

На правах рукописи



Дрокин Виталий Вадимович

**АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛЕПЕСТКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов  
и детали машин»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

**Научный руководитель –** кандидат технических наук, доцент  
**Левина Галина Абрамовна**

**Официальные оппоненты:** **Некрасов Сергей Геннадьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Информационно-  
измерительная техника» ФГБОУ ВПО  
Южно-Уральский государственный  
университет» (национальный  
исследовательский университет)

**Болдырев Юрий Яковлевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующей кафедрой «Математическое и  
программное обеспечение  
высокопроизводительных вычислений»  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный технический  
университет»

**Ведущее предприятие –** ФГБОУ ВПО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет»

Защита диссертации состоится «27» июня 2012 года, в 13:00 часов, на заседании специализированного диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Автореферат разослан «25» мая 2012 г.

Учёный секретарь специализированного  
диссертационного совета Д 212.298.09,  
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из проблем разработки и создания высокоскоростных турбомашин, роторы которых вращаются со скоростями более 20...60 тысяч оборотов в минуту, является обеспечение надежной работы их опор. Основные трудности связаны с динамическими нагрузками, действующими на опоры турбомашин при неуравновешенности ротора, а также с нагревом от горячего газа, циркулирующего в проточной части машины, и с большим градиентом распределения температур вдоль оси ротора.

Начиная с 60–70-х годов прошлого столетия, внимание разработчиков турбомашин обращается к газодинамическим опорам с деформируемыми рабочими поверхностями, среди которых наиболее приспособленными к условиям эксплуатации оказываются лепестковые газодинамические подшипники (ЛГП).

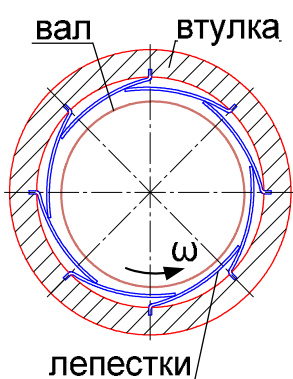


Рис. 1. ЛГП

Многолепестковые подшипники (рис. 1) рассмотрены в работах отечественных исследователей А.Н. Брагина, Н.Е. Захаровой, С.И. Сигачева, Г.А. Левиной, А.К. Бояршиновой, В.В. Смирнова, Ю.И. Ермилова, Ю.А. Равиковича, Ю.В. Пешти, П.Н. Звонарева, Н.В. Левчук, А.И. Самсонова и в работах зарубежных авторов Оу, Роде, Уоловитта, Пинкуса, Хешмета и других, опубликованных в Трудах американского общества инженеров-механиков.

Анализ нагрузочных характеристик (НХ) ЛГП является важным этапом проектирования опор. Экспериментальное получение таких данных связано со значительными затратами ресурсов. Современные вычислительные методы и компьютерные технологии позволяют эффективно выполнить математическое моделирование опор и их характеристик.

Весьма важен вопрос выбора программного обеспечения. Обзор специализированных программ для расчета подшипников жидкостного и газового трения показал, что возможность расчета ЛГП в большинстве программных продуктов отсутствует. Особенности задачи о реакциях ЛГП – связанность задачи газовой смазки и задачи о деформациях упругих элементов, а также заранее неопределимые области контактирования упругих элементов – ограничивают возможности применения известных инженерных пакетов. Кроме того, программное обеспечение с закрытым кодом не предоставляет пользователю возможность добавления новых алгоритмов расчета и математических моделей.

С учетом приведенных обстоятельств задача математического моделирования ЛГП с использованием современных программных сред и технологий представляется **актуальной**.

В работах Г.А. Левиной, А.К. Бояршиновой, В.В. Смирнова упругогидродинамическая (УГД) задача решается путем итераций «прогиб – давление – прогиб...». Задача упругости решается на основании расширенного вариационного принципа Лагранжа. Определяются области контактов в пакете лепестков и конфигурация зазора в опоре. После решения задачи упругости определяется

давление в слое смазки при полученном профиле зазора на основе уравнения Рейнольдса. В результате итерационного процесса решения УГД задачи определяются величины результирующих реакций ЛГП: главного вектора сил давления газового слоя и момента сил вязкого трения. Настоящее исследование является продолжением и развитием этого направления.

**Цели исследования:** развитие метода численного моделирования нагрузочных характеристик ЛГП и анализ несущей способности при различных конструктивных параметрах в стационарных условиях.

Для достижения цели исследования необходимо решить **задачи:**

1. Разработать дополнения к опубликованному в предшествующих работах численному методу решения УГД задачи на плоской модели ЛГП, обеспечивающие расширение области применимости метода в пространстве конструктивных параметров подшипника и повышение точности результатов.

2. Создать программное обеспечение для численного решения задачи упругости и УГД задачи для лепесткового газодинамического подшипника с использованием средств визуального программирования.

3. Выполнить верификацию математической модели и созданной вычислительной программы по экспериментальным и расчетным данным других авторов, а также по решению задачи упругости в пакете Ansys.

4. Выполнить сравнительный анализ нагрузочных характеристик ЛГП при различных конструктивных параметрах на основе численного моделирования в созданной программе.

5. Разработать математическую модель двухопорного подвеса на ЛГП, учитывающую пространственное перемещение оси вала в подвесе.

**Методика исследования.** Применение численных методов нелинейного программирования и решения краевых задач газовой смазки, компьютерное моделирование, вычислительный эксперимент.

**Научная новизна** исследования состоит в следующем.

1. Развитие метода численного решения упругогидродинамической задачи на плоской модели ЛГП: предложен способ выбора параметров вычислительной схемы, обеспечивающих сходимость и повышение точности решения.

2. Построена математическая модель двухопорного подвеса на ЛГП с учетом пространственных перемещений оси вала, позволяющая оценить угловую жесткость и влияние угловых перемещений на несущую способность подвеса.

3. На основании анализа результатов численного моделирования ЛГП в расширенной, по сравнению с работами других авторов, области пространства параметров определены свойства лепестковой опоры: предельная несущая способность при допустимых минимальных зазорах и заданной скорости вращения, скорость «всплытия» вала на газовом слое, зависимости момента сил вязкого трения от скорости вращения и смещения вала.

**Достоверность результатов** работы обоснована корректной постановкой задачи, применением хорошо обусловленных численных методов, подтверждается качественным и количественным соответствием полученных результатов экспериментальным и расчетным данным, полученным другими авторами.

## **Практическая значимость работы**

1. Создано программное обеспечение для расчета нагрузочных характеристик ЛГП в среде программирования Delphi, позволяющее оценить влияние конструктивных параметров на несущую способность при заданных условиях работы (скорость вращения вала, температура и давление окружающей среды). Программа обладает удобным для работы интерфейсом и готова для передачи пользователю.

2. Сформулированы рекомендации по выбору значений конструктивных параметров лепестковых подшипников на основе сравнительного анализа нагрузочных характеристик ЛГП с типоразмерами, характерными для турбомашин малой и средней мощности.

3. Выполнена численная оценка угловой жесткости двухопорного подвеса на ЛГП и влияния осевых перемещений оси вала на несущую способность.

**Объект исследования** – реакции лепестковых газодинамических подшипников роторов турбомашин малой и средней мощности.

**Предмет исследования** – упругие и упругогидродинамические взаимодействия в ЛГП, нагрузочные характеристики и несущая способность ЛГП в стационарных условиях работы опорного узла.

**Реализация.** Создано программное обеспечение «Упругогидродинамический расчет нагрузочных характеристик лепесткового газодинамического подшипника, v.1.0» (далее – «Модель ЛГП-1»). Программа использована при проектировании опорных узлов турбохолодильника «ХОУ-4» и турбогенератора «МДГ-20» предприятиями ООО «Корхолод» (г. Коркино, Челябинская область) и ООО НТЦ «Микротурбинные технологии» (г. Санкт-Петербург).

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на 1-й и 2-й конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2009, 2010), Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, СамГТУ, 2010 г.), Всероссийской выставке инноваций «Время вперед» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010), Четвертом Всероссийском Форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2010), 63-й и 64-й научных конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ, (Челябинск, 2011, 2012).

Ряд результатов вошли в итоговый отчет по НИОКР, выполненной с участием автора по программе «Старт-08». Кроме того, представление работы на ежегодных городских конкурсах г. Челябинска отмечено дипломами «Лучшая инновационная идея года» (2010 г.) и «Перспективный проект» (2011 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 3 в изданиях из списка, рекомендованного ВАК, получен 1 патент РФ на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, тезисы докладов на 4 конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, изложена на 143 страницах машинописного

текста, включая 75 иллюстраций, 27 таблиц, 81 формулу и список литературы, содержащий 71 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации, реализации и структуре диссертации.

**В первой главе** приведены результаты аналитического обзора российских и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований ЛГП. Показано, что термин «лепестковые подшипники» используется для различных вариантов конструкций. Больше внимание уделяется подшипникам с разрезанной лентой и гофрированной подложкой (англ. – foil bearing), чем многолепестковым подшипникам с перекрывающимися лепестками (англ. – multi-leaf bearing). В работах, посвященных исследованию многолепестковых ЛГП, приводится мало данных о влиянии конструктивных параметров на НХ и не рассмотрены вопросы влияния углового перемещения оси вала в подвесе на реакции. На основе обзора литературных источников поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** приведены постановка и метод решения УГД задачи на плоской модели ЛГП, опирающиеся на работы Г.А. Левиной и В.В. Смирнова.

Одна из рабочих поверхностей ЛГП образована упругими оболочками-лепестками толщиной  $\delta_0$  ( $\delta_0=0,05\dots0,2$  мм) с постоянным радиусом кривизны средней линии  $R_l$ , длиной средней линии лепестка  $l_l$  (рис. 1, 2). Одним краем лепестки закреплены во втулке под углом  $\alpha_0$ , жестко связанной с корпусом турбомашины. Несущая способность газовой опоры обеспечивается эффектом клина – эффектом повышения давления в слое газа,

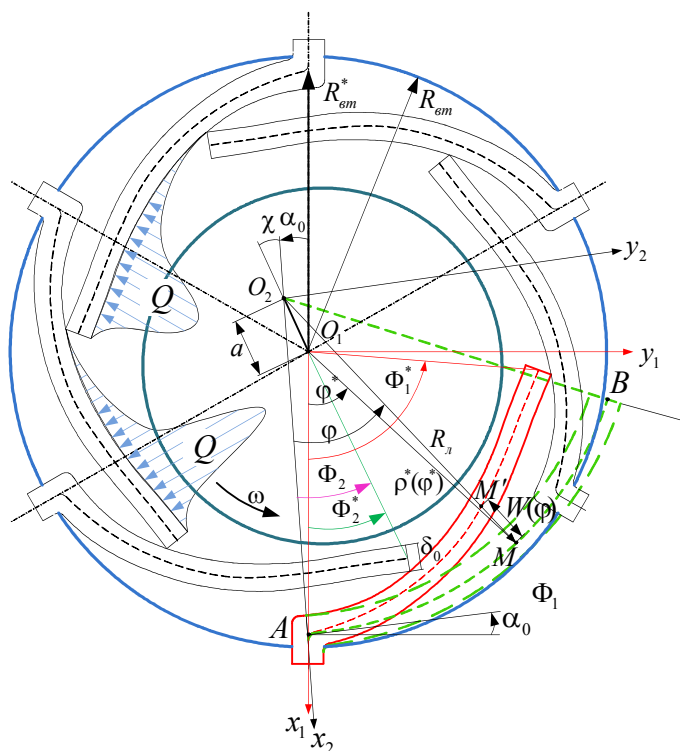


Рис. 2. Плоская модель ЛГП

заполняющего клиновидные сужающиеся зазоры между валом и лепестками при движении вала относительно корпуса. На рабочие поверхности лепестков наносится износостойкое антифрикционное покрытие.

Решение задачи упругости строится на основе расширенного вариационного принципа Лагранжа. Равновесная конфигурация упругого пакета находится по распределению прогибов  $W_i(\varphi_i^*)$ , доставляющему наименьшее значение потенциальной энергии пакета лепестков при геометрических ограничениях в ви-

де неравенств, выражающих естественные условия неврезания лепестков друг в друга и в твердые поверхности цапфы вала и втулки подшипника

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \Pi(W_i(\varphi_i^*)) \rightarrow \inf \Pi, \quad W_i(\varphi_i^*) \in C^{(2)}[0, \Phi_1], \quad (1)$$

$$W_i^-(\varphi_i^*) \leq W_i(\varphi_i^*) \leq W_i^+(\varphi_i^*). \quad (2)$$

Здесь  $i = \overline{1, N}$  – номер лепестка;  $N$  – число лепестков;  $W_i^-(\varphi_i^*)$ ,  $W_i^+(\varphi_i^*)$  – уравнения границ для прогибов каждого лепестка при заданном положении цапфы.

Потенциальная энергия пакета лепестков определена на модели малых прогибов

$$\Pi = L \sum_{i=1}^N \left[ \frac{D}{2} \int_0^{\Phi_1^*} \frac{1}{R_l^3} (W_i'' + W_i)^2 d\varphi^* - R_l \int_{\Phi_2^*}^{\Phi_1^*} Q_i W_i d\varphi^* \right], \quad (3)$$

где  $L$  – длина втулки подшипника;  $D$  – коэффициент цилиндрической жесткости оболочки лепестка;  $Q_i = P_i - P_a$  – избыточное давление смазочного слоя;  $P_i$  – давление в слое сектора с номером  $i$ ;  $P_a$  – давление среды.

Уравнения границ для прогибов в глобальной полярной системе координат (СК)  $(O_1, \rho^*, \varphi^*)$  на плоскости  $O_1 x_1 y_1$  записываются в виде

$$W_i^+(\varphi_i^*) = \begin{cases} R_{em} - 0,5\delta_0 - \rho^*(\varphi_i^*); & \varphi_i^* \in [2\pi(i-1)/N; 2\pi i/N] \\ R_{em} - 1,5\delta_0 - \delta_n - \rho^*(\varphi_i^*); & \varphi_i^* \in [2\pi i/N; 2\pi i/N + \Phi_2^*] \end{cases} \quad (4)$$

$$W_i^-(\varphi_i^*) = \begin{cases} R_y(\varphi_i^*) + h_{\min}^* + 1,5\delta_0 + 2\delta_n - \rho^*(\varphi_i^*); & [2\pi(i-1)/N; 2\pi(i-1)/N + \Phi_2^*] \\ R_y(\varphi_i^*) + h_{\min}^* + 0,5\delta_0 + \delta_n - \rho^*(\varphi_i^*); & (2\pi(i-1)/N + \Phi_2^*; 2\pi(i-1)/N + \Phi_1^*) \end{cases} \quad (5)$$

Здесь  $R_y(\varphi_i^*)$  – полярный радиус точки на поверхности цапфы, соответствующий углу  $\varphi_i^*$  при смещении цапфы из центрального положения;  $h_{\min}^*$  – минимальный допустимый зазор;  $\delta_n$  – толщина покрытия лепестка.

Выполнена доработка методики решения УГД задачи в части описания геометрических соотношений в ЛГП и преобразования координат из локальных СК, связанных с лепестками, в глобальную СК, связанную с втулкой

$$\begin{cases} \rho^*(\varphi) = \sqrt{R_l^2 + a^2 - 2R_l a \cos(\chi - \varphi)}; & \varphi < \chi; \\ \rho^*(\varphi) = \sqrt{R_l^2 + a^2 - 2R_l a \cos(\varphi - \chi)}; & \varphi \geq \chi, \end{cases} \quad (6)$$

$$\varphi^*(\varphi) = \arccos \left( \frac{\rho^{*2}(\varphi) + (R_{em} - 0,5\delta_0)^2 - 2R_l^2(1 - \cos \varphi)}{2(R_{em} - 0,5\delta_0)\rho^*(\varphi)} \right). \quad (7)$$

Преобразования (6), (7) можно использовать в численном решении УГД задачи для ЛГП в широкой области изменения конструктивных параметров, не ограничиваясь рассмотрением схем с малым углом установки и большим радиусом недеформированной средней линии лепестков, либо с радиусом средней линии, близким к радиусу втулки.

Распределение давления в смазочном слое определяется решением уравнения Рейнольдса, которое в безразмерных величинах имеет вид

$$\frac{d}{d\varphi_i^*} \left( \bar{h}_i^3 \bar{p}_i \frac{d\bar{p}_i}{d\varphi_i^*} - \Lambda \bar{p}_i \bar{h}_i \right) = 0, \quad (8)$$

где  $\bar{h}_i = h_i(\varphi_i^*)/h^*$  – безразмерный (относительный) зазор;  $h_i$  – зазор между цапфой и лепестком;  $h^*$  – характерный зазор;  $\bar{p}_i = P_i(\varphi_i^*)/P_a$  – безразмерное давление;  $\Lambda = 6\mu\omega R_y^2 / P_a h^{*2}$  – газодинамический параметр подшипника;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости газовой среды;  $\omega$  – скорость вращения вала.

Краевые условия для давления приближенно принимаются как краевые условия для слоя с открытыми в окружающую среду границами, что обусловлено большой величиной зазора на границе перекрытия лепестков

$$\bar{p}_i(\Phi_1^*) = \bar{p}_i(\Phi_2^*) = 1. \quad (9)$$

Численное решение УГД задачи строится для стационарного нагружения подшипника путем прямых итераций «прогиб–давление–прогиб...».

Численное решение вариационной задачи (1), (2) выполняется путем дискретизации и сведения к задаче нелинейного программирования. Дискретизация с помощью построения равномерной сетки на средней линии лепестка с шагом  $\Delta$ . Минимизация дискретного аналога функционала потенциальной энергии  $I(W_{ij})$  осуществляется методом проекций градиента.

Признаки достижения решения вариационной задачи:

$$|I_1 - I_2| < \varepsilon_1; \quad (10)$$

$$\begin{cases} |\partial I / \partial W_{ij}| \leq \varepsilon_2 & \text{– в точках без контакта;} \\ |\partial I / \partial W_{ij} + \partial I / \partial W_{i'j'}| \leq \varepsilon_2 & \text{– при упругом контакте двух лепестков;} \\ |\partial I / \partial W_{ij}| > \varepsilon_2 & \text{– при контакте лепестка с валом в задаче упругости.} \end{cases} \quad (11)$$

Здесь  $I_1, I_2$  – значения функционала потенциальной энергии на соседних итерациях;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – малые параметры.

Условия (11) следуют из принципа виртуальных перемещений для системы с неударживающими связями и соответствует условиям Куна–Таккера задачи нелинейного программирования.

Численное решение краевой задачи (8), (9) строится в виде итерационного процесса Ньютона–Канторовича, на каждом этапе которого соответствующие линейные уравнения аппроксимируются разностной схемой интегрирования методом. Полученная СЛАУ решается методами прямой и обратной прогонки с процедурой поправок приращений давления (регуляризацией). Критерием завершения расчета давления является условие:

$$|P_{ij^{(n+1)}} - P_{ij^{(n)}}| / P_{ij^{(n+1)}} < \varepsilon_3 \quad (\varepsilon_3 \text{ – малый параметр}). \quad (12)$$

Критерий окончания итерационного процесса решения УГД задачи

$$|P_{ij^{(n+1)}} - P_{ij^{(n)}}| / P_{ij^{(n+1)}} < \varepsilon_4, \quad (13)$$



где  $p_{ij}^{(n)}$ ,  $p_{ij}^{(n+1)}$  – сеточные значения функции давления на двух соседних итерациях процесса «прогиб – давление – прогиб...»;  $\varepsilon_4$  – малый параметр.

По результатам решения УГД задачи для заданного положения цапфы определяются проекции результирующей силы давления смазочного слоя  $\vec{F}$  на выбранные координатные оси (рис. 2)

$$F_{x_1} = -LR_u \sum_{i=1}^N \int_{\Phi_2^*}^{\Phi_1^*} P_i(\varphi^*) \sin \varphi^* d\varphi^*; \quad F_{y_1} = LR_u \sum_{i=1}^N \int_{\Phi_3^*}^{\Phi_1^*} P_i(\varphi^*) \cos \varphi^* d\varphi^*. \quad (14)$$

Главный момент сил вязкого трения определяется выражением

$$M_{в.тр} = \frac{LR_u^3 \mu \omega}{h^*} \int_0^{2\pi} \left( \frac{3}{\Lambda} \frac{\partial p}{\partial \varphi^*} h + \frac{1}{h} \right) d\varphi^*. \quad (15)$$

Контактные реакции пакета лепестков находятся при отсутствии вращения вала в численном решении задачи упругости на дискретной модели как силы, приложенные к валу со стороны лепестков в точках контакта лепестков с валом:

$$F_{ij}^K = \partial I / \partial W_{ij} - \text{в узле контакта } i\text{-го лепестка с валом}; \quad (16)$$

$$F_{ij}^K = \partial I / \partial W_{ij} + \partial I / \partial W_{ij'} - \text{в узле контакта } i\text{-го лепестка с валом}$$

$$\text{и с соседним лепестком.} \quad (17)$$

Момент сил сухого трения опоры, действующий при пуске и останове ротора, находится с использованием найденных в результате решения задачи упругости контактных сил по закону Амонтона–Кулона

$$M_{mp} = k_{mp} R_u \sum_{i=1}^N F_{ij}^K, \quad (18)$$

где  $k_{mp}$  – коэффициент трения покрытия лепестка по поверхности вала. Направление силы трения выбирается противоположным скорости скольжения поверхности вала относительно лепестков при разгоне (выбеге) ротора

**В третьей главе** приведено описание и представлены алгоритмы работы созданной в среде программирования Delphi вычислительной программы «Модель ЛГП-1». Вычислительным экспериментом определены значения параметров расчетной схемы, обеспечивающие сходимость решения УГД задачи на плоской модели ЛГП наряду с достаточной точностью вычислений.

В программе «Модель ЛГП-1» вычисляются конфигурация смазочного слоя и избыточные давления в нем, упругогидродинамические нагрузочные характеристики (НХ) ЛГП и упругие статические нагрузочные характеристики без вращения вала (СНХ) при различных конструктивных параметрах подшипника, а также предельная несущая способность и скорость «всплытия» вала.

Нагрузочные характеристики ЛГП рассматриваются как зависимости коэффициента нагрузки  $\bar{F}$  (величины результирующей реакции  $F$ ) и минимальной толщины смазочного слоя опоры  $h_{\min}$  от относительного смещения вала из центрального положения  $\varepsilon = e / H_{\text{монт}}$ . Коэффициент нагрузки определяется по формуле  $\bar{F} = F / 2R_{em} LP_a$ . Монтажный зазор определяется как

$H_{\text{монт}} = R_{\text{вн}} - R_{\text{ц}} - 2(\delta_0 + \delta_{\text{п}})$ . Угол  $\gamma = (\hat{\vec{\varepsilon}}, \vec{P})$  между вектором смещения  $\vec{\varepsilon}$  и вектором внешней нагрузки  $\vec{P} = -\vec{F}$  в вычислениях для ЛГП оказывается малым.

Расчет НХ ЛГП в программе «Модель ЛГП-1» строится путем решения УГД задачи для каждого положения цапфы. Время решения УГД задачи на персональном компьютере составляет 5...15 минут для одного положения цапфы – в зависимости от параметров упругого пакета и вычислительной схемы.

Визуализация расчета при решении задачи позволяет получить представление о конфигурации зазора и распределении избыточного давления в газовом слое, и определить зоны возможного контакта лепестков с валом (рис. 3).



Рис. 3. Графическое представление результата УГД задачи в программе «Модель ЛГП-1»

При сохранении результатов в файл возможен перенос численных данных в пакеты математического моделирования (MathCAD, MatLab). Представление результатов позволяет сделать выводы о точности вычислений, при выполнении критериев (11)–(13) – о реакции и предельной несущей способности ЛГП.

«Модель ЛГП-1» реализует достоинства объектно-ориентированого программирования: имеет модульную структуру, позволяющую добавлять новые и редактировать существующие объекты. Например, есть возможность расширения списков материалов лепестков и газовых смазочных сред, их свойств.

Основными подпрограммами являются процедуры решения задачи упругости и задачи о давлении. Каждая подпрограмма включает последовательное обращение к модулям нижнего уровня. Выполнение многочисленных циклов в программе оптимизировано с целью сокращения времени расчета.

К параметрам подшипника относятся: число лепестков, радиусы втулки, цапфы и средней линии недеформированного лепестка, длина втулки, толщины лепестка и покрытия, угол установки лепестков во втулке, скорость вращения вала, температура и давление окружающей среды. К параметрам модели также относятся: значения минимального допустимого  $h_{\text{мин}}^*$  и характерного  $h^*$  зазоров.

Выбор значения  $h_{\text{мин}}^*$  связан с той особенностью, что лепестки «отслеживают» поверхность вращающегося вала с малыми зазорами, поэтому значение  $h_{\text{мин}}^*$  в расчетах ограничено высотой микронеровностей  $\approx 0,2...0,5$  мкм и пара-

метром Кнудсена  $Kn \leq 0,01$ . Если рабочая среда – воздух,  $h_{\min}^* \approx 1 \dots 3$  мкм. Величина характерного зазора  $h^*$  при вычислениях выбирается  $\approx 10$  мкм.

К параметрам вычислительной схемы относятся: шаг сетки на средней линии лепестка для расчета прогибов  $\Delta$ , шаг сетки для решения задачи о распределении давления, малые параметры  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_4$ , максимальное число итераций варьирования прогибов в УГД задаче.

Весьма существенным является выбор шага  $\Delta$ . Для сходимости дискретной задачи к вариационной необходимо выполнить соотношение шага варьирования  $h_{\text{вар}}$  процедуры минимизации функции  $I(W_{ij})$  и шага сетки

$$h_{\text{вар}} \approx O(\Delta^4). \quad (19)$$

Вычислительным экспериментом установлено, что достаточная точность вычислений обеспечивается при выполнении условия (13) и шаге сетки в окружном направлении, превышающим толщину лепестка в  $3 \dots 6$  раз.

Функция давления в области сужения зазора является быстро изменяющейся, поэтому решение краевой задачи (8), (9) строится на более густой сетке, чем решение задачи упругости. Между двумя узлами сетки прогибов расположены  $2 \dots 6$  узлов сетки давлений. Для каждого узла сетки прогибов есть совпадающий с ним узел сетки давлений. Приведение распределенной нагрузки к соответствующему узлу сетки прогибов осуществляется методом осреднения рассчитанной сеточной функции избыточного давления в прилегающих узлах сгущенной сетки. Функция зазора в узлах сгущенной сетки определяется с помощью линейной интерполяции значений  $h$  по двум соседним узлам.

На основании вычислительных экспериментов определено, что приближенное решение достигается при малых параметрах  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_4 \approx 10^{-12} \dots 10^{-4}$ . Параметр  $\varepsilon_2$  не является определяющим для завершения итерационного процесса, но служит для оценки точности полученного решения.

В четвертой главе приведены результаты моделирования в авторской программе статических упругих и упругогидродинамических нагрузочных характеристик на плоской модели ЛПП. В таблице 1 приведены параметры подшипника турбогенератора. Варьируемые параметры:  $\alpha_0, H_{\text{монт}}, \delta_0$ . Конструкции 1, 6, 11 с шарнирным закреплением лепестков во втулке. Зависимости  $F(\varepsilon)$  и  $h_{\min}(\varepsilon)$  представлены на рис. 4. В таблице 2 приведены параметры подшипника турбохолодильника. Варьируется скорость вращения вала  $\omega$ . Нагрузочная характеристика № 1 рассчитана при  $\omega=0$ . Результаты на рис. 5.

Таблица 1

Параметры моделируемых подшипников с различными  $\alpha_0$

№ графика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\alpha_0$ , град	ш	3	4	5	6	ш	3	4	5	6	ш	3	4	5	6
$H_{\text{монт}}$ , мм	0,14					0,16					0,18				
$\delta_0$ , мм	0,12					0,14					0,16				
$R_{\text{ц}}=30,5$ мм; $R_{\text{л}}=42,7$ мм; $l_{\text{л}}=34,1$ мм; $N=8$ ; $\omega=60$ тыс. об/мин.															

*Параметры моделируемых подшипников*

№ графика	1	2	3	4	5	6	7
$\omega$ , тыс. об/мин	0	10	20	30	40	50	60
$R_y=15$ мм; $R_n=19,5$ мм; $l_n=17,7$ мм; $\alpha_0=4^\circ$ ; $\delta_0=0,12$ мм; $H_{монт}=0,14$ мм; $N=8$							

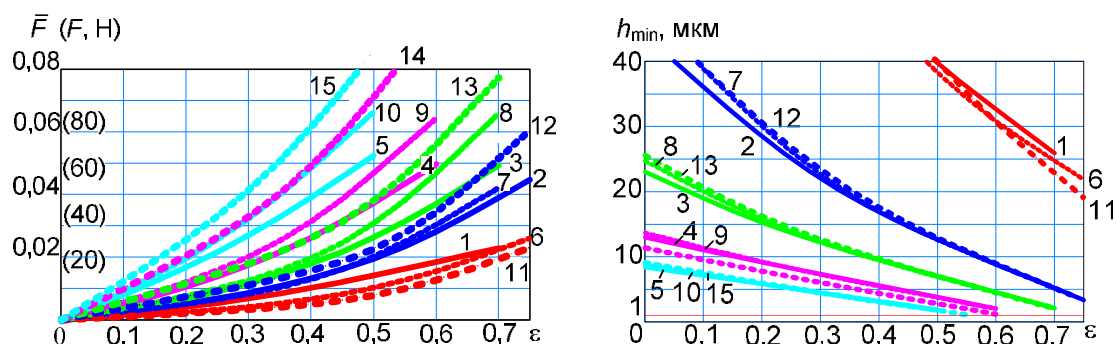


Рис. 4. Нагрузочные характеристики ЛПП при различных  $\alpha_0$

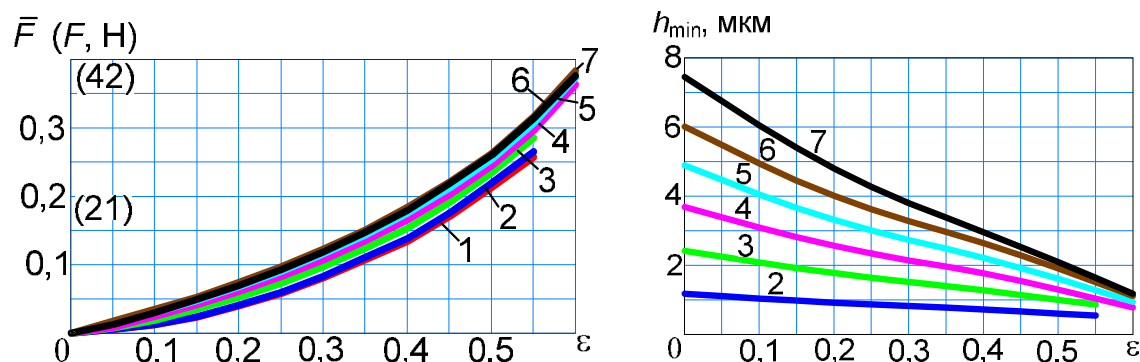


Рис. 5. Нагрузочные характеристики ЛПП при различных  $\omega$

На основании сравнительного анализа нагрузочных характеристик большого числа конструкций ЛПП сформулированы рекомендации по выбору основных конструктивных параметров подшипников с жестким закреплением лепестков в условиях стационарного нагружения:

- угол установки лепестков во втулке выбирать из интервала  $\alpha_0=4\dots5^\circ$ ;
- монтажный зазор определять в соответствии с толщиной основы лепестка:  $H_{монт}=1\dots1,2\delta_0$ ;
- толщину лепестка, изготовленного из прецизионного сплава (например, 36НХТЮ), определять в соответствии с габаритами ЛПП: для подшипников с  $R_y < 20$  мм толщина  $\delta_0=0,1$  мм; при  $R_y=20\dots30$  мм –  $\delta_0=0,12\dots0,14$  мм;
- относительные значения длины и радиуса средней линии лепестка предлагается выбирать из интервалов  $\bar{l}_n=1,3\dots1,5$ ;  $\bar{R}_n=1,2\dots1,4$ ;
- выбор числа лепестков  $N$  определяется габаритными размерами подшипника, рекомендуемое значение  $N=6\dots10$ .

Верификация программы «Модель ЛПП-1» выполнена путем сравнения полученных результатов с результатами в пакете Ansys. Построена конечно-элементная модель ЛПП с тремя лепестками, реализованная в Ansys. Получено

качественное и количественное совпадение результатов – отклонение менее 15%. При этом следует отметить, что для расчета конструкций ЛГП эффективность применения программы «Модель ЛГП-1» выше, чем применение Ansys, с точки зрения достижения требуемой точности при многовариантном расчете.

Сравнение с численными результатами, приведенными в диссертации В.В. Смирнова (1988 г.), полученными на аналогичном подходе к решению задачи, дало расхождение результатов 15–20%.

Выполнено сравнение с экспериментальными данными А.Н. Брагина (1985–1988 гг.), Н.Е. Захаровой, С.И. Сигачева (2010 г.). Расхождение результатов моделирования с экспериментом (по нагрузочным характеристикам, предельной несущей способности, скорости всплытия) оказывается менее 14%.

**В пятой главе** представлена постановка статической задачи упругости для пространственной модели ЛГП, учитывающей поступательное смещение центра симметрии вала  $\bar{\epsilon}$  и угловое перемещение оси вала в двухопорном подвесе  $\Pi_1 - \Pi_2$  с расстоянием между средними сечениями втулок подшипников  $L_{подв}$  (рис. 6). Упругость подвеса представлена на рис. 6 условно. Угловое перемещение оси вала определяется поворотом связанной с валом СК  $Ox_2y_2z_2$  относительно опорной СК  $Oxyz$  на углы Эйлера-Крылова  $\psi$  и  $\theta$ .

Обращение к статической модели ЛГП (без вращения вала) основано на свойстве ЛГП – близости НХ к СНХ при умеренных нагрузках (рис. 5). При сборке опорного узла лепестки оказываются деформированными и контактирующими с валом. Контактная задача упругости решается с помощью расширенного вариационного принципа Лагранжа. Численное решение на дискретной модели построено градиентным методом. Шаг сетки в окружном и продольном направлениях выбирается из интервала  $\Delta_\varphi \approx (3...6)\delta_0 / R_n$ ;  $\Delta_\eta \approx (5...9)\delta_0$ .

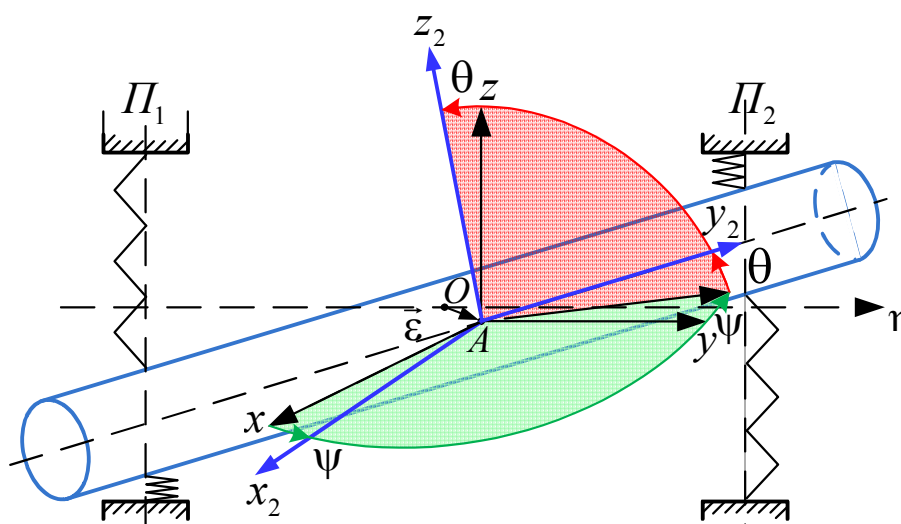


Рис. 6. Кинематическая схема вала в подвесе

Установлено, что на пространственной модели сходимость приближений процедуры минимизации обеспечивается для большинства конструкций ЛГП при построении начального приближения путем объединения решений задачи упругости, полученных на плоской модели для равноотстоящих поперечных

сечений подвеса. При этом аппроксимация вторых производных  $\partial^2 W / \partial \eta^2$  и  $\partial^2 W / \partial \varphi \partial \eta$  проводится, исходя из значений прогибов, полученных для соседних сечений.

Численные результаты для двух ЛГП с параметрами в таблице 3 представлены на рис. 7–10.

Таблица 3

Параметры моделируемых подшипников

Мо- дель ЛГП	$R_{ц}$ , мм	$N$ , шт	$\bar{l}_l$	$\bar{R}_l$	$\alpha_0$ , град	$L$ , мм	$L_{подв}$ , мм	$\delta_0$ , мм	$\delta_{п}$ , мм	$H_{монт}$ , мм
П-1	15	4	1,1	1,13	4	27	300	0,15	0,02	0,2
П-2	25	6	1,2	1,12	2	50	400	0,15	0,02	0,2

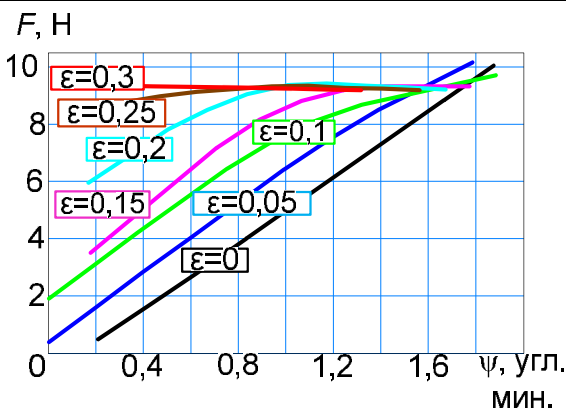


Рис. 7. Зависимость  $F(\psi)$   
П-1 ( $\psi_{max} = 4,17$  угл. мин)

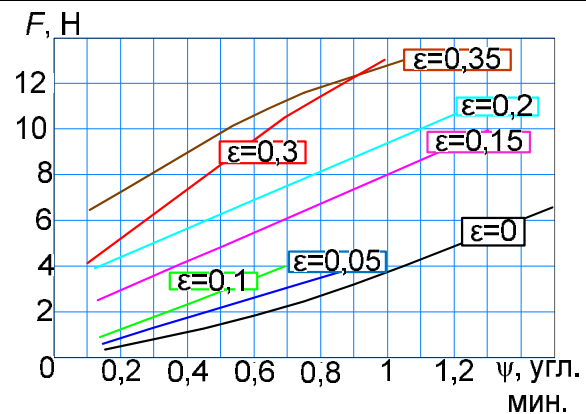


Рис. 8. Зависимость  $F(\psi)$  П-2  
( $\psi_{max} = 3,06$  угл. мин)

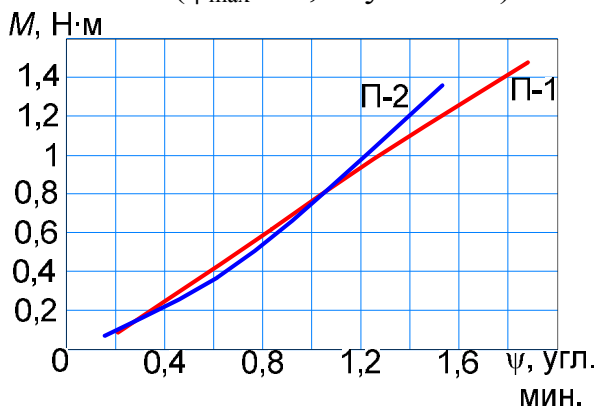


Рис. 9. Зависимости  $M(\psi)$   
моделей П-1 и П-2

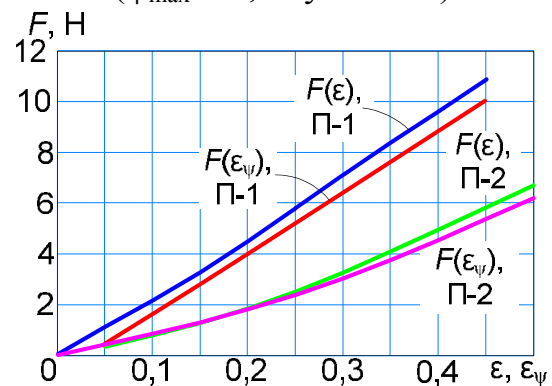


Рис. 10. Зависимости  $F(\epsilon)$  и  $F(\epsilon_{\psi})$   
моделей П-1 и П-2

На рис. 7 и 8: зависимости  $F(\psi)$  для подшипников П-1 и П-2 при различных смещениях вала  $\epsilon$ . На рис. 9: зависимости восстанавливающих моментов  $M$  от угла  $\psi$  для подшипников П-1, П-2. На рис. 10 приведены графики  $F(\epsilon)$ , рассчитанные без учета углового перемещения оси вала ( $\psi = \theta = 0$ ), и графики  $F(\epsilon_{\psi})$ , полученные для центрального положения вала ( $\epsilon = 0$ ) с угловыми пере-

мещениями оси. Здесь  $\varepsilon_\psi = \psi / \psi_{\max}$ ;  $\psi_{\max} = \arctg(2H_{\text{монт}} / (L_{\text{подв}} + L))$  – максимальный возможный угол отклонения оси вала от оси подвеса.

Несовпадение зависимостей  $F(\varepsilon)$  и  $F(\varepsilon_\psi)$  для подшипников П-1 и П-2 менее 10%. Результирующие контактные реакции пакета лепестков при поступательном смещении вала и при угловом перемещении оси вала имеют близкие значения, если равны значения относительного эксцентриситета  $\varepsilon$  и относительного углового перемещения оси вала  $\varepsilon_\psi$ :  $F(\varepsilon) \approx F(\varepsilon_\psi)$  при  $\varepsilon = \varepsilon_\psi$ . Зависимости восстанавливающих моментов  $M$  подшипников П-1 и П-2 от угла  $\psi$  близки к линейным. Угловую жесткость можно оценить  $\approx 0,8 \dots 1$  Н·м/угл. мин.

**В заключении** кратко изложены основные результаты исследования.

**В приложении** помещены копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, патента на полезную модель испытательного стенда для лепестковых опор, актов об использовании результатов работы предприятиями, разрешения на использование в работе численных данных ИП Сигачев С.И. (до 2010 г. – ООО «Турбоком–М»).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена актуальной научно-технической задаче анализа нагрузочных характеристик лепестковых газодинамических подшипников и совершенствования методов их численного моделирования. Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем.

1. Выполнены дополнения к опубликованному в предшествующих работах методу решения упругогидродинамической задачи для ЛГП на плоской модели, связанные с выбором параметров вычислительной схемы, что обеспечивает сходимость вычислительных процедур и повышение точности численных результатов в широкой области конструктивных параметров.

2. Решена контактная задача упругости на пространственной модели двухопорного подвеса на ЛГП, учитывающей поступательное смещение геометрического центра вала и угловое перемещение оси вала в подвесе, на основании которой выполнена оценка влияния углового перемещения оси вала на несущую способность и оценка угловой жесткости подвеса.

3. Создана программа в среде программирования Delphi для расчета нагрузочных характеристик лепестковых подшипников, реализующая численное решение упругогидродинамической задачи на плоской модели. Программа зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ и может служить инструментом для исследования свойств и проектирования ЛГП.

4. Выполнена верификация авторской программы «Модель ЛГП-1», подтверждающая достоверность расчетов, путем сравнения численных результатов с решениями, полученными в пакете Ansys, а также с экспериментальными и теоретическими данными других авторов. Расхождение результатов по нагрузочным характеристикам, предельной несущей способности и скорости всплытия составляет 15–20%.

5. На основании расчетов в программе «Модель ЛГП-1» исследованы свойства лепестковых подшипников – предельная несущая способность, скорость «всплытия» вала на газовом слое, зависимости момента сил вязкого трения от скорости вращения и смещения вала. Сформулированы рекомендации по выбору основных конструктивных параметров ЛГП.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Дрокин, В.В. Моделирование статических упругих взаимодействий в лепестковом радиальном подшипнике / **В.В. Дрокин** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Выпуск 13. №2 (219). – С. 40–45.

2. Левина, Г.А. Нагрузочные характеристики лепестковых радиальных подшипников турбомашин / Г.А. Левина, **В.В. Дрокин** // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2010. – №4(110). – С. 146–150.

3. Левина, Г.А. Численное моделирование и анализ нагрузочных характеристик лепесткового подшипника с газовым смазочным слоем / Г.А. Левина, **В.В. Дрокин** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – Выпуск 18, №31 (248). – С. 23–30.

### *Другие публикации*

1. Разработка многофункционального автоматизированного стенда для испытаний и снятия нагрузочных характеристик лепестковых газодинамических опор. Итоговый отчет о выполнении НИОКР по государственному контракту № 5838р/8319 от 31.03.2008 г. / А.В. Цыкунов, Г.А. Левина, Ю.А. Манаков, **В.В. Дрокин** // Зарегистрирован во ВНИИЦ под инв. № 02200954091. – утв. 21.11.2009. – 256 с.

2. Патент на полезную модель №77430. Российская Федерация. Автоматизированный универсальный стенд для испытаний лепестковых газодинамических опор / А.В. Цыкунов, Г.А. Левина, Ю.А. Манаков, **В.В. Дрокин**; заявители и патентообладатели Общество с ограниченной ответственностью «ЭкоТурбо» и Южно-Уральский государственный университет. – заявка № 2008117088; – зарегистрировано в Гос. реестре полезных моделей РФ 10.10.2008

3. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. 2009616105 Российская Федерация. Упругогидродинамический расчет нагрузочных характеристик лепесткового газодинамического подшипника, v.1.0 / Г.А. Левина, **В.В. Дрокин**; заявители и патентообладатели Общество с ограниченной ответственностью «ЭкоТурбо» и Южно-Уральский государственный университет. – заявка № 2009614875; – зарегистрировано в государственном Реестре программ для ЭВМ 05.11.2009.

4. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. 2010616109 Российская Федерация. Расчет статических нагрузочных характеристик лепесткового газодинамического подшипника, v.1.0 / Г.А. Левина, **В.В. Дрокин**; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. –



заявка № 2010614474; – зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.09.2010.

5. **Дрокин, В.В.** Математическое моделирование нагрузочных характеристик лепестковых газодинамических подшипников. Научный поиск: Материалы первой научной конференции аспирантов и докторантов. Ч. 1: Технические науки. / **В.В. Дрокин** // Челябинск: ЮУрГУ. – 2009. – С. 194–198.

6. **Дрокин, В.В.** Расчет статических нагрузочных характеристик лепестковых газодинамических подпятников в среде Visual C++.. Научный поиск: Материалы второй научной конференции аспирантов и докторантов. Т. 2: Технические науки. / **В.В. Дрокин** // Челябинск: ЮУрГУ. – 2010. – С. 21–24.

7. Левина, Г.А. Моделирование лепестковых газодинамических опор в программных средах Delphi и C++. Наука и инновации в технических университетах: Материалы 4 Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых / Г.А. Левина, **В.В. Дрокин** // СПб.: Издательство Политехн. ун-та. – 2010. – С. 15–16.

8. Левина, Г.А. Решение задачи газовой смазки для подшипника с упругими поверхностями. Математическое моделирование и краевые задачи: Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. / Г.А. Левина, **В.В. Дрокин** // Самара: СамГТУ. – 2009. – С. 203-206

Дрокин Виталий Вадимович

АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛЕПЕСТКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов  
и детали машин»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Студия дизайна и типография «ТЕТА»

---

Подписано в печать 23.05.2012. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз.

---

454048, г. Челябинск, ул. Яблочкина, 23.