

М 493334

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

На правах рукописи

КОВАЛЕВ Виктор Дмитриевич

УДК 621.822

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ
НАПРАВЛЯЮЩИХ СОВРЕМЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ МАШИН

05.02.02 - Машиноведение и детали машин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1989 г.

Работа выполнена в Краматорском индустриальном институте

Научный руководитель - доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Приходько О.Б.

Официальные оппоненты - Доктор технических наук
профессор Бушуев В.В.
Кандидат технических наук
доцент Фомин М.В.

Ведущее предприятие - Краматорское станкостроительное
производственное объединение

Защита диссертации состоится "27" марта 1989 г.
на заседании Специализированного совета
при Краматорском индустриальном институте,
г. Краматорск, ул. Ленина, 107005,
по адресу: 107005,

в библиотеке
им. Н.Э. Баумана

август 1989 г.

М493337

П.К. Попов

Актуальность темы. Решениями XXVII съезда и соответствующих пленумов ЦК КПСС определены задачи, среди которых важное место занимает повышение надежности машин, создание новых видов металлорежущего оборудования, обеспечение опережающего выпуска станков с числовым программным управлением, станков высокой и особо высокой точности.

В настоящее время требования, предъявляемые к машиностроению вообще и к станкостроению в частности, выросли настолько, что использование гидростатодинамических опор в узлах тяжелых машин стало необходимым, особенно для высокоточных станков с программным управлением. Это объясняется тем, что опоры такого типа позволяют создать гарантированный слой смазочного материала заданной толщины между взаимодействующими поверхностями узлов, находящимися в относительном движении или состоянии покоя и передающими или воспринимающими нагрузки, что обеспечивает точность и плавность перемещений, необходимые для работы машин с числовым программным управлением, повышает надежность и долговечность, сводит к минимуму силы трения, практически ликвидирует износ.

Тенденции увеличения единичных мощностей и размеров машин, увеличение точности металлообрабатывающего оборудования, создание новых типов станков, оснащенных системами программного управления, требуют замены традиционных направляющих смешанного трения усовершенствованными направляющими жидкостного трения, избавленными от недостатков, присущих применяемым конструкциям гидростатических и гидродинамических направляющих. Нуждаются в совершенствовании и существующие методики их расчетов. Сложившаяся ситуация уже сейчас требует безотлагательного решения этих вопросов, чему и посвящена настоящая диссертационная работа. В основу её положены те задачи, которые в силу недостаточной изученности и не отвечающей современному уровню развития гидродинамической теории смазки разработанности поставлены промышленными предприятиями, в своей практической деятельности часто сталкивающимися с ними при создании и выпуске образцов новой техники, а также при ремонте и модернизации существующей, тем более импортной, с переводом соответствующей фирменной гидроаппаратуры и насосов на отечественные аналоги.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1493337

Ковалев В.Д. Усовершенствован

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Тема настоящей диссертации вытекает из проводимых в Краматорском индустриальном институте плановых научно-исследовательских работ, выполняемых в рамках Программы исследований на 1971-1990 г.г. "Научные проблемы повышения надежности и долговечности конструкций и механизмов", разработанной в соответствии с Постановлением Президиума АН СССР от 26.06.1973 г. № 581; Координационного плана АН СССР на 1986-1990 г.г. по проблеме "Гидромеханика", шифр I.10.I.6; Координационного плана АН СССР по направлению I.8 "Исследование космоса"

Цель работы заключается в повышении надежности, долговечности тяжелых уникальных машин, а также повышение точности обработки на металлорежущих станках и обеспечение возможности оснащения их системами числового программного управления за счет разработки и внедрения рациональных конструкций гидростатодинамических направляющих (ГСДН).

Научная новизна. Разработана математическая модель течения смазочного материала, обусловленного эффектами его прокачки под избыточным давлением и возможного относительного перемещения сопрягаемых произвольно расположенных плоских и цилиндрических с полным углом охвата и разными радиусами кривизны поверхностей, на которых имеются либо отсутствуют активные или пассивные источники либо их рациональное сочетание, что позволило реализовать универсальный общий алгоритм исследований и расчетов опор жидкостного трения рассматриваемой геометрии, независимо от того, являются ли они гидростатического, гидростатодинамического или гидродинамического типов. При этом выбор и обоснование шага конечно-разностной сетки производится в зависимости от достигаемой физической точности решения. Решена задача о глухих полостях, расположенных на рабочих поверхностях опор. Выполнены параметрические исследования эксплуатационных характеристик. Подтверждена адекватность разработанной математической модели явлениям, имеющим место в слое смазочного материала. Проведены экспериментальные исследования реальных гидростатодинамических опор в условиях эксплуатации.

Практическая ценность. Разработана методика расчета параметров плоских и цилиндрических гидростатодинамических направля-

ющих с учетом современного состояния гидродинамической теории смазки. Приведены расчетные графические зависимости основных параметров, характеризующих работоспособность опор, позволяющие проектировать направляющие с малой затратой времени. Показаны пути совершенствования конструкций опор жидкостного трения. Программа расчетов и проектирования гидростатодинамических направляющих, позволяющая конструкторам, не вдаваясь в сложные теоретические выкладки, сознательно выбирать рациональные параметры опор, создает реальную предпосылку для создания САПР этого вида направляющих.

Реализация работы. Результаты работы внедрены с экономическим эффектом в Краматорском станкостроительном производственном объединении при создании тяжелого токарного станка модели КЖ 1615943; на Старокраматорском машиностроительном заводе при модернизации металлорежущего оборудования; в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР на агрегате для обработки крупногабаритной астрономической оптики; в Институте проблем машиностроения АН УССР при создании трехкоординатного вибрационного стенда для комплексных испытаний электронных агрегатов.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены, обсуждены и одобрены на Всесоюзных научно-технических конференциях "Контактная гидродинамика" (г. Куйбышев, 1986), "Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок" (г. Казань, 1986), на Всесоюзных семинарах "Внедрение программно-управляемого оборудования в механообработку" (г. Севастополь, 1987, 1988), на XIII Республиканском семинаре по гидроаэродинамике двигателей и машин Научного совета по проблеме "Гидромеханика" АН УССР (г. Харьков, 1985), на научно-технических конференциях Краматорского индустриального института (1986, 1988), на заседании научно-технического совета отдела главного конструктора Краматорского станкостроительного объединения (1986), на научно-техническом совещании Крымской астрофизической обсерватории АН СССР (1986), на техническом совещании отдела главного механика Старокраматорского машиностроительного завода (1986).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 статей и создано 1 изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и выводов, списка литературы, приложений и содержит 144 страниц машинописного текста, 13 таблиц, 94 рисунка. Список литературы содержит 127 наименований на 14 страницах. Приложения - на 82 страницах. Общий объем 332 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, кратко изложены структура и содержание работы по главам.

I. Современное состояние гидродинамической теории смазки, методов решения исходных уравнений, методик расчета применительно к направляющим жидкостного трения (аналитический обзор).

Произведен анализ состояния гидродинамической теории смазки и методик расчета применительно к направляющим жидкостного трения. Указаны недостатки существующих конструкций и методик расчета, в большинстве своем основанных на допущении о возможности спрямления эпюры давлений в исследуемой области, что приводит к значительным погрешностям при определении эксплуатационных параметров направляющих. Отмечено, что в литературе мало внимания уделяется вопросам систематизации исследований опор жидкостного трения. Обоснована необходимость усовершенствования ГСДН и методики их расчета.

На основании обзора работ по исследованию опор жидкостного трения установлено, что их расчет может базироваться на предположении о изотермическом течении смазочного материала в зазоре между сопрягаемыми произвольно расположенными поверхностями большой кривизны.

Рассмотрены применяемые методы реализации исходных уравнений, обоснована целесообразность применения численных методов для расчета характеристик направляющих, проведен сравнительный анализ методов конечных разностей и конечных элементов. Показана необходимость разработки общего алгоритма расчета направляющих, независимо от того являются ли они гидростатодинамическими (гидростатическими), либо гидродинамическими.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

проанализированы особенности изготовления и работы ГСДН, в том числе плавающих, на действующем оборудовании и в условиях эксплуатации и определены пути их совершенствования;

создана математическая модель течения смазочного материала в зазоре между плоскими и цилиндрическими разных радиусов кривизны полного угла охвата сопрягаемыми поверхностями в условиях их относительного перемещения и состояния покоя, физически соответствующая явлениям, происходящим в слое смазки;

произведены параметрические исследования и определены расчетные параметры ГСДН с рациональными характеристиками, гарантирующие их работу в жидкостном режиме;

проверена адекватность принятой математической модели реальным процессам путем экспериментальных и натурных исследований, а также сопоставлением полученных результатов с данными других авторов;

на основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по проектированию ГСДН с рациональными параметрами;

разработаны и внедрены ГСДН в соответствующие узлы тяжелых машин.

2. Теоретические предпосылки, лежащие в основе исследований и расчетов гидростатодинамических направляющих.

Разработана математическая модель течения смазочного материала в зазоре между произвольно расположенными поверхностями большой кривизны, совершающими относительное перемещение в двух направлениях. Закон распределения давлений в смазочном слое описывается уравнением Рейнольдса.

При рассмотрении плоских ГСДН исходное уравнение в безразмерной форме приобретает вид:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = -\Omega \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}},$$

где $\bar{x} = x/A$; $\bar{z} = z/A$ – безразмерные переменные в направлении координатных осей x и z ;

$\bar{h} = h/h_0 = 1 + \alpha \bar{x} + \beta \bar{z}$ – безразмерная толщина слоя смазочного материала (контактными деформациями при $p < 10 \text{ МПа}$ пренебрегаем);

$\alpha = h_{maxx} / h_0 - 1$; $\beta = (h_{maxz} / h_0 - 1) D^{-1}$ - безразмерные углы взаимного перекося сопрягаемых поверхностей; $D = B/A$;

$\bar{p} = p/C$ - безразмерное давление в рассматриваемой точке;

$$C = \frac{6\mu UA}{h_0^2} + p_c; \quad \Omega = \frac{6\mu UA}{h_0^2 C};$$

A и B - длина и ширина направляющей; h_0 - минимальная толщина слоя смазочного материала; μ - коэффициент динамической вязкости; U - скорость относительного перемещения;

p_c - давление в системе питания.

В качестве масштаба давлений выбрана величина C , зависящая как от гидростатического, так и от гидродинамического давления, что позволяет с помощью одного уравнения (I) рассчитывать суммарное поле давлений, возникающее от гидростатического и гидродинамического эффектов. При значении параметра Ω , характеризующего режим эксплуатации, равно $\Omega = 1$, задача сводится к исследованию опор гидродинамического типа, при $\Omega = 0$ - гидростатического, а при $0 < \Omega < 1$ - гидростатодинамического.

Граничные условия полагают равенство нулю функции давления $\bar{p} = 0$ на границе исследуемой области Γ_0 и равенство этой функции на границах камер Γ_j давлению в них $\bar{p}_{\Gamma_j} = \bar{p}_j$, которое определяется в ходе решения.

При этом вводится понятие активного и пассивного источников. **Активный** источник - камера на рабочей поверхности, в которую смазочный материал нагнетается под избыточным давлением из системы питания, а также из слоя смазки. В **пассивном** источнике (глухой камере) избыточное давление создается только за счет поступления смазочного материала из слоя смазки. Источники могут быть положительными, отрицательными и нулевыми. Пассивные источники можно использовать для управления поведением главного вектора давлений, в частности для повышения самоустанавливаемости опор. Значение давления в источнике ищется из условия неразрывности потока смазочного материала через каждую из N камер направляющей и связанный с этой камерой компенсатор:

$$\oint_{\Gamma_j} q_{\Gamma_j} d\Gamma_j = K_{c_j} \bar{q}_{c_j} \quad - \text{ для активного источника;}$$

$$\phi q_{rj} d\Gamma_j = 0 \quad - \text{ для пассивного.}$$

Значения расходных характеристик κ_{cj} и $\bar{Q}_{cj}$ для различных типов компенсаторов приведены в работе.

Выборный масштаб давлений и введенное понятие пассивного источника позволяет исследовать работоспособность опор в аварийных ситуациях при $p_c = 0$, так как в этом случае исходное уравнение не теряет смысла, и при прекращении подачи смазки в камеру из системы питания.

Рассматриваемая краевая задача (I) реализуется численно методом конечных разностей. Выбор и обоснование шага конечноразностной сетки производится, исходя из требуемой физической точности решения — баланса расходов смазочного материала, поступающего в исследуемую область и вытекающего из неё.

$$\sum_{j=1}^N \phi q_{rj} d\Gamma_j = \phi q_{r_0} d\Gamma_0.$$

На основании найденного поля давлений определяются основные экспериментальные характеристики направляющих: несущая способность W ; координаты вектора равнодействующей давлений A_{wx} , B_{wz} ; моменты главного вектора M_x , M_y , введенные для оценки способности опоры к самоустанавливаемости; расход смазочного материала Q_{r_0} ; мощности, затрачиваемые на его прокачку N_{np} и на преодоление сил вязкого сдвига N_{mp} ; жесткость слоя смазочного материала J ; температура его перегрева при прохождении через исследуемую область Δt :

$$W = CA^2 \kappa_w; \quad A_{wx} = A \kappa_{wx}; \quad B_{wz} = B \kappa_{wz};$$

$$M_x = CA^3 \kappa_{Mx}; \quad M_z = CA^3 \kappa_{Mz}; \quad Q_{r_0} = \frac{h_0^3 C}{\mu} \kappa_{Qr_0};$$

$$N_{np} = \frac{h_0^3}{\mu} \left(\frac{W}{A^2} \right) \kappa_{Nnp}; \quad N_{mp} = \frac{\mu A^2 U^2}{h_0} \kappa_{Nmp};$$

$$J = \frac{CA^2}{h_0} \kappa_J; \quad \Delta t = \frac{\mu_{cp}^2 A^2 U^2 \kappa_{Nmp}}{c \rho h_0^4 C \kappa_{Qr_0}} + \frac{W^2 \kappa_{Nnp}}{c \rho C \kappa_{Qr_0}}.$$

Расчет безразмерных коэффициентов κ_w , κ_{wx} , κ_{wz} , κ_{Mx} , κ_{Mz} , $\kappa_{Q_{G_0}}$, $\kappa_{N_{пр}}$, $\kappa_{N_{тпр}}$, κ_J произведен на ЭМ ЕС-1036 в соответствии с приведенным в работе алгоритмом.

Когда рассматриваются опоры гидродинамического ($\Omega = 1$) или гидростатодинамического типа ($0 \leq \Omega < 1$), выражения (2) приобретают вид:

$$\begin{aligned} W_{cm} &= p_c A^2 \kappa_{wcm}; & W_{дин} &= \frac{\mu U A^3}{h_0^2} \kappa_{wдин}; \\ M_{xcm} &= p_c A^3 \kappa_{Mxcm}; & M_{xдин} &= \frac{\mu U A^4}{h_0^2} \kappa_{Mxдин}; \\ Q_{G_0} &= \frac{h_0^3}{\mu} p_c \kappa_{Q_{G_0}cm}; & Q_{G_0дин} &= h_0 U A \kappa_{Q_{G_0дин}}; \\ J_{cm} &= \frac{p_c A^2}{h_0} \kappa_{Jcm}; & J_{дин} &= \frac{\mu U A^3}{h^3} \kappa_{Jдин}. \end{aligned}$$

Вычисление безразмерных коэффициентов в выражениях (3) не требует дополнительных операций над полями давлений, они получаются умножением соответствующих коэффициентов из выражений (2) на простые сомножители: $(1 - \Omega)^{-1}$ — для гидростатодинамических направляющих; 6 — для гидродинамических. Например,

$$\kappa_{wcm} = (1 - \Omega)^{-1} \kappa_w; \quad \kappa_{wдин} = 6 \kappa_w.$$

Значение вязкости μ в выражениях (2)–(3) принимается по средней температуре $T_{cp} = T_{\theta_k} + \Delta t / 2$, вычисленной путем последовательных приближений уравнений теплового баланса. При этом значение μ_{cp} в выражении для $\Delta t'$ описывается эмпирической формулой Фогеля, выражающей зависимость вязкости от температуры.

При расчетах эксплуатационных параметров ГСДН точность по расходным характеристикам принималась в пределах 2%, при этом величина невязки при итерационном решении системы конечноразностных уравнений состав. для $\varepsilon = 0,0002$.

Проведен теоретический анализ результатов расчета множества вариантов плоских гидростатодинамических и гидродинамических опор с различными геометрическими соотношениями, практически охватывающих весь их возможный спектр. Результаты систематизированы. Установлено, что наиболее рациональным отношением площади зоны камер к площади опоры является $F_{з.к} / F = 0,25 - 0,4$.

Для опор гидродинамического типа максимум несущей способности достигается при $\alpha = 1,5$. При определении эксплуатационных величин ГСДН, у которых $\Omega \leq 0,75-0,8$, удовлетворительные результаты дает решение для случая $\Omega = 0$ (то есть чисто гидростатических опор). При $\Omega > 0,75-0,8$ необходимо учитывать влияние гидродинамического эффекта, рассматривая решение исходного уравнения (I) с правой частью. Установлены критические значения сочетаний геометрических и эксплуатационных параметров, при которых исключается проявление гидродинамического эффекта, приводящего к отклонениям траектории перемещения подвижных узлов. Например, в станкостроении это вызывает снижение точности обработки на станках.

Предложен новый вид опор с одной центральной камерой подвода смазки (активным источником) и четырьмя глухими камерами (пассивными источниками), расположенными на рабочей поверхности опоры между границами центральной камеры и границами самой опоры. Показано, что такие опоры обладают высокой самоустанавливаемостью, по сравнению с однокамерными, при сохранении прежней сложности изготовления и эксплуатации. Получены рациональные геометрические соотношения опор с глухими камерами. Приведены выражения для расчета основных эксплуатационных величин замкнутых ГСДН и рекомендации по их проектированию. Предложены новые конструкции плавающих опор, с установкой их на сифонах.

При рассмотрении цилиндрических ГСДН исходное уравнение представлено в цилиндрической системе координат, полагая $x = R\varphi$; $A = 2\pi R$; $B = L$, где R - радиус сопрягаемых поверхностей, φ - угловая координата, L - длина направляющих. Безразмерные координаты принимают вид $\bar{z} = \frac{z}{2\pi R}$; $\bar{\varphi} = \frac{\varphi}{2\pi}$. Безразмерная толщина слоя смазочного материала с учетом эксцентриситета и перекоса сопрягаемых поверхностей направляющей определяется выражением:

$$\bar{h} = \frac{h}{\Delta} = 1 - \chi_o \left\{ [(1 - \alpha \bar{\Delta}^{-1} \bar{z}) \sin 2\pi \bar{\varphi}_{oo}] + [(1 - \beta \bar{\Delta}^{-1} \bar{z}) \cos 2\pi \bar{\varphi}_{oo}] \right\}^{1/2} \cos 2\pi (\bar{\varphi}_{oo}^* - \bar{\varphi}),$$

где Δ - радиальный зазор; $\chi_o = \frac{e_o}{\Delta}$ - относительный эксцентриситет; $\bar{\varphi}_{oo}^*$ - безразмерная координата линии центров в сечении $\bar{z}$:

$$\bar{\varphi}^* = \arctg \left(\frac{1 - \alpha \bar{\Delta}^{-1} \bar{z}}{1 - \beta \bar{\Delta}^{-1} \bar{z}} \cdot \operatorname{tg} 2\pi \bar{\varphi}_{oo} \right);$$

$$\alpha = 1 - \frac{e'_o \sin 2\pi \bar{\varphi}'_o}{e_o \sin 2\pi \bar{\varphi}_o} ; \quad \beta = 1 - \frac{e'_o \cos 2\pi \bar{\varphi}'_o}{e_o \cos 2\pi \bar{\varphi}_o}$$

— безразмерные

величины, характеризующие угловой перекося;

e_o и e'_o — эксцентриситет в сечениях $Z = 0$ и $Z = L$;
 $\bar{\varphi}_o$ и $\bar{\varphi}'_o$ — безразмерные координаты линий центров при $Z = 0$
 и $Z = L$. При записи граничных условий введено требование
 непрерывности исследуемой области $\bar{P}|_{\bar{\varphi}=0} = \bar{P}|_{\bar{\varphi}=1}$. Выражения
 для определения эксплуатационных параметров цилиндрических ГСДН
 аналогичны (2) — (3). Жесткость слоя смазки оценивается четырьмя
 показателями жесткости, так как направление смещения, в общем
 случае, не совпадает с направлением нагрузки. Для определения
 этих показателей использован метод малых возмущений из положения
 равновесия.

Рассчитано множество вариантов цилиндрических многокамерных
 с полным углом охвата и разными радиусами кривизны ГСДН ($0 \leq \Omega < 1$)
 и проведен теоретический анализ. Показано, что анизотропностью
 свойств смазочного слоя, то есть равномерностью несущей способ-
 ности и жесткости слоя по угловой координате, обладают опоры с
 числом камер по окружности $N \geq 6$. Угловая протяженность камер
 должна быть равной $\varphi_{кам} = (0,5-0,65)2\pi/N$, но не более 150 —
 200 мм по длине дуги, осевая протяженность $l_k = (0,7-0,75)L$,
 относительная длина направляющей $L/D = 1$. Максимум несущей
 способности соответствует значениям $P_{0j}/P_c = 0,7-0,85$,
 где P_{0j} — давление в камере. Вследствие нежелательности пере-
 косов сопрягаемых поверхностей направляющих, рекомендуется вы-
 полнять их в виде блока из двух однорядных втулок в жестком
 корпусе или двухрядной втулки в подвижном, с шириной перемычки
 между рядами, равной $Q = (0,1 - 0,15)L$.

3. Экспериментальные исследования ГСДН позволили установить
 степень адекватности созданной математической модели реальным
 процессам, имеющим место в направляющих жидкостного трения, с
 помощью специально созданных установок и стендов, согласно раз-
 работанным критериям подобия. При этом использовались датчики
 зазоров индуктивного типа, манометры типа МО кл. 0.4 с наклеен-
 ными на их упругие трубки тензодатчиками, работающие со стан-
 дартной тензометрической и регистрирующей аппаратурой, шлейфовы-

ми осциллографами. Учитывая специфику тяжелого машиностроения, экспериментальные исследования подведены на моделях натуральных размеров и форм.

На стенде для испытания натуральных плавающих опор направляющих тяжелых станков были проведены исследования опор с различным числом и размерами активных и пассивных источников, различными параметрами дросселей с целью выявления способности направляющих к самоустановке. Установлено, что однокамерные конструкции не самоустанавливаются. Хорошую самоустановку продемонстрировали четырехкамерные опоры и опоры с глухими камерами (пассивными источниками). Большое значение имеет обеспечение подвижности опорного узла плавающих опор, конструкция которого была усовершенствована в процессе эксперимента. Проведены также исследования на установке для испытаний опор с глухими камерами, также подтвердившие их высокую самоустанавливаемость. Испытуемые опоры с различными размерами и формой активного и пассивных источников не только сохраняли постоянную величину зазора между сопрягаемыми поверхностями, но и воспринимали значительные опрокидывающие моменты. На стенде для испытаний замкнутых гидростатических направляющих тяжелых станков проведены качественные исследования модели натуральных размеров с целью проверки принятых компоновочных решений и отработки конструкции замкнутых направляющих и системы их питания.

Экспериментальные исследования цилиндрических ГСДН проведены на стенде для испытания полноохватных опор, выполненном на базе токарного станка модели I65, имеющем гидростатические шпиндельные подшипники. Моделировалось нагружение цилиндрических направляющих радиальной силой при неподвижном и вращающемся шпинделе, в условиях взаимного перемещения сопрягаемых поверхностей опоры.

Проведены также экспериментальные исследования температурно-вязкостных характеристик применяемого смазочного материала, с целью установления, какая из эмпирических зависимостей, описывающих изменение вязкости от температуры, может быть принята при исследованиях и расчетах. Показано, что формула Фогеля дает значения μ , наиболее близкие к экспериментальным.

Результаты экспериментальных исследований ГСДН удовлетворительно согласуются с данными теории, при этом расхождение не превышает по несущей способности 5-7%, по расходу смазочного материала 12-18%.

4. Внедрение и промышленные опробования ГСДН. Плоские гидростатические направляющие внедрены в каретках суппортов универсального тяжелого токарного станка модели КЖ 16159.Ф3, изготовленного на КСПО для обработки деталей диаметром до 3,5 м и массой до 250 т для атомной энергетики. Каретки оснащены замкнутыми продольными и поперечными гидростатическими направляющими, продольные направляющие имеют четырехкамерные плавающие опоры. Направляющие выполнены с покрытием из антифрикционного эпоксидного компаунда. Все плавающие опоры станка были испытаны и отрегулированы на специальном стенде, что позволило избежать значительных трудностей при наладке опор непосредственно на станке. В период отладки станка были проведены промышленные опробования направляющих. При этом измеряли давление в системе питания и в карманах направляющих, толщину слоя смазки. Установлено, что между сопрягаемыми поверхностями направляющих сохраняется гарантированный слой смазки толщиной 50-70 мкм во всех положениях суппорта, на всей длине его рабочего хода в продольном и поперечном направлениях, во всем диапазоне действующих нагрузок от сил резания и веса узлов, причем толщина слоя на вертикальных опорах, определяющая точность обработки, практически не изменялась. Точность обработки контрольных образцов соответствовала требованиям приемки. Испытания показали, что суппорты движутся плавно, без скачков. Приведены результаты сравнения опытных данных и расчетных значений.

Внедрение на станке мод. КЖ 16159.Ф3 гидростатических направляющих позволило добиться плавности хода суппортов во всем диапазоне скоростей, что обеспечило работоспособность системы ЧПУ. Отсутствие износа обеспечит требуемую долговечность станка и увеличенные межремонтные сроки. Применение плавающих опор высокой самоустанавливаемости позволило снизить допуски на изготовление и сборку, особенно при стыковке секций станины, обеспечив при этом требуемую точность обработки.

При модернизации тяжелого металлорежущего оборудования на СКМЗ им. С. Орджоникидзе на гидростатическую смазку переводились подвижные узлы станков, на которых наблюдались повышенный износ и задиры направляющих, скачкообразность перемещений, приводивших к падению точности и производительности. После модернизации обеспечена плавность перемещений, износ сопрягаемых

поверхностей практически отсутствует.

Цилиндрическими ГСДН оснащены узлы трения линейных двигателей постоянного тока, разработанных Краматорским промышленным институтом для установок, обрабатывающих детали сложного профиля.

Наличие гарантированного слоя смазки заданной толщины и высокой жесткости между якорем и магнитопроводом обеспечило работоспособность таких двигателей, особенно крупногабаритных, устранив заклинивание подвижных частей, постоянство развиваемого усилия, минимальную силу трения. В системе питания ГСДН применена активная компенсация изменения толщины слоя смазки при помощи автоматического регулятора расхода с обратной связью по давлению. Линейный двигатель усилием 1200 Н с цилиндрическими ГСДН ($D = 100$ мм; $L = 150$ мм) внедрен в следящем приводе уникального агрегата с ЧПУ в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР для обработки крупногабаритных зеркал наземных и космических телескопов. Создание такого агрегата было бы невозможно без применения линейного двигателя.

Цилиндрические ГСДН использованы также в ИПМаш АН УССР на установке для комплексных испытаний систем автоматизированного управления, что является обязательным с точки зрения функционального назначения изделия.

Анализ результатов промышленных опробований показал, что отклонение эксплуатационных параметров, полученных с помощью разработанной методики расчета ГСДН, от экспериментально измеренных величин не превышают в среднем 21%, что подтверждает правильность принятой методики расчета и проектирования. В Приложении, помещенном во втором томе, приведены результаты сопоставления полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других исследователей. Здесь приведены также графические зависимости основных параметров, характеризующих работоспособность плоских и цилиндрических ГСДН, материалы, подтверждающие внедрение результатов данной работы, программа расчета рабочих характеристик ГСДН на ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Создана математическая модель течения смазочного материала в зазоре между плоскими и цилиндрическими сопрягаемыми поверхностями ГСДН, содержащая следующие элементы новизны:

возможность определения общих полей давлений в исследуемой

области, обусловленных как прокачкой смазочного материала под избыточным давлением, так и относительным перемещением сопрягаемых поверхностей;

решение задачи о глухих полостях (пассивных источниках), расположенных на рабочей поверхности опоры;

выбор и обоснование шага конечно-разностной сетки в зависимости от достигаемой физической точности решения;

учет совместного влияния геометрических параметров, типа и характеристик входных гидравлических компенсаторов, условий эксплуатации на работоспособность направляющих.

2. Разработанный и реализованный на ЭЕМ универсальный (единый) алгоритм решения задач, связанных с расчетом и исследованиями направляющих, не зависящий от их типа (гидростатического, гидростатодинамического, гидродинамического), позволил сознательно выбирать тип направляющих и их рациональные параметры для узлов жидкостного трения, что является основой для создания САПР опор скольжения.

3. Определены рациональные геометрические и эксплуатационные характеристики плоских и цилиндрических ГСДН, обеспечивающие их работу в заданном режиме в течение всего срока эксплуатации. Во всех случаях при проектировании должны закладываться многокамерные решения. Размещение камер, более, чем в два ряда, нецелесообразно.

4. Разработан и комплексно исследован новый вид опор с глухими камерами на рабочей поверхности, обладающий высокой самоустанавливаемостью. Наиболее рациональными характеристиками обладают опоры с отношением площади активного источника к площади опоры $F_{\text{кам}}/F = 0,09-0,15$ и шириной пассивных источников, равной $1/3$ ширины перемычки между границами активного источника и опоры.

5. Гидродинамический эффект в ГСДН возникает при значениях $\Omega > 0,75-0,8$, что в этом случае требует его учета при определении эксплуатационных параметров. Если необходимо исключить влияние этого эффекта в направляющих, то надо при проектировании подбирать такое сочетание величин U , μ , h_0 , ρ_c , A , которые давали бы значение $\Omega < 0,07-0,8$.

6. Замкнутые ГСДН необходимо выполнять с плавающими опорами, которые должны обладать способностью к самоустановке, (че-

тырехкамерные или опоры с глухими камерами). Узел крепления плавающей опоры к базовой детали должен обеспечивать необходимую для самоустанавливаемости подвижность.

7. В цилиндрических ГСДН нагрузка должна быть направлена на центр камеры. При переменном направлении нагрузки следует использовать опоры с шестью камерами по окружности, как обладающие анизотропностью свойств слоя смазки.

8. Экспериментальные исследования ГСДН проведены на стендах, обеспечивающих испытания опор натурных размеров в режимах соответствующих, а в ряде случаев превышающих режимы эксплуатации тяжелых машин. Методика экспериментальных исследований позволила произвести сопоставления величин, определенных теоретически и найденных экспериментально, согласно разработанным критериям подобия, что сделало возможным распространить результаты единичного опыта на целую группу опор жидкостного трения. Стендовые и промышленные исследования подтвердили достоверность результатов и выводов, полученных на основании разработанного расчета.

9. Сопоставление результатов, полученных по методике, основанной на разработанном в работе общем алгоритме расчета опор жидкостного трения, не зависящем от их типа и полагающем течение смазочного материала изотермическим в зазоре между недеформируемыми сопрягаемыми поверхностями с температурой, равной средней между температурами на входе и выходе исследуемой области, с данными других исследователей, найденными экспериментально и на основании ТГД и ТУТД анализов, а также в предположении адиабатного течения смазки, показало их удовлетворительное согласование, по крайней мере при $\alpha > 0,25-0,35$, $h_0 > 10-20$ мкм и $U < 60-80$ м/с.

10. Внедрение автором разработанных ГСДН позволило повысить точность обработки на станках, оснастить их системами ЧПУ, создать принципиально новое оборудование. От внедрения результатов исследований получен реальный экономический эффект.

По теме диссертации выполнено 5 научно-исследовательских работ с КраО АН СССР (Крымская область), КСПО, СКМЗ им. С. Орджоникидзе (г. Краматорск), ИПМаш АН УССР (г. Харьков), из которых 2 зарегистрировано в системе ВЦ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ковалев В.Д., Приходько О.Б. Единый алгоритм расчета опор жидкостного трения, не зависящий от их типа // Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок: Тез. докл. УП Всесоюз. научн. - техн. конф. - Казань, 1985. - С. 282.

2. Ямпольц Н.Г., Ковалев В.Д., Приходько О.Б. Новый алгоритм расчета опор скольжения машин заготовительного производства // Прогрессивная технология заготовительного и механосборочного производства: Темат. сб. научн. тр. - Краматорск: НИИПТМаш, 1985. - С. 72-76.

3. Ковалев В.Д., Приходько О.Б. Методы реализации исходных дифференциальных уравнений гидродинамической теории смазки // Контактная гидродинамика: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. - Кушбашев, 1986. - С. II4-II5.

4. Гушин А.М., Ковалев В.Д., Приходько О.Б. Качественная оценка самоустанавливаемости гидростатических опор // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1986. - № 10. - С. 25-29.

5. Ковалев В.Д., Приходько О.Б. Жесткость слоя смазывающего вещества плавающей опоры // Известия ВУЗов. Машиностроение, 1987. - № 5. - С. 18-20.

6. Приходько О.Б., Ковалев В.Д. Практика расчетов опор жидкостного трения // Трение и износ. - 1987. - Т.8, № 3. - С. 504-511.

7. Ковалев В.Д., Приходько О.Б. Гидростатические направляющие // Металлорежущие станки (Киев) - 1987. - Вып. 15. - С. 49-56.

8. Ковалев В.Д., Приходько О.Б. К вопросу повышения самоустанавливаемости опор жидкостного трения // Исследование гидростатических опор и уплотнений двигателей летательных аппаратов. - Харьков: ХАИ, 1987. - С. 103-106.

9. Положительное решение по заявке № 3982064, 14.10.1985. Линейный двигатель / Н.В. Стещенко, А.М. Гушин, В.П. Журавель, О.Ф. Бабин, В.Д. Ковалев.

16 Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз. Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана.
Заказ 102

А-34021 от 19.01.89г.

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА