

М474045
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

КУРЫШКИН НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 621.512.002.237

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ МАШИН

Специальность 08.00.20 - "Стандартизация и управление
качеством продукции"

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.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЛУБЕНЦ В.Д.

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник **СКРИПКА В.Л.**

Ведущее предприятие: - указано в решении специализированного совета

Защита диссертации состоится "6" июня 1988 года на заседании специализированного Совета К 053.15.16 в Московском ордена Трудового Красного Знамени училище имени Н.Э.Баумана, улица, д. 15.

С диссертацией
Н.Э.Баумана

ТУ имени

Ваше
направление

просим

Автор

да

Ученый
специализированный
К 053.15.

ДОВСКАЯ

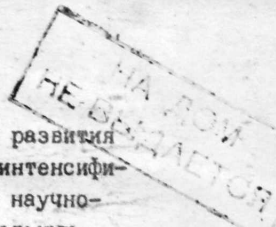
М 474045



1474045

Курышкин Н.П. Разработка и

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



проблемы. Характерной особенностью развития народного хозяйства на современном этапе является интенсификация экономики на основе использования достижений научно-технического прогресса и всемерной экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов. "В центре экономической политики партии, - указывается в Программе КПСС, - всегда будет находиться всемерное повышение технического уровня и качества продукции".

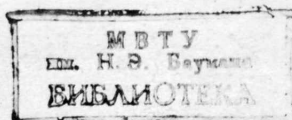
Компрессорные машины во многих технологических процессах являются основным машинным оборудованием, определяющим технический уровень и надежность технологических линий в целом. В то же время они исключительно трудоемки и энергоемки и потребляют около 20% всей вырабатываемой в стране электроэнергии, а на крупных химических предприятиях на привод компрессорного оборудования затрачивается до 80% от общей потребляемой мощности.

Среди компрессоров различных типов особое место занимает винтовые компрессорные машины (ВКМ). Их производство в последнее время как у нас в стране так и за рубежом переживает период бурного развития. Так в СССР до 1990 года планируется увеличить выпуск ВКМ в 1,8 раза. Рост производства ВКМ обусловлен их очевидными преимуществами перед другими типами компрессорных машин, заключающимися в отсутствии деталей, совершающих возвратно-поступательное движение, малом износе рабочих органов, высокой надежности и удельной производительности, приходящейся на единицу площади и веса и др.

Качество функционирования ВКМ, характеризующееся в основном энергетическими и объемными показателями, определяется конфигурацией рабочих органов и протечками газа по щелям между рабочими органами на всасывание и в соседние рабочие полости.

Целью работы является повышение качества винтовых компрессорных машин на основе разработки и внедрения методов, заключающихся в оптимизации геометрических параметров винтовых частей роторов.

Методы исследований. Диссертация выполнена на основе системного подхода к процессу формирования качества ВКМ. В теоретических и экспериментальных исследованиях применялись методы математического моделирования, теории вероятностей и



М44045

математической статистики, аппарата дифференциального и интегрального исчисления, методов регрессионного анализа и планирования экспериментов и решения оптимизационных задач. При исследованиях применялись ЭВМ с развитым математическим обеспечением. Экспериментальные исследования проводились с использованием современной измерительной техники и регистрирующей аппаратуры.

Научная новизна диссертационной работы заключается в выявлении закономерностей формирования качества ВКМ и разработке на этой основе методов его повышения, заключающихся в оптимизации геометрических параметров профилей зубьев и отклонений формы и расположения поверхностей винтовых частей роторов.

Впервые выявлены области существования профилей зубьев и определено влияние параметров их конфигурации на показатели качества ВКМ (производительность, коэффициент подачи, индикаторный к.п.д.). Разработан новый профиль зубьев роторов, защищенный двумя авторскими свидетельствами на изобретения и доказана возможность его изготовления высокопроизводительным методом обката червячными фрезами.

Раскрыт механизм влияния точности геометрических параметров рабочих органов на показатели качества ВКМ, позволивший научно обосновать метод и величины занижений теоретического профиля зубьев, обеспечивающие минимально безопасные профильные зазоры с учетом применения для обработки роторов как метода бесцентроидного огибания дисковыми фрезами так и метода обкатки червячными фрезами.

Практическая ценность и реализация результатов работы. На основании проведенных исследований даны рекомендации по повышению качества ВКМ, включающие методику оценки эффективности профилей зубьев роторов и методику расчета занижений теоретических профилей зубьев с учетом технологических и эксплуатационных факторов.

Математическая модель качества ВКМ реализована в виде комплекса библиотечных фортран-программ на ЭВМ. Она позволяет моделировать рабочий процесс, рассчитывать показатели качества функционирования винтовых компрессоров в зависимости от геометрических параметров деталей, точности их изготовления и условий эксплуатации.

Указанные программы могут быть использованы при автомати-

зированном проектировании новых и модернизации существующих винтовых компрессорных машин.

Разработаны программы расчета обкатного инструмента для профилирования винтовых частей роторов с любым профилем зубьев.

Результаты работы внедрены на Читинском машиностроительном заводе, во Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте холодильного машиностроения (Минхимнефтемаш СССР).

Использование разработанных рекомендаций по выбору параметров профилей зубьев и оптимизации требований к точности формы и расположения поверхностей винтовых частей роторов позволит снизить удельную потребляемую компрессором мощность на 1,5%, что даёт в расчете на годовую программу лишь одного типоразмера ВКМ экономию 2246 тыс. кВт-часов электроэнергии в год.

Экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 278,05 тыс. рублей в год.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Зональной научно-технической конференции "Автоматизация технологического проектирования", г. Пенза (1983 г.); на XV конференции молодых специалистов ВНИИхолодмаша, г. Москва (1984 г.); на областной научно-технической конференции "Механизация и автоматизация ручных и трудоемких операций в промышленности Кузбасса", г. Кемерово (1984 г.); на УП Всесоюзной научно-технической конференции по компрессоростроению "Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок", г. Казань (1986 г.); на научно-методических семинарах кафедры "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в семи статьях и двух авторских свидетельствах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений; изложена на 137 страницах машинописного текста. Сопровождается 13 таблицами, 68 рисунками, списком литературы из 93 наименований и семи приложениями на 52 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дана характеристика винтовых компрессорных машин, проведен критический анализ литературных и производст-

венных данных по методам повышения качества функционирования ВКМ. На основе системного подхода к управлению качеством ВКМ сформулированы задачи исследований.

Винтовые компрессоры, являясь машинами объемного сжатия, применяются в области производительностей от 4 до 800 м³/мин при давлении нагнетания до 2 МПа, они используются в нефтяной, газовой, химической и горнорудной промышленности, в холодильной и криогенной технике и др. При всем многообразии областей применения во всех ВКМ используется единый принцип сжатия газов, который и предопределяет единую конструктивную схему ВКМ, практически неизменную для всех модификаций; рабочими органами ВКМ являются два «некообразных» ротора, вращающихся в цилиндрических расточках корпуса и находящихся в зацеплении друг с другом.

Качество ВКМ характеризуется показателями назначения (объемная производительность, коэффициент подачи, к.п.д., удельная потребляемая мощность и др.), показателями надежности и долговечности, технологичности и др.

Анализ литературных и производственных данных показал, что надежность и долговечность отечественных винтовых компрессоров находится на уровне лучших мировых образцов. В тоже время по таким показателям назначения, как производительность, коэффициент подачи, энергоемкость отечественные ВКМ уступают зарубежным образцам. Имеются определенные отставания и по производительности изготовления основных деталей, особенно винтовых роторов, на долю которых приходится 65-70% от общей трудоемкости изготовления ВКМ.

Резервы повышения качества по указанным выше показателям заключаются в совершенствовании конфигурации профилей зубьев роторов, уменьшении протечек рабочего тела в компрессоре на основе совершенствования конструкции рабочих органов ВКМ, методов расчета действительных величин зазоров между ними, нормирования минимальных значений этих зазоров, их технологического обеспечения.

Произведенный анализ технического уровня показал, что задача повышения качества ВКМ должна решаться на всех стадиях жизненного цикла изделия. Это возможно на основе использования метода математического моделирования путем всестороннего и комплексного рассмотрения основных факторов, влияющих на показатели качества ВКМ.

В результате анализа патентной литературы установлено, что существует большое разнообразие профилей зубьев роторов ВКМ. Такое положение в основном объясняется недостаточной изученностью закономерностей влияния конфигурации профилей на показатели качества функционирования ВКМ, а также отсутствием обобщенных критериев оценки их эффективности.

В работах Сакуна И.А., Андреева П.И., Шварца А.И. и других авторов исследовано влияние симметричных и асимметричных профилей зубьев на эффективность работы ВКМ. Выработаны рекомендации по оценке эффективности профилей по их влиянию на основные геометрические характеристики зацепления роторов. Однако эти рекомендации носят приблизительный характер. Кроме этого при оценке эффективности профилей не рассматривались вопросы технологичности с анализом возможности их обработки перспективными методами профилирования, например, методом обкатки червячными фрезами.

Исследованиями Андреева П.И., Амосова П.Е., Виноградова А.Н. и др. установлено, что экономичность ВКМ определяется так же величинами протечек между рабочими полостями; проведена классификация щелей, установлено, что 75-80% всех протечек приходится на профильные щели между зубьями роторов. Основными факторами, определяющими их величины, являются технологические погрешности изготовления и сборки, температурные деформации, величины занижений профилей.

Однако разработанные методики расчета профильных зазоров не учитывают все указанные выше факторы, что не позволяет определять их величины в произвольном торцевом сечении и для различных профилей зубьев роторов. Без этого невозможна количественная оценка влияния геометрических параметров рабочих органов и их точности на показатели качества ВКМ.

Связь геометрических параметров рабочих полостей и щелей, соединяющих эти полости, с показателями качества функционирования ВКМ возможна на основе использования теории рабочего процесса тела переменной массы, разработанной для ВКМ Тарасовым А.М., Сакуном А.И., Верным А.Л. и др. Однако необходимые для этого экспериментальные исследования течения рабочего тела через окно нагнетания и температурных полей роторов носят ограниченный характер и требуют дальнейшего уточнения и дополнения для различных режимов работы ВКМ.

Анализ работ Виноградова А.Н. и др. в области нормирования профильных зазоров и технологических погрешностей, определяющих их величины, показал, что они были сориентированы на конкретные профили зубьев и на существующую технологию профилирования роторов. Эта технология предусматривает применение метода бесцентроидного огибания дисковыми фрезами, отличающегося низкой производительностью (время обработки одного ротора составляет около шести часов) и недостаточной точностью профилирования.

Исходя из анализа технического уровня и выявленных при этом недостатков в управлении качеством функционирования ВКМ в работе поставлены следующие задачи исследований:

1. Разработать методы повышения качества функционирования ВКМ, заключающиеся в воздействии на основные факторы, определяющие уровень его показателей.
2. Исследовать влияние конфигурации профилей зубьев роторов на основные показатели качества ВКМ.
3. Разработать методику аналитического описания влияния точности параметров винтовых частей роторов на показатели качества ВКМ.
4. Исследовать температурные поля роторов и процесс течения рабочего тела через окно нагнетания при различных режимах работы ВКМ.
5. Разработать математическую модель качества ВКМ, связывающую управляющие параметры геометрии проточной части с основными показателями качества. Проверить адекватность модели реальному процессу.
6. Разработать математическую модель комплексной оптимизации параметров профилей зубьев роторов и параметров точности их изготовления, провести их оптимизацию.
7. Разработать и внедрить рекомендации по выбору рациональной конфигурации профилей зубьев роторов, нормированию точности их изготовления и выбору величин занижения теоретических профилей с учетом применения для обработки роторов метода обката червячными фрезами.

Во второй главе проведен анализ функций объекта исследования. По результатам анализа структуры ВКМ выявлены основные связи показателей качества с параметрами структурных элементов. Выявлены и обобщены закономерности влияния профилей зубьев роторов на показатели качества. Получены зависимости этих

показателей от геометрических и точностных параметров винтовых частей роторов. Разработана математическая модель качества ВКМ.

Процесс формирования качества любой технической системы рассматривался как процесс взаимодействия материальными и информационными потоками с другими системами на всех стадиях жизненного цикла: проектирования, изготовления и эксплуатации. Исходя из этой концепции выявлен функционал вектора действительных показателей качества ВКМ:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_a &= \bar{Y}_a[\bar{Z} = \bar{Z}(X_1, X_2, \dots, X_n, \bar{\eta}, \bar{S}), \bar{\eta} = \bar{\eta}(X_1, X_2, \dots, X_n, \bar{S}), \\ \bar{S} &= \bar{S}(\bar{\alpha}, \bar{\tau}), \bar{\alpha} = \bar{\alpha}(\lambda_{1k}, \lambda_{2k}, \dots, \lambda_{1n}), \bar{\tau} = \bar{\tau}(\lambda_{1r}, \lambda_{2r}, \dots, \lambda_{nr}), \quad (I) \\ \bar{V} &= \bar{V}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l)],\end{aligned}$$

где $\bar{Z}$ - вектор-переменная состояния рассматриваемой системы; $\bar{\eta}$ - вектор энергетических и других потерь системы в процессе её функционирования; $\bar{S}$ - вектор свойств системы, включающий компоненты векторов $\bar{Z}$, определяемые конструкцией ВКМ и $\bar{\tau}$ - определяемые технологическим процессом изготовления ВКМ; $\bar{V}$ - вектор свойств технологической системы, в которой изготавливается ВКМ.

В результате анализа функций ВКМ как технической системы, основанного на принципе выделения и рассмотрения структур с двухуровневой иерархией, раскрыты связи компонентов вектора $\bar{Y}_a$, которыми являются объемная производительность $\bar{V}_t$, коэффициент подачи η_v , индикаторный к.п.д. η_i , удельная потребляемая мощность $N_{уд}$ и др., с компонентами векторов $\bar{S}$, $\bar{\eta}$ и $\bar{Z}$. На основе исследований Тарасова А.М. формализация этих связей представлена в виде дифференциального уравнения состояния рабочего тела в парной полости:

$$\begin{aligned}dp\left(1 - \frac{k-1}{k} \frac{GRT}{Vp}\right) &= \frac{pT(dG_{вх} - dG_{вых}) - p dV}{V} + \frac{G \cdot T_1 + d(G \cdot T_1)_{вх} - T(G + dG_{вх})}{G \cdot R \cdot V(G + dG_{вх})} + \\ &+ \frac{(k-1)RT}{V(dG_{вх} - dG_{вых})} + \frac{R \cdot C_F(T - T_{сг})dT}{VC_v},\end{aligned} \quad (2)$$

где p, V, T, G - текущие давление, объем, температура и масса рабочего тела в парной полости; k - показатель адиабаты; R - газовая постоянная; $dG_{вх}, dG_{вых}$ - масса рабочего тела поступившего и вышедшего из парной полости за время dt ;

α - коэффициент теплоотдачи корпуса; F_T - площадь поверхности полости; $T_{ст}$ - температура стенок полости; C_v - удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Анализ зависимостей (1) и (2) показал, что определяющее влияние на их величины оказывает геометрия проточной части ВКМ, включающая параметры конфигурации профилей зубьев роторов и щелей между рабочими органами.

Для исследования влияния конфигурации профилей зубьев на показатели качества ВКМ по оценке основных геометрических характеристик зацепления (суммарной площади впадин между зубьями, длины их линии контакта и площади треугольной щели) были разработаны их геометрические модели отдельно для тыльных и передних частей. Каждая из моделей охватывала всю теоретически возможную область существования профилей зубьев; при этом учитывалась возможность их обработки высокопроизводительным методом обкатки.

Применительно к геометрическим моделям профилей зубьев разработаны обобщенные методики расчета изменения объема парной полости, площади окна нагнетания, длин и конфигурации щелей между рабочими органами ВКМ в зависимости от угла поворота роторов и параметров этих моделей.

С целью установления зависимости профильных зазоров от указанных выше факторов использовался метод обращения движения; влияние каждой элементарной погрешности сводилось к микроперемещениям профиля зуба ведомого ротора вдоль взаимно перпендикулярных осей $\Delta x = f_1(\Delta_1, \dots, \Delta_n, \varphi, l_i)$ и $\Delta y = f_2(\Delta_1, \dots, \Delta_n, \varphi, l_i)$ и микроповороту вокруг оси его вращения $\Delta \varphi = f_3(\Delta_1, \dots, \Delta_n, \varphi, l_i)$. Это позволило описать влияние технологических погрешностей на величины профильных зазоров следующей формулой:

$$\begin{aligned} S_n = & \sin \arctg(B_1/2\pi r) [\Delta_3 \pm f_1(\Delta_1, \dots, \Delta_n, \varphi, l_i) \times \\ & \times \cos \arctg(dx_2/d\varphi)/(dy_2/d\varphi) \pm f_2(\Delta_1, \dots, \Delta_n, \varphi, l_i) \times \\ & \times \sin \arctg(dx_2/d\varphi)/(dy_2/d\varphi) \pm f_3(\Delta_1, \dots, \Delta_n, \varphi, l_i) \times \\ & \times \sin \arctg|y_2|/|x_2| - \arctg(dx_2/d\varphi)/(dy_2/d\varphi) \pm f_7(a_1, \dots, a_n, l_i)], \end{aligned} \quad (3)$$

где B_1 - шаг винта ведущего ротора; r - расстояние от оси вращения ведомого ротора до точки контакта теоретических профилей; Δ_3 - занижение профиля ведомого ротора в данной точке;

x_2, y_2 - координаты точки касания профилей; φ - параметр профиля; $f_T(a_1, \dots, a_n, l_1)$ - величина изменения зазора в результате тепловых деформаций роторов и корпуса; φ_1 - угол поворота ведущего ротора; l_1 - расстояние от торца всасывания до рассматриваемой точки линии контакта роторов.

Формула (3) позволяет рассчитывать величины профильных зазоров для любого профиля зубьев в произвольном их торцевом сечении. С её дополнением эмпирическими зависимостями коэффициентов расхода щелей, полученных Захаренко С.Е., Сакуном И.А., Алешиным В.И., Верным А.Л. и другими авторами стало возможным нахождение массы газа протечек в единицу времени.

Показатели качества ВКМ определялись после построения расчетной индикаторной диаграммы по результатам решения дифференциального уравнения (2). Необходимые для этого эмпирические зависимости коэффициентов расхода окна нагнетания от условий нагнетания и конфигурации проточной части находились экспериментальным путем.

Таким образом, разработанные методики математического моделирования геометрии проточной части ВКМ с определением параметров состояния рабочего тела в парной полости позволили функционально связать показатели качества ВКМ с параметрами конфигурации профилей зубьев и отклонениями формы и расположения поверхностей винтовых частей роторов.

Все методики реализованы на ЭВМ серии ЕС в виде единого комплекса библиотечных фортран-программ.

В третьей главе изложены методика и результаты экспериментальных исследований по уточнению математической модели качества ВКМ и проверке её адекватности реальному процессу.

Экспериментальная установка представляла собой маслозаполненный винтовой компрессор, входящий в состав холодильного компрессорного агрегата АВЕ-160 и выполненного по схеме "газовое кольцо". Установка позволяла изменять давления всасывания от 0,3 до 0,8 МПа и давления нагнетания от 1,0 до 1,7 МПа и измерять потребляемую мощность, расход рабочего тела в "газовом кольце", температуру и расход масла и охлаждающей воды на входе и выходе, температуру роторов и корпуса, текущее давление в парных полостях и в патрубках всасывания и нагнетания, величины зазоров в подшипниках и между зубьями роторов.

Варьируемые параметры при экспериментальных исследованиях представляли собой набор управляющих параметров в математической модели качества ВКМ. Изменение профильных зазоров в зацеплении роторов моделировалось косвенным образом путем расточки вкладышей подшипников скольжения роторов, положение цапф которых фиксировалось специально установленными в подшипниках первичными преобразователями.

Перед сборкой компрессора и проведением экспериментов с помощью высокоточных универсальных измерительных средств измерялись геометрические параметры роторов и корпуса, определяющие величины зазоров между рабочими органами ВКМ. Параметры винтовых частей роторов, имеющих асимметричный профиль зубьев, измерялись на специальном стенде на основе оптической делительной головки.

Текущие значения давлений рабочего тела в парной полости и температуры роторов фиксировались емкостными первичными преобразователями и термопарами, установленными во впадинах ведомого ротора на стороне всасывания и нагнетания. Профильные зазоры измерялись вихретоковыми первичными преобразователями, установленными на передней и тыльной частях зубьев ведущего ротора на сторонах всасывания и нагнетания. Сигналы с первичных преобразователей выводились с помощью ртутных токосъемников.

Из-за большого количества регистрируемых параметров, высокой скорости их изменения и, в связи с этим, необходимости автоматизации их первичной статистической обработки в качестве регистрирующей аппаратуры применялся двухканальный частотный анализатор 2032 фирмы "Брюль и Кьер" с элементами вычислительной техники и графическим регистратором. В качестве синхронизирующего на второй канал анализатора подавался сигнал с индуктивного отметчика положения ведомого ротора.

Экспериментальные исследования были разделены на две серии. В первой серии использовались подшипники роторов, расточка которых обеспечивала средний зазор между вкладышем и цапфой 0,05 мм, а во второй серии — 0,1 мм. В каждой серии экспериментов изменялась внешняя степень повышения давления варьированием давлений всасывания и нагнетания в указанных выше пределах.

По результатам экспериментальных исследований получены зависимости температуры роторов по их длине от параметров режима работы ВКМ и коэффициента расхода окна нагнетания от критерия подобия Рейнольдса. Указанные зависимости были введены в математическую модель качества ВКМ.

Проверка адекватности математической модели проводилась в два этапа. На первом этапе анализировались величины профильных зазоров между роторами, а на втором этапе сравнивались показатели качества ВКМ, полученные теоретическим и экспериментальным методами.

Установлено, что величины профильных зазоров между передними частями в 3-5 раз больше, чем эти зазоры между тыльными частями зубьев роторов. Сравнительный анализ результатов первой и второй серий экспериментов показал, что увеличение зазоров в подшипниках скольжения приводит к увеличению профильных зазоров между роторами во всех точках их линии контакта. При этом теоретические и экспериментальные исследования имели расхождения не превышающие 10%.

Исследования коэффициента подачи и индикаторного к.п.д. в зависимости от указанных выше варьируемых параметров показали, что увеличение профильных зазоров в среднем на 30% приводит к снижению показателей качества на 6,5-7%. Зависимость индикаторного к.п.д. от внешней степени повышения давления носит экстремальный характер, максимальное значение которой соответствует равенству геометрической степени сжатия и внешней степени повышения давления.

Получение экспериментальных зависимостей показателей качества ВКМ от внешней степени повышения давления и профильных зазоров и сравнение их с теоретическими зависимостями показало их удовлетворительную сходимость. Это позволило сделать вывод об адекватности математического описания рассматриваемого процесса.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния на показатели качества параметров геометрии проточной части, их оптимизации, разработке и внедрению предложений и мероприятий по повышению качества ВКМ.

С учетом установленной совокупности управляющих параметров геометрии проточной части и определения их влияния на показатели качества функционирования ВКМ был сформулирован оптими-

зируемый комплекс, включающий целевую функцию, функциональные и областные ограничения.

Целевая функция, сформулированная на основе рассмотрения ВКМ как сложной системы, представляет собой себестоимость сжатия единицы объема газа и учитывает затраты как на изготовление так и на эксплуатацию ВКМ:

$$\mathcal{Z} = \frac{3_m + (1+A/100)(\sum m_{km} T_{km}^{TP} + \sum m_{ic} T_{ic}^{TP}) + P_u + P_{ob} + \eta_{эл} U_3 N_{уб} + C_o}{60 V_t \eta_v [t_{st} t_p - (n_k t_{nk} + n_c t_{nc} + n_t t_{nr})]}, \quad (4)$$

где в числителе представлены затраты на изготовление и эксплуатацию ВКМ, включающие затраты на материалы 3_m , суммарные затраты на изготовление $\sum m_{km} T_{km}^{TP}$ и сборку $\sum m_{ic} T_{ic}^{TP}$ ВКМ, а также затраты на электроэнергию $\eta_{эл} U_3 N_{уб}$ и стоимость ремонтов, масла и воды C_o . В знаменателе – объемное количество сжатого газа за весь срок службы компрессора.

Трудоемкость механической обработки и сборки определялась по результатам анализа конструкторской и технологической документации и нормативов времени по двум вариантам: с обработкой роторов традиционным методом бесцентроидного огибания и предлагаемым в работе методом обката. Областные ограничения обуславливались: для параметров профилей зубьев роторов – основной теоремой зацепления и условием герметичности парных полостей; для элементарных погрешностей, входящих в формулу (3) – точностными возможностями металлорежущего оборудования. Функциональные ограничения обуславливались математической моделью качества ВКМ, связывающей показатели качества V_t , η_v ,

$N_{уб}$ с управляющими параметрами. Однако использование её в оптимизирующем комплексе значительно увеличивает затраты машинного времени и оптимизация становится труднореализуемой. Поэтому с целью упрощения функциональных ограничений были получены регрессионные зависимости показателей качества от управляющих параметров.

Процесс получения зависимостей состоял из двух этапов. На первом этапе в результате машинного эксперимента с использованием полного факторного эксперимента получены зависимости показателей качества от параметров профилей зубьев роторов.

На втором этапе с помощью пакета статистической обработки опытных данных **BM DP** методом множественного регрессионного анализа оценивалось влияние точности геометрических параметров на указанные выше показатели качества. Подготовка исход-

ных данных для анализа осуществлялась с использованием теории планирования дробного многофакторного эксперимента. Оценка коэффициентов регрессии по t - критерию и оценка регрессионных зависимостей по F - критерию показала их статистическую значимость и адекватность.

Процесс оптимизации был реализован с помощью библиотечной программы MNØ6R, входящей в математическое обеспечение ЭВМ ЕС-1055, разработанного в МГУ им.М.В.Ломоносова, и осуществлялся методом покоординатного спуска.

В результате оптимизации синтезированы новые профили зубьев роторов, обеспечивающие повышение производительности ВМ на 1,2%, увеличение коэффициента подачи и индикаторного к.п.д. на 1%. Эти профили позволяют применить для их обработки метод обкатки, что увеличивает производительность обработки в 2,2 раза. Синтезированные профили защищены авторскими свидетельствами на изобретения (а.с. № 1135922, № 1151712).

Оптимизация точностных требований к параметрам винтовых частей роторов позволила научно обосновать их допуски и предельные отклонения, разработать метод и величины занижений теоретического профиля ведомого ротора с целью обеспечения минимально допустимых зазоров между зубьями роторов.

По результатам оптимизации параметров геометрии проточной части разработаны и приняты к внедрению во Всесоюзном научно-исследовательском конструкторском и проектно-технологическом институте холодильного машиностроения (ВНИИхолодмаше) Минхиммаша СССР проекты стандартов предприятия "Компрессоры холодильные винтовые маслозаполненные. Роторы винтовых компрессоров. Параметры винтовых частей и теоретические профили зубьев" и "Компрессоры холодильные винтовые маслозаполненные. Роторы винтовых компрессоров. Номинальные профили зубьев роторов и допуски параметров их винтовых частей". В практику проектирования винтовых компрессорных холодильных агрегатов ВНИИхолодмаша внедрен пакет прикладных программ, реализующий математическую модель качества ВМ, позволяющий автоматизировать значительную часть расчетных работ и повысить качество проектирования.

В результате проведенных исследований внедрен в практику проектирования ВНИИхолодмаша руководящий документ РД-0555-119-86 "Компрессоры винтовые. Методика расчета сил, действующих на роторы".

С учетом рекомендаций, полученных в диссертационной работе, рассчитаны и изготовлены дисковые фрезы для профилирования опытного образца ВКМ. Документация передана на Читинский машиностроительный завод.

По результатам исследований разработана методика и программа профилирования червячных фрез для обработки роторов, проведена её апробация при проектировании и изготовлении червячных фрез для обработки роторов с новым профилем зубьев и наружным диаметром роторов 160 мм. Методика и программа используются в конструкторской практике ВНИИхолодмаша.

Экономический эффект от внедрения предложенных технических результатов работы получен за счет снижения затрат на производство и эксплуатацию ВКМ и составляет 278,03 тыс. рублей в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных и производственных данных по управлению качеством винтовых компрессорных машин показал, что определяющее влияние на показатели качества ВКМ (производительность, коэффициент подачи, удельную потребляемую мощность и др.) оказывает геометрия проточной части, характеризуемая параметрами конфигурации профилей зубьев роторов и точностными параметрами их винтовых частей.

2. Установлено, что воздействие на точность параметров винтовых частей роторов, определяющую основную долю протечек в винтовой компрессорной машине, неразрывно связано с вопросами профилирования и конфигурацией профилей зубьев.

3. В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы повышения качества ВКМ, заключающиеся в комплексной оптимизации параметров профилей зубьев и требований к точности винтовых частей роторов и основанные на раскрытии механизма влияния параметров геометрии проточной части на показатели качества ВКМ, а также на затраты при изготовлении и эксплуатации.

4. В результате моделирования с использованием теории термодинамики тела переменной массы и теории точности получена

математическая модель качества ВКМ, в которой в зависимости от параметров конфигурации профилей зубьев, точности изготовления роторов и эксплуатационных факторов рассчитываются показатели качества. Экспериментально подтверждена адекватность модели реальному процессу. С её реализацией на ЭВМ решены предпосылки создания автоматизированной системы проектирования ВКМ.

5. Определено влияние на показатели качества ВКМ основной части конструкции роторов – конфигурации зубьев. Синтезированы защищенные двумя авторскими свидетельствами на изобретения (а.с. № И135922 и № И151712) новые профили, применение которых позволяет повысить производительность ВКМ на 1,2% и увеличить коэффициент подачи и индикаторный к.п.д. на 1%.

6. Выявление закономерностей влияния отклонений формы и расположения поверхностей винтовых частей роторов на показатели качества ВКМ позволило научно обосновать метод и величины занижений теоретического профиля зубьев, обеспечивающие минимально безопасные профильные зазоры с учетом применения для обработки роторов как метода бесцентроидного огибания дисковыми фрезами так и метода обкатки червячными фрезами.

7. В результате комплексной оптимизации параметров геометрии проточной части, выбора параметров профилей зубьев роторов и нормирования их точности снижена удельная потребляемая ВКМ мощность на 1,5%. Внедрение разработанных рекомендаций позволяет применить для профилирования роторов метод центроидного огибания червячными фрезами, обеспечивающий повышение производительности обработки в 2,2 раза.

8. Результаты исследований внедрены на Читинском машиностроительном заводе и во Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте холодильного машиностроения. Экономический эффект, полученный за счет повышения показателей качества ВКМ, составит 278,05 тыс. рублей в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печатных работах:

1. Математическая модель функционирования винтовой компрессорной машины /А.Н.Виноградов, А.В.Калашин, Н.П.Курышкин, В.К.Санников //Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок: Тез.

докл. УП Всесоюзн. научно-техн. конф. - Казань, 1985.

- С.171-172.

2. А.с. 1135922 СССР, МКИ³ F 04C 18/16. Зубчатое зацепление винтового компрессора /А.Н.Виноградов, И.А.Бугрова, Н.П.Курышкин (СССР). - № 3593183/25-06; Заявлено 20.05.83; Опубл.

23.01.85, Бюл. № 3 //Открытия. Изобретения. - 1985. - № 3. - С.86.

3. А.с. 1151712 СССР, МКИ³ F 04C 18/16. Зубчатое зацепление винтового компрессора /А.Н.Виноградов, И.А.Бугрова, Н.П.Курышкин (СССР). - № 3729319/25-06; Заявлено 25.04.84; Опубл.

23.04.85, Бюл. № 15 //Открытия. Изобретения. - 1985. - № 15. - С.73.

4. Виноградов А.Н., Курышкин Н.П., Санников В.К. Математическое моделирование профильных зазоров в винтовых компрессорах //Известия вузов. Машиностроение. - 1985. - № 6. - С.61-64.

5. Виноградов А.Н., Курышкин Н.П., Санников В.К. Исследование влияния технологических факторов на профильные зазоры винтовых компрессоров //Известия вузов. Машиностроение. - 1985.

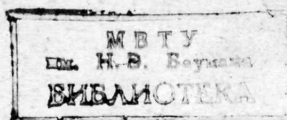
- № 7. - С.60-62.

6. Виноградов А.Н., Курышкин Н.П. Новые профили зубьев роторов винтовых компрессорных машин //Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок: Тез. докл. УП Всесоюзн. научно-техн. конф. - Казань, 1985. - С.170-171.

7. Виноградов А.Н., Курышкин Н.П. Особенности профилирования обкатного инструмента для обработки роторов винтовых компрессоров //Известия вузов. Машиностроение. - 1982. - № 12. - С.83-85.

8. Контрольно-измерительный комплекс для исследования качества функционирования винтовых компрессоров /А.Н.Виноградов, С.А.Володичев, Н.П.Курышкин и др. //Химическое и нефтяное машиностроение. - 1986. - № 8. - С.15-16.

9. К расчету геометрических параметров винтовых компрессорных машин /А.Н.Виноградов, Г.А.Каньшев, Н.П.Курышкин и др. //Химическое и нефтяное машиностроение. - 1986. - № 11. - С.11-12.



ОП. 06172. Заказ 395, тираж 100 экз. Объем 1 п.л.,
формат 60х84 1/16, печать офсетная.
Типография Кузбасского политехнического института.

650027, Кемерово, ул. Красноармейская, 115