, что радиальный градиент температур роторов отсутствует, а осевой градиент имеет линейный характер. Эти допущения позволяют проводить расчеты температурных деформаций роторов по известным зависимостям. Силовые факторы, действующие на роторы винтовых компрессоров при эксплуатации компрессора, вызывают их прогибы. Для роторов малой длины ($\ell/d_1 \leq 1$) при небольшой степени повышения давления ($\varepsilon \leq 3{,}5$) ввиду их большой жесткости величины прогибов пренебрежимо малы. Однако при отношении $\ell/d_1 > 1$ и значительных нагрузках величины прогибов необходимо учитывать.

Радиальные смещения винтов возникают вследствие всплытия цапф в масляном клине подшипников скольжения и определяются на основе гидродинамической теории смазки. Осевые смещения винтов вызываются действием осевых сил и зависят от величины зазора в упорных подшипниках.

С учетом перечисленных факторов уравнение (2) имеет вид:

$$E_{A_0} = U_j \left\{ \sum_{j=1}^{m} E_{A_j} + [d_1 \alpha_\delta (t_\delta^\circ - t_0^\circ) - A_\kappa \alpha_\kappa (t_\kappa^\circ - t_0^\circ)] + S^y \cos\beta_\kappa + y_0 + \frac{S^o \left[ \vartheta (\psi - \psi^2) + \frac{\rho \psi^2}{\mu\omega} \right]}{\left( \vartheta + \frac{\rho \psi^2}{\mu\omega} \right)} \sin\gamma_i \right\} \quad (3),$$

где $d_1$ –наружный диаметр ведущего винта, $\alpha_\delta, \alpha_\kappa$ –коэффициенты линейного расширения материалов винтов и корпуса, $A_\kappa$ –межосевое расстояние в корпусе, $t_\delta^\circ, t_\kappa^\circ$ –температура винтов и корпуса, $t_0^\circ$ –температура окружающего воздуха, $S^y$ –зазор в упорном подшипнике, $\beta_\kappa$ –угол наклона винтовых линий, $y_0$ –прогиб винтов, $S^o$ –зазор в опорном подшипнике скольжения, $\vartheta, \psi$ –коэффициенты, учитывающие конструкцию подшипника, $P$ –среднее давление, приходящееся на единицу площади опорной поверхности подшипника, $\psi$ –относительный зазор, $\mu$ –динамическая вязкость масла, $\omega$ –угловая скорость вала, $\gamma_i$ –угол минимального сечения. С помощью уравнений (I) и (3) определяются предельные расчетные значения замыкающих звеньев (зазоров) с учетом реальных условий эксплуатации.

Анализ фактической точности изготовления и сборки винтовых

компрессоров был проведен на серийно выпускаемых винтовых компрессорах ВК-II с окружным профилем зубьев. Результаты расчетов предельных значений зазоров по уравнениям (I)-(3) показали хорошую сходимость с величиной фактического поля рассеяния зазоров, полученных в результате длительной доводки компрессоров ВК-II до серийных образцов. Исследования фактической точности сборки ВК подтвердили, что выведенные уравнения могут применяться для инженерных методов расчета.

Наряду с исследованием точности размерных связей для обоснованного нормирования допусков геометрических параметров необходимо провести исследования по определению предельных величин зазоров в режиме эксплуатации винтовых компрессоров.

Глава Ш. Теоретические и экспериментальные исследования величин профильных и радиальных зазоров винтового компрессора и разработка методов и средств их измерения.

В режиме эксплуатации компрессора детали и узлы находятся в определенных температурных условиях. Так, для винтовых компрессоров "сухого" сжатия при степени повышения давления $\varepsilon > 2$ температура роторов со стороны нагнетания достигает величины 200°С и выше. Поэтому для компенсации температурных расширений роторов между их профилями должны быть предусмотрены минимально безопасные зазоры, составляющие 0,2-0,4 мм в зависимости от диаметра роторов. Как известно, необходимые величины зазоров достигаются путем занижения профиля роторов. На основе исследований Сакуна И.А. получены аналитические зависимости для расчетов предельных величин профильных и радиальных зазоров, характеризующих посадки основных сопряжений винтовых компрессоров.

Для проверки теоретических положений были проведены экспериментальные исследования по изменению величин зазоров в зависимости от параметров режима эксплуатации винтовых компрессоров. Указанные исследования проводились с использованием емкостных преобразователей, отличающихся простотой конструкции и достаточной точностной надежностью. В результате испытаний, доводки и метрологических исследований аппаратуры для измерения зазоров в режиме эксплуатации винтовых компрессоров, разработанной автором, удалось осуществить измерения зазоров в пределах от 0 до

500 мкм, при температуре до 200°С, на всем диапазоне частот вращения роторов винтовых компрессоров. Погрешность измерения $\Delta$ находилась в пределах от -8,0 мкм до 8,0 мкм ( с вероятностью 0,90). Для обеспечения возможности измерений профильных и радиальных зазоров как по углу поворота роторов, так и по их длине, на последних было установлено по четыре преобразователя. Измерения зазоров проводились в экспериментальном винтовом компрессоре ВКЭ с эллиптическим профилем зубьев (типоразмера $d_1$=160мм), установленном на испытательном стенде ПТО "Компрессор". Регулировочная и контрольно-измерительная аппаратура стенда позволяла изменять при исследованиях частоту вращения роторов, давление всасываемого и нагнетаемого воздуха, вид охлаждения компрессора.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что изменение величин профильных зазоров по длине винтов подчиняется линейной зависимости, что хорошо согласуется с результатами исследований температурных полей роторов. Наиболее интенсивное уменьшение величин профильных зазоров наблюдается на торце нагнетания. Так, на режиме без охлаждения корпуса компрессора при степени повышения давления $\varepsilon$ =2,0 и частоте вращения $f$= 95 $с^{-1}$ ( $n$ =5700 об/мин) профильный зазор между вершиной зуба ведущего ротора и впадиной ведомого на торце нагнетания уменьшился на 0,2 мм по сравнению с зазором на торце всасывания. Такое уменьшение зазора при заводских испытаниях серийно выпускаемых винтовых компрессоров зачастую приводит к заклиниванию роторов и задирам. С увеличением частоты вращения роторов при постоянном значении степени повышения давления для каждого конкретного сечения величины профильных зазоров возрастали незначительно. Например при $\varepsilon$ =2,0 величина профильного зазора на торце нагнетания при $f$ =116 $с^{-1}$ ( $n$ =7000об/мин) составила 0,095 мм, а при $f$ =158 $с^{-1}$ ( $n$ =9500 об/мин) она увеличилась до 0,115 мм, что объясняется некоторым улучшением условий отвода тепла от винтов при увеличении частоты их вращения. На основании полученных экспериментальных данных автором была получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить минимально безопасные величины профильных зазоров при заданных параметрах режима:

$$S_{min}^{пр} = [280 - 4{,}07 f^{0{,}43} - 0{,}936(\varepsilon - 1{,}5)\cdot 10^2] \frac{d_1}{152} \quad (мкм) \qquad (4)$$

Полученная эмпирическая зависимость позволяет устанавливать величины профильных зазоров в компрессоре для расчетного режима эксплуа-

тации проектируемых винтовых компрессоров.

Величины радиальных зазоров (между роторами и корпусом) при $f = Const$ и $\varepsilon = Const$ уменьшаются по длине корпуса, достигая наименьших значений на торце нагнетания, что объясняется интенсивным расширением роторов в этом сечении. Экспериментальные данные по распределению величин профильных и радиальных зазоров по длине роторов и корпуса подтвердили гипотезу о целесообразности изготовления роторов с конусностью по наружному диаметру, высказанную в ряде работ, и позволили дать количественную оценку величин относительной конусности. Так, для роторов компрессоров "сухого" сжатия относительная конусность определяется зависимостью:

$$K = \frac{d_1 \alpha_в}{L}\left[\frac{(90+L)(0{,}25 t^{\circ}_{н} - 165\cdot 10^{-3} f + 1{,}5)}{(33{,}1 - 132\cdot 10^{-3} f)\varepsilon} - 0{,}15L - t^{\circ}_{в}\right] \qquad (5),$$

где $t^{\circ}_{н}$ – температура нагнетаемого воздуха.

Изготовление роторов конусообразными по наружному диаметру позволяет добиться равномерных величин зазоров по их длине в процессе эксплуатации компрессора и снизить объем протечек газа через зазоры, что приведет к повышению эксплуатационных показателей винтовых компрессоров.

Глава IУ. Стандартизация основных параметров винтовых компрессоров и разработка системы допусков на их детали и сопряжения.

Научно-исследовательские работы, проведенные кафедрой "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ им.Баумана при участии автора совместно с ПТО "Компрессор", СКБ-К (г.Казань) позволили положить начало разработке нормативно-технической документации на винтовые компрессоры на уровне Государственных стандартов. Анализ данных по потребностям различных отраслей народного хозяйства в винтовых компрессорах, а также определение функции их стоимости позволили решить задачу оптимизации параметрического ряда номинальной объемной производительности винтовых компрессоров методом динамического программирования. Задача оптимизации ряда заключалась в нахождении количества членов ряда и их значений, обеспечивающих минимум приведенных суммарных затрат при максимальном удовлетворении потребностей народного хозяйства. Алгоритм для решения задачи оптимизации был разработан на основании функции минимума приведенных суммарных затрат:

$$S_n = \sum_{k=1}^{N}\left\{\vartheta^{\circ}(U_k) + C(U_k)\left[\Phi(U_k) - \Phi(U_{k-1})\right]\right\} \qquad (6),$$

где $N$ – число типов винтовых компрессоров, $\Phi(U_k) = \int_a^u \varphi(x)\,dx$ – интег-

ральная функция потребностей, $\varphi(x)$ -дифференциальная функция потребностей, $U_k$ -параметр компрессора $k$ -го типа, $g^0(U_k)$ - начальные затраты на проектирование , организацию и подготовку производства, $C(U_k)$ -стоимость эксплуатации и производства компрессора $k$ -го типа.

В результате вычислений, проведенных на "БЭСМ-6", был получен оптимальный параметрический ряд, принятый за основу. Затем ряд был дополнен значениями производительности, предусматривающими перспективное развитие винтовых компрессоров и приведен в соответствие с рядом $R$ 5 предпочтительных чисел. На основе параметрического ряда был разработан проект ГОСТ ПГ 400-492/75"Винтовые компрессоры. Типы и основные параметры".

Так как наружный диаметр винтов пропорционален производительности компрессора, винтовые компрессоры параметрического ряда геометрически подобны. На базе параметрического ряда был построен размерный ряд винтов по $R$ IO, составляющий следующие значения наружного диаметра $d_1$ ведущего винта: 50, 63, 80, I00, I25, I60, 200, 250, 3I5, 400, 500, 630 мм. Данный ряд вошел в разработанный проект ГОСТ ПГ 400-49I-75 "Винтовые компрессоры. Винты. Основные размеры". ..

Применение принципа функциональной взаимозаменяемости, основанного на регламентации точности деталей и сопряжений в зависимости от экономически оптимальных пределов изменения эксплуатационных показателей позволило построить систему допусков и посадок деталей и сопряжений винтовых компрессоров. При этом было принято, что допустимые предельные отклонения номинальной объемной производительности составляют $\pm 7\%$, а номинальное значение коэффициента подачи для всего ряда винтовых компрессоров равно 0.86. Система допусков и посадок вошла в проект ГОСТ ПГ 400-493-75 "Винтовые компрессоры. Винты. Допуски". В диссертации приводятся аналитические зависимости для определения числовых значений комплексных и дифференцированных показателей точности изготовления и сборки винтовых компрессоров, вошедших в систему допусков.

Разработанные проекты ГОСТ создали предпосылки для разработки специализированных средств измерения и контроля геометрических параметров деталей и сопряжений винтовых компрессоров.

Глава У. Метрологическое обеспечение контроля точности деталей и сопряжений винтовых компрессоров.

В соответствии с разделением показателей точности изготовления и сборки винтовых компрессоров на комплексные и дифференцированные, в диссертации были разработаны средства комплексного и дифференцированного контроля.

Условия комплексного контроля должны максимально приближаться к эксплуатационным. Поэтому для измерения величин профильных зазоров по линии контакта было разработано устройство, обеспечивающее непрерывные измерения в кинематически связанной между собой паре винтов по всей поверхности их взаимодействия. Синхронное вращение винтов и поступательное перемещение каретки с преобразователями, размещенной между винтами, обеспечивается посредством передачи гибкими связями. Линии измерения преобразователей направлены по нормалям к сопряженным профилям. Сигналы с преобразователей поступают на усилители, а затем на регистрирующие устройства. В диссертации приводится методика обработки измерительной информации, получаемой с регистрирующих устройств. Разработанное устройство позволяет контролировать зазоры в зацеплении зубьев винтов любого типа профиля на любом угле их поворота, а также моделировать погрешности положения винтов и исследовать их влияние на величины зазоров. Для обеспечения возможности применения устройства для винтов всего типоразмерного ряда достаточно создать три его модификации: на винты с наружными диаметрами 50÷125 мм, 160÷315 мм и 400÷630 мм.

Контроль дифференцированных показателей точности важен с точки зрения определения технологической точности станков. Для контроля был разработан измерительный стенд, основным элементом которого является электроиндуктивная делительная головка модели ЭДГ-3. На станине головки размещены люнеты, каретка продольного перемещения с отсчетным микроскопом, оптический длиномер с микроскопом. В результате метрологических исследований измерительного стенда определена суммарная погрешность измерения $\Delta$ , которая находится в пределах 14 мкм и соответствует требованиям ГОСТ 8.051-73 "Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров от 1 до 500 мм". Пределы измерения стенда: по диаметру – до 400 мм, по длине – до 750 мм. Пределы измерения можно расширить, применив станину большей длины и плоскопараллельные брусы для увеличения высоты центров.

Таким образом, проведенные в диссертации теоретические и экспериментальные исследования позволят повысить качество винтовых

компрессоров за счет регламентации точностных требований на детали и сопряжения, стандартизации параметров и унификации, внедрения в производство специальных средств контроля.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

I. В результате теоретических исследований проведена классификация погрешностей геометрических параметров деталей винтовых компрессоров в зависимости от их конструктивных особенностей, позволившая установить, что 60% всех погрешностей являются векторными величинами. Это вызвало необходимость в разработке новой методики расчета размерных цепей винтовых компрессоров.

2. На основе теории точности разработана единая методика точностного анализа размерных связей в винтовых компрессорах. Используя теоретико-вероятностный метод суммирования векторных и скалярных погрешностей, получены уравнения для расчета допусков величин профильных, радиальных и торцевых зазоров. Получены аналитические зависимости для расчета посадок основных сопряжений винтовых компрессоров. Исследования фактической точности изготовления и сборки серийных винтовых компрессоров подтвердили возможность использования полученных зависимостей, что значительно сократят объем опытно-конструкторских и доводочных работ для вновь проектируемых винтовых компрессоров.

3. Для экспериментальной оценки величин минимально безопасных зазоров разработаны методика и средства измерения, которые впервые применены для определения зазоров в условиях эксплуатации винтовых компрессоров на всем диапазоне рабочих частот вращения роторов (пределы измерения зазоров 0÷500 мкм, диапазон изменения температур роторов $20^{\circ}$–$200^{\circ}$С, суммарная погрешность измерения $\Delta$ от –8мкм до 8 мкм с вероятностью 0,90). Разработанная методика измерения может найти применение для измерения зазоров между любыми деталями, совершающими вращательное и возвратно-поступательное движение.

4. На основе математической обработки результатов экспериментальных исследований, проведенных на опытном винтовом компрессоре ВКЭ с наружным диаметром $d_1$=160 мм, получены эмпирические зависимости для определения величин минимально безопасных профильных зазоров. Установлено, что изменение величин профильных и радиальных зазоров по длине винтов и корпуса вследствие температурных и силовых деформаций подчиняется линейным зависимостям, достигая наименьших значений на торце нагнетания. Для обеспечения равномер-

ных величин указанных зазоров по длине роторов в процессе эксплуатации и для повышения эксплуатационных показателей винтовых компрессоров рекомендована обработка винтов по наружному диаметру с относительной конусностью, определяемой по полученным зависимостям.

5.Исходя из потребностей народного хозяйства в винтовых компрессорах и определения функции их стоимости,разработан алгоритм программы оптимизации параметрического ряда номинальных объемных производительностей, на основе которого с учетом геометрического подобия деталей получен размерный ряд винтов.Указанные ряды легли в основу проектов ГОСТ ПГ 400-492-75"Винтовые компрессоры.Типы и основные параметры" и ПГ 400-491-75"Винтовые компрессоры. Винты.Основные размеры",положивших начало комплексной стандартизации винтовых компрессоров.

6.Используя принцип функциональной взаимозаменяемости,основанный на регламентации точности в зависимости от экономически оптимальных пределов изменения эксплуатационных показателей,разработана система допусков на детали и сопряжения винтовых компрессоров. Внедрение системы допусков в промышленность обеспечит серийное взаимозаменяемое производство винтовых компрессоров по их эксплуатационным показателям.Указанные материалы положены в основу проекта ГОСТ ПГ 400-493-75"Винтовые компрессоры.Винты.Допуски".

7.Для метрологического обеспечения норм и требований, заложенных в указанных стандартах,разработано устройство,которое позволяет впервые осуществить непрерывные измерения зазоров.Внедрение устройства в промышленность сократит объем сборочных и регулировочных работ и,тем самым, повысит качество сборки винтовых компрессоров.Для контроля дифференцированных показателей точности деталей изготовлен измерительный стенд,обеспечивающий контроль геометрических параметров с погрешностью,находящейся в пределах I4 мкм.Разработанные средства измерений могут найти применение также для контроля деталей и сопряжений винтовых насосов,воздуходувок,роторных двигателей,зубчатых передач и т.д.

8.В результате проведенных исследований в практику проектирования винтовых компрессоров в ПТО"Компрессор"и др.организации внедрена методика точностных расчетов.Для исследований винтовых компрессоров внедрена методика измерений рабочих зазоров при их эксплуатации.

9.Экономический эффект от внедрения только одного проекта ГОСТ

ШГ 400-493-75"Винтовые компрессоры.Винты.Допуски" составит 150.000 руб. в год,который будет получен за счет сокращения трудоемкости сборки,значительного уменьшения номенклатуры размерного режущего инструмента,средств измерения, калибров и т.д.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1.Бугрова И.А.Метрологические исследования измерительного стенда и вопросы высокоточного контроля основных геометрических параметров роторов винтовых компрессоров и синхронизирующих шестерен связи.В кн."Компрессорные машины",М.,ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ,1968г.
2.Бугрова И.А.Особенности и средства контроля основных геометрических параметров роторов винтовых компрессорных машин.Тезисы докладов Ш Всесоюзной научно-технической конференции по компрессорному машиностроению(Казань,октябрь,1971г.)ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М.,1971г.
3.Воронин Ю.В.Бугрова И.А.Оптимизация допусков основных геометрических параметров винтовых компрессоров методами функциональной взаимозаменяемости.Тезисы докладов IУ Всесоюзной научно-технической конференции"Конструирование,технология изготовления и эксплуатация компрессорных машин различного назначения"(СУМЫ, 1974г.)ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ,М.,1974г.
4.Бугрова И.А.Федоров А.Д.Устройство для измерения профильных зазоров между роторами винтового компрессора."Известия ВУЗов. Машиностроение",№ 2,1975г.