

М407641

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

На правах рукописи

ХЛЕБОВА Инна Леонидовна

УДК 621.513.21

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
КАЧЕСТВА ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ МАЛЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Специальность 08.00.20 - "Стандартизация и
управление качеством продукции" (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1963

Работа выполнена в Кировском политехническом институте.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент А.Н.Эиноградов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
доцент П.И.Пластинин
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Д.Б.Плескачева.

Ведущее предприятие: завод "Борец"

Защита состоится 30 июля 1983 г. в _____ час.
на заседании специализированного Совета К-053.15.16 в Москов-
ском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Тру-
дового Красного Знамени Высшем техническом училище им.Н.Э.Бау-
мана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская, дом. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный
печатью, просим направлять по указанному адресу.

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

Авторе

Учен
специал
канд
д

М.-997

Тир. 1

Ротапр

Г.

ем I п.л.

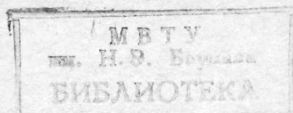
М 407641

Решения XXVI съезда КПСС предусматривают дальнейшее развитие материально-технической базы нашей страны на основе повышения эффективности и качества выпускаемой продукции при экономии энергетических ресурсов во всех сферах народного хозяйства.

Одним из средств укрепления энергетической базы промышленности является развитие энергомашиностроения и, в частности, компрессоростроения. Изделия этой отрасли составляют 15% всей машиностроительной продукции страны. Массовым спросом пользуется продукция холодильного машиностроения — особенно: малые холодильные машины с холодопроизводительностью до 300 ккал/ч; 95% всех машин данного класса составляют паровые компрессионные машины, которые находят широкое применение в быту, пищевой промышленности, торговле и т.д. Так, общий выпуск только бытовых холодильников с полезным объемом до 0,5 м³ составляет в СССР около 6,5 млн. шт. в год, что может обеспечить хранение 360000 т пищевых продуктов. Для работы бытовых холодильников в стране потребляется свыше 6 млн. кВт электрической энергии, поэтому важную народнохозяйственную задачу представляет снижение энергоемкости каждого отдельного холодильного агрегата. К малым холодильным машинам предъявляются требования по стабильности и надежности обеспечения заданного холодильного эффекта в течение 10...15 лет работы. Нормальное функционирование холодильного агрегата в значительной степени зависит от уровня качества компрессора. Выпускаемые отечественной промышленностью бытовые холодильники емкостью до 2,4 м³ оборудованы поршневыми герметичными мотор-компрессорами моделей ДХ2-1010А, ДХ-1010А, "Г-О, 14 и другими их конструктивными модификациями, которые изготавливаются в ряде городов страны, в том числе и на машиностроительном производственном объединении имени XX партсъезда г. Кирова, где годовое производство моделей ДХ2-1010 и ДХ2-1010А составляет 750000 штук в год.

Несмотря на существующую тенденцию увеличения частоты вращения эти модели, в том числе и исследуемая модель ДХ2-1010А, успешно конкурируют по своим эксплуатационным показателям с моделями высокооборотных компрессоров, однако, удельные показатели качества отечественных моделей ниже, чем поршневых компрессоров, например, фирмы *Secumseh* (США), недостаточно обеспечивается стабильность объемной производительности.

Необходимость уменьшения энергоемкости, повышения ресурса работы и стабильности объемной производительности выпускаемых моделей,



а также тенденция к расширению номенклатуры компрессоров для холодильных агрегатов различного назначения требует создания обобщенных научно-обоснованных методов повышения качества компрессоров и прогнозирования эксплуатационных показателей на стадии проектирования. Разработка таких методов является актуальной задачей как для любой конкретной модели, так и в масштабе отрасли.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории вероятности и математической статистики: теории случайных функций, регрессионный анализ, метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), а также анализ напряженного состояния по теории предельных напряженных состояний и метод ускоренных испытаний на износ. Расчеты проводились на ЭЦМ ЕС-1030 с использованием современных методов программирования.

Цель работы является исследование и разработка методов повышения качества поршневых компрессоров малых холодильных машин на стадиях проектирования и освоения моделей, позволяющих уменьшить рассеяние объемной производительности и энергоемкость холодильных агрегатов, повысить надежность их эксплуатации при учете реальных условий технологического производства.

Научная новизна. Разработаны методы повышения качества поршневых компрессоров за счет назначения рациональной точности зазоров в механическом узле компрессора по оптимальным значениям обобщенного показателя качества с учетом требований, предъявляемых к величине и допустимым отклонениям единичных показателей качества при эксплуатации.

Разработана математическая модель, алгоритм и программа для расчета численных параметров нормального распределения объемной производительности компрессоров по заданной точности изготовления деталей с учетом динамики их износа, что позволяет на стадии проектирования оценить стабильность и функциональные взаимосвязи показателя эффективности с точностью конструктивных параметров.

Разработана методика расчета вероятности отказа компрессора по объемной производительности при изменении точности одного из конструктивных параметров с учетом рассеяния предельных значений этого параметра. Методика позволяет определить функциональную взаимосвязь конструктивных параметров с показателем надежности. Получена формула для расчета удельной относительной энергии формирования шероховатого профиля сопряженных деталей в условиях жидкостного трения, которую предлагается использовать для назначения

параметров шероховатости t_p , R_{max} и обеспечивать за счет этого уменьшение энергоемкости компрессора.

Практическая ценность и реализация научных результатов работы.

Разработанные методы позволяют на стадии проектирования прогнозировать и обеспечивать оптимальные качественные показатели поршневых компрессоров любых моделей за счет назначения рациональной точности конструктивных параметров и параметров шероховатости поверхностей деталей, что сокращает время освоения новых моделей в 1,5...2 раза при снижении энергоемкости в процессе эксплуатации. Результаты работы отражены в двух СТП: "Обеспечение качества поршневых компрессоров за счет нормирования рациональной точности конструктивных параметров", "Оценка эффективности внедрения методов и средств управления качеством продукции", которые могут быть использованы на предприятиях отрасли. Применение этих СТП и разработанных методов расчета позволило дать рекомендации по изменению зазора в сопряжении "поршень - цилиндр", линейного мертвого зазора, зазоров в сопряжениях коленчатого вала и параметров шероховатости поверхностей трения отдельных сопряжений компрессора модели ДХ2-1010А. Внедрение рекомендаций по изменению зазора в сопряжении поршень - цилиндр на Хировском МПО им. XX партсъезда позволило получить годовой экономический эффект в сумме 83000 руб. за счет уменьшения интенсивности износа деталей и повышения надежности работы компрессора. Ожидаемый годовой экономический эффект по уменьшению энергоемкости компрессоров за счет внедрения комплекса рекомендаций составит в сфере производства 2,5 тыс. кВт/час., в сфере потребления - около 30 млн. кВт/час., по повышению стабильности объемной производительности - 2,2%.

Выпущена и сдана на кодконтрольную эксплуатацию опытно-промышленная партия компрессоров с заданными конструктивными параметрами.

Апробация работы и публикации. Основные материалы диссертационной работы докладывались на V-й Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по энергомашиностроению в 1980 г., Всесоюзном научно-практическом семинаре в МЭСИ в 1983 г., научных семинарах кафедры "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ им. Н.Э.Баумана и отражены в трех печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 138 наименований и приложений. Основной текст диссертации содержит 142 страницы машинописного текста, 36 рисунков. Приложения включают в себя 27 таблиц с результатами исследований и расчетов.

Содержание работы. В главе I - "Анализ методов и средств повышения качества поршневых компрессоров", рассматривается современное состояние проблемы управления качеством изделий в энергомашиностроении и поршневых компрессоров малых холодильных машин, в частности.

Основные теоретические положения и практические рекомендации в этой области, разработанные в работах советских ученых В.В.Борцова, В.В.Ткаченко, В.И.Постева и др., указывают на необходимость создания оптимального соотношения между различными свойствами изделий с целью получения максимального экономического эффекта от их эксплуатации и потребления. Отмечается, что наиболее важной стадией жизненного цикла изделий при формировании их "качества" является стадия проектирования. Методы управления качеством на этой стадии, разработанные советскими учеными Н.А.Боролачевым, Е.С.Балакиным, Н.А.Колатниковым, Л.И.Акушевым, Б.А.Ташем, И.В.Луниным-Барковским и др., требуют изучения качественных и количественных взаимосвязей точности конструктивных параметров узлов и деталей (зазоров в сопряжениях, отклонений формы, шероховатости и т.д.) с показателями качества при эксплуатации изделий. Развитие этих методов продолжается в направлении разработки и автоматизации методов расчета начальной точности конструктивных параметров для конкретных машин. Исследования и решению прикладных задач в области энергомашиностроения посвящены работы В.Г.Калитенко, А.Н.Виноградова, В.А.Милованова и др. авторов. 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 компрессоров малых холодильных машин.

Как показал анализ литературных и производственных данных, при разработке новых моделей и совершенствовании внедренных конструкций компрессоров назначение или изменение точности конструктивных параметров осуществляется по результатам опыта эксплуатации машин-аналогов, что не всегда дает нужный положительный эффект и увеличивает срок освоения новых моделей.

Одной из особенностей развития современных методов расчета является требование оценки надежности изделия, как одного из основных показателей качества, который характеризует процесс изменения функционального состояния машины во времени.

Теоретические основы и методы анализа изменения надежности изделий, разработанные Б.В.Гусленко, Н.Б.Гердбахом, Х.Б.Кордонским, А.С.Прониковым и др. позволяют оценить вероятность отказов и

безотказной работы механической системы как функций времени и скорости изменения качественных показателей. Однако разработанные методы не в полной мере отражают специфику формирования показателей качества поршневых компрессоров, что требует дальнейшего совершенствования методов анализа и расчета надежности машин данного класса при учете изменения точности деталей в процессе износа.

Анализ результатов исследований процессов трения и износа, выполненных советскими учеными П.И.Дьяченко, М.Н.Хрущевым, И.З.Крагельским, А.С.Прониковым и др. показал, что фундаментальные теории и методы расчета разработаны в области изучения контактного взаимодействия твердых тел. Значительная роль при этом отводится шероховатости поверхностей. Назначение шероховатости, близкой к равновесной, обеспечивает условия минимального износа с самого начала эксплуатации и является резервом повышения качества машин. Однако, в настоящее время не решен вопрос о причинах возникновения и методах назначения такой шероховатости при изготовлении деталей, отсутствуют методы количественной оценки влияния шероховатости на энергоемкость механизмов.

В поршневом компрессоре взаимодействие подвижных деталей происходит через сопряжения с гарантированными зазорами в присутствии смазки, при этом имеет место изменение шероховатости трущихся поверхностей и износ деталей. Однако вопрос влияния смазки на взаимодействие шероховатых поверхностей исследован недостаточно. Изучение механизма этого влияния является необходимым условием для определения величины зазоров и шероховатости, обеспечивающих наименьшие энергоемкость и износ деталей.

Таким образом, для повышения качества машин и поршневых компрессоров, в частности, необходимо разработать такие методы, которые позволили бы определять при проектировании точность конструктивных зазоров и параметров шероховатости на основе требований, предъявляемых к полной совокупности единичных показателей качества эксплуатации, а также решать задачу прогнозирования величины и стабильности этих показателей по точности изготовления конструктивных параметров отдельных деталей и шероховатости поверхностей.

В настоящее время такие методы для поршневых компрессоров малых холодильных машин не разработаны и не стандартизованы, в результате чего научно-методическое руководство созданием требуемого уровня качества этих изделий на начальных стадиях создания продукции обеспечено недостаточно.

В соответствии с этими задачи настоящей работы определены следующим образом:

- разработать методы, обеспечивающие повышение качества поршневых компрессоров до оптимального технического уровня качества на начальных стадиях создания продукции;

- установить номенклатуру показателей качества, характеризующую процесс эксплуатации поршневого компрессора, систематизировать разгерметичные и функциональные связи конструктивных зазоров и параметров шероховатости с этими показателями;

- разработать расчетную модель для прогнозирования величины и стабильности показателей качества на этапе проектирования с учетом изменения точности конструктивных параметров в процессе износа;

- разработать расчетный метод назначения точности конструктивных зазоров по комплексной оценке их влияния на единичные качественные показатели;

- исследовать взаимодействие шероховатых поверхностей при наличии смазки, разработать метод оценки влияния шероховатости поверхностей трения на энергоемкость поршневых компрессоров;

- разработать стандарты предприятия по обеспечению качества поршневых компрессоров и использовать их для определения рациональной точности основных конструктивных зазоров в реальной модели компрессора;

- внедрить рекомендации по назначению точности конструктивных зазоров и параметров шероховатости в производство поршневых компрессоров модели ДХ2-ЮЮЮА.

В главе 2 "Разработка методов повышения качества поршневого компрессора" на основе системного подхода к анализу взаимодействия узлов и отдельных деталей поршневого компрессора в процессе работы устанавливаются количественные взаимосвязи между основными показателями качества эксплуатации и точностью конструктивных параметров с учетом изменения этих параметров при износе деталей. Теоретически исследуется вопрос влияния формы микропрофиля шероховатых поверхностей на энергоемкость компрессора. Разрабатываются методы нормирования рациональной точности зазоров и шероховатости трущихся поверхностей.

Установлено, что основными показателями качества, которые характеризуют процесс эксплуатации поршневого компрессора, как энергетической машины, являются: эффективность (объемная производительность V ($\text{м}^3/\text{с}$)), энергоемкость (электрическая потребляемая мощность P_e (Вт)), надежность (вероятность безотказной работы $P(t)$).

Анализ энергетического баланса поршневого компрессора позволил

установить, что на эффективность работы компрессора и величину электрической потребляемой мощности оказывают влияние одни и те же конструктивные параметры, например, величина зазора в сопряжении поршень-цилиндр S_1 и величина мертвого объема под поршнем, которая условно характеризуется расстоянием от торца поршня до нагнетательного клапана или линейным мертвым зазором S_2 при верхнем положении поршня.

Величина и рассеяние этих зазоров могут быть определены на основе теории размерных цепей по точности изготовления отдельных деталей с учетом величин зазоров в сопряжениях. Исследования показали, что для математического описания процесса преобразования размерных связей в функциональные связи зазоров S_1 и S_2 с энергетическими показателями можно использовать известные из термодинамики соотношения для изменения состояния газа при политропическом сжатии и теоретическую зависимость, полученную С.В.Захаренко для определения весовых утечек газа через целевой зазор. Наличие функциональных связей с показателями качества позволило применить к зазорам S_1 и S_2 термин "функциональные". При износе деталей в процессе эксплуатации функциональные зазоры изменяются, что приводит к изменению энергетических показателей качества и надежности компрессора. Отказ поршневого компрессора будет иметь место, если один из энергетических показателей качества достигнет своего предельного значения. Таким образом, скорость изменения функциональных зазоров, в конечном счете, определяет надежность и ресурс работы компрессора.

Для определения взаимосвязи функциональных зазоров с показателем надежности выполнен анализ процесса изменения функционального состояния компрессора до отказа по одному из энергетических показателей - объемной производительности, причем взаимосвязь конструктивного параметра с этим показателем исследуется в 3-х мерном пространстве с координатами: объемная производительность (V_L) - функциональный зазор (S_i) - время (t_i), а объемная производительность компрессоров представлена как случайная функция двух зависимых переменных - зазора и времени. Отказ компрессора в зависимости от условий эксплуатации может произойти при некотором диапазоне значений зазора S_i . Такие зазоры называются предельными. Процесс формирования отказа рассматривается как процесс приближения, а затем наложения кривой нормального распределения текущих зазоров в заданные моменты времени на кривую распределения предельных зазоров. На основе выполненного анализа разработана методика расчета вероятности отказа

и безотказной работы поршневых компрессоров, которая позволила установить количественные соотношения численных параметров нормального распределения функционального зазора с параметрической надежностью компрессора в любой момент времени.

По результатам теоретических исследований разработана формализованная схема с математическим описанием взаимосвязей между конструктивными параметрами и показателем эффективности, которая была положена в основу разработки алгоритма и программы для моделирования процесса формирования и изменения во времени численных параметров нормального распределения этого показателя. Реализация программы на ЭВМ ЕС 1030 позволяет прогнозировать величину и стабильность показателя эффективности на стадии проектирования по заданной точности изготовления деталей, а также дает возможность оценить закономерности влияния функциональных зазоров S_i и S_n на объемную производительность.

Учитывая качественно противоположный характер влияния одного и того же зазора на различные единичные показатели качества, разработан метод комплексной оценки качества поршневых компрессоров с помощью обобщенного показателя, за который была принята целевая функция "полной желательности" D , предложенная Харингтоном Е.С.

$$D = \sqrt{d_1 \cdot d_2 \dots d_n} \quad (I)$$

где $d_1, d_2, \dots, d_n$ - частные функции желательности единичных показателей качества (откликов Y_i), связанные с конструктивными параметрами через закономерности влияния этих параметров на показатели качества.

Расчет и определение оптимального значения функции $D = f(S_i)$ позволяют установить и рекомендовать для изготовления пределы наиболее рациональных значений зазоров S_i , которые обеспечивают оптимальные соотношения и заданные отклонения единичных показателей качества. Для расчета зависимости (I) на ЭВМ ЕС 1030 разработана программа на языке ФОРТРАН-IV.

С целью определения способов уменьшения энергоемкости компрессора проведены теоретические исследования влияния шероховатости трущихся поверхностей на напряженное состояние и энергию формоизменения шероховатого профиля в условиях жидкостного трения. На основе энергетической гипотезы теории предельных напряжений получена зависимость для определения относительной энергии формоизменения шероховатой поверхности, где эквивалентные напряжения выражены через нормальное давление смазки и параметры, определяющие форму шероховатого профиля t_p и t_{gd} в относительных координатах.

$$\sigma_{\text{эф}} = \frac{1+m}{3E} \cdot \sigma_i^2 = \frac{1+m}{3E} P^2 (1 - t_p \sqrt{1 + t_g^2 \alpha}) \quad (2)$$

где σ_i - эквивалентное напряжение на заданном уровне сечения профиля;

P - давление смазки в сопряжении;

E, m - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала соответственно;

t_p - опорная длина профиля на заданном уровне в относительных координатах;

$t_g = \frac{dt_p}{dx}$ - отношение изменения опорной длины профиля к изменению уровня сечения или тангенс угла наклона элементарного участка профиля.

По сумме относительных энергий формоизменения двух сопряженных поверхностей $U_{\text{с1}} + U_{\text{с2}}$ можно оценить энергию, потребляемую на создание напряженного состояния и изменение формы шероховатого профиля при заданных условиях нагружения. Сравнение этих сумм энергии для трущихся пар, имеющих различную начальную форму шероховатого профиля позволит при проектировании и освоении моделей выбрать наиболее выгодный с точки зрения энергоемкости параметр шероховатости t_p и, на основе этого, корректировать технологический процесс изготовления деталей. Для расчета эквивалентных напряжений и относительной энергии формоизменения при $P = 1$ на ЭВМ ЕС 1030 разработана программа на языке ФОРТРАН-IV. Предложенный метод расчета создает предпосылки для определения условий формирования равновесной шероховатости трущихся поверхностей.

Таким образом, разработанные методы расчета позволяют обеспечить требуемое качество поршневых компрессоров при проектировании, повысить уровень качества при обработке моделей за счет нормирования рациональной точности функциональных зазоров и параметров шероховатости трущихся поверхностей, прогнозировать величину и стабильность качественных показателей во времени. Расчетные методы могут быть использованы как составные части комплексной системы управления качеством на заводах-изготовителях поршневых компрессоров любых моделей.

В главе 3 "Экспериментальные исследования влияния функциональных зазоров в подвижных сопряжениях на энергетические показатели качества поршневого компрессора" представлены методика и результаты экспериментальных исследований, которые проводились на базе теоретического анализа процесса формирования показателей качества с целью проверки возможности практического использования разработанных методов управления качеством поршневых компрессоров на начальных

стадиях создания новых моделей. На лабораторном стенде для измерения энергетических показателей качества поршневых компрессоров при постоянной температуре и давлении в цилиндре исследованы однофакторные функциональные зависимости влияния зазора в сопряжении поршень-цилиндр S_z и линейного мертвого зазора S_n на объемную производительность V_z и электрическую потребляемую мощность P_{el} . Для исследований были скомплектованы две выборки компрессоров модели ДХ2-1010А, численные параметры нормального распределения показателей

V которых соответствовали поля рассеяния этого показателя в условиях реального производства. Точность измерения объемной производительности составляла: $\bar{V}_z = 0,3 \text{ л/мин} = 0,005 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, точность измерения электрической потребляемой мощности - $\bar{P}_{el} = 0,5 \text{ Вт}$. Изменения величины зазоров S_z и S_n проводились за счет шлифования поверхности цилиндра и торца поршня до тех пор, пока значения объемной производительности не достигали $V_{p.min}$. Математическая обработка результатов проводилась методом регрессионного анализа, в результате чего были установлены линейные закономерности и границы полей рассеяния функций $V = f(S_z)$; $V = f(S_n)$. Оценка гипотезы линейности проводилась по критерию Фишера. Значимость коэффициентов регрессии проверялась по критерию Стьюдента. Одновременно определялись эмпирические закономерности $P_{el} = f(S_z)$ и $P_{el} = f(S_n)$, для расчета коэффициентов которых использовался метод наименьших квадратов. Установлено, что предельное состояние компрессора по производительности, когда $V_z = V_{p.min} = 6 \text{ л/мин} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ достигается при зазорах $S_z = (30...60) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и $S_n = (0,45...1,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Расчетом удельных показателей качества - $V_{уд}$ и $P_{уд}$ для последовательного ряда исследуемых зазоров определена возможность повышения качества модели за счет оптимизации этих зазоров. Процесс формирования и изменения численных параметров нормального распределения объемной производительности имитировался на ЭВМ методом статистических испытаний. При этом учитывалась реальная точность изготовления деталей, в том числе погрешности формы и расположения поверхностей. Для оценки изменений точности зазоров и показателя V во времени использовались результаты износных испытаний (глава 4). Реализация математической модели в последовательно заданные моменты времени позволила получить данные для определения закономерностей $V = f(S_z)$ и $V = f(S_n)$ расчетным методом. Установлена адекватность модели и уравнений регрессии, полученных по расчетным и экспериментальным данным на 5% уровне значимости, что позволяет применить разработанный метод

повышения качества на стадии проектирования.

С целью определения возможности повышения качества компрессоров за счет других факторов исследован вопрос о влиянии зазоров в опорах коленчатого вала S_2 и S_3 на эксплуатационные показатели компрессора. Исследованиями установлено, что при минимальных зазорах в сопряжении коленчатый вал-корпус $S_2 = 12 \cdot 10^{-6}$ м, мощность P_{ei} больше в среднем на 4,9%, чем при зазорах $S_2 > 20 \cdot 10^{-6}$ м. По результатам измерения P_{ei} на 22-х компрессорах определены значения и значимость коэффициентов уравнения регрессии второго порядка $P_{ei} = f(S_2, S_3)$. Установлено также, что увеличение мощности наблюдается как при наименьших технологических зазорах в сопряжении коленчатый вал-подшипник $S_3 = 6 \cdot 10^{-6}$ м, так и при наибольших $S_3 = 35 \cdot 10^{-6}$ м.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлена возможность повышения качества поршневых компрессоров модели ДХ2-1010А за счет назначения рациональной точности и функциональных зазоров и зазоров в подвижных сопряжениях; подтверждена возможность прогнозирования численных параметров нормального распределения объемной производительности и определения закономерностей влияния зазоров S_i и S_n на этот показатель с помощью математической модели, что позволяет использовать разработанный метод для определения величины и допуска этих зазоров на стадии проектирования новых поршневых компрессоров.

В главе 4 "Экспериментальные исследования влияния зазоров и шероховатости сопряженных поверхностей на износ деталей и энергоёмкость компрессора" представлены методика и результаты исследования комплекса взаимосвязанных факторов, оказывающих влияние на величину электрической потребляемой мощности компрессора и изменение точности зазоров во времени.

На базе теоретических исследований процессов взаимодействия сопряженных шероховатых поверхностей экспериментально исследованы изменения опорных кривых микропрофилей в процессе износа. Разработана методика назначения начальных значений параметра $\bar{t}_p$ по условию обеспечения наименьшей энергии формоизменения шероховатого микропрофиля.

Исследования износа деталей поршневых компрессоров проводились на стендах для износных испытаний. При этом начальные зазоры в сопряжениях обеспечивались подбором деталей, контролировались параметры шероховатости трущихся поверхностей. По результатам определения весового и размерного износа установлено, что начальные зазоры в

сопряжении поршень-цилиндр и в опорах коленчатого вала влияют на скорость весового износа деталей и увеличение зазоров по времени. При этом начальная шероховатость, выполняемая с $R_a < 0,16 \cdot 10^{-6}$ м, на всех контролируемых трущихся поверхностях корпуса и коленчатого вала увеличилась. После износа в течение 3360 часов шероховатость устанавливалась в соответствии с зазорами в сопряжениях.

По результатам износных испытаний компрессоров в среде хладона И2 установлены эмпирические закономерности влияния зазора в сопряжении поршень-цилиндр на износ поршня, определена интенсивность изнашивания и численные параметры нормального распределения зазоров после износа за период работы $t_p = 600$ часов, которые были использованы в математической модели для определения показателя эффективности компрессоров методом статистических испытаний. В последующей серии испытаний экспериментально проверялось влияние начальных зазоров и параметров шероховатости поверхностей поршня и цилиндра на изменение формы шероховатых профилей, износ и энергоемкость компрессоров при работе в среде хладона И2. Значения параметров шероховатости R_a, R_z, R_{max}, S_m определялись по профилограммам перед сборкой и после износа в заданные периоды времени. Начальная шероховатость поверхностей была $R_a = (0,08 \dots 0,14) \cdot 10^{-6}$ м и $R_z = (0,16 \dots 0,17) \cdot 10^{-6}$ м. Количественных связей наиболее часто применяемых параметров R_a, R_z, S_m с энергоемкостью компрессора не было получено. Анализ опорных кривых выполнялся на основе установленных теоретических закономерностей влияния параметра t_p на относительную энергию формоизменения профиля. Форма опорных кривых с достаточной для практики степенью приближения была выражена функцией $t_p = e^{-K^2 X^2}$ (3), где X — высота сечения шероховатого профиля от уровня впадин;

K^2 — коэффициент пропорциональности или коэффициент "кривизны" профиля. Коэффициент K^2 определялся для каждой опорной кривой по экспериментальным данным методом наименьших квадратов на ЭВМ ЕС 1030.

По формуле (2) с использованием соотношения (3) определялось распределение эквивалентных напряжений, приходящихся на единицу давления $P = 1$ по высоте микропрофиля и составляющие относительной энергии формоизменения σ_i^2 и $\sum \sigma_i^2$ для поверхностей поршня и цилиндра, работающих в сопряжениях с различными зазорами. Расчеты выполнялись на ЭВМ ЕС 1030 и позволили установить, что после приработки отношение расчетных значений относительной энергии формоизменения сопряженных поверхностей с различными коэффициентами K^2 количественно соответствует отношению электрических потребляемых мощностей

компрессоров с погрешностью 1,6%. Большое влияние на расчетную энергию формоизменения оказывает высота профиля. Сопряжения, относительная энергия формоизменения поверхностей которых больше, имеют увеличенный износ. Таким образом, по условию обеспечения наименьшей энергии формоизменения можно выбрать для принятых зазоров наиболее предпочтительную форму шероховатого профиля по параметру ζ_p через коэффициент K^2 и высоту по параметру R_{max} . Для исследуемой модели поршневого компрессора при среднем зазоре в сопряжении поршень-цилиндр $S_1 = 13,8 \cdot 10^{-6}$ м наиболее предпочтительной является форма шероховатого профиля поверхности поршня с $K^2 = 11,62$ при $R_{max} < 0,65 \cdot 10^{-6}$ м и цилиндра: с $K^2 = 6,74$ при $R_{max} < 0,97 \cdot 10^{-6}$ м. Разработанный расчетный метод может быть применен для выбора технологических методов получения поверхностей с заданным профилем шероховатости.

Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено влияние зазоров в сопряжении поршень-цилиндр и опорах коленчатого вала на износ деталей, подтверждена возможность оценки влияния формы микропрофиля шероховатых поверхностей поршня и цилиндра на энергоемкость компрессоров методом расчета и сравнения относительных энергий формоизменения сопряженных поверхностей с различной шероховатостью. Сделан вывод, что при зазорах, величина которых меньше оптимальной, часть потребляемой электрической энергии расходуется непроизводительно на создание напряжений в микрослое и повышенный износ поверхностей.

В главе 5 "Внедрение результатов исследования и определение эффективности использования методов повышения качества" рассматриваются вопросы стандартизации и практического использования разработанного метода повышения качества поршневых компрессоров малых холодильных машин за счет назначения рациональной точности зазоров в механическом узле компрессора.

Теоретические исследования и разработанные методы расчета обобщенного показателя качества поршневого компрессора, проверенные экспериментально, были положены в основу создания стандартов предприятия (СТП) "Обеспечение качества поршневых компрессоров за счет нормирования рациональной точности конструктивных параметров" и "Оценка эффективности использования методов и средств управления качеством продукции". В СТП приведены общие принципы управления качеством, методика расчета обобщенного показателя качества и рекомендации по определению рациональной точности функциональных зазоров. Разработан

метод расчета экономического эффекта от внедрения средств управления качеством за счет экономии энергии на один среднестатистический компрессор.

Для расчета экономического эффекта от повышения надежности компрессоров предлагается использовать разработанную методику расчета вероятности отказов и результаты экспериментальных исследований влияния начальных зазоров на интенсивность изнашивания.

В соответствии с разработанным и стандартизованным на уровне предприятия методом обеспечения качества рассчитаны на ЭВМ ЕС 1030 значения обобщенного показателя качества " D " для последовательных значений зазора в сопряжении поршень-цилиндр (S_1) и линейного мертвого зазора (S_2). На рис. 1 представлена графическая зависимость $D = f(S_1)$.

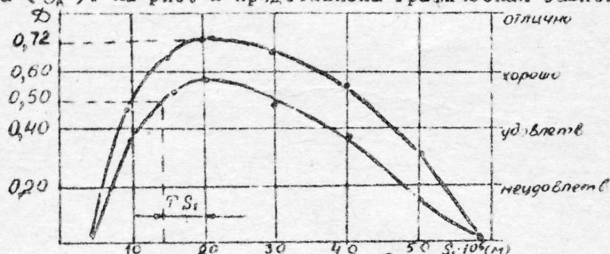


Рис. 1. Зависимость показателя качества " D " от величины зазора S_1 .

По оптимальным значениям показателя " D " определены допуски зазоров S_1 и S_2 , обеспечивающие оптимальное качество исследуемого компрессора по совокупности исследуемых единичных показателей качества и рекомендованы к внедрению следующие значения зазоров: $S_1 = (14 \dots 20) \cdot 10^{-6}$ м; $S_2 = (0,1 \dots 0,18) \cdot 10^{-3}$ м, а также зазоры в сопряжении коленчатый вал-подшипник - $S_3 = (12 \dots 28) \cdot 10^{-6}$ м.

Экспериментальная проверка показала, что изменение зазора S_1 до указанных пределов уменьшает интенсивность износа не только поршня, но и других деталей компрессора в среднем в 1,8 раза.

На первом этапе совершенствования конструкции внедрены зазоры $S_1 = (10 \dots 16) \cdot 10^{-6}$ м и рекомендованные значения шероховатости трущихся поверхностей поршня и цилиндра (см. главу 4), что позволило уменьшить энергоёмкость на 4,4% и повысить надежность работы компрессоров. Реальный годовой экономический эффект от внедрения данных рекомендаций составил 83 тыс. руб. за счет уменьшения отказов компрессоров в процессе эксплуатации. При внедрении полного комплекса рекомендаций по изменению зазоров S_1 и S_2 экономический эффект по уменьшению энергоёмкости составит на один среднестатистический

компрессор II,3 Вт. При массовом выпуске компрессоров только на одном КМПО им. XX партсъезда годовая экономия в сфере производства составит 2500 кВт/час, а в сфере потребления - около 30 млн. кВт/час. Изготовлена опытно-промышленная партия компрессоров, где использованы рекомендации по изменению конструктивных параметров. Статистические исследования эксплуатационных показателей в партии показали, что энергоёмкость компрессоров по сравнению с контрольной партией уменьшилась на 1,3%, а рассеяние объемной производительности на 15%.

Таким образом, внедрение результатов исследований подтвердило возможность применения разработанных методов в практике повышения качества компрессоров малых холодильных машин, что позволяет рекомендовать использовать разработанные СТП в масштабе отрасли при создании и совершенствовании компрессоров новых моделей.

Общие выводы

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы повышения качества поршневых компрессоров, которые позволяют на начальных стадиях создания и освоения моделей обеспечить уровень качества, близкий к оптимальному за счет расчета и назначения рациональной точности конструктивных зазоров и параметров шероховатости поверхностей трения.

2. Установлено, что необходимым условием для преодоления рациональной точности конструктивных зазоров является систематизация и количественная оценка совокупности размерных и функциональных взаимосвязей исследуемых зазоров с единичными показателями качества при учете фактора времени. Предложенный метод изучения взаимосвязей во времени расширяет теоретическую базу анализа динамики функционирования сложных механических систем.

3. На основе анализа формирования отказа поршневого компрессора разработана математическая модель и программа, которые на этапе проектирования позволяют прогнозировать численные параметры нормального распределения показателя эффективности в любой момент времени и определять исходные данные для количественной оценки влияния функциональных зазоров на объемную производительность компрессоров типа ДХ. Использование модели в практике проектирования позволит уменьшить в 1,5...2 раза время освоения новых типоразмеров поршневых компрессоров.

4. Разработан метод расчета рациональной точности конструктивных зазоров по комплексной оценке их влияния на эффективность, энергоёмкость и надежность эксплуатации компрессора, что повышает точность нормирования и позволяет научно обоснованно назначать и

корректировать зазоры в условиях постоянного совершенствования технологии изготовления деталей с целью повышения общего технического уровня изделия.

5. На основе теоретических исследований напряженного состояния шероховатого микропрофиля разработан и экспериментально проверен расчетный метод оценки влияния зазоров и формы шероховатого профиля на энергоемкость поршневых компрессоров, который позволяет назначать параметры шероховатости t_r и R_{max} , обеспечивающие уменьшение энергии формирования профиля, и создает предпосылки для управления технологическими методами обработки деталей.

6. Целесообразность использования результатов исследований подтверждена при разработке и внедрении СТП "Обеспечение качества поршневых компрессоров за счет нормирования рациональной точности конструктивных параметров" и "Оценка эффективности использования методов и средств управления качеством", на основе которых даны экономически обоснованные рекомендации по изменению конструктивных зазоров в поршневом компрессоре модели ДХ2-1010А и сделан вывод о необходимости использования стандартов в масштабе отрасли для повышения качества проектирования новых моделей компрессоров малых холодильных машин.

7. Техничко-экономические исследования показали, что внедрение полного комплекса рекомендаций при изготовлении поршневого компрессора модели ДХ2-1010А позволит получить годовую экономию электрической энергии в сфере производства 2,5 тыс. кВт/час, в сфере потребления - около 30 млн. кВт/час и повысить стабильность объемной производительности на 2,2%. Внедрение только части рекомендаций по изменению зазора и шероховатости в сопряжении поршень-цилиндр позволило получить реальный годовой экономический эффект на Кировском МПО им. XX партсъезда в сумме 83 тыс. руб. за счет повышения надежности выпускаемых компрессоров.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Хлебоза И.Л., Соловьев В.Е., Касимов М.Н. Исследование шероховатости трущихся поверхностей поршневого компрессора в процессе износа. Изв. вузов. Машиностроение, № 6. 1979.- с. 78-82.

2. Хлебоза И.Л. Формирование параметрического отказа при изменении точности сопряжений поршневого компрессора в процессе износа (сообщение 1). Изв. вузов. Машиностроение, № 12. 1980.- с. 74-77.

3. Хлебоза И.Л. Формирование параметрического отказа при изменении точности сопряжения поршневого компрессора в процессе износа. (сообщение 2). Изв. вузов. Машиностроение, № 1. 1981.- с. 91-95.