

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

НИКОЛАЕВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
имени адмирала С. О. Макарова

БЕЗРОДНЫЙ Владимир Григорьевич

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СУДОВЫХ
РОТАТИВНЫХ МАШИН**

Специальность 05.08.05 — судовые энергетические установки
и их элементы (главные и вспомогательные)

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

НИКОЛАЕВ—1974

Николаевский ордена Трудового Красного Знамени
кораблестроительный институт
имени адмирала С.О. Макарова

На правах рукописи

БЕЗРОДНЫЙ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СУДОВЫХ
РОТАТИВНЫХ МАШИН

Специальность 05.08.05 - судовые
энергетические установки и их элементы
(главные и вспомогательные)

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

НИКОЛАЕВ - 1974

Работа выполнена в Николаевском ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительном институте имени адмирала С.О.Макарова.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
ДЫХТА Л.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук КОЗЛОВ Л.Ф.
кандидат технических наук, доцент
КОРОВЧИНСКИЙ М.В.

Ведущее предприятие - Ленинградский политехнический институт.

Автореферат разослан "24" января 1974 г.

Защита диссертации состоится "28" февраля 1974 г.

на заседании Ученого Совета Николаевского ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительного института имени адмирала С.О. Макарова (327000, Николаев, ул. Скорородова, 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять в адрес Ученого Совета института в двух экземплярах.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
К.Т.Н., доцент

/ТЕЛЕТИН В.А./

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения надежности и экономичности ротативных машин предъявляет повышенные требования к конструкции ротора и его опор. При этом в ряде случаев успешное решение указанной проблемы достигается благодаря использованию подшипников с газовой смазкой, обладающих известными преимуществами по сравнению с другими типами опор. С конструктивной и технологической точек зрения представляется предпочтительным применение опор с газовой смазкой в различного рода специальном оборудовании: в механизмах ядерных энергетических установок; турбодетандерах; высокооборотных электродвигателях, вентиляторах и турбогенераторах; в аппаратах, предназначенных для выполнения глубоководных исследований и разработки континентального шельфа, и т.д.

Однако проектирование и внедрение подшипников с газовой смазкой затруднено вследствие того, что рассматриваемому типу опор присущи некоторые специфические особенности, отличающие их от подшипников с жидкостной смазкой. Так, например, вследствие незначительной вязкости рабочего тела газовые опоры обладают обычно меньшей несущей способностью по сравнению с аналогичными жидкостными. Меньшая толщина и значительно меньшее демпфирование газовой пленки требует более точного предварительного определения действующих нагрузок и тщательного учета динамических характеристик роторной системы. Кроме того, газовые подшипники более чувствительны к загрязнению, ви-

бору материалов, погрешностям изготовления и монтажа, термическим и динамическим деформациям ротора и корпусных конструкций. Отсюда следует, что уверенное проектирование и внедрение подшипников с газовой смазкой возможно только при учете указанной их специфики, на основе полного и строгого анализа физических явлений, происходящих в смазочном слое.

Исследование особенностей и анализ процесса течения газа в опоре, изучение качественных и количественных закономерностей явлений, происходящих в смазочном слое, производится методами гидродинамики вязкой, сжимаемой жидкости. Эти методы позволяют эффективно решить такие важные с точки зрения проектирования задачи, как определение расхода газа и оценка грузоподъемности опоры. Знание последних характеристик позволяет не только произвести правильный выбор параметров опоры, но и ставить вопрос об исследовании устойчивости движения системы в целом.

Накопленный к настоящему времени материал теоретического и экспериментального характера подтверждает правильность теоретических представлений и даваемых с их помощью рекомендаций по проектированию газовых подшипников. Однако известные в литературе решения гидродинамической задачи о движении газа в смазочном слое опоры и основанные на них методы расчета расхода газа и грузоподъемности не включают в себя многих интересных в практическом отношении случаев. В частности, открытым до настоящего времени остается вопрос о выборе оптимальной конструкции подшипника и оптимальный выбор его параметров при заданной конструкции.

Из всего многообразия конструктивных типов опор с газовой смазкой наиболее удобными для применения в судовых ротативных машинах в настоящее время следует признать цилиндрические (опор-

ные) и плоские (упорные) подшипники с наддувом. Это связано, прежде всего с технологичностью таких опор, поскольку многие отработанные методы проектирования, изготовления и монтажа аналогичных жидкостных опор могут быть перенесены без каких-либо существенных изменений на рассматриваемый случай.

Изложенные соображения и определили предмет настоящей диссертационной работы: изучение методами гидродинамики движения сжимаемого газа в зазоре цилиндрического подшипника с произвольным расположением малых отверстий наддува и разработка на этой основе приемлемых в инженерном отношении методов расчета газостатических опор. Возникающая при этом соответствующая граничная задача для уравнения Рейнольдса решается с помощью эффективных методов теории возмущений. На основе решения граничной задачи произведена разработка алгоритма и составлены программы для расчета с помощью ЭЦВМ БЭСМ-3М и "МИР" поля давлений в смазочном слое, грузоподъемности и расхода газа. Выполнены расчеты и произведено сравнение теоретических и известных в литературе экспериментальных результатов.

Г Л А В А I

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ ГИДРОДИНАМИКИ К РАСЧЕТУ ГАЗОВЫХ ОПОР С НАДДУВОМ

Настоящая глава представляет собой краткий обзор результатов работ, посвященных методам гидродинамического расчета опор с газовой смазкой. Круг затронутых вопросов касается, главным образом, постановки задачи, математических моделей,

общего подхода к исследованию движения роторов, опирающихся на подшипники с газовой смазкой (§ 1), и некоторых методов решения стационарной задачи для опорных (цилиндрических) и упорных (плоских) газостатических подшипников (§ 2).

При общепринятых допущениях гидродинамической теории смазки проблема сводится к совместному решению уравнений движения рассматриваемой системы тел и уравнения Рейнольдса, описывающего движение газа в смазочном слое. При исследовании опор с наддувом необходимо одновременно учитывать движение газа в системе подачи.

Ввиду очевидных трудностей математического характера, хорошо разработанные методы гидродинамики вязкой, сжимаемой жидкости долгое время не находили серьезного применения при анализе газовых опор с наддувом. В частности, широкое распространение получила математическая модель цилиндрического подшипника, основанная на комбинации сопло-цель и известная под названием "модель осевого течения" (Шайрс, Миллер, Робинсон и Стерри, С.А. Шейнберг, Камерон). В этой модели течение в зазоре подшипника принимается осевым, а непрерывно изменяющийся зазор заменяется отдельными прямоугольными щелями. Аналогичные соображения используют Лемон, Гриннел и Ричардсон, Константиnescу и Салкудеан, Ю.В. Пешги и др.

А.М. Котляром, Н.В. Душиным и Л.Г. Степанянцем, Сасаки и Мори, Лохом предложены решения соответствующих граничных задач для газовых подвесов методом гидродинамической аналогии. В Ленинградском политехническом институте (Н.Д. Заблочкий, И.Е. Сипенков, Л.Г. Степанянц) для решения стационарной задачи газо-

вой смазки разработаны "метод линий наддува" и "схема не-прерывного наддува".

Трудности аналитического решения проблем газовой смазки, а также прогресс в развитии вычислительной техники обусловили широкое применение в течение последних 10-15 лет прямых численных методов (Гросс, Раймонди, Кастелли, Элрод, Коулмен, Шапиро). При этом общие недостатки численных методов: потребность в быстродействующих вычислительных системах, большие затраты машинного времени - в ряде случаев оку-пайтс минимумом упрощающих предположений.

Успешное применение теории возмущений для анализа гидро- и газодинамических подшипников стимулировало разработку аналогичных методов расчета газовых опор с наддувом (Хейнрих, Дунд, А.И. Снопов и Л.М. Юдина, Л.С. Осеньян и И.Е. Сипенков, А.Г. Бургвиц с соавторами).

Достоверное описание процессов, протекающих в смазочном слое газостатических подшипников, невозможно без учета реальных расходных характеристик компенсирующих устройств. Поэтому практически во все инженерные методики расчета таких опор входит эмпирический фактор - коэффициент расхода компенсатора. Однако в настоящее время отсутствует обоснованные и достаточно надежные рекомендации по выбору коэффициента расхода.

Г Л А В А II

КРАЕВАЯ ЗАДАЧА О ДВИЖЕНИИ ГАЗА В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ

Глава включает постановку краевой задачи для цилиндри-

ческого газового подвеса с малыми отверстиями наддува (§ 3), определение функции давления (§ 4) и расчетные формулы для газового подвеса с симметричным относительно линии центров расположением отверстий наддува (§ 5).

Рассматривается стационарное движение вязкого, сжимаемого газа, поступающего из полости с повышенным давлением p_n в смазочный зазор между неподвижными, недеформируемыми цилиндрическими поверхностями втулки и шипа через систему N небольших отверстий (рис. 1). Учитывая малость толщины h смазочного слоя по сравнению с линейными размерами смазываемых поверхностей, действительную, сложную картину движения газа в зазоре подшипника с достаточной степенью точности можно заменить приближенной на основе обычных допущений гидродинамической теории смазки:

- 1) газ предполагается баротропным, движение его — ламинарным и изотермическим;
- 2) влиянием сил тяжести и сил инерции смазки пренебрегаем;
- 3) учитываются только главные слагаемые сил трения;
- 4) смазываемые поверхности имеют правильную цилиндрическую форму и их кривизной можно пренебречь.

Кроме того, для упрощения математической постановки задачи каждое из N отверстий наддува заменяется точечным источником с соответствующим расходом газа G_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Это позволяет свести общие уравнения гидродинамики вязкой, сжимаемой жидкости к уравнению Рейнольдса, которое для функции давления

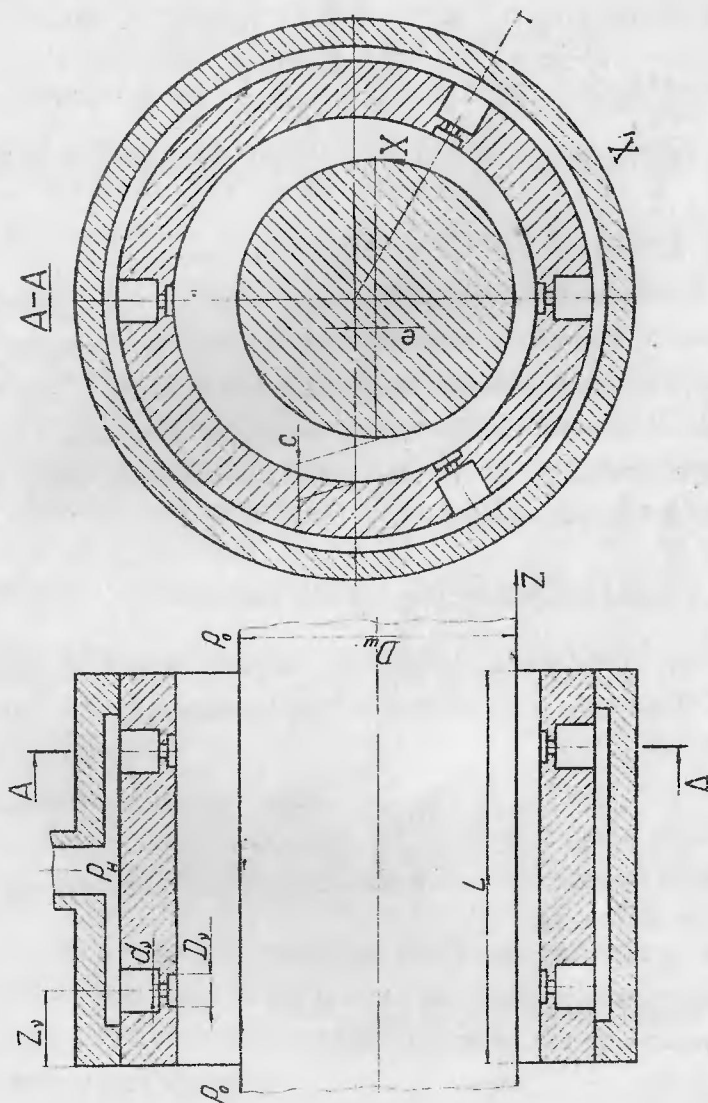


Рис. 1. Цилиндрический газовый подвес с симметричным относительно линии центров расположением отверстий наддува

$$\Phi(x, z) = \frac{\rho^2(x, z) - \rho_0^2}{\rho_H^2} \quad (2.1)$$

можно записать в виде ($\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа):

$$\Delta \Phi(x, z) + \frac{3\chi \sin \chi}{1 - \chi \cos \chi} \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, z) = \sum_{\nu=1}^N Q_{\nu} \delta(x - x_{\nu}) \delta(z - z_{\nu}). \quad (2.2)$$

В приведенных соотношениях через $\rho(x, z)$ и ρ_0 обозначены абсолютное давление в смазочном слое и давление окружающей среды, χ - относительный эксцентриситет, а дельта - функция Дирака $\delta(x)$ указывает на наличие точечного источника в точке с координатами x_{ν}, z_{ν} . Интенсивность точечного источника Q_{ν} определяется соотношением

$$Q_{\nu} = -24 \mu R T_H G_{\nu} / \rho_H^2 c^3 (1 - \chi \cos \chi_{\nu})^3, \quad (2.3)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости газа, R - газовая постоянная, T_H - температура газа в ресивере, c - радиальный зазор.

Расход газа G_{ν} ($\nu = 1, 2, \dots, N$) через отверстие наддува, определяющий интенсивность Q_{ν} точечного источника, должен удовлетворять соотношениям Сен-Венана-Ванцеля для адиабатического процесса истечения:

$$\text{докритический режим} - \rho_{\nu} / \rho_H > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$G_{\nu} = \alpha_{\nu} F_{\nu} \rho_H \left[\frac{2 g k}{R T_H (k+1)} \right]^{\frac{1}{k}} \left[\left(\frac{\rho_{\nu}}{\rho_H} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \left(\frac{\rho_{\nu}}{\rho_H} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.4)$$

$$\text{критический режим} - \frac{\rho_{\nu}}{\rho_H} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$G_{\nu} = \alpha_{\nu} F_{\nu} \rho_H \left[\frac{2 g k}{R T_H (k+1)} \right]^{\frac{1}{k}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

В последних равенствах k - показатель изоэнтропы, g - ускорение силы тяжести, ρ_{ν} - среднее квадратическое значение давления на контуре отверстия наддува с номером ν , α_{ν} и F_{ν} - соответственно коэффициент расхода и площадь диафрагмы отверстия наддува.

Область определения функции $\Phi(x, z)$ является прямоугольником $\{0 \leq x \leq 2\pi, 0 \leq z \leq \ell\}$, причем из физических соображений искомую функцию необходимо подчинить следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x + 2\pi, z) &= \Phi(x, z), \\ \Phi(x, 0) &= \Phi(x, \ell) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Рассмотрим основанный на применении эффективных средств теории возмущений метод решения сформулированной граничной задачи. В качестве малого параметра удобно выбрать величину ε , определяемую формулой

$$\varepsilon = \frac{1 - \sqrt{1 - \chi^2}}{\chi}. \quad (2.6)$$

Поскольку коэффициент $\chi \sin \chi (1 - \chi \cos \chi)$ уравнения (2.2) допускает представление в виде степенного ряда

$$\frac{3\chi \sin \chi}{1 - \chi \cos \chi} = 6 \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \sin k\chi, \quad (2.7)$$

предположим, что $\Phi(\chi, z)$ является аналитической в окрестности нуля функцией переменного ε . Иными словами, мы вводим допущение о возможности представления искомого решения в виде сходящегося ряда по степеням ε :

$$\Phi(\chi, z) = \Phi^{(0)}(\chi, z) + \varepsilon \Phi^{(1)}(\chi, z) + \varepsilon^2 \Phi^{(2)}(\chi, z) + \dots \quad (2.8)$$

Подставляя ряды (2.7) и (2.8) в уравнение (2.2) и граничные условия (2.5) и группируя коэффициенты при одних и тех же степенях ε , получаем последовательность краевых задач для уравнения Пуассона:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \Phi^{(0)}(\chi, z) &= \sum_{j=1}^N Q_j \delta(\chi - \chi_j) \delta(z - z_j), \\ \Delta \Phi^{(1)}(\chi, z) &= -6 \sin \chi \frac{\partial}{\partial \chi} \Phi^{(0)}(\chi, z), \\ \Delta \Phi^{(s)}(\chi, z) &= -6 \sum_{k=1}^s \sin k\chi \frac{\partial}{\partial \chi} \Phi^{(s-k)}(\chi, z) \\ &\quad (s = 2, 3, \dots), \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{(r)}(\chi + 2\pi, z) &= \Phi^{(r)}(\chi, z), \\ \Phi^{(r)}(\chi, 0) &= \Phi^{(r)}(\chi, \ell) = 0 \\ &\quad (r = 0, 1, 2, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Введем в рассмотрение полную и ортонормированную на промежутке $0 \leq z \leq \ell$ систему функций $\{\psi_m(z)\}_1^\infty$, где

$$\psi_m(z) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin k_m z, \quad k_m = \pi m / \ell.$$

Условие на концах рассматриваемого отрезка

$$\psi_m(0) = \psi_m(\ell) = 0 \quad (m = 1, 2, \dots)$$

позволяет искать каждую из функций $\Phi^{(r)}(\chi, z)$ ($r = 0, 1, 2, \dots$) в виде ряда Фурье:

$$\Phi^{(r)}(\chi, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m^{(r)}(\chi) \psi_m(z).$$

Коэффициенты $\Phi_m^{(r)}(\chi)$ приведенного разложения как функции переменного χ представляет собой решение последовательности краевых задач для обобщенных неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2}{d\chi^2} \Phi_m^{(0)}(\chi) - k_m^2 \Phi_m^{(0)}(\chi) &= \sum_{j=1}^N Q_j \delta(\chi - \chi_j) \psi_m(z_j), \\ \frac{d^2}{d\chi^2} \Phi_m^{(s)}(\chi) - k_m^2 \Phi_m^{(s)}(\chi) &= -6 \sum_{k=1}^s \sin k\chi \frac{d}{d\chi} \Phi_m^{(s-k)}(\chi) \\ &\quad (s = 1, 2, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

$$\Phi_m^{(r)}(\chi + 2\pi) = \Phi_m^{(r)}(\chi) \quad (r = 0, 1, 2, \dots; m = 1, 2, \dots). \quad (2.12)$$

Условие периодичности в свою очередь позволяет представить каждую из функций $\Phi_m^{(r)}(\chi)$ в виде ряда Фурье относительно

системы функций $\{\theta_n(x)\}_{n=-\infty}^{\infty}$, где

$$\theta_n(x) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} e^{in\pi x}.$$

Подставим в уравнения (2.11) ряды

$$\phi_m^{(r)}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \phi_{mn}^{(r)} \theta_n(x) \quad (r=0, 1, 2, \dots) \quad (2.13)$$

и выразим $\sin kx$ через показательную функцию. Это позволяет свести задачу нахождения функций $\phi_m^{(r)}(x)$ к следующей рекуррентной последовательности для определения коэффициентов $\phi_{mn}^{(r)}$ разложения (2.13):

$$\begin{aligned} \phi_{mn}^{(0)} &= \sum_{j=1}^N (-Q_j) \frac{\theta_n(x_j) \psi_m(z_j)}{n^2 + k_m^2}, \\ \phi_{mn}^{(1)} &= \frac{-3}{n^2 + k_m^2} \left[(n+1) \phi_{m,n+1}^{(0)} - (n-1) \phi_{m,n-1}^{(0)} \right], \\ \phi_{mn}^{(s)} &= \frac{-3}{n^2 + k_m^2} \sum_{k=1}^s \left[(n+k) \phi_{m,n+k}^{(s-k)} - (n-k) \phi_{m,n-k}^{(s-k)} \right] \\ &\quad (s=2, 3, \dots). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Из приведенных формул следует, что коэффициенты $\phi_{mn}^{(r)}$ линейно выражаются через константы Q_j ($j=1, 2, \dots, N$):

$$\phi_{mn}^{(r)} = \sum_{j=1}^N (-Q_j) b_{mn}^{(r)}(x_j, z_j) \quad (2.15)$$

и функция давления может быть представлена рядом

$$\phi(x, z) = \sum_{j=1}^N (-Q_j) \sum_{s=0}^{\infty} \epsilon^s \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{mn}^{(s)}(x_j, z_j) \theta_n(x) \psi_m(z).$$

Нахождение функции $\phi(x, z)$ заканчивается определением величины констант Q_j ($j=1, 2, \dots, N$), которое производим из условия равенства расходов газа через отверстия наддува и смазочный слой подвеса. Для этой цели вычислим среднее значение функции давления на контуре отверстия наддува с номером j :

$$\begin{aligned} \Phi_{(j)} &= \frac{1}{2\pi r_j} \oint_{\Gamma_j} \phi(x, z) ds = \\ &= \sum_{r=0}^{\infty} \epsilon^r \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \phi_{mn}^{(r)} J_0(r_j \sqrt{n^2 + k_m^2}) \theta_n(x_j) \psi_m(z_j). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Здесь Γ_j - контур интегрирования, представляющий собой окружность радиуса $r_j = D_j/D_w$; D_j - диаметр рассматриваемого отверстия наддува; $J_0(x)$ - функция Бесселя.

Величина $\Phi_{(j)}$ ($j=1, 2, \dots, N$), в силу равенства (2.15), является линейной комбинацией констант Q_j ($j=1, 2, \dots, N$), каждая из которых связана соотношением (2.3) с соответствующим расходом газа G_j через отверстие наддува. Представим расход газа через диафрагму отверстия наддува как функцию соответствующей безразмерной плотности тока $q(\lambda_j)$:

$$G_j = \alpha_j \beta \rho_n T_n^{-1/2} F_j q(\lambda_j) \quad (2.17)$$

и преобразуем выражение (2.16), используя формулы (2.17), (2.3) и (2.15), к виду

$$\Phi_{(j)} = \sum_{i=1}^N A_{ji} q(\lambda_i).$$

Здесь A_{ji} - элемент квадратной матрицы порядка N , а константа β определяется родом газа:

$$\beta = \left[\frac{q}{R} k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

С другой стороны, принимая во внимание соотношение (2.1),

где обозначено $\rho_{(j)} = (\rho_j / \rho_H)^2$, $\rho_{(0)} = (\rho_0 / \rho_H)^2$. Таким образом, окончательно получаем

$$\rho_{(j)} = \rho_{(0)} + \sum_{i=1}^N A_{ji} q(\lambda_i).$$

Для любого данного газа безразмерная плотность тока $q(\lambda_j)$ ($j = 1, 2, \dots, N$) зависит лишь от отношения давления за диафрагмой питающего отверстия с номером j к давлению наддува. При этом в качестве давления за диафрагмой принимается среднее квадратическое давление ρ_j на контуре рассматриваемого питающего отверстия. Для определения в явном виде зависимости

$$q(\lambda_j) = \psi \left[\rho_{(j)} \right]$$

воспользуемся формулами (2.4) и (2.17), определяющими расход газа через дроссель при адиабатическом процессе истечения. Тождественность указанных соотношений позволяет определить характер искомой зависимости в виде

$$q(\lambda_j) = \begin{cases} \beta \left[\rho_{(j)}^{\frac{1}{k}} - \rho_{(0)}^{\frac{k+1}{2k}} \right]^{\frac{1}{2}} & \text{при } \rho_{(j)} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2k}{k-1}}, \\ 1 & \text{при } \rho_{(j)} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2k}{k-1}}, \end{cases} \quad (2.18)$$

где

$$\beta = \left[\frac{2}{k-1} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Таким образом, для определения величин $q(\lambda_j)$, а следовательно, и констант Q , имеем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \rho_{(j)} &= \rho_{(0)} + \sum_{i=1}^N A_{ji} q(\lambda_i), \\ q(\lambda_j) &= \psi \left[\rho_{(j)} \right] \quad (j = 1, 2, \dots, N), \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

которая может быть решена, если предварительно вычислены коэффициенты A_{ji} ($j = 1, 2, \dots, N$; $i = 1, 2, \dots, N$), любым известным приближенным методом, например методом итераций.

Для газового подвеса с симметричным относительно линии центров расположением отверстий наддува ряды (2.13) для величин $\phi_m^{(r)}(x)$ при всех $r = 0, 1, 2, \dots$, в силу симметрии поля давлений относительно оси Z , представляют собой ряды Фурье по косинусам. Формулы для вычисления величин $\phi_m^{(r)}(x, z)$ могут быть получены на основании рекуррентной последовательности (2.14). При этом оказывается, что функции $\phi_m^{(r)}(x, z)$ для всех r являются линейной комбинацией рядов определенного вида, например для $r = 0, 1, 2$ эти ряды можно представить следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} C_j(x, z) &= \frac{1}{2} f \cos f x, \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin k_m z, \sin k_m z}{k_m^2 [f^2 + k_m^2]} + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+f) \cos(n+f)x, \cos n x \sin k_m z, \sin k_m z}{[(n+f)^2 + k_m^2] [n^2 + k_m^2]}, \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$C_{fh}(x, z) = \frac{1}{2} fh \cos f x, \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin k_m z, \sin k_m z}{k_m^2 (f^2 + k_m^2)(h^2 + k_m^2)} +$$

$$+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+f)(n+h) \cos(n+f)x, \cos n x \sin k_m z, \sin k_m z}{[(n+f)^2 + k_m^2][(n+h)^2 + k_m^2][n^2 + k_m^2]} \quad (2.21)$$

(индексы f и h - некоторые целые числа).

Суммирование рядов (2.20) и (2.21) по индексам m и n позволяют представить абсолютное давление в смазочном слое формулой

$$p(x, z) = p_0 \left[1 + \sum_{j=1}^{N_p} B_j \Omega(x, z, x_j, z_j) \right]^{1/2}. \quad (2.22)$$

Функция $\Omega(x, z, x_j, z_j)$, определяемая в прямоугольнике $\{0 \leq x \leq \pi, 0 \leq z \leq l\}$ с исключенными особыми точками $M_j(x_j, z_j)$, если ограничиться первыми тремя членами разложения (2.8), может быть представлена в виде

$$\Omega(x, z, x_j, z_j) = 4 \left[1 - 6\varepsilon \cos x, + 6\varepsilon^2 \cos 2x, \right] R^{(0)}(z, z_j) -$$

$$- \left[1 - 6\varepsilon \cos x, + 6\varepsilon^2 (1.5 + \cos 2x,) \right] W^{(0)}(x, z, x_j, z_j) +$$

$$+ \left[6\varepsilon - 9\varepsilon^2 (3 \cos x, - \cos 3x) \right] W^{(0)}(x, z, x_j, z_j) -$$

$$- 3\varepsilon^2 W^{(2)}(x, z, x_j, z_j) + 36\varepsilon^2 V^{(0)}(x, z, x_j, z_j).$$

Входящие в последнее соотношение функции $W^{(0)}(x, z, x_j, z_j)$, $W^{(2)}(x, z, x_j, z_j)$ и $V^{(0)}(x, z, x_j, z_j)$ определяются быстроходящимися рядами, члены которых - некоторые комбинации логарифмической,

тригонометрических и гиперболических функций. Расчетное число точечных источников N_p представляет собой среднее арифметическое общего количества точечных источников N и числа источников N_0 , расположенных на линиях $x = 0$ и $x = \pi$:

$$N_p = (N + N_0) / 2. \quad (2.24)$$

Безразмерный комплекс B_j , определяется выражением

$$B_j = A_{0j} q(\lambda_j) / p_{(0)}, \quad (2.25)$$

в которое помимо определенных выше $p_{(0)}$ и $q(\lambda_j)$ входят следующие величины:

$$A_{0j} = \frac{6}{\pi} k_{xj} \mu R \alpha_j \beta \frac{\sqrt{T_n}}{p_n} \cdot \frac{F_j}{c^3 (1 - \chi \cos \chi_j)^3}, \quad (2.26)$$

$$k_{xj} = \begin{cases} 0.5 & \text{при } x_j = 0, x_j = \pi, \\ 1 & \text{при } 0 < x_j < \pi. \end{cases} \quad (2.27)$$

Неизвестные заранее при расчете величины $q(\lambda_j)$, как установлено ранее, являются решением системы нелинейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} p_{(0)} &= p_{(0)} + \sum_{j=1}^{N_p} A_{jj} q(\lambda_j), \\ q(\lambda_j) &= \psi \left[\frac{p_{(0)}}{p_{(0)}} \right] \quad (j = 1, 2, \dots, N_p), \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

коэффициенты A_{jj} ($j = 1, 2, \dots, N_p$; $i = 1, 2, \dots, N_p$) которой могут быть определены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_{jj} &= A_{0j} C_j, \\ A_{ji} &= A_{0j} \Omega(x_j, z_j, x_i, z_i) \quad (j \neq i), \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Параметры C_j ($j = 1, 2, \dots, N_p$) определяются по одной формуле для случая $0 < \chi_j < \pi$, и по другой для случая $\chi_j = 0$ или $\chi_j = \pi$.

В конце главы приводится несколько иной метод преобразования функции $\Phi^{(0)}(\chi, z)$, который позволяет выразить сумму соответствующего двойного ряда через тета-функции:

при $\ell < \pi$

$$\Phi^{(0)}(\chi, z) = \sum_{j=1}^{N_p} \frac{-Q_j k_{\chi_j}}{2\pi} \operatorname{Re} \ln \frac{v_j^{\ell}(u+u_j) v_j^{\ell}(u+\bar{u}_j)}{v_j^{\ell}(u-u_j) v_j^{\ell}(u-\bar{u}_j)}, \quad (2.30)$$

при $\ell > \pi$

$$\Phi^{(0)}(\chi, z) = \sum_{j=1}^{N_p} \frac{-Q_j k_{\chi_j}}{2\pi} \left[\frac{2z_j z}{\ell} + \operatorname{Re} \ln \frac{v_j^{\ell}(u+u_j) v_j^{\ell}(u-\bar{u}_j)}{v_j^{\ell}(u-u_j) v_j^{\ell}(u+\bar{u}_j)} \right] \quad (2.31)$$

Можно показать, что если известна одна из формул: (2.30) или (2.31), то другая может быть получена с помощью мнимого преобразования Якоби. Полученные соотношения используются в дальнейшем для расчета газовых подвесов с постоянным зазором.

Г Л А В А Ш

РАСЧЕТ ГАЗОВЫХ ОПОР С НАДУВОМ

В рассматриваемой главе, на основе полученного решения гидродинамической задачи для цилиндрического газового подвеса, приводятся общие расчетные формулы (§ 6), расчет цилиндрического подшипника на ЭЦВМ и сравнение теоретических характеристик с экспериментальными (§ 7), упрощенный способ расчета цилиндрических подшипников с наддувом (§ 8), расчет опор с по-

стоянкой толщиной смазочного слоя (§ 9), применение метода электрогидродинамической аналогии к расчету газостатических опор (§ 10).

Определение расхода газа и грузоподъемности опор с наддувом, для которых приемлемы оговоренные ранее допущения, сводится к вычислению коэффициентов $A_{j\gamma}$ и решению системы нелинейных алгебраических уравнений (2.28), что позволяет найти безразмерную плотность тока $q(\lambda_j)$ ($j = 1, 2, \dots, N_p$) для отдельных питающих отверстий, и к вычислению безразмерной характеристики грузоподъемности:

$$\Psi = \int_0^{\ell} dz \int_0^{\pi} \left[1 + \sum_{j=1}^{N_p} B_j \Omega(\chi, z, \chi_j, z_j) \right]^{\frac{1}{2}} \cos \chi d\chi. \quad (3.1)$$

Проведение расчета предполагает известными геометрические и газодинамические параметры опоры. В качестве исходных данных в ЭЦВМ вводятся следующие безразмерные параметры:

- 1) относительное давление окружающей среды $P_o = (P_o/P_n)^2$;
- 2) относительная длина подшипника $\ell = 2L/D_w$;
- 3) относительный эксцентриситет $\chi = e/c$;
- 4) расчетное число точечных источников $N_p = (N + N_o)/2$;
- 5) координаты точечных источников $\chi_j = 2X_j/D_w$, $z_j = 2Z_j/D_w$ ($0 \leq \chi_j \leq \pi$, $0 < z_j < \ell$, $j = 1, 2, \dots, N_p$);
- 6) обобщенные параметры отверстий наддува

$$A_{o\gamma} = \frac{6}{\pi} k_{\chi_j} \mu R \alpha_j \beta \frac{\sqrt{T_n}}{P_n} \cdot \frac{F_j}{c^2 (1 - \chi \cos \chi_j)^2} \quad (\gamma = 1, 2, \dots, N_p).$$

Несущее усилие и расход газа через опору, если известны значения величин $q(\lambda_j)$ и Ψ , определяются соответственно выражениями:

$$P = \frac{D_w^2}{2} \rho_0 \psi, \quad (3.2)$$

$$G = 2\beta \frac{\rho_0}{V T_H} \sum_{j=1}^{N_p} k_{xj} \alpha_j F_j q(\lambda_j). \quad (3.3)$$

При численной реализации описанного алгоритма важны следующие моменты:

1) ряды, определяющие функции $W^{(0)}(x, z, x_j, z_j), W^{(n)}(x, z, x_j, z_j), W^{(2)}(x, z, x_j, z_j), V^{(0)}(x, z, x_j, z_j)$ и параметр C_j , заменяем соответствующими частичными суммами. Для возможности эффективного выполнения такой замены проводится анализ соответствующих формул.

2) нахождение искомых значений величин $q(\lambda_j)$ сводим к последовательному решению системы двух уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \rho_{(j)} &= b_j + A_{jj} q(\lambda_j), \\ q(\lambda_j) &= \psi[\rho_{(j)}], \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

принимая во внимание тот факт, что в координатах $\rho_{(j)}$ и $q(\lambda_j)$ упомянутое решение определяется точкой пересечения прямой

$$\rho_{(j)} = b_j + A_{jj} q(\lambda_j)$$

с графиком функции $q(\lambda_j) = \psi[\rho_{(j)}]$ (рис. 2). При этом для вычисления приближенного значения b_j используются вычисленные ранее приближения неизвестных $q(\lambda_j)$:

$$b_j = \rho_{(0)} + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq j)}}^{N_p} A_{jj} q(\lambda_j).$$

3) для одно- и двухрядных цилиндрических подшипников, имеющих наибольшее значение для практического использования,

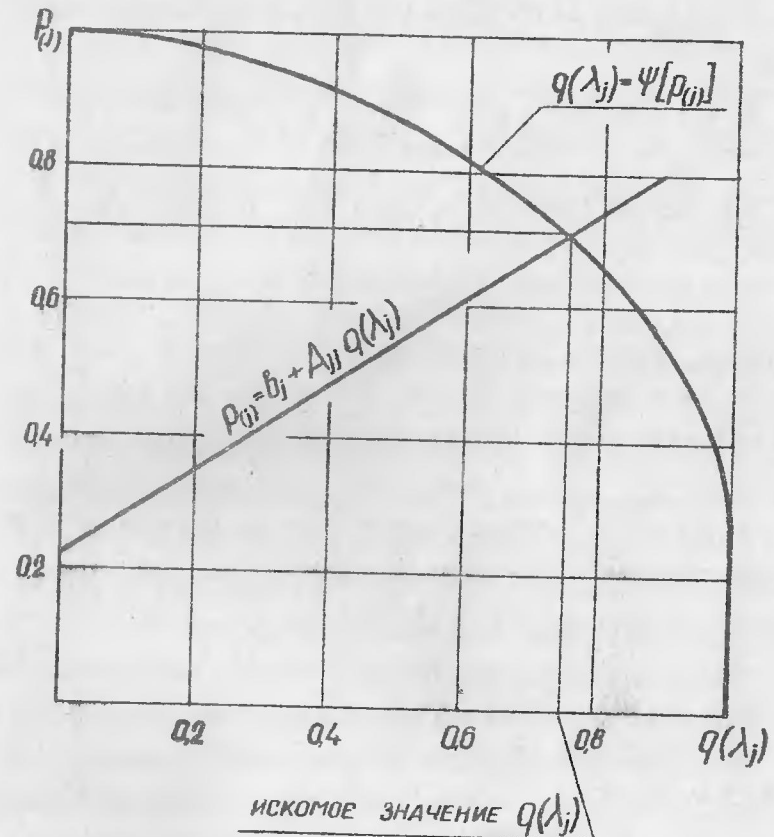


Рис. 2. К определению безразмерной плотности тока через диафрагму отверстия наддува

симметрия поля давлений позволяет значительно сократить количество исходных данных и упростить вид соответствующих выражений.

Алгоритм расчета расхода газа и грузоподъемности одно- и двухрядных газостатических подшипников был реализован на ЭЦМ БЭСМ-3М (программа расчета и инструкции оператору по ее использованию приведены в приложении). Характеристики грузоподъемности, вычисленные изложенным методом, сопоставлены с экспериментальными данными (Гринвель и Ричардсон; Мазакацу и Тошинори; Рейнгольд; Каннингем, Флеминг и Андерсон) и расчетными зависимостями (И.А. Букус и А.М. Антонов). Сопоставленные характеристики вполне удовлетворительно согласуются друг с другом. Для иллюстрации возможностей разработанного метода приведены также расчетные характеристики расхода газа и грузоподъемности цилиндрических подшипников с неравномерным распределением отверстий наддува по окружности втулки.

Для цилиндрических подшипников с относительно большим числом отверстий наддува в каждом кольцевом ряду объем вычислений с использованием предложенных формул значительно возрастает, поэтому во многих случаях целесообразно применение приближенного способа расчета Я.М. Котляра, И.В. Миролюбова и В.М. Шамина. При этом, помимо общепринятых допущений гидродинамической теории смазки, предполагают, что возможно рассматривать изолированно течение газа в отдельных секторах, на которые разбивается кольцевой зазор подшипника. В такой постановке задача сводится к определению гармонической функции давления для каждого расчетного сектора. В § 8 показано, что основные формулы

статьи И.В. Миролюбова и В.М. Шамина могут быть получены введением дополнительных упрощающих предположений для функции $\Phi^{(0)}(x, z)$. Для симметричных одно- и двухрядных цилиндрических газовых подшипников, имеющих наибольшее значение для практического применения, грузоподъемность и расход газа по методу Котляра-Миролюбова-Шамина определяются особенно просто, если использовать вспомогательные графики, приведенные в реферируемой работе.

В случае газовых подшипников с постоянной толщиной h смазочного слоя уравнение Рейнольдса сводится в уравнение Лапласа для функции давления, поэтому решения соответствующих граничных задач для подшипников можно получить на основе формул, приведенных во второй главе для нулевого члена разложения (2.8). В частности, для кольцевого подшипника (рис.3) задача сводится к ранее рассмотренной конформным отображением расчетного сектора $\{r_e \leq r \leq r_n, -\pi/N_0 \leq \varphi \leq \pi/N_0\}$, лежащего в комплексной плоскости $V = re^{i\varphi}$, на прямоугольник плоскости $u = X + iZ$. Принимая во внимание быстроту сходимости рядов, определяющих искомое решение, в качестве функции, реализующей требуемое конформное отображение, удобно выбрать:

$$\begin{aligned} \text{для случая } \pi/N_0 < \ln \frac{r_n}{r_e} \\ u &= -i \frac{N_0}{2} \ln \frac{V}{r_n}, \\ \text{для случая } \pi/N_0 > \ln \frac{r_n}{r_e} \\ u &= \frac{\pi}{2 \ln \frac{r_n}{r_e}} \ln \frac{V}{r_e}. \end{aligned}$$

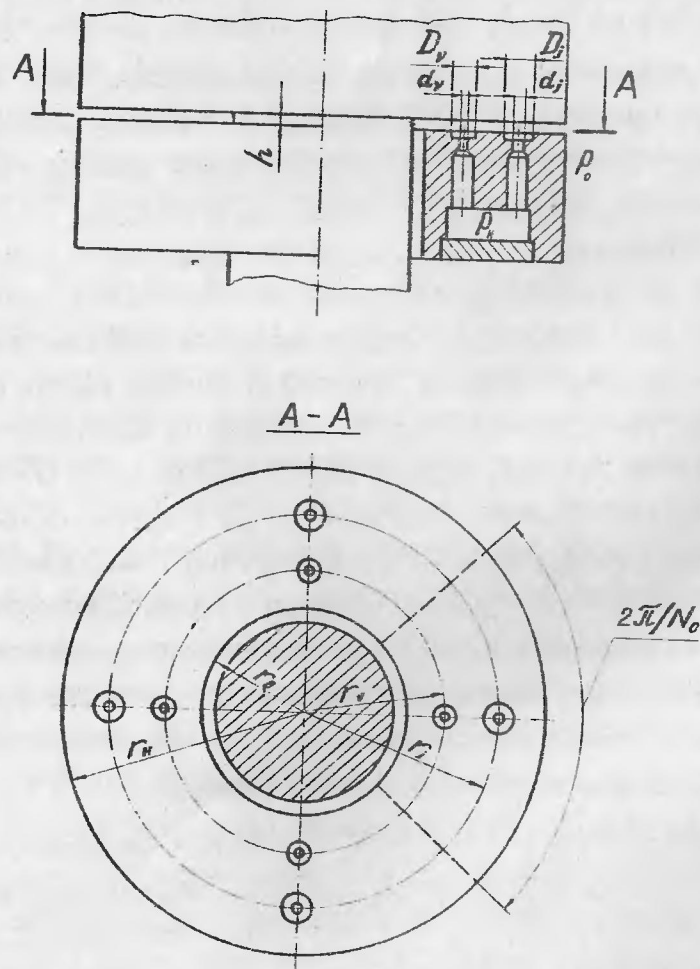


Рис. 3. Кольцевой газостатический подшипник

Для прямоугольного газового подвеса (рис. 4) искомым функцией давления также представляем в виде двойного ряда Фурье, суммирование которого позволит получить удобные для выполнения расчетов формулы. Отметим, что в рассматриваемом случае этот результат может быть получен также с помощью известных принципов симметрии и аналитического продолжения, как это показано Я.М. Котляром.

Полученные в § 9 формулы позволяют выполнять расчеты кольцевых и прямоугольных газовых подвесов по схеме, приведенной в § 7 для цилиндрического подвеса. При этом существенно, что изменения в программе, реализующей алгоритм расчета опор с постоянной толщиной смазочного слоя на ЭЦМ, касаются только вида функции $\Omega(x, z, x_0, z_0)$ и величин C_j . Сравнение результатов расчетов, выполненных на ЭЦМ "МИР-I", с экспериментальными исследованиями (Лох; Леман, Вимер и Ендерт; Я.Х. Сорока, Ф.И. Баландин и Н.П. Седько) позволяет рекомендовать разработанный метод расчета для рассмотренных конструкций газостатических подшипников ротативных машин при условиях:

$$\text{толщина смазочного слоя } h > 15 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\text{давление наддува } p_n < 20 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2.$$

В ряде случаев расчет опор с наддувом целесообразно выполнять, используя метод электрогидродинамической аналогии. В реферируемой работе рассматривается применение метода ЭГДА для вычисления поля давлений в смазочном слое, расхода газа и грузоподъемности подвесов, когда задача точно (для подшипников без вращения) или приближенно (для цилиндрических подвесов) сводится к случаю одинакового давления за отверстиями наддува.

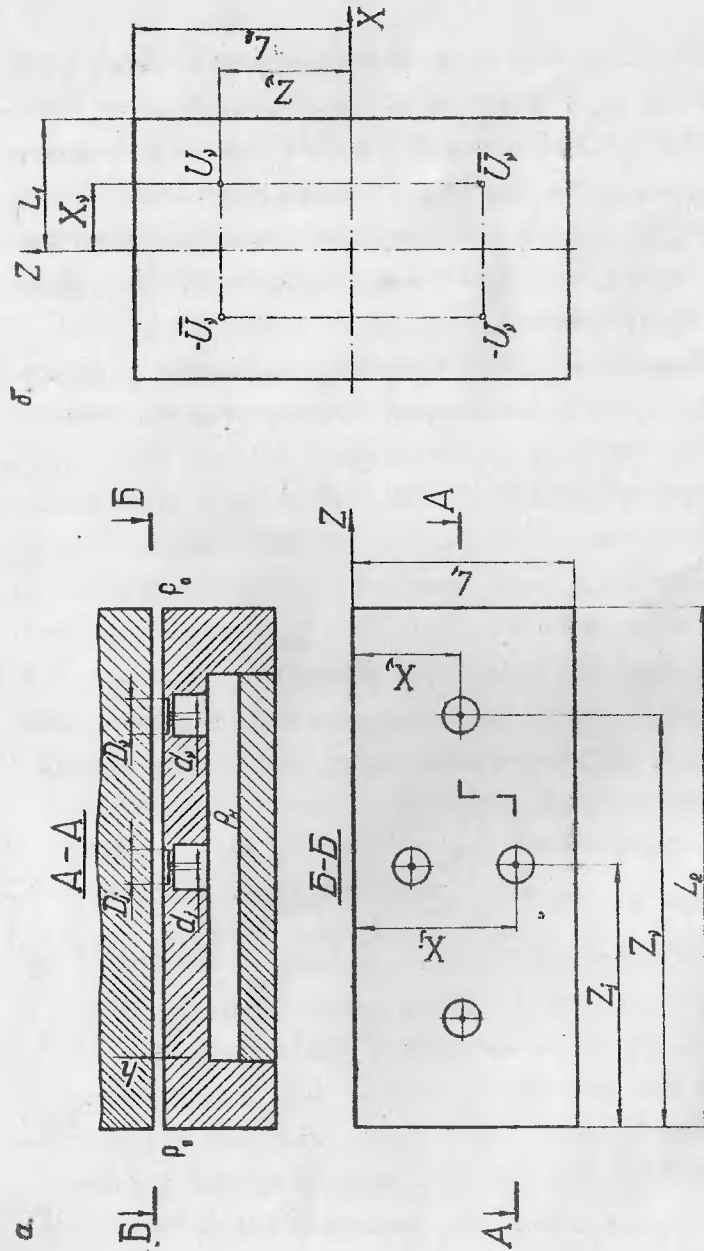


Рис. 4. Прямоугольный газовый подвес:
а - конструктивная схема; б - ячейка комплексного потенциала

Таким способом можно рассчитать однорядные подвешки, однорядные и симметричные двухрядные цилиндрические подвесы и некоторые другие газостатические опоры с различными геометрическими характеристиками и параметрами газа.

Для однорядного подвешки, сняв в узлах сетки его электрической модели (сектор с центральным углом $2\pi/N$) значения относительного потенциала U_{jk} ($j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$), давление в соответствующих точках смазочного слоя, грузоподъемность и расход газа находим по формулам:

$$\rho_{jk} = \rho_H \left[\frac{\rho_{(c)} - \rho_{(o)}}{\rho_{(c)}} \right]^{1/2} \left[U_{jk} + \frac{\rho_{(o)}}{\rho_{(c)} - \rho_{(o)}} \right]^{1/2}, \quad (3.5)$$

$$\rho = \frac{4\pi(r_H - r_B) \rho_H}{mn} \left[\frac{\rho_{(c)} - \rho_{(o)}}{\rho_{(c)}} \right]^{1/2} \times \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n/2} r_j \left[U_{jk} + \frac{\rho_{(o)}}{\rho_{(c)} - \rho_{(o)}} \right]^{1/2} - \pi \rho_o (r_H^2 - r_B^2), \quad (3.6)$$

$$G = \alpha \beta \frac{\rho_H}{\sqrt{T_H}} F_c q(\lambda_c) N. \quad (3.7)$$

Относительное давление $\rho_{(c)}$ на контуре отверстия наддува и соответствующее ему значение безразмерной плотности тока $q(\lambda_c)$ определяется точкой пересечения графика функции $q(\lambda_c) = \psi \left[\frac{\rho}{\rho_{(c)}} \right]$ с прямой

$$\rho_{(c)} = \rho_{(o)} + \frac{A_c}{W_c} q(\lambda_c). \quad (3.8)$$

Помимо величин, значение которых определено ранее, в приведенных соотношениях обозначено:

$$W_c = \frac{2m}{Nn(r_H - r_B)} \left(r_H \sum_{k=1}^{n/2} U_{mk} + r_B \sum_{k=1}^{n/2} U_{nk} \right), \quad (3.9)$$

$$A_c = \frac{6}{\pi} \mu R \alpha \beta \frac{\sqrt{T_n}}{\rho_n} \frac{F_c}{h^3},$$

$$r_j = \frac{r_n - r_c}{m} (j - 1/2). \quad (3.10)$$

Метод электромоделирования можно применить и к расчету однорядных и симметричных двухрядных цилиндрических газовых подшипников с относительно большим числом N_k отверстий наддува в одном кольцевом ряду, если предположить, что газ течет изолированно в отдельных секторах кольцевого зазора и зазор в пределах каждого сектора постоянный:

$$h_j = c (1 - \chi \cos \theta_j) \quad (j = 1, 2, \dots, N_k).$$

Тогда вместо формул (3.6) и (3.7) получим следующие:

$$\rho = \frac{8\pi D_w L \rho_n}{N_k m n} \sum_{j=1}^{N_p} k_{\theta_j} \cos \theta_j \left[\rho_{(j)} - \rho_{(0)} \right]^{1/2}, \quad (3.11)$$

$$\times \sum_{j=1}^{m/2} \sum_{k=1}^{n/2} \left[U_{jk} + \frac{\rho_{(0)}}{\rho_{(j)} - \rho_{(0)}} \right]^{1/2},$$

$$G = 2\alpha \beta \frac{\rho_n}{\sqrt{T_n}} K \sum_{j=1}^{N_p} k_{\theta_j} F_j q(\lambda_j). \quad (3.12)$$

Соотношение (3.8) теперь записываем для каждого расчетного сектора

$$\rho_{(j)} = \rho_{(0)} + \frac{A_{0j}}{W_u} q(\lambda_j) \quad (j = 1, 2, \dots, N_p), \quad (3.13)$$

где

$$W_u = \frac{2 D_w m}{L K N_k n} \sum_{k=1}^{n/2} U_{jk}, \quad (3.14)$$

$$A_{0j} = \frac{6}{\pi} \mu R \alpha \beta \frac{\sqrt{T_n}}{\rho_n} \frac{F_j}{c^3 (1 - \chi \cos \theta_j)^3}. \quad (3.15)$$

Расчетные характеристики, определенные методом электромоделирования, удовлетворительно согласуются с экспериментальными как для подшипников, так и для цилиндрического подвеса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидродинамическая теория смазки является основой и одним из наиболее важных и перспективных направлений аналитического исследования опор, смазываемых газом. Об этом свидетельствуют многочисленные литературные данные, касающиеся успехов в области расчетов газодинамических подшипников, для которых полученные теоретическим путем результаты с удовлетворительной для практики точностью согласуются с экспериментальными результатами.

Развитие и широкое внедрение в практику инженерных расчетов быстродействующей вычислительной техники оказало известное влияние на теорию газовой смазки. Это проявляется в наметившейся тенденции к отказу от ряда упрощающих допущений как при решении некоторых ставших уже традиционными задач, так и при постановке и эффективном решении новых актуальных в практическом отношении задач. Подобный подход вызван стремлением исследователей по возможности максимально приблизить идеализованную математическую схему к реальному явлению, вскрыть новые его стороны и произвести количественную оценку влияния различных факторов на величину гидродинамических сил.

В диссертационной работе предпринята попытка решения нелинейной граничной задачи для уравнения Рейнольдса применительно к цилиндрическому газовому подвесу. Исходная граничная за-

дача с помощью эффективных методов теории возмущений сведена затем к решению последовательности граничных задач для уравнения Пуассона. При этом интенсивности точечных источников, которыми в первом приближении заменяются питающие отверстия, определяются в процессе решения задачи. Полученное решение граничной задачи послужило основой при разработке автором приемлемого с инженерной точки зрения метода расчета опорных и упорных газостатических подшипников ротативных машин. Окончательной целью работы является разработка алгоритма и программы для расчета статических характеристик упомянутых подшипников на ЭЦВМ.

Приведем краткий перечень основных результатов работы:

1. Применительно к рассматриваемому случаю цилиндрического газового подвеса произведена формулировка краевой задачи для уравнения Рейнольдса, к которой при общепринятых допущениях сводится проблема гидродинамических сил.

2. Методами теории возмущений решена указанная задача, причем в качестве малого параметра выбрана некоторая функция относительного эксцентриситета. При соответствующей переформулировке задачи полученные функции могут быть использованы при решении граничной задачи для подшипников.

3. Подробно изучены свойства функций, входящих в качестве составных элементов в коэффициенты разложения искомого решения краевой задачи в ряды по степеням малого параметра. Показано также, что после принятия дополнительных упрощающих предположений полученные выражения для искомых величин преобразуются к известным в теории газовой смазки формулам.

4. На основе решения граничной задачи установлены формулы, позволяющие достаточно просто рассчитать поле давлений в смазочном слое практически используемых конструкций газостатических опор при учете взаимного влияния питающих отверстий.

5. С помощью полученных в работе результатов теоретического характера разработан единый алгоритм расчета статических характеристик опорных и упорных подшипников с наддувом и составлены программы для ЭЦВМ БЭСМ-3М и МИР-1.

6. С применением указанной вычислительной техники произведены расчеты расхода газа и грузоподъемности опорных и упорных газостатических подшипников. Вполне удовлетворительное с точки зрения практических приложений совпадение результатов расчетов с многочисленными экспериментальными данными различных авторов свидетельствуют о приемлемости математической модели и принятых в работе допущений при решении аналогичных задач для газовых подшипников с наддувом.

7. На основе анализа и обработки результатов расчетов и экспериментальных данных, а также соображений физического характера, после принятия дополнительных допущений разработаны упрощенный способ расчета и метод расчета с применением ЭГДА, которые целесообразно использовать на стадии эскизного проектирования.

Основное содержание диссертации опубликовано
в работах

1. К расчету газовых опор с наддувом методом ЭГДА (в соавторстве с Я.Х. Сорокой, Ф.И. Баландиным). Труды НКИ, Материалы научно-технической конференции 1967 г, 1969.

2. Граничная задача для цилиндрического газового подвеса (в соавторстве с Л.М. Дыхтой). Труды НКИ, вып.34, 1970.

3. Гидродинамический расчет газовых подвесов с постоянным зазором. Труды НКИ, вып. 42, 1971.

4. Способ расчета симметричных цилиндрических газовых подвесов. Труды НКИ, вып.48, 1971.

Материалы диссертации докладывались

1. На научно-технических конференциях НКИ, Николаев, 1968-1972 гг.

2. На Всесоюзном координационном совещании по проблемам развития газовой смазки, Москва, 31.V.1972 г.

Подписано к печати 9.01.74 г. БЛ 02014.

Заказ 43.

Объем 1,6 п.л.

Тираж 180

Николаевский ордена Трудового Красного Знамени
кораблестроительный институт им. адм. С.О.Макарова
Ротопринт