

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАДДУВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР

AN INFLUENCE POROUS RESTRICTOR PERMEABILITY INHOMOGENEITY ON FLAT AEROSTATIC BEARINGS CHARACTERISTICS

Пошехонов Р.А., Гуськов А.М.

Abstract

The mathematical model was developed for numerical determining main operating characteristics of the porous flat aerostatic bearings for precision carriage (stiffness, damping, load capacity in the linear and angular directions and consumed by the air flow). The permeability inhomogeneity of porous graphite was experimentally measured. The permeability variations influence on the porous air bearing characteristics was investigated by computing these characteristics for the largest permeability coefficient and the smallest permeability coefficient. Air bearing's characteristics dispersion is considered by constant load and by constant gap thickness. The recommendations for the porous aerostatic bearings production and control were described.

Key words: flat aerostatic bearing, rigidity; damping; load capacity; porous restrictor; permeability heterogeneity.

Аннотация

Для плоских аэростатических опор с пористыми ограничителями наддува разработана математическая модель, позволяющая определять основные эксплуатационные характеристики (жесткость, демпфирования, допускаемой нагрузки в линейном и угловом направлениях, а также потребляемого расхода воздуха). Проведено экспериментальное определение неоднородности проницаемости для пористых графитовых ограничителей наддува. Оценено влияние разброса проницаемости на характеристики аэростатической опоры расчетом при наибольшем и наименьшем значении коэффициента проницаемости. Влияние разброса проницаемости на характеристики аэростатической опоры оказалось меньше при постоянном аэростатическом зазоре, чем при постоянной нагрузке. На основе этого сделаны рекомендации для изготовления плоских аэростатических опор и аэростатических подшипников.

Ключевые слова: плоская аэростатическая опора; жесткость; демпфирование; допускаемая нагрузка; пористые ограничители наддува; неоднородная проницаемость.

Введение

На предприятии ОАО «ВНИИИСТРУМЕНТ» совместно с МГТУ им Н.Э. Баумана и ООО «Ресурс Точности» разрабатывают и изготавливают аэростатические шпиндельные узлы, плоские подпятники, каретки и поворотные столы. Подобными компонентами на модульном принципе оснащают прецизионные станки с ЧПУ для алмазного точения, фрезерования и шлифования деталей различного назначения: металлооптика, гелиоэнергетика, оптические элементы, штампы линз Френеля [1]... Кроме того, подобные аэростатические узлы востребованы при нанесении дифракционных решеток или создании прецизионных измерительных устройств [2]. Аэростатические опоры позволяют с высокой точностью воспроизводить движение за счет усредняющего эффекта и отсутствия трения покоя. Жесткость и демпфирующая способность аэростатических опор может принимать значения в достаточно широком диапазоне. Повышение качества указанного обрабатываемого оборудования и измерительных устройств требует изготовления аэростатических опор с заранее заданными характеристиками. Одной из причин отклонения характеристик аэростатических опор является вариация сопротивлений ограничителей наддува. В аэростатических опорах применяют различные ограничители наддува. Достаточно полная их классификация приведена в монографиях [3, 4]. Опоры с наддувом через частично пористую опорную поверхность технологичны и обладают рядом преимуществ: повышенной жесткостью, несущей способностью и виброустойчивостью. Для создания пористых ограничителей наддува в аэростатических опорах могут быть использованы различные материалы, например, спеченный графит [5, 6], бронзографит [7], спеченные металлические порошки, пористая бронза [8], модифицированная древесина березы [9], цементные смеси [10] и керамические композиты [8, 11]. Пористый графит используют для изготовления аэростатических опор с середины прошлого века [6] до наших дней [12]. Пористый графит удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к материалам аэростатических опор. Он является стабильным, распространенным антифрикционным (при наличии влажности) материалом и легко поддается обработке. Благодаря хрупкости графита при его точении или фрезеровании не происходит смятия поверхностного слоя, закупоривающего поры. Однако он, как и все перечисленные выше материалы обладает существенной неоднородностью проницаемости. Во многих работах (например, [10, 13]) исследователи соглашались в том, что именно неоднородность проницаемости осложняет внедрение пористых аэростатических опор.

Проницаемость любого материала очень сильно зависит от количества и геометрии пор, которая имеет случайный характер. На проницаемость сильно влияют технологические факторы (например, давление прессования, температура и время спекания), которые

не всегда удается задать постоянными внутри формируемой пористой заготовки. Также проницаемость зависит от свойств соединенных частиц (размеры, геометрия, состав) и равномерности их распределения в объеме заготовки. Исходя из этих соображений, можно утверждать, что все пористые материалы обладают разбросом проницаемости, который должен учитываться для обеспечения заданных характеристик опоры. В то же время ни в обширном библиографическом исследовании по пористым ограничителям наддува, приведенном в работе [13], ни в справочнике [14] нет сведений о возможном разбросе проницаемости графита или о его влиянии на характеристики опор. Данная статья посвящена восполнению указанного пробела. Для этого были решены две задачи. Во-первых, с помощью эксперимента оценена неоднородность проницаемости спеченного графита. Во-вторых, на основании расчетов определен разброс характеристик аэростатической опоры, обусловленный неоднородностью проницаемости.

1. Объект исследования

Для расчетов выбрана плоская аэростатическая опора. Подобные опоры применяют в линейных аэростатических направляющих, которые в станкостроении называются аэростатическими каретками, а также в аэростатических подпятниках, поворотных столах и шпиндельных узлах. На рисунке 1 а показана типовая конструкция аэростатической каретки, изготавливаемой ООО «Ресурс Точности».

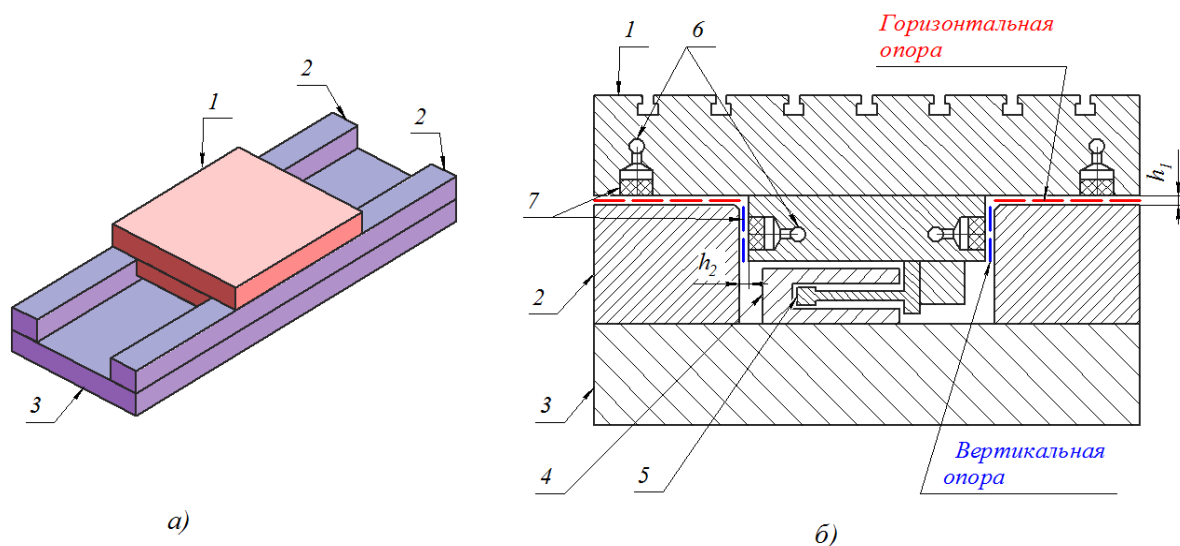


Рисунок 1 – Аэростатическая каретка линейных перемещений: а – общий вид; б – внутреннее устройство

Аэростатическая каретка 1 может двигаться по направляющим 2, жестко присоединенным к основанию 3. Такое движение называют рабочим ходом каретки. Для повышения точности движения перемещение каретки осуществляют бесконтактным линейным электроприводом, состоящим из статора 4 и якоря 5. Внутри каретки по каналам 6 подают сжатый

воздух под постоянным давлением подачи p_s . Воздух проходит через пористые вставки 7 и узкий зазор между кареткой 1 и направляющими 2. При прохождении воздухом дросселирующих пористых вставок теряется только часть разницы между давлением подачи и атмосферным давлением ($p_s - p_{atm}$), остальная часть разницы давлений расходуется по мере движения воздуха через зазор и создает подъемную реакцию. Каретка «висит» в слое сжатого воздуха и может быть перемещена вдоль направляющих без трения покоя и с очень малым трением движения. Под действием внешних сил каретка совершает нежелательные биения, которые меняют толщины аэростатических слоев. В точках опорной поверхности, где толщина сократилась, растет сопротивление, оказываемое движению воздуха зазором, и уменьшается воздушный расход. При этом убывает потеря давления при прохождении дросселирующих пористых вставок и растет давление в зазоре. В результате меняются опорные реакции, которые стремятся вернуть каретку в центральное положение. Такое поведение газовой пленки объясняет наличие позиционных связей между опорными реакциями и биениями каретки, иначе говоря, ее жесткости. Вместе с ними присутствуют демпфирующие связи. Они обусловлены ростом давления в тонком воздушном слое при его быстром сжатии из-за того, что воздух не успевает выйти из зазора. Жесткость и демпфирование аэростатического слоя непосредственно определяет эксплуатационные характеристики каретки. Однако они существенно зависят, как от конструкции, так и от методов регулировки.

При выбранной конструкции опор (рисунок 1 - б) противоположные горизонтальные опорные реакции F_x уравнивают друг друга в центральном положении (рисунок 2). Настройка вертикальных опор осуществляется геометрически за счет выставления суммарного зазора $2 \cdot h_2$ между направляющими 2 и кареткой (рисунок 1). Такое состояние опор будем называть «*кинематическим замыканием*».

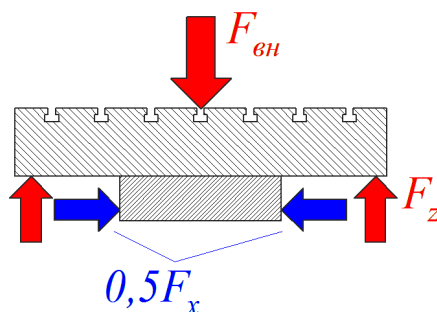


Рисунок 2 – Аэростатические опорные реакции

Подобное состояние характерно для плоских упорных подшипников в аэростатических шпиндельных узлах, построенных по катушечной схеме. Поэтому полученные ниже

результаты для «кинематического замыкания» могут быть с минимальными изменениями адаптированы для опор шпиндельного узла.

Для обеспечения высокой жесткости опоры требуется большая опорная поверхность и значительное давление воздуха в аэростатическом зазоре. Поэтому вертикальные опорные реакции F_z (рис. 2) должны быть уравновешены дополнительной внешней силой $F_{вн}$, поскольку вес самой каретки недостаточен. Нагружение постоянной силой для повышения жесткости опоры будем называть «силовым замыканием». Технически силовое замыкание аэростатических опор возможно за счет увеличения весовой нагрузки, использования вакуумного [15] или магнитного натяжения [16]. Все данные методы имеют определенные недостатки. Значительное повышение веса приводит к увеличению габаритов, инерционности подвижных элементов и уменьшению частот свободных колебаний. Использование прижимающих систем с мощными постоянными магнитами возможно только при ферромагнитных материалах опор. При движении по ним каретки происходят потери энергии от перемагничивания, что эквивалентно наличию незначительного сухого трения. Подобное явление нежелательно в наиболее точных прецизионных приложениях. Вакуумный прижим существенно снижает площадь аэростатических опор. Например, при использовании избыточного давления подачи 5 атм среднее давление в зазоре должно составить 2-3 атм. Давление вакуума ограничено диапазоном от минус 0,8 до минус 0,9 атм. Поэтому для создания равновесия сил вакуумного притяжения и аэростатического отталкивания площадь вакуумных полостей должна занимать 60-75 % от всей площади взаимодействия. При большем давлении подачи растет доля площади, которая должна отводиться под вакуумные карманы, что может снизить характеристики опор при отсутствии расчетов на стадии проектирования. Окончательный выбор способа нагружения осуществляют с учетом технологических возможностей и технических требований.

Для дальнейшего изложения принципиально важно, что удержание аэростатической опоры в положении с наибольшей жесткостью возможно *кинематическим замыканием* (заданием толщины воздушного слоя) или *силовым замыканием* (приложением постоянной внешней силы).

1.1. Компоновка опорной поверхности

Рассмотрим одну плоскую аэростатическую опору (Рисунок 3). Несущая поверхность сформирована в виде прямоугольника с рядом круглых пористых вставок. Введены следующие обозначения: L – длина опоры; B – ширина опоры; R – радиус пористой встав-

ки; L_1 – расстояние между соседними вставками; N – количество пористых вставок, расположенных в ряд.

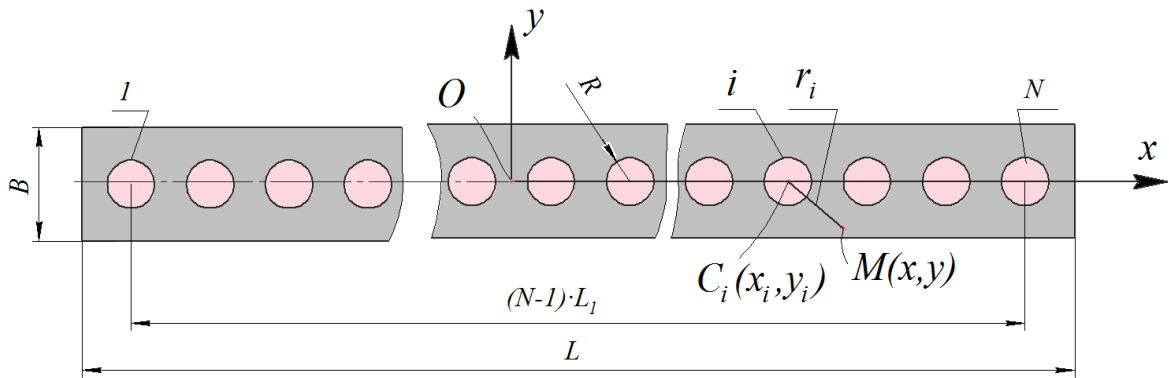


Рисунок 3 – Геометрия опорной поверхности

С центром опоры O (рисунки 3 и 4) связана система координат xuz .

1.2. Кинематика и силовые факторы

Положение аэростатической опоры определим толщиной зазора h_0 в центральной точке O (рисунок 3) и углом перекоса каретки φ (поворот вокруг оси y). Опора гораздо менее чувствительна к повороту вокруг оси x , поэтому он не учтен. Состояние несущего газового слоя также зависит от линейной скорости V и угловой – ω

$$V = \frac{dh_0}{dt}, \quad \omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (1)$$

соответственно. Каждому состоянию воздушного слоя соответствует распределение давления $p(x, y)$ на опорную поверхность, его равнодействующая сила F и момент M , приведенные к центру опоры O .

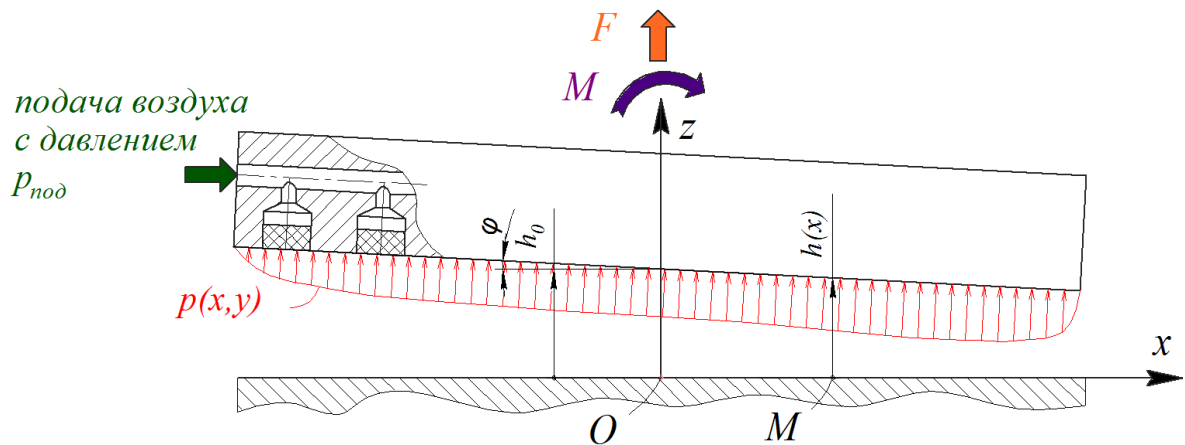


Рисунок 4 – Рассматриваемая аэростатическая опора

1.3. Модель аэростатической опоры

1.3.1. Физическая модель

Как и во многих других исследованиях аэростатических опор [7, 17 - 19], движение воздуха описано как изотермическое, ламинарное, дозвуковое, стационарное и сплошное движением линейно вязкой среды. При описании геометрии слоя опорные поверхности каретки и направляющей рассмотрены как идеально ровные и жесткие. Зависимость давления от времени и координаты z , перпендикулярной к поверхности опоры, не учтена.

1.3.2. Математическая модель аэростатического слоя

При принятых допущениях распределение давления в опорном аэростатическом слое найдено на основании уравнением Рейнольдса, известного в теории газовой смазки [6]

$$\nabla \left[h^3 \nabla (p^2) \right] = -K_1 (p_s^2 - p^2) + 24\mu p V_n, \quad (2)$$

где h – аэростатический зазор; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха; p – абсолютное давление воздуха; K_1 – коэффициент, учитывающий наличие наддува; p_s – давление подачи; V_n – нормальная скорость сближения опорных поверхностей. Независимыми переменными в уравнении (2) являются декартовы координаты x, y . Для решения уравнения (2) использовано граничное условие Дирихле на всем внешнем контуре $p=p_{atm}$ на распределение давления p . Коэффициент K_1 , учитывающий наличие наддува, определен через толщину вставки δ и коэффициент проницаемости материала вставки k_p следующим образом

$$K_1 = \frac{k_{p0}(x, y)}{12\delta}, \text{ где } k_{p0}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{там, где есть вставка,} \\ k_p, & \text{там, где нет вставки} \end{cases} \quad (3)$$

это переменный коэффициент проницаемости материала стенки корпуса. Вычисление $k_{p0}(x, y)$ проведено аналогично статье [19], но в декартовых координатах. Для произвольной точки $M(x, y)$ вычислено расстояние r_i до центра каждой вставки $C_i(x, y)$ ($i=1 \dots N$, рис. 3). Если минимальное из расстояний было меньше радиуса вставки, то учитывался наддув для точки M .

$$k_{p0}(x, y) = \begin{cases} 0, & \min(r_i) < R, \\ k_p, & \min(r_i) \geq R. \end{cases} \quad (4)$$

Для расчета уравнения (2) в каждой точке должна быть вычислена толщина аэростатического зазора

$$h(x) = h_0 - \varphi x \quad (5)$$

и нормальная скорость сближения опорных поверхностей

$$V_n(x) = -\frac{\partial h(x)}{\partial t} = -(V - \omega x). \quad (6)$$

1.3.3. Вычисление опорных реакций и расхода

Для произвольного состояния по определенному распределению давления $p(x,y)$ можно вычислить равнодействующую силу F и момент M относительно оси y (рис. 2, рис. 3), а также потребляемый расход воздуха Q (приведенный к нормальным условиям)

$$\begin{aligned} F &= \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-L/2}^{L/2} (p(x,y) - p_{atm}) dx dy, \\ M &= - \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-L/2}^{L/2} x (p(x,y) - p_{atm}) dx dy, \\ Q &= \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{k_{p0}(x,y) (p_s^2 - p(x,y)^2)}{2\delta \mu p_{atm}} dx dy. \end{aligned} \quad (7)$$

1.3.4. Метод расчета распределения давления $p(x,y)$

Решение уравнения (2) в такой постановке не имеет аналитического решения и было реализовано численно в программном комплексе MATLAB с приложением PDETOOL методом конечных элементов. Были использованы треугольные конечные элементы с тремя узлами. Для решения нелинейной задачи был выбран метод Ньютона с пересчетом "матрицы жесткости" на каждой итерации. Сходимость решения при сгущении сетки проверена. В качестве начального приближения для давления было выбрано постоянное давление $p(x,y)=p_{atm}$. В качестве основной неизвестной выбрана функция давления $u=p^2$. Относительно функции давления u уравнение (2) линейно при нулевых обобщенных скоростях $V=0$, $\omega=0$. В этом случае решение сходится при любых рассмотренных значениях обобщенных перемещений h_0 и φ , не вызывающих отрицательного зазора.

При ненулевых обобщенных скоростях уравнение (2) является нелинейным, и процесс решения может не сойтись при больших значениях скоростей. В этом имеет место аналогия с областью сходящихся решений в фазовом пространстве (состоящем из нормального смещения и скорости) отдельного сегмента сферической аэростатической опоры, подробно рассмотренной в другой работе авторов [19]. Так же, как и для расчетного сегмента сферической аэростатической опоры, при малом зазоре $h(x,y)$ распределение давления очень чувствительно к значениям обобщенных скоростей. При малом зазоре реше-

ние можно получить только при обобщенных скоростях, лежащих в очень узкой окрестности нуля $\{V \in (V_a, V_b), \omega \in (\omega_a, \omega_b) | V_a > 0, V_b > 0, \omega_a > 0, \omega_b > 0\}$. Аналогия с сегментом сферической опоры есть и в том, что при быстром расширении (или сжатии) тонкого слоя, $V \gg V_b$ (или $V \ll V_a$), необходима корректировка физической и математической модели из-за проявления нестационарных процессов (или эффектов скольжения). Обсуждение быстрого сжатия сферического аэростатического слоя также описано в работе [1]. В ней расчеты проведены по похожей модели, но решение получено в программном комплексе Comsol Multiphysics, где больше выбор нелинейных решателей для задач метода конечных элементов.

Несмотря на сложность получения решений при больших скоростях, представленные в данной статье модели имеют существенное практическое значение. При уменьшении аэростатического зазора убывает и скорость вибрационных колебаний, а также резко растет демпфирование аэростатического слоя. Из-за этого состояния опоры с очень малым зазором и с большой скоростью не реализуемы на практике.

1.4. Пример расчета одного состояния

Параметры опоры, взятой для расчета, представлены в таблице 1. В частности, для проницаемости использовано среднее значение, полученное в экспериментальном исследовании (см. ниже раздел 2).

Таблица 1

Параметры аэростатической опоры

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Длина опоры	L	м	$500 \cdot 10^{-3}$
Ширина опоры	B	м	$24 \cdot 10^{-3}$
Расстояние между вставками	L_1	м	$20 \cdot 10^{-3}$
Количество вставок	N	шт.	22
Проницаемость вставок	k_p	м	$7,78 \cdot 10^{-15}$
Толщина вставок	Δ	м	$6 \cdot 10^{-3}$
Радиус вставки	R	м	$9 \cdot 10^{-3}$
Атмосферное давление (абс.)	p_{atm}	Па	$1,013 \cdot 10^5$
Давление подачи (абс.)	p_s	Па	$5,916 \cdot 10^5$
Коэффициент динамической вязкости воздуха	μ	Па·с	$1,81 \cdot 10^{-5}$

Состояние опоры при расчете задано следующими значениями обобщенных координат: $h_0=10 \cdot 10^{-6}$ м, $\varphi=1,2 \cdot 10^{-5}$ рад, а также нулевыми обобщенными скоростями. На рисунке 5 представлено распределение давления для данного случая, а в таблице 2 – результаты расчета.

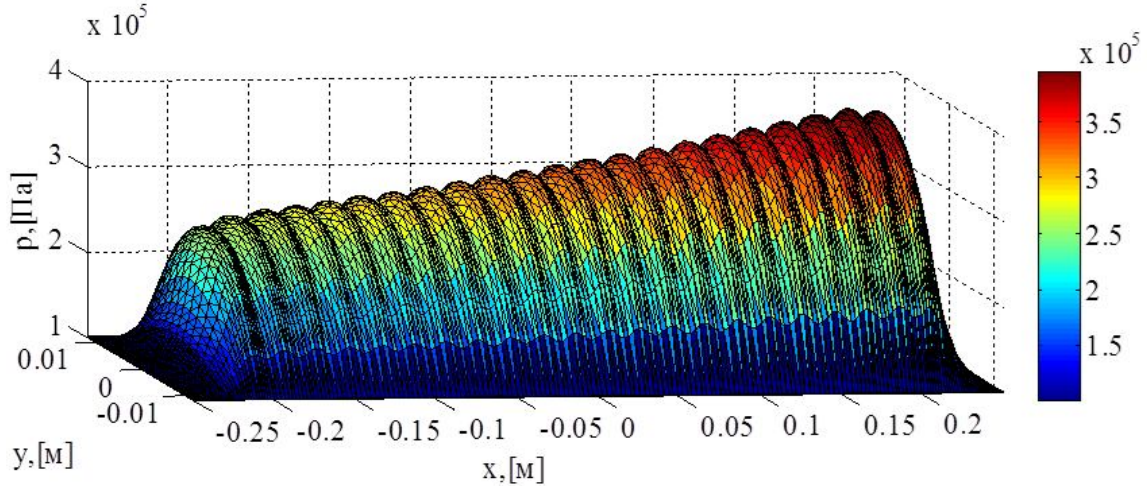


Рисунок 5 – Пример расчета распределение давления $p(x,y)$, [Па]

Таблица 2

Результаты расчета произвольного состояния

Параметр	Размерность	Значение
Сила F	Н	169
Момент M	Н·м	- 41,3
Потребляемый расход Q	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (л·мин $^{-1}$)	$5,12 \cdot 10^{-4}$ (30,7)
Максимальное абсолютное давление p_{max}	Па	$3,95 \cdot 10^5$

1.5. Анализ силовых характеристик без учета разброса проницаемости

При заданных обобщенных координатах h_0 , φ и обобщенных скоростях V , ω опорные реакции F и M могут быть рассчитаны по формулам (2) ... (7). Анализировать зависимости опорных реакций от четырех кинематических факторов довольно сложно. Поэтому ниже рассмотрены зависимости опорной силы от перемещения и скорости $F(h_0, V)$, а также зависимость момента опорной реакции от угла перекося и угловой скорости $M(\varphi, \omega)$. Данные характеристики имеют ясный физический смысл и удобны для использования в инженерной практике. Зависимость $F(h_0, V)$ характеризует жесткость и демпфирующую способность опоры в вертикальном направлении, а зависимость $M(\varphi, \omega)$ – в угловом.

1.5.1. Силовая характеристика для опорной реакции $F(h_0, V)$

Для получения данной характеристики были проведены расчеты опорных реакций при различных значениях зазора h_0 и скорости V с нулевым углом перекоса φ и нулевой угловой скорости ω . Параметры опоры соответствуют таблице 1. Как отмечено выше, решение нелинейного уравнения (2) можно получить только для ограниченного диапазона скоростей. Причем при большем значении зазора h_0 получить сходящееся решение можно при бóльших значениях скоростей. На рис. 6 – а показана область $h_0 - V$, для которой было получено решение и линии постоянного уровня опорной реакции F . На рисунке 6 б показан трехмерный график зависимости $F(h_0, V)$ и на нем выделена линия $F(h_0, 0)$, которая соответствует статическому состоянию опоры. Эта линия определяет поведение опоры при медленном нагружении.

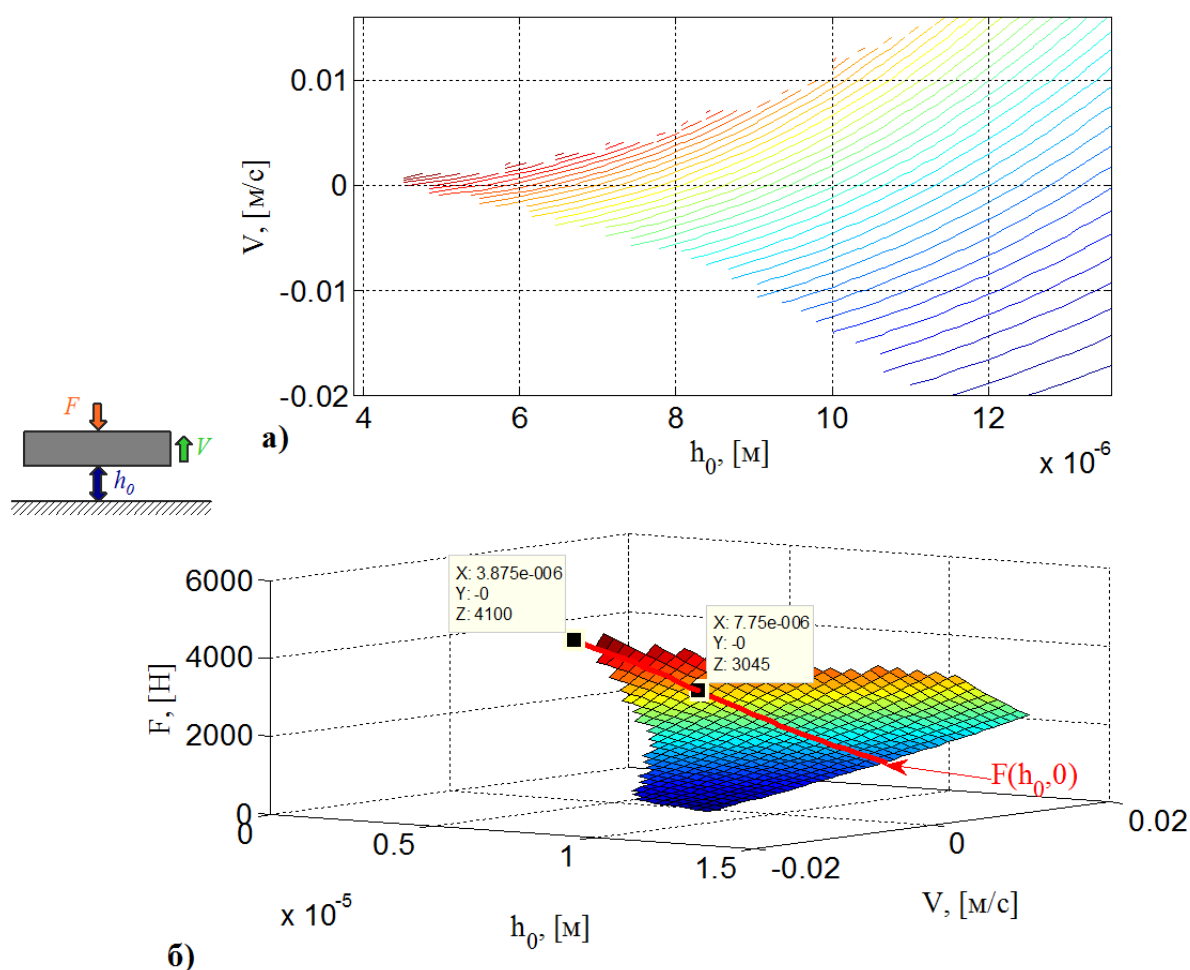


Рисунок 6 – Зависимость опорной силы F от зазора h_0 и скорости V : а – линии уровней постоянной силы в области полученных решений; б – 3D график

Нелинейная зависимость $F(h_0, V)$ свидетельствует о переменной жесткости и переменном демпфировании опоры. Будем рассматривать касательную жесткость опоры

$$K(h_0, V) = -\frac{\partial F(h_0, V)}{\partial h_0} \quad (8)$$

и «касательное демпфирование», введенное аналогичным образом,

$$D(h_0, V) = -\frac{\partial F(h_0, V)}{\partial V}. \quad (9)$$

В зависимостях (8) и (9) использован знак «-», потому что F – опорная реакция, а не внешняя сила. Жесткость опоры представляет основной интерес в большинстве приложений, поскольку она определяет статические смещения опоры и частоты свободных колебаний. Демпфирование опоры определяет скорость затухания свободных колебаний и уровень вынужденных колебаний. Для вычисления зависимостей (8) и (9) были использованы конечно-разностные выражения

$$\frac{\partial A(a_1, a_2)}{\partial a_1} \Big|_{\frac{a_1^{[m]}+a_1^{[m+1]}}{2}, a_2^{[n]}} = \frac{A(a_1^{[m+1]}, a_2^{[n]}) - A(a_1^{[m]}, a_2^{[n]})}{a_1^{[m+1]} - a_1^{[m]}},$$

$$\frac{\partial A(a_1, a_2)}{\partial a_2} \Big|_{a_1^{[m]}, \frac{a_2^{[n]}+a_2^{[n+1]}}{2}} = \frac{A(a_1^{[m]}, a_2^{[n+1]}) - A(a_1^{[m]}, a_2^{[n]})}{a_2^{[n+1]} - a_2^{[n]}}. \quad (10)$$

На рис. 7 представлена касательная жесткость $K(h_0, V)$, которая меняется в зависимости от величины зазора h_0 , и от величины скорости V . Также на рисунке 7 отмечена зависимость статической жесткости от зазора $K(h_0, 0)$, описывающая поведение опоры при медленно меняющейся нагрузке.

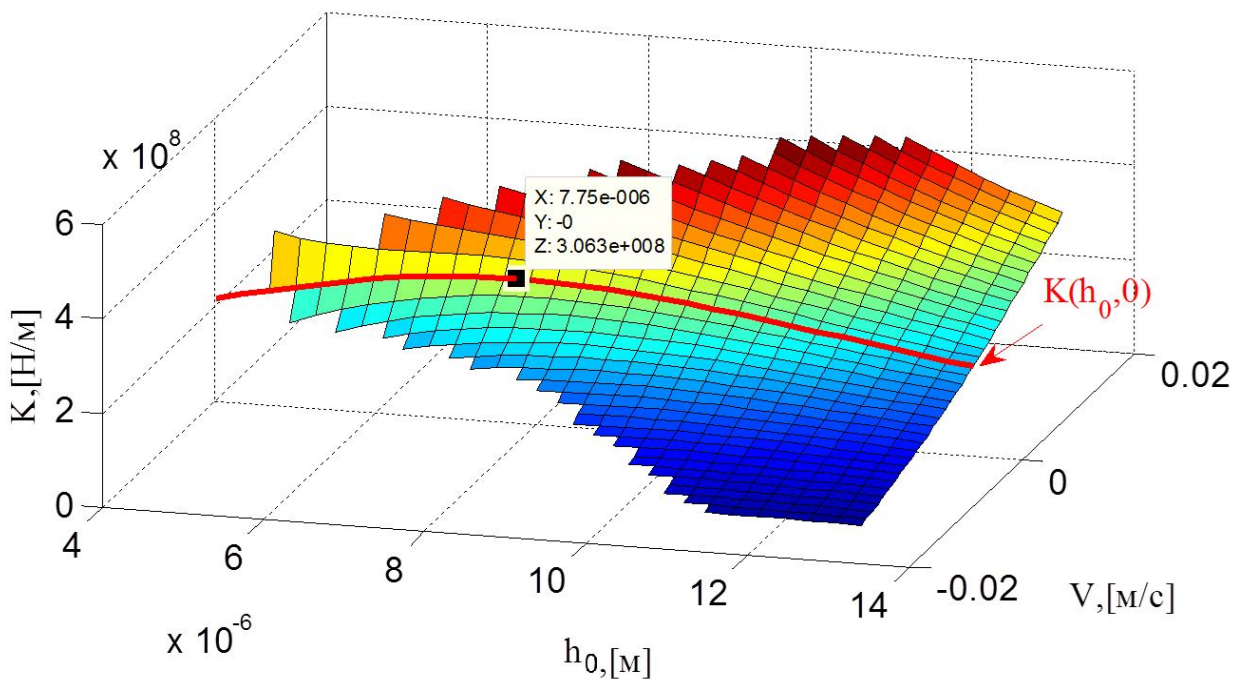


Рисунок 7 – Зависимость жесткости K от зазора h_0 и скорости V

Зависимость статической жесткости от зазора $K(h_0, 0)$ имеет характерный максимум $K(h_0^{opt}, 0) = 3,063 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$. Жесткость аэростатических опор представляет наибольший интерес, поскольку она влияет на статическую погрешность и собственные частоты колебаний. Поэтому зазор h_0^{opt} , при котором может быть получена наибольшая жесткость, далее будем называть «оптимальным зазором». При выбранных параметрах опоры для реализации максимальной жесткости необходимо обеспечить оптимальный зазор $h_0^{opt} = 7,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ при кинематическом замыкании или создать прижимающими устройствами силу $F^{opt} = 3045 \text{ Н}$ при силовом замыкании. Далее определяется допустимая нагрузка, прикладываемая к опоре в этом состоянии. В прецизионных приложениях полное перекрытие аэростатического зазора недопустимо, поскольку сухое трение приводит к различным нежелательным явлениям: автоколебаниям и росту сопротивления при движении, механическому гистерезису, износу опорных поверхностей. Поэтому допустимым значением нагрузки будем считать то, которое необходимо для сокращения зазора вдвое. По статической характеристике (рис. 6 б) можно утверждать, что для удержания опоры в состоянии $h = 3,875 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ необходимо приложить дополнительную силу $F(3,875 \cdot 10^{-6} \text{ м}, 0) - F^{opt} = 4100 - 3045 = 1055 \text{ Н}$. Это и есть допустимое значением силы.

На рис. 8 представлено «касательное демпфирование» $D(h_0, V)$, которое зависит от величины зазора h_0 и от величины скорости V .

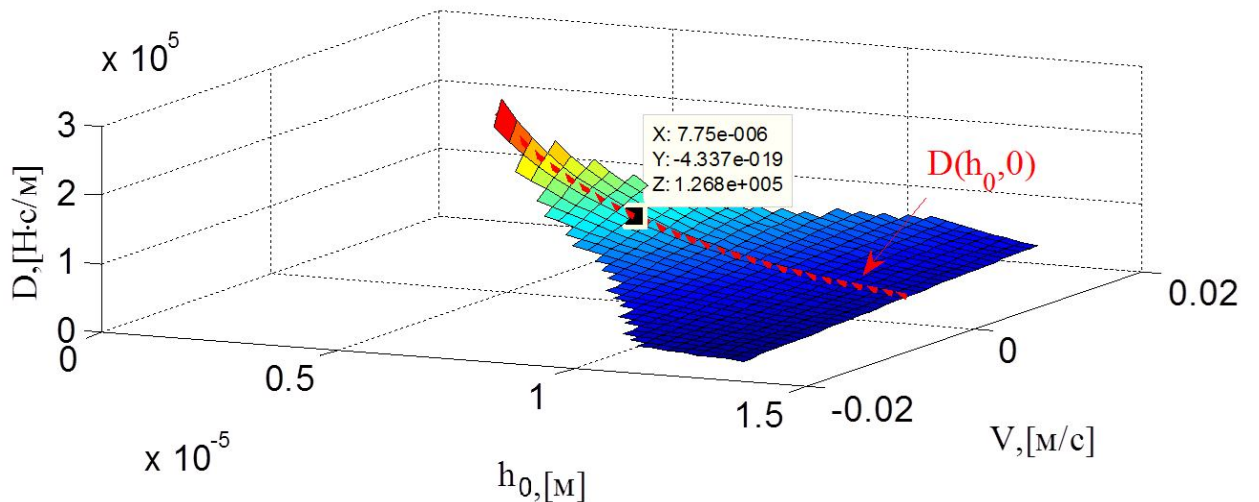


Рисунок 8 – Зависимость демпфирования D от зазора h_0 и скорости V

На рис. 8 показана зависимость демпфирования от зазора $D(h_0, 0)$, при нулевой скорости описывающая поведение опоры при медленно меняющейся нагрузке, а также отмечено значение при оптимальном зазоре $D(h_0^{opt}, 0) = 1,27 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$.

1.5.2. Силовая характеристика для опорного момента $M(\varphi, \omega)$

Исследуем силовую характеристику для опорного момента $M(\varphi, \omega)$, полученную варьированием углового перемещения φ и угловой скорости ω при оптимальном зазоре $h_0^{opt} = 7,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и при нулевом значении скорости $V=0$ (рис. 9).

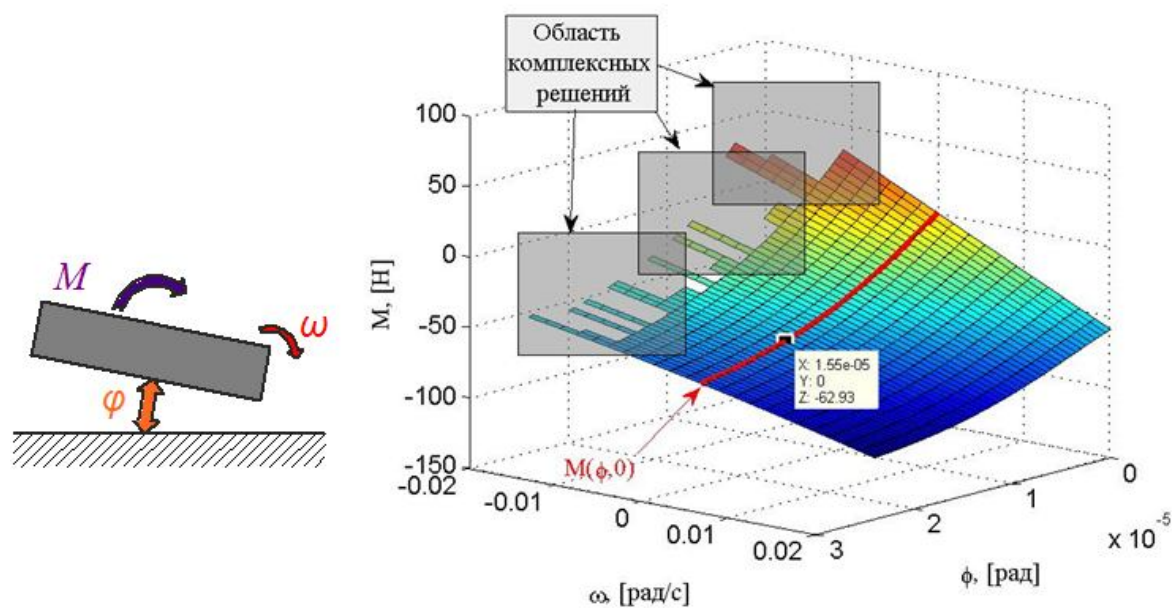


Рисунок 9 – Зависимость опорного момента M от угла поворота φ и угловой скорости ω

При увеличении угловой скорости возрастает нелинейность уравнения (9), что может приводить к расходящемуся результату. Однако даже в сравнительно небольшом диапазоне угловых скоростей в некоторых точках были получены нефизичные отрицательные решения для функции давления ($u=p^2 < 0$), соответствующие комплексному давлению. Это объясняется тем, что при положительном угле поворота в точках с $x > 0$ уменьшается зазор, и распределение давления становится очень сильно зависящим от скорости сближения поверхностей V_n . При $\omega < 0$ в точках $x > 0$ наблюдается наличие вакуума в точках, удаленных от отверстий наддува (подобно области «б» для сферического сегмента [19]). На рис. 9...11 отброшены расчетные точки, для которых была получена заметная комплексная составляющая давления $\max(\text{Im}(p(x,y))) > 1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. На рис. 9 отмечена статическая характеристика $M(\varphi, 0)$. По статической характеристике можно определить допустимую моментную нагрузку опоры, как момент, вызывающий сокращение зазора $h(x,y)$ до $0,5 \cdot h_0^{opt}$. Это происходит при угле поворота $\varphi_{\min} = h_0^{opt} \cdot L = 1,55 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$. Предельный момент, определенный таким образом, составил $M(\varphi_{\min}, 0) = -62,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Определим жесткость, демпфирование и предельную нагрузку для рассматриваемой опоры при ее перекосе (повороте) вокруг оси Y при соблюдении оптимального зазора h_0^{opt} в центральной точке O . Касательная угловая жесткость $K_\phi(\phi, \omega)$ и демпфирование были определены по формулам, аналогичным (11) и (12), численным вычислением частных производных по правилу (13). Зависимость касательной жесткости $K_\phi(\phi, \omega)$ представлена на рис. 10. При этом красной линией выделена статическая характеристика $K_\phi(\phi, 0)$.

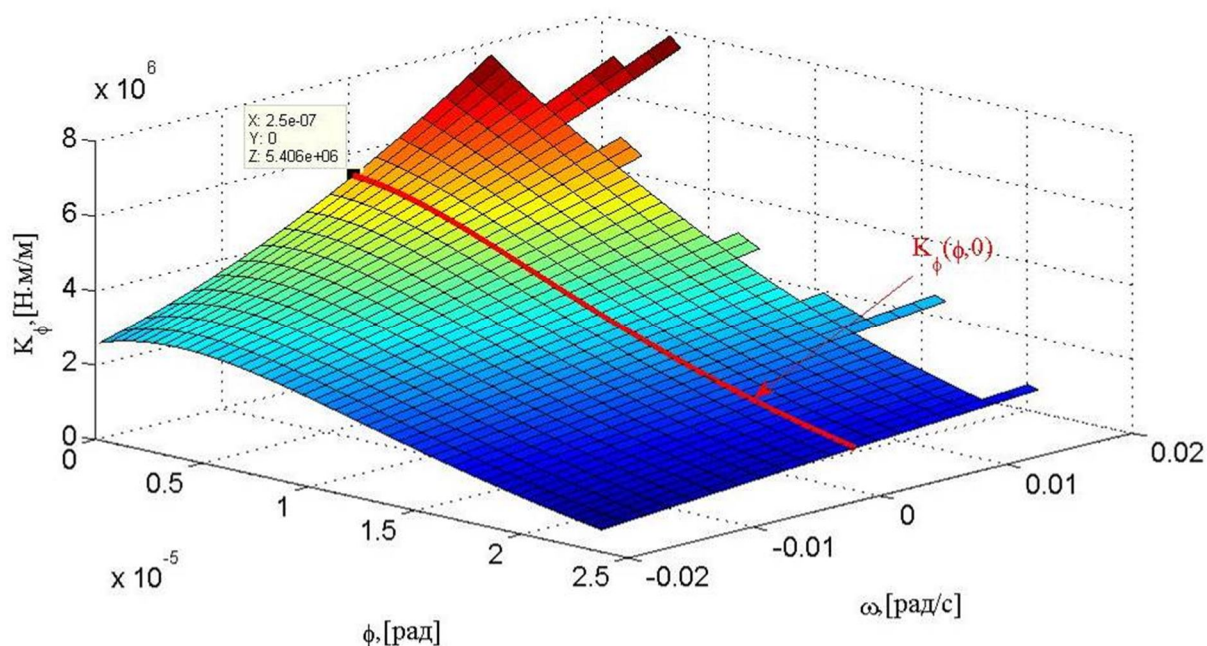


Рисунок 10 – Зависимость угловой жесткости K_ϕ от угла поворота ϕ и угловой скорости ω

Значение касательной жесткости вблизи положения равновесия составляет $K_\phi(0,0)=5,41 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{рад}^{-1}$. При увеличении угла ϕ касательная жесткость в угловом направлении существенно падает.

На рисунке 11 представлено «касательное демпфирование» в угловом направлении $D_\phi(\phi, \omega)$, которое также зависит от величины углового смещения ϕ и угловой скорости ω .

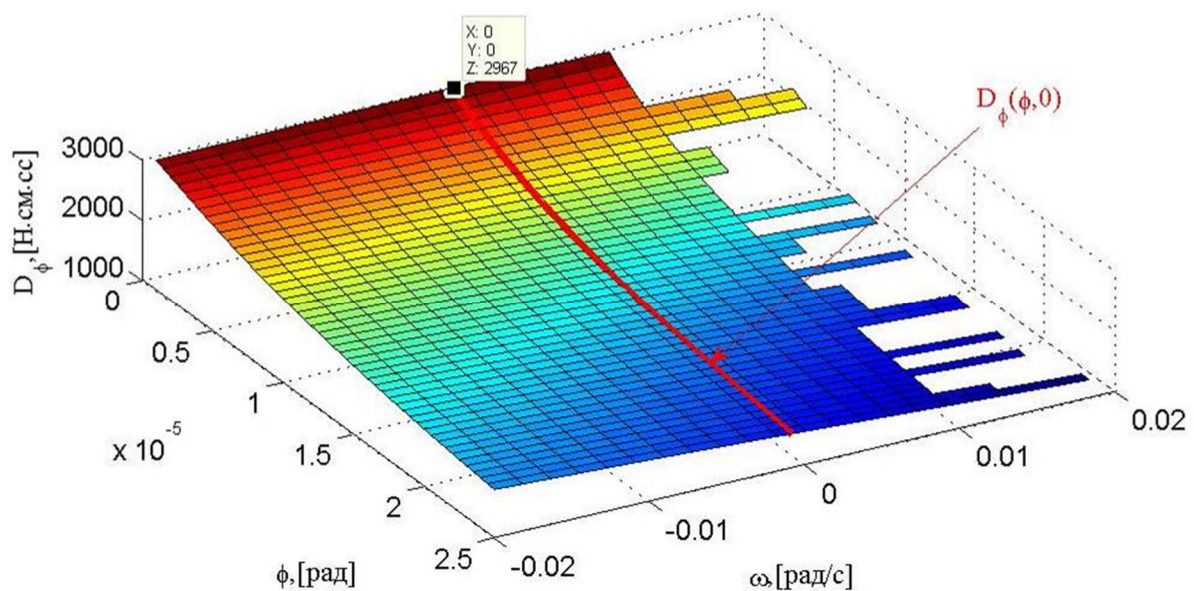


Рисунок 11 – Зависимость углового демпфирования D_ϕ от угла поворота ϕ и угловой скорости ω

Отмеченная на рис. 11 линия соответствует демпфированию при нулевой угловой скорости $D_\phi(\phi, 0)$, описывающему поведение опоры при медленно меняющейся нагрузке. В отличие от поступательного смещения (рис. 8) увеличение угла поворота существенно снижает демпфирование опоры. В положении покоя, при отсутствии угла поворота ϕ и угловой скорости ω демпфирование опоры составляет $D_\phi(0, 0) = 2970 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$.

1.5.3. Результаты расчета характеристик опоры без учета разброса проницаемости

Разработанная математическая модель позволяет при заданных параметрах опоры прогнозировать ее характеристики. Числовые результаты расчета для среднего значения проницаемости ограничителей наддува представлены в таблице 3. Из-за нелинейности силовых характеристик жесткость и демпфирование опоры зависят и от обобщенных координат, и от обобщенных скоростей. Приведенные значения описывают малые и медленные колебания относительно выбранных положений равновесия с максимальной жесткостью.

Таблица 3

Результаты расчета плоской аэростатической опоры

Характеристика	Размерность	Значение
Требуемый зазор h_0^{opt}	м	$7,75 \cdot 10^{-6}$
Постоянная прижимающая сила $F^{opt} = F(h_0^{opt}, 0)$	Н	3045
Расход воздуха	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (л·мин ⁻¹)	$2,84 \cdot 10^{-4}$ (17,0)
Вертикальное направление	Н	1055

Допустимая нагрузка $F(0,5 \cdot h_0^{opt}, 0) - F(h_0^{opt}, 0)$		
Жесткость $K(h_0^{opt}, 0)$	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$	$3,063 \cdot 10^8$
Демпфирование $D(h_0^{opt}, 0)$	$\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$	$1,27 \cdot 10^5$
Угловое направление Допустимая нагрузка M	$\text{Н} \cdot \text{м}$	62,9
Жесткость K_ϕ	$\text{Н} \cdot \text{м}$	$5,41 \cdot 10^6$
Демпфирование D_ϕ	$\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}$	2970

2. Экспериментальное исследование разброса проницаемости пористого графита

Для изготовления аэростатических опор был специально изготовлен низко пористый спеченный графит. Проницаемость графита может существенно варьироваться в зависимости от исходного сырья и условий обработки, и что более важно, иметь значительный разброс значений даже внутри одной заготовки. Определение проницаемости графита можно проводить по методике ГОСТ 26283-93 [20], предназначенной для определения проницаемости спеченных металлических материалов при движении жидкости. Однако в производственных условиях собрать установку, соответствующую требованиям ГОСТ 26283-93, было бы весьма сложно. К тому же, способ крепления пористой вставки по ГОСТ 26283-93 отлично от способов крепления, применяемых в аэростатических опорах, изготавливаемых ООО «Ресурс точности», что усложняет интерпретацию полученных по ней результатов.

При эксперименте была использована упрощенная установка, схема которой представлена на рисунке 12. Измерение проведено следующим образом. Сжатый воздух подавался через редукционный пневматический клапан 1, предназначенный для регулировки давления подачи по показаниям манометра 2. Выключатель 3 позволял быстро начинать и останавливать подачу воздуха через пористую вставку 4, закрепленную в специальном приспособлении. Крепление вставки соответствовало технологии, применяемой ОАО «Ресурс Точности» для изготавливаемых аэростатических узлов. Объемный поток был измерен с помощью полиэтиленовой мерной емкости 5, погруженной в сосуд с водой 6, и секундомера 7. На мерную емкость была нанесена шкала для измерения объема воздуха, поступившего в нее. Давление внутри мерной емкости было чуть больше атмосферного из-за ее веса. Несущественное отличие давления внутри емкости от атмосферного давления было оценено по разнице уровней воды Δh и ее плотности ρ_w как $\Delta p = \Delta h \rho_w g \approx 98 \text{ Па}$.

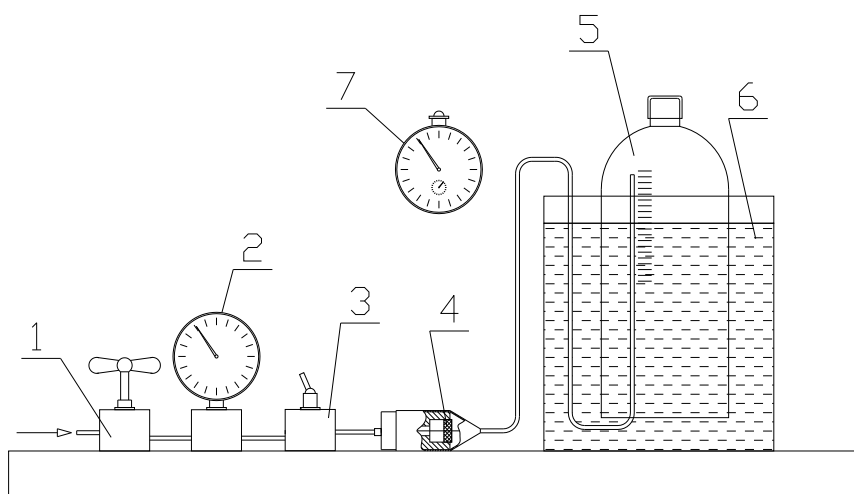


Рисунок 12 – Принципиальная схема установки для определения проницаемости

Воздушный поток, прошедший через вставку, определяется по объему воздуха, поступившего в мерную ёмкость V_{atm} , и времени t :

$$Q_{atm} = \frac{V_{atm}}{t}. \quad (11)$$

При определенном воздушном расходе коэффициент проницаемости k_p был выражен через давление подачи p_s и с учетом сжимаемости воздуха и закона Дарси, для движения вязкой среды через пористый материал [6]

$$k_p = \frac{8\delta_0\mu Q_{atm} p_{atm}}{\pi D_0^2 (p_{под}^2 - p_{atm}^2)}. \quad (12)$$

где δ_0 и D_0 - толщина и диаметр пористой вставки; $p_{atm} \approx 101325$ Па - давление на выходе из пористой вставки. Данная зависимость получена при предположениях об изотермическом, ламинарном, сплошном и однонаправленном движении воздуха через пористый материал.

Для проверки однородности проницаемости графита были проведены измерения для серии из десяти пористых вставок, вырезанных из одного слоя графитовой заготовки. Испытания проведены при фиксированном избыточном давлении подачи $p_s \approx 392400$ Па (4 атм). Измеренные значения коэффициента проницаемость отдельных пористых вставок приведены в таблице 4.

Результаты измерения проницаемости серии вставок

№ вставки	$k_p, 10^{-15}, \text{м}^2$
1	5,08
2	3,98 (наименьшее)
3	14,0 (наибольшее)
4	6,01
5	13,1
6	5,86
7	8,91
8	5,47
9	5,70
10	9,66

В таблице 4 выделены наибольшее и наименьшее измеренные значения коэффициента проницаемости k_p . Получено десять экспериментальных значений, на основании которых была оценена проницаемость с доверительным интервалом 95% (предполагался нормальный закон распределения)

$$k_p = k_{p \text{ med}} \pm \Delta k_p = 7,78 \cdot 10^{-15} \pm 2,5 \cdot 10^{-15} [\text{м}^2]. \quad (13)$$

Таким образом, получены границы доверительного интервала проницаемости графита с вероятностью 95% $k_{p \text{ min}} = 5,27 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_{p \text{ max}} = 10,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

2.1. Обсуждения результатов измерения

Полученные значения проницаемости k_p близки к данным, указанным у В.Н. Константинеску [6] ($13,12 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ для пористого графитированного угля). Определен существенный разброс значений проницаемости k_p . Наименьшее измеренное значение составляет 28,4% от наибольшего. Статистическая обработка заметно снизила этот интервал. Минимальная граница доверительного интервала составила 51% от максимальной. Сложно сравнивать материалы пористых аэростатических опор по разбросу проницаемости, поскольку эти данные почти не встречается в печати. Обнаружено только два источника, описывающих разброс проницаемости. Запатентованная технология температурной обработки древесины березы [21] обеспечивает большой разброс проницаемости $k_p = (1,08 \dots 2,65) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Однако при этом не указаны методы измерения и статистической обработки. Среднее значение проницаемости при этом больше, чем у измеренного графита.

та на 3-4 порядка. У опор с такими ограничителями наддува аэростатический зазор должен быть намного больше для сохранения баланса между сопротивлением зазора и пористых вставок. При большем зазоре опора будет обладать меньшей жесткостью и демпфированием.

В упомянутой выше статье Panzera Т. Н. и соавторов [10] приведены сведения об испытаниях проницаемости цементных смесей после добавления в них частиц различного размера и формы. При этом продемонстрирована возможность получения проницаемости, необходимой для аэростатических опор. Для каждого вида частиц было испытано всего по два образца, что недостаточно для статистического исследования. При столь малой выборке с некоторыми добавками меньшее значение проницаемости составило около 60 % от максимального. Хотя необходимо признать, что технология получения цементных смесей для пористых аэростатических опор может быть доработана и представляет существенный интерес.

По результатам измерения проницаемости пористого графита можно утверждать, что он применим для создания аэростатических опор с малым зазором, высокой жесткостью и демпфированием, но обладает заметным разбросом проницаемости. Влияние разброса значений проницаемости на характеристики опоры исследуются в следующем разделе.

3. Сравнение характеристик опоры при различной проницаемости

Чтобы узнать, насколько сильно влияет неоднородность проницаемости ограничителей наддува на характеристики аэростатических опор, рассмотрены два крайних случая. В одном из них предположен минимальный коэффициент проницаемости, а в другом – максимальный. Для обоих вариантов определены статические силовые характеристики $F(h_0, 0)$, которые представлены на рисунке 13 в сравнении с силовой характеристикой, полученной при средней проницаемости (рис. 6). На рисунке 13 красным отмечены точки характеристик с усилием F^{opt} , которые соответствуют нейтральному состоянию опор при силовом замыкании. Зеленым отмечены точки, с одинаковым зазором h_0^{opt} , которые соответствуют нейтральному состоянию опор при кинематическом замыкании.

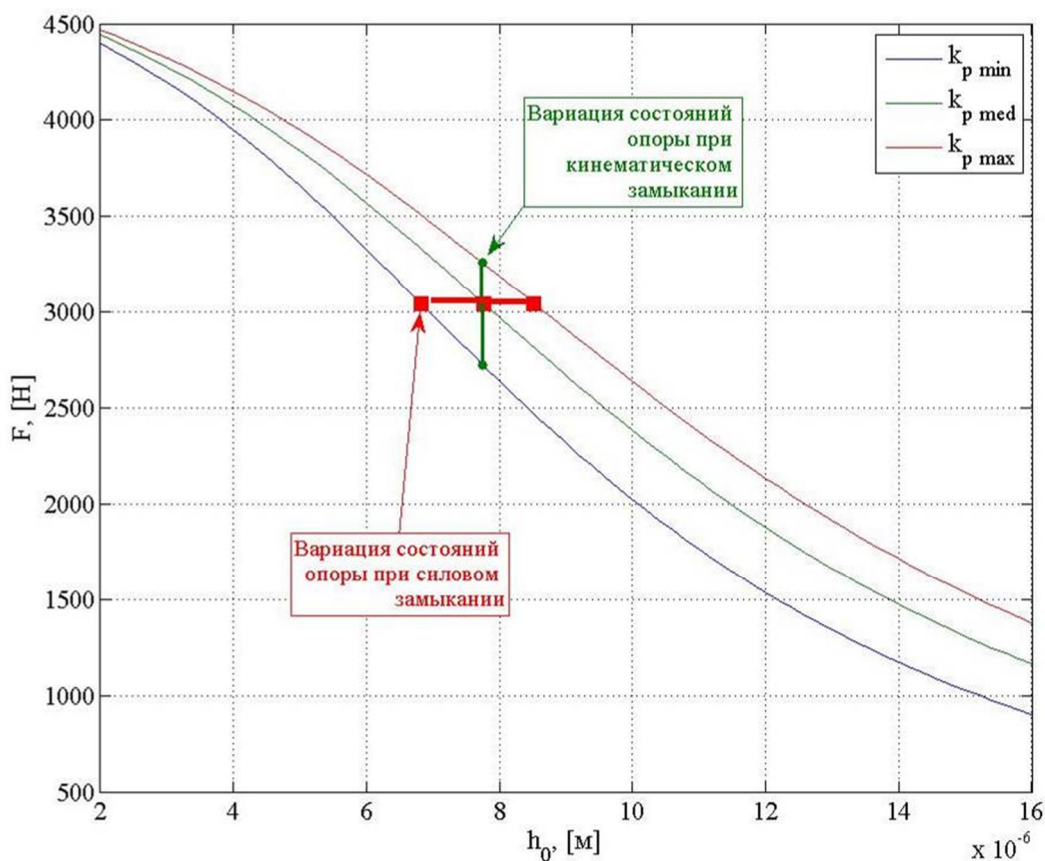


Рисунок 13 – Силовые и расходные характеристики для различных значений коэффициента проницаемости k_p

В каждой точке опоры будет обладать различной жесткостью, расходом воздуха и демпфированием. Разброс значения проницаемости может приводить к существенному различию характеристик опоры в нейтральном состоянии. Численные характеристики опор при различных способах замыкания приведены в двух следующих подразделах.

3.1. Разброс характеристик при силовом замыкании опоры

Если состояние опоры определяется внешней прижимающей силой $F_{вн}$ (рис. 1), то в зависимости от проницаемости ограничителей наддува k_p может быть получен различный аэростатический зазор в нейтральном положении, и все характеристики опоры. Сравнение рассчитанных характеристик опоры приводится в таблице 5. Разброс P_X каждой характеристики X вычислялся по следующей формуле

$$P_X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\min}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Таблица 5

Влияния разброса проницаемости k_p на характеристики опоры при силовом замыкании опоры

Характеристика	Размерность	Коэффициент проницаемости			Разброс, %
		$k_{p \min}$	$k_{p \text{ med}}$	$k_{p \max}$	
Зазор без дополнительной силы h_0	м	$6,82 \cdot 10^{-6}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$	$8,52 \cdot 10^{-6}$	22,1
Прижимающая сила $F^{\text{opt}}=F(h_0^{\text{opt}},0)$	Н	3045	3045	3045	0
Расход воздуха	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (л·мин ⁻¹)	$1,94 \cdot 10^{-4}$ (11,62)	$2,84 \cdot 10^{-4}$ (17,0)	$3,78 \cdot 10^{-4}$ (22,63)	64,5
Вертикальное направление					
Допустимая нагрузка $F(0,5 \cdot h_0^{\text{opt}},0)-F(h_0^{\text{opt}},0)$	Н	937	1055	1230	27,3
Жесткость $K(h_0^{\text{opt}},0)$	Н·м ⁻¹	$3,49 \cdot 10^8$	$3,063 \cdot 10^8$	$2,79 \cdot 10^8$	22,5
Демпфирование $D(h_0^{\text{opt}},0)$	Н·с·м ⁻¹	$1,82 \cdot 10^5$	$1,27 \cdot 10^5$	$0,979 \cdot 10^5$	62,0
Угловое направление					
Допустимая нагрузка M	Н·м	67,6	62,9	59,4	12,9
Жесткость K_φ	Н·м	$6,15 \cdot 10^6$	$5,41 \cdot 10^6$	$4,91 \cdot 10^6$	33,5
Демпфирование D_φ	Н·с·м	4360	2970	2230	66,8

3.2. Разброс характеристик при кинематическом замыкании опоры

Если опора зафиксирована на определенной величине зазора h_0 , например, за счет установки в распор между двумя направляющими (рис. 1), то в зависимости от проницаемости ограничителей наддува k_p меняется прижимающая сила в нейтральном положении, а также все характеристики опоры. Сравнение рассчитанных характеристик опоры приводится в таблице 6.

Влияния разброса проницаемости k_p на характеристики опоры при кинематическом замыкании опоры

Характеристика	Размерность	Коэффициент проницаемости			Разброс, %
		$k_{p \min}$	$k_{p \text{ med}}$	$k_{p \max}$	
Зазор без дополнительной силы h_0	м	$7,75 \cdot 10^{-6}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$	0
Прижимающая сила $F=F(h_0,0)$	Н	2720	3045	3259	17,9
Расход воздуха	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (л·мин ⁻¹)	$2,36 \cdot 10^{-4}$ (14,2)	$2,84 \cdot 10^{-4}$ (17,0)	$3,20 \cdot 10^{-4}$ (19,2)	30,0
Вертикальное направление					
Допустимая нагрузка $F(0,5 \cdot h_0^{\text{opt}},0)-F(h_0^{\text{opt}},0)$	Н	1260	1055	914	32,1
Жесткость $K(h_0^{\text{opt}},0)$	Н·м ⁻¹	$3,37 \cdot 10^8$	$3,063 \cdot 10^8$	$2,75 \cdot 10^8$	20,2
Демпфирование $D(h_0^{\text{opt}},0)$	Н·с·м ⁻¹	$1,46 \cdot 10^5$	$1,27 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^5$	29,1
Угловое направление					
Допустимая нагрузка M	Н·м	59,6	62,9	63,5	6,29
Жесткость K_ϕ	Н·м	$5,89 \cdot 10^6$	$5,41 \cdot 10^6$	$4,92 \cdot 10^6$	17,9
Демпфирование D_ϕ	Н·с·м	3340	2970	2710	20,9

3.3. Обсуждение результатов

1. Рассмотренные расчетные случаи позволяют сказать, что предпочтительнее кинематическое замыкание опоры, поскольку в этом случае меньше разброс всех характеристик, кроме допускаемой нагрузки в вертикальном направлении. Допускаемая нагрузка в вертикальном направлении имеет значительно меньший разброс при силовом замыкании.

2. Разброс жесткости в обоих случаях замыкания сопоставим. При силовом замыкании разброс жесткости составляет 22-33 %, при кинематическом разброс жесткости несколько ниже 17-20 %.

3. Величина зазора h_0 присутствует в уравнении распределения давления (2) в третьей степени и очень сильно влияет на характеристики опоры. При силовом замыкании вариация проницаемости приводит к увеличению зазора, и из-за этого сильно меняется демпфирование, допускаемая нагрузка, жесткость и расход воздуха.

4. При изготовлении опоры с силовым замыканием желательно иметь возможность изменять прижимающую силу. Регулировка прижимающей силы по величине зазора поз-

волит реализовать кинематическое замыкание при отсутствии «контр опоры». За счет этого можно уменьшить разброс характеристик. В этом плане предпочтительнее использование вакуумного прижима, чем систем с постоянными магнитами, поскольку давление вакуума регулировать намного проще.

5. Изготовление пористых аэроэстатических опор с меньшим разбросом характеристик возможен только при использовании более однородных проницаемых материалов, или при введении дополнительных технологических мер. Например, применение предварительной калибровки ограничителей наддува по проницаемости.

4. Заключение

1. Разработана модель для расчета основных характеристик плоских аэроэстатических опор с пористыми ограничителями наддува: линейной и угловой жесткости, допускаемой нагрузки, демпфирования и расхода воздуха.

2. Для графита, используемого при изготовлении аэроэстатических опор, экспериментально определено значение коэффициента проницаемости и его разброс $k_p = (7,78 \pm 2,5) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Границы доверительного интервала проницаемости определены для вероятности 95 %.

3. С учетом экспериментальных данных определен разброс характеристик аэроэстатической опоры при ее кинематическом и силовом замыкании.

4. Сделаны рекомендации по уменьшению разброса характеристик аэроэстатических опор.

5. Как отмечалось выше, аэроэстатические шпиндельные узлы имеют взаимно уравновешенные аэроэстатические опоры и в них реализуется кинематическое замыкание. Разброс характеристик шпиндельных узлов, вызванный разбросом проницаемости при схожем давлении подачи и зазоре должен ориентировочно соответствовать таблице 6.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» номер контракта 14.513.11.0036.

Список литературы

1. Пошехонов Р.А. Примеры расчета сферической аэроэластической опоры с учетом смещений и скорости шпинделя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. научно-техническое изд. М. 2012. Режим доступа: <http://vestnik.bmstu.ru/catalog/eng/teormech/272.html>. (дата обращения 18.04.2013).
2. Григорьев С.Н., Мастеренко Д.А., Ковальский М.Г., Емельянов П.Н. Опыт МГТУ «СТАНКИН» в разработке координатно-измерительных машин субмикронной точности. Контроль. Диагностика. 2012. №12. С.25-30.
3. Прецизионные газовые подшипники/ И.Е.Сипенков, А.Ю.Филиппов, Ю.Я.Болдырев, Б.С.Григорьев, Н.Д.Заблоцкий, Г.А.Лучин, Т.В.Панич / Под ред. А.Ю.Филиппова и И.Е.Сипенкова. СПб. ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2007. - 504 с.
4. Опоры с газовой смазкой в турбомашинах ограниченной мощности. Пинегин С.В., Поспелов Г.А., Пешти Ю.В. М., Наука, 1977, 149 с.
5. Пошехонов Р.А. Расчет сферических аэроэластических опор при заданном смещении и скорости шпинделя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. С. 35-62. DOI: 10.7463/1012.0467949.
6. Константиnescу В. Н. Газовая смазка. М.: Издательство Машиностроение, 1968. 709 с.
7. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов/ А.В. Космынин [и др.] М.: Издательство Академия Естествознания, 2005. 218 с.
8. Process for manufacturing a hydrostatic bearing of porous material: USA patent № 6342270 B1, 2002, P. 6.
9. Космынин А.В., Шаломов В.И. Пористые ограничители расхода газостатических подшипников // Современные проблемы науки и образования. Электрон. журн. 2006. № 3. С. 70-73. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/11-338> (дата обращения 18.04.2013).
10. Panzera T. H., Christoforo A. L., Campos Rubio J.C., Bowen C.R., Ribeiro Borges P.H., Silva L. J. Evaluation of Compacted Cementitious Composites for Porous Bearings // International Journal of Applied Ceramic Technology. 2012. DOI: 10.1111/j.1744-7402.
11. Uhlmann E., Neumann C. Air bearings based on porous ceramic composites // Amsterdam : Elsevier, 2006 г., Intelligent Production Machines and Systems. 2nd IPROMS Virtual International Conference, P. 211-216.
12. Drew D. Analysis of Pressurized Porous Air Bearings Problem / 20th Annual Workshop on Mathematical Problems in Industry University of Delaware. 2004. P.1-16.
13. Частично пористые газостатические опоры шпиндельных узлов. Теория и эксперимент: монография / А.В. Космынин, С.В.Виноградов, В.С. Виноградов, В.С. Щетинин, А.В. Смирнов ; под ред. А.В. Космынина. М. : Академия Естествознания, 2011. Режим доступа: . <http://www.rae.ru/monographs/119>.
14. Искусственный графит / В.С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков, Н.Н. Шипков; под ред. К.И. Сыскова. М.: Металлургия, 1986. 272 с.
15. ООО "Ресурс точности". Режим доступа: www.ultraprecision.ru/(Дата посещения 21.02.2013).
16. Индукаев К.В., Осипов П.А. Бесконтактное аэромагнитное линейное направляющее устройство (варианты): патент РФ № 2451590. 2012.
17. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А. Шейнберг, В.П. Жедь, М.В. Шишеев, В.С. Баласаньян, Н.Д. Заболоцкий ; под ред. С.А. Шейнберга. 2 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 335 с.
18. Дроздович В.Н. Газодинамические подшипники / В.Н. Дроздович. Л.: Машиностроение, 1976. 208 с.

19. Пошехонов Р.А., Гуськов А.М. Сегментная модель для расчета сферических аэростатических опор // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №.12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/353914.html> (дата обращения 18.04.2012).
20. ГОСТ 26283-93. Материалы спеченные проницаемые Определение проницаемости жидкостей. Введен 1991-01-01. М.: "Издательство стандартов", 1996. 20 с.
21. Лямкина Е.М., Космынин А.В., Виноградов В.С. Пористый вкладыш газостатического подшипника и способ его обработки : пат. 2186268 РФ. 2002. 4 с.