

Влияние неоднородности проницаемости ограничителей наддува на характеристики плоских аэростатических опор

08, август 2013

DOI: 10.7463/0813.0611443

Пошехонов Р. А., Гуськов А. М.

УДК 004.942; 621.822.174

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

roma-rio@list.rugoukov_am@mail.ru**Введение**

На предприятии ОАО "ВНИИИСТРУМЕНТ" совместно с МГТУ им Н.Э. Баумана и ООО «Ресурс Точности» разрабатываются и изготавливаются аэростатические шпиндельные узлы, плоские подпятники, каретки и поворотные столы. Подобными компонентами на модульном принципе оснащаются 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]. За счет усредняющего эффекта и отсутствия трения покоя аэростатические опоры позволяют с высокой точностью воспроизводить движение. А их жесткость и демпфирующая способность может меняться в 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 используются 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 применяются 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 используется 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. При его точении или фрезеровании не происходит смятия поверхностного слоя, закупоривающего поры, поскольку графит является хрупким материалом. Однако он, как и все перечисленные выше материалы обладает существенной неоднородностью проницаемости. Многие исследователи (например, [13, 10]) соглашаются в том, что именно неоднородность проницаемости осложняет внедрение пористых аэростатических опор.

Проницаемость 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 распределить равномерно внутри формируемой пористой заготовки. Также проницаемость зависит от свойств соединенных частиц (размеры, геометрия, состав) и равномерности распределения их 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, и о его влиянии на характеристики опор. Данная статья посвящена восполнению указанного пробела. Для этого решаются две задачи. Во-первых, с помощью эксперимента определяется неоднородность проницаемости спеченного графита. Во-вторых, на основании расчетов определяется разброс характеристик аэростатической опоры, обусловленный неоднородностью проницаемости.

Объект исследования

Расчеты проводятся на примере плоских аэростатических опор. Подобные опоры используются 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».

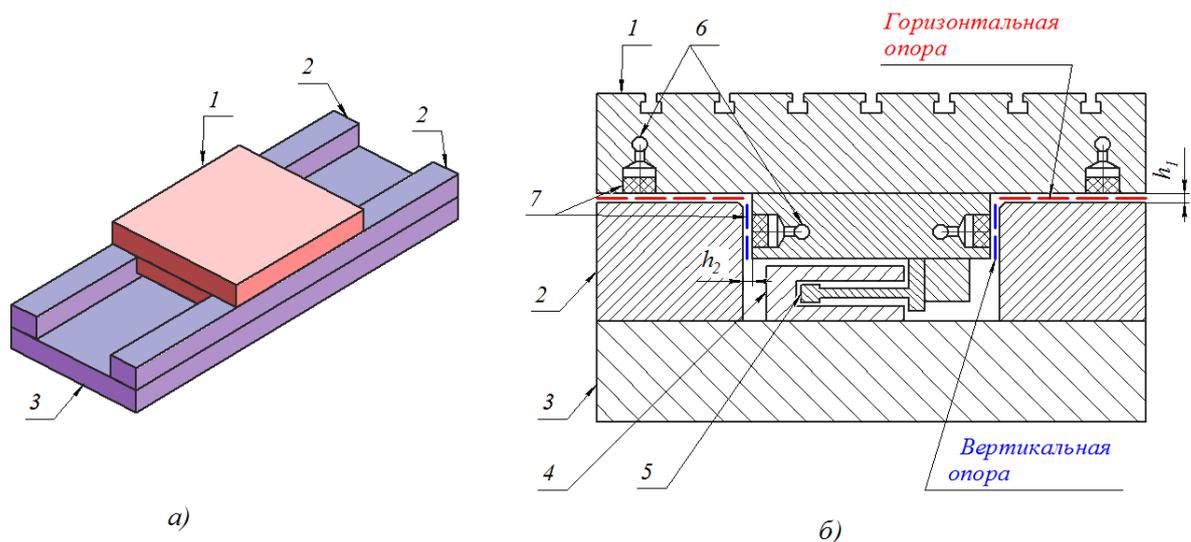


Рисунок 1 – Аэростатическая каретка линейных перемещений: а – общий вид; б – внутреннее устройство

Аэростатическая каретка 1 движется по направляющим 2, жестко присоединенным к основанию 3. Для повышения точности движения перемещение каретки осуществляется бесконтактным линейным электроприводом, состоящим из статора 4 и якоря 5. Внутри каретки по каналам 6 подается сжатый воздух под постоянным давлением подачи p_s . Воздух проходит через пористые вставки 7 и зазор в аэростатической опоре. Воздух, попадая в узкий зазор между кареткой 1 и направляющими 2, находится под давлением, за счет чего создается опорная реакция газового слоя. Часть давления воздуха тратится при прохождении через пористые вставки, за чего создаются обратные связи, позволяющие увеличивать вертикальные или горизонтальные опорные реакции при сокращении толщин газовых слоев h_1 или h_2 , соответственно. При выбранной конструкции опор (рисунок 1 - б) противоположные горизонтальные опорные реакции F_x уравнивают друг друга (рисунок 2). При этом контроль опоры осуществляется геометрически за счет выставления суммарного зазора $2 \cdot h_2$ между направляющими 2 и кареткой (рисунок 1). Такое состояние опоры будем называть «кинематическим замыканием».

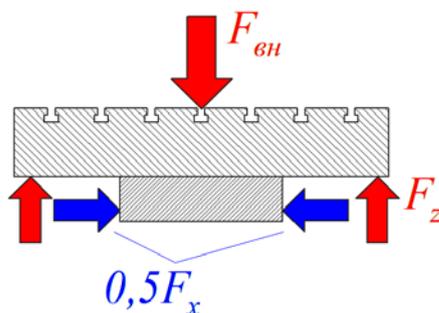


Рисунок 2 – Аэростатические опорные реакции

В подобном состоянии находятся плоские упорные подшипники 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.

Вертикальные опорные реакции F_z (рисунок 2) должны уравниваться дополнительной внешней силой $F_{вн}$, поскольку вес самой каретки недостаточен. Для обеспечения высокой жесткости опоры требуется большая опорная поверхность и сильно сжатый аэростатический зазор. 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 нагружения [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 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 величиной минус 0,8... минус 0,9 атм. При этом для создания равновесия сил вакуумного притяжения и аэростатического отталкивания площадь вакуумных полостей должна занимать 60-75 % от всей площади взаимодействия. Окончательный выбор способа нагружения проводится с учетом технологических возможностей и технических требований.

Для дальнейшего изложения принципиально важно, что удержание аэростатической опоры в положении с наибольшей жесткостью может осуществляться *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 ограничителей наддува. Введены следующие обозначения: L – длина опоры; B – ширина опоры; R – радиус пористой вставки; L_l – расстояние между соседними вставками; N –

количество пористых вставок. Пористые вставки предполагаются расположенными в ряд. Свяжем с опорой систему координат x, y, z , расположив ее начало в центре опоры O (рисунки 3 и 4).

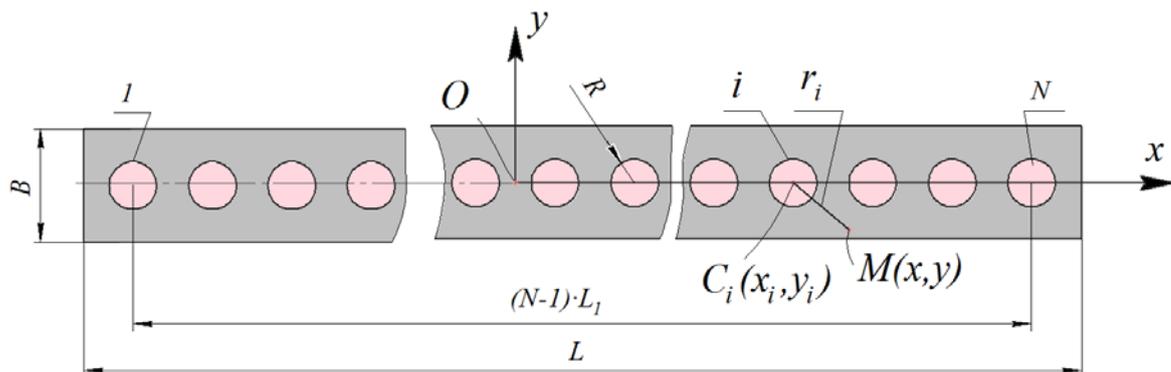


Рисунок 3 – Геометрия опорной поверхности

1.2. Кинематика и силовые факторы

Положение аэроэстатической опоры определяется толщиной зазора h_0 в центральной точке O и углом перекося каретки φ (поворот вокруг оси y). Опора гораздо менее чувствительна к повороту вокруг оси x , поэтому он не рассматривается. 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. Для заданного состояния воздушного слоя рассчитывается распределение давления $p(x, y)$ на опорную поверхность, его равнодействующая сила F и момент M , приведенные к центру опоры O .

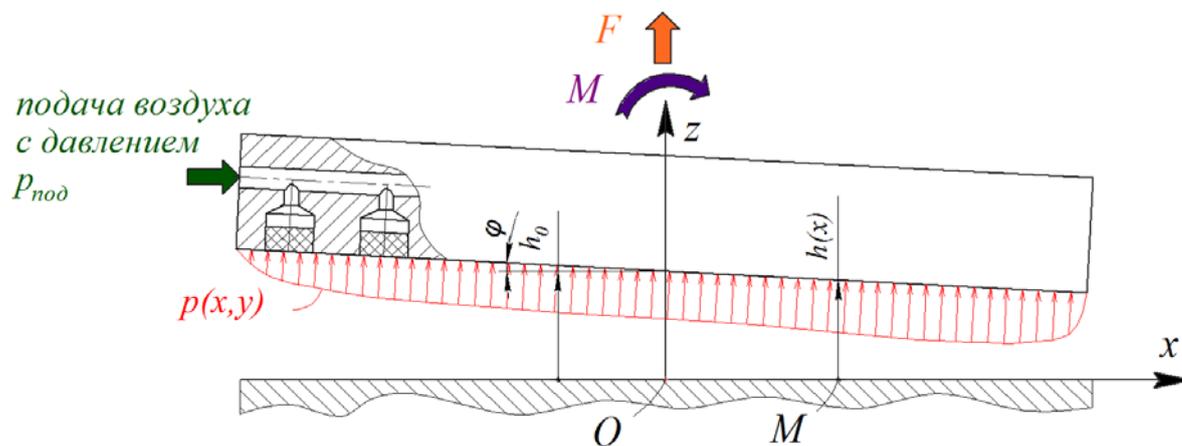


Рисунок 4 – Рассматриваемая аэроэстатическая опора

1.3. Модель аэростатической опоры

1.1.1. Физическая модель

Как и во многих других исследованиях аэростатических опор [7, 17-19], движение воздуха предполагается изотермическим, ламинарным, дозвуковым, стационарным и сплошным движением линейно вязкой среды. Опорные поверхности каретки и направляющей считаются идеально ровными и жесткими. Зависимостью давления от времени и координаты z , перпендикулярной к поверхности опоры, пренебрегаем.

1.1.2. Математическая модель

При принятых допущениях распределение давления в опорном аэростатическом слое описывается известным в теории газовой смазки уравнением Рейнольдса [6]

$$\nabla \left[h^3 \nabla (p^2) \right] = -K_1 (p_{\text{под}}^2 - p^2) + 24\mu p V_n, \quad (2)$$

где h – аэростатический зазор; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха; p – абсолютное давление воздуха; K_1 – коэффициент, учитывающий наличие наддува; $p_{\text{под}}$ – давление подачи; V_n – нормальная скорость сближения опорных поверхностей.

Независимыми переменными в уравнении (2) являются декартовы координаты x, y .

Коэффициент K_1 , учитывающий наличие наддува, определяется через толщину вставки δ и коэффициент проницаемости материала вставки k_p следующим образом

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

это переменный коэффициент проницаемости материала стенки корпуса. Вычисление $k_{p0}(x, y)$ проводилось аналогично тому, как это проводилось в статье [19], но в декартовых координатах. Для произвольной точки $M(x, y)$ вычислялись расстояния r_i до центра каждой вставки $C_i(x, y)$ ($i=1 \dots N$, рисунок 3). Если минимальное из расстояний оказывалось 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 определялась толщина аэростатического зазора

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

и нормальная скорость сближения опорных поверхностей

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

1.1.3. Расчет распределения давления $p(x,y)$

Уравнение (2) является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных. Для его решения на распределение давления p накладывается граничное условие Дирихле на всем внешнем контуре $p=p_{atm}$. Решение уравнения (2) в такой постановке проводилось в программном комплексе MATLAB с приложением PDETOOL методом конечных элементов. Использовались треугольные трехузловые конечные элементы. Решение в нелинейной постановке проводилось методом Ньютона с пересчетом "матрицы жесткости" на каждой итерации. Использовалось начальное приближение $p(x,y)=p_{atm}$. Сходимость решения при сгущении сетки проверена. Решение проводилось относительно функции давления $u=p^2$. Уравнение (2) становится линейным при нулевых обобщенных скоростях $V=0$, $\omega=0$ относительно функции давления u . В этом случае решение сходится при любых значениях обобщенных перемещений h_0 и φ , не вызывающих отрицательного зазора. При ненулевых обобщенных скоростях уравнение (2) является нелинейным и может не сойтись при больших значениях скоростей. При этом прослеживается аналогия с областью значений в фазовом пространстве (состоящем из нормального смещения и скорости) отдельного сегмента сферической аэростатической опоры, подробно рассмотренной в другой работе авторов [19]. Также, как и для расчетного сегмента сферической аэростатической опоры, при малом зазоре $h(x,y)$ распределение давления становится очень чувствительным к обобщенным скоростям. При малом зазоре решение можно получить только в очень узкой области обобщенных скоростей $V_a < V < V_b$ и $\omega_a < \omega < \omega_b$. Аналогия с сегментом сферической опоры прослеживается и в том, что при быстром расширении (или сжатии) тонкого слоя, например $V \gg V_b$ (или $V \ll V_a$), требуется корректировка физической и математической модели из-за проявления нестационарных процессов (или эффектов скольжения). Обсуждение быстрого сжатия сферического аэростатического слоя также приводилось в работе [1]. При этом расчеты проводились по похожей модели, но решение получалось в программном комплексе Comsol Multiphysics, где больше выбор нелинейных решателей для задач методом конечных элементов.

Несмотря на сложность получения решений при больших скоростях, представленные в данной статье модели представляют существенный практический интерес. Это объясняется тем, что при уменьшении аэростатического зазора уменьшается

и скорость вибрационных колебаний, а также резко растет демпфирование аэростатического слоя. Из-за этого сосояние опоры с очень малым зазором и с большой скоростью не реализуется на практике.

1.1.4. Вычисление силовых факторов и расхода

В результате расчета определялась эпюра распределения давления $p(x,y)$, равнодействующая сила F и момент M относительно оси y (Рисунок 2, Рисунок 3), а также потребляемый расход воздуха Q (приведенный к нормальным условиям)

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

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. раздел 2).

Таблица 1 – Параметры аэростатической опоры

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Длина опоры	L	м	0,5
Ширина опоры	B	м	0,024
Расстояние между вставками	L_1	м	0,02
Количество вставок	N	шт.	22
Проницаемость вставок	k_p	м	7,78e-15
Толщина вставок	Δ	м	6e-3
Радиус вставки	R	м	9e-3
Атмосферное давление (абс.)	p_{atm}	Па	1,013e5
Давление подачи (абс.)	p_s	Па	5,916e5
Коэффициент динамической вязкости воздуха	μ	Па·с	1,81e-5

Состояние опоры при расчете определялось следующими обобщенными координатами: $h_0=10$ мкм, $\varphi=1,2e-5$ рад. Обобщенные скорости взяты нулевыми: $V=0$; $\omega=0$.

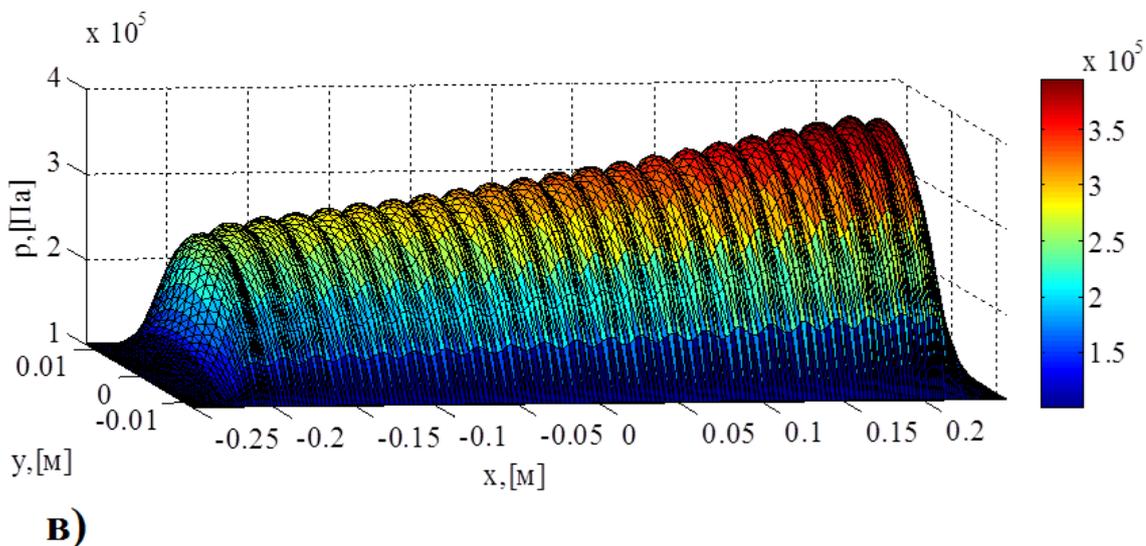
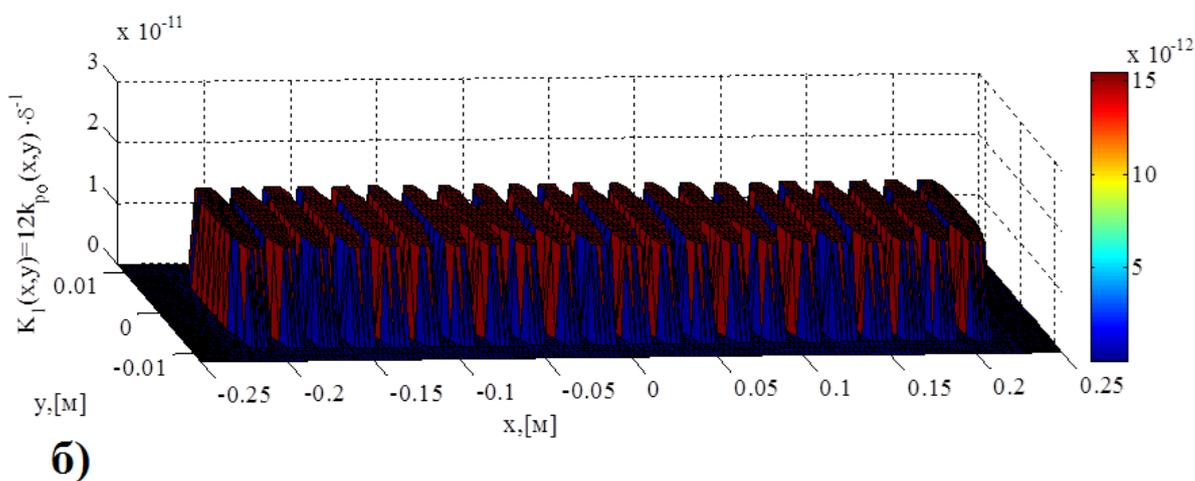
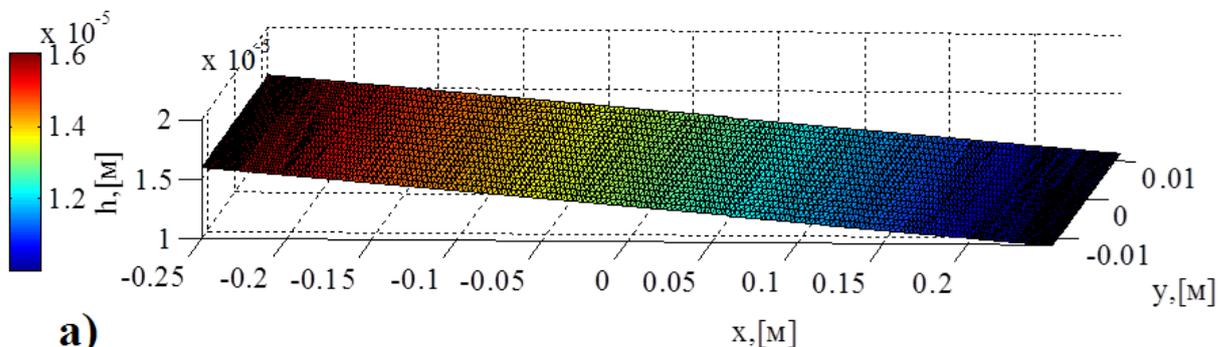


Рисунок 5 – Пример расчета одного состояния аэростатической опоры: а – толщина смазочного слоя $h(x,y)$, [м]; б – коэффициент $K_I(x,y)$, [м], учитывающий наличие наддува; в – распределение давления $p(x,y)$, [Па]

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)	5,12e-4 (30,7)
Максимальное абсолютное давление p_{\max}	Па	3,95e+5

Анализ силовых характеристик без учета разброса проницаемости

Опорные реакции F и M , рассчитанные по формулам (2) ... (7) зависят от обобщенных координат h_0 , φ и обобщенных скоростей V , ω . Анализировать зависимости опорных реакций от четырех кинематических факторов довольно сложно. Поэтому рассмотрим зависимость опорной силы от перемещения и скорости $F(h_0, V)$, а также зависимость реактивного момента от угла перекоса 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.

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

Для получения данной характеристики угол перекоса опоры φ и угловая скорость ω предполагались нулевыми, а зазор h_0 и скорость V варьировались. Как отмечалось выше, решение нелинейного уравнения (2) можно получить только для небольших скоростей. Причем при увеличении зазора h_0 увеличивается диапазон скоростей, в котором можно получить решение. На рисунке 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, а также ее статическую жесткость. Параметры опоры соответствуют таблице 1.

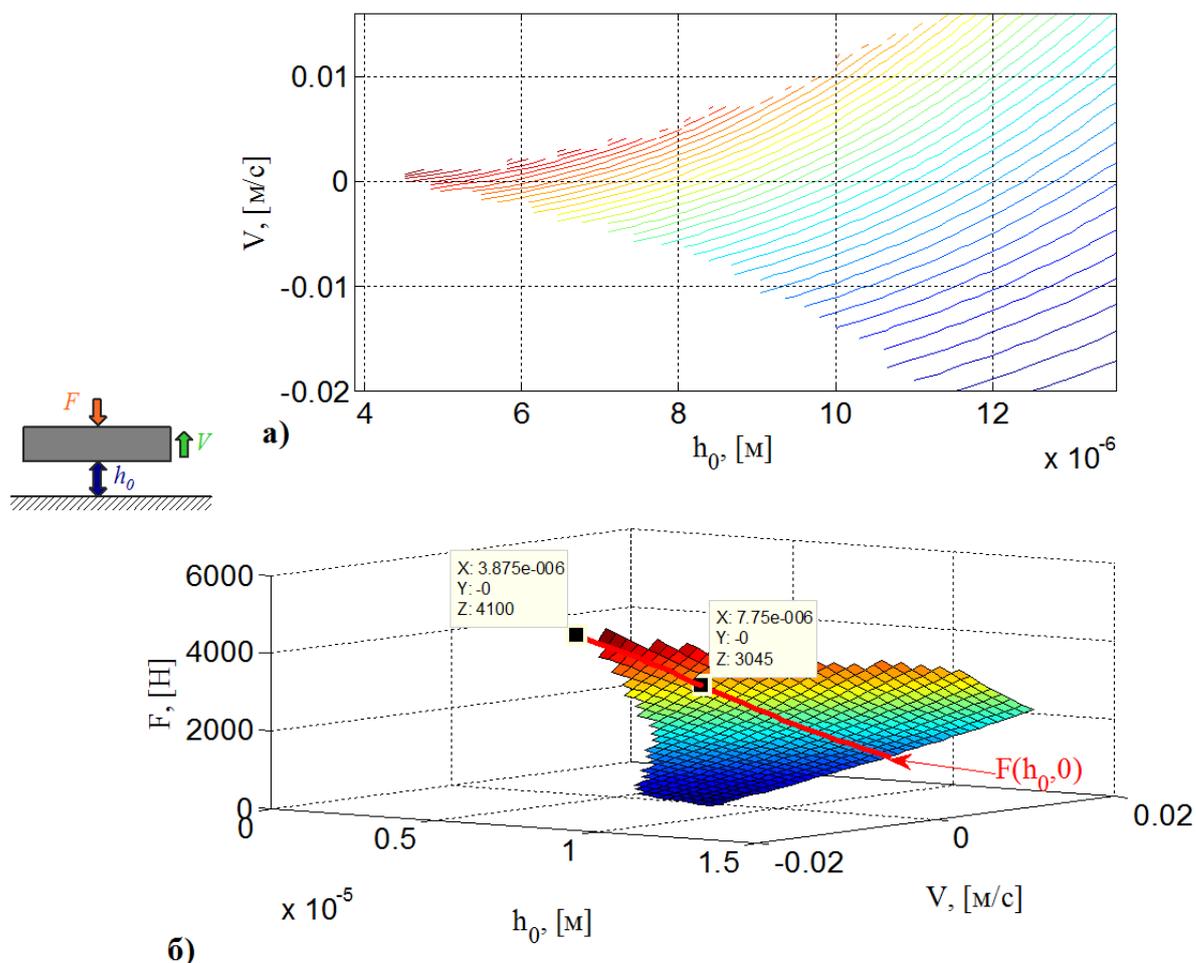


Рисунок 6 – Зависимость опорной силы F от зазора h_0 и скорости V : а – линии уровней постоянной силы в области полученных решений; б – 3D график

Зависимость $F(h_0, V)$ является нелинейной, что говорит о переменной жесткости и переменном демпфировании опоры. При колебаниях, малых по сравнению с зазором, поведение опоры характеризуется касательной жесткостью

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

и аналогичном образом введенным «касательным демпфированием» опоры

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

В зависимостях (8) и (9) используется знак «-», потому что F – опорная реакция, а не внешняя сила. Для вычисления зависимостей (8) и (9) использовались конечно-разностные выражения

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

На рисунке 7 представлена касательная жесткость $K(h_0, V)$, которая зависит от величины зазора h_0 , и от величины скорости V . Также на рисунке 7 отмечена статическая жесткостная характеристика $K(h_0, 0)$, описывающая поведение опоры при медленно меняющейся нагрузке.

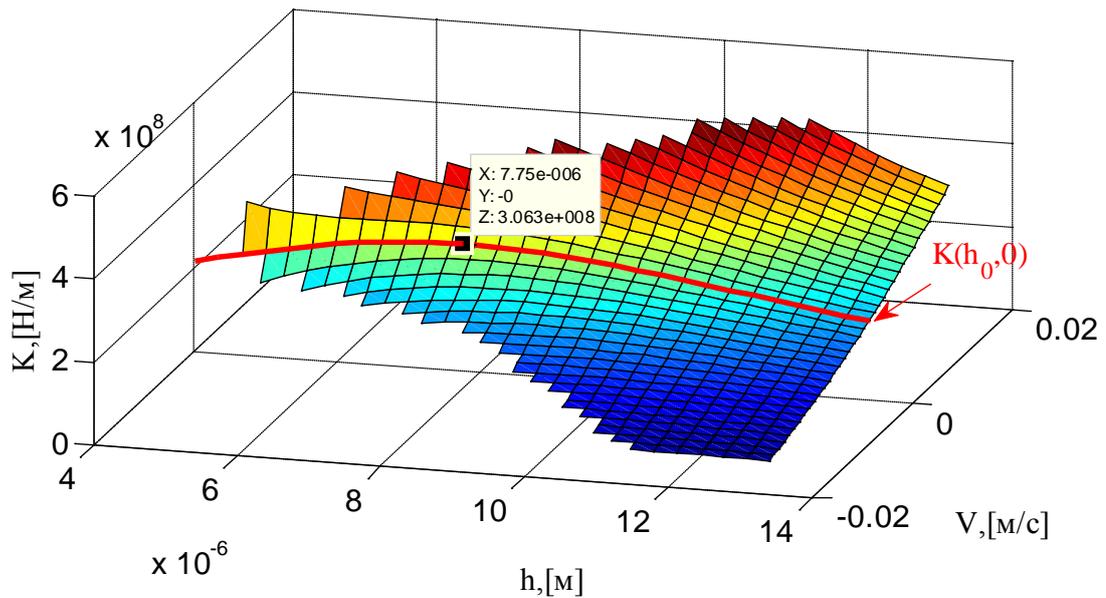


Рисунок 7 – Зависимость жесткости K от зазора h_0 и скорости V

Именно статическая жесткостная характеристика представляет основной интерес в большинстве приложений, поскольку динамическая характеристика (которая будет рассмотрена ниже) имеет монотонное поведение: чем меньше зазор, тем больше демпфирование тонкого аэростатического слоя. А жесткостная характеристика имеет характерный максимум при определенной величине зазора. Часто при проектировании аэростатических опор стремятся сместить этот максимум в область наименьших зазоров, обеспечиваемых технологией изготовления опор, изменяя размеры и параметры опоры. При этом обеспечивается как наибольшая жесткость, так и наибольшее демпфирование, реализуемое при имеющейся технологии изготовления опор.

Для обеспечения максимума статической жесткости $K(h_0, 0)$ необходимо выдержать зазор $h_0^{opt} = 7,75$ мкм или приложить внешнюю силу $F^{opt} = 3045$ Н в зависимости от способа замыкания опоры (кинематический или силовой). За счет этого можно достигнуть жесткости $K(h_0^{opt}, 0) = 3,063 \times 10^8$ Н·м⁻¹. Несущую способность в вертикальном направлении будем определять как дополнительную силу, которую надо приложить к опоре для

сокращения аэростатического зазора вдвое. По статической характеристике (рисунок 6 б) можно утверждать, что для удержания опоры в состоянии $h=3,875$ мкм необходимо приложить дополнительную силу $F(3,875 \text{ мкм}, 0) - F^{opt} = 4100 - 3045 = 1055$ [Н].

На рисунке 8 представлено «касательное демпфирование» $D(h_0, V)$, которое зависит от величины зазора h_0 и от величины скорости V . На рисунке 8 отмечено демпфирование при нулевой скорости $D(h_0, 0)$, описывающее поведение опоры при медленно меняющейся нагрузке.

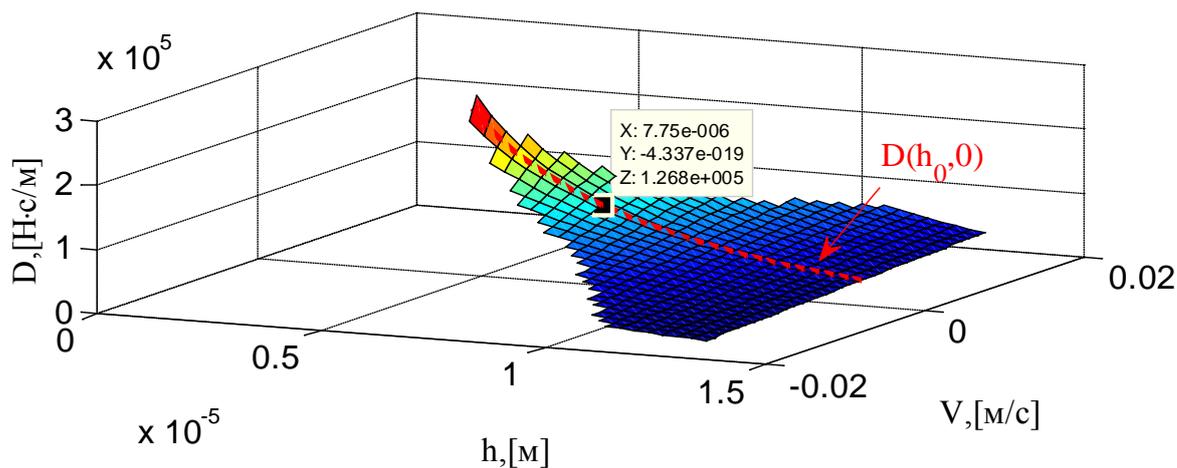


Рисунок 8 Зависимость демпфирования D от зазора h_0 и скорости V

При колебаниях с малой амплитудой и скоростью относительно положения $h_0=(7,5...8)$ мкм и $V=0$ демпфирование можно считать постоянным и равным $D(h_0^{opt}, 0) = 1,27e5 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$.

1.1.6. 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 зазоре $h_0=7,75$ мкм и при нулевом значении скорости $V=0$ (рисунок 9).

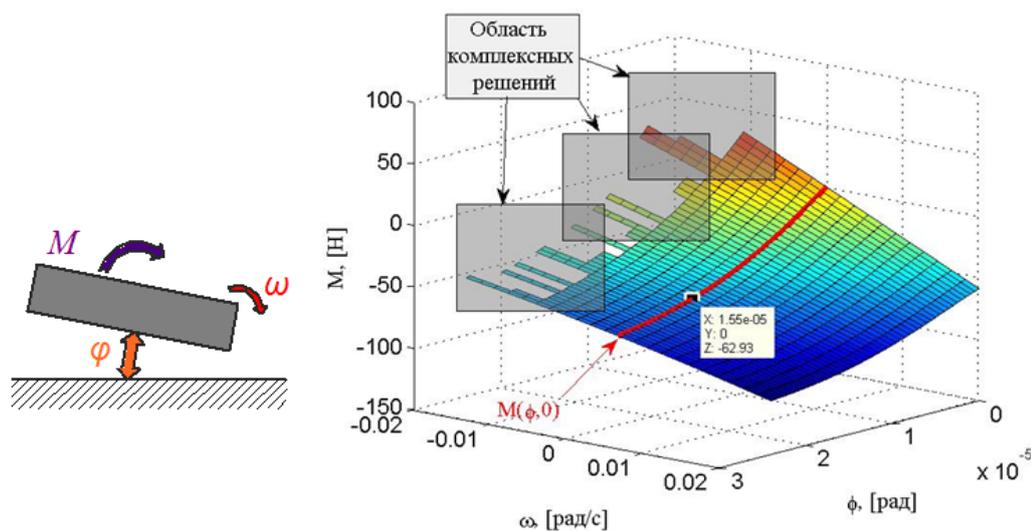


Рисунок 9 – Зависимость опорного момента M от угла поворота φ и угловой скорости ω

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 было 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 рисунках 9...11 отброшены расчетные точки, для которых была получена заметная комплексная составляющая давления $\max(\text{Im}(p(x,y))) > 1e-6$ Па. На рисунке 9 отмечена статическая характеристика $M(\varphi, 0)$. По статической характеристике можно определить угловую несущую способность опоры как момент, вызывающий сокращение минимального зазора $h(x,y)$ до $0,5 \cdot h_0^{opt}$. С учетом формулы (5) это происходит при угле поворота $\varphi_{min} = h_0^{opt} \cdot L = 1,55e-5$ рад. Предельный момент, определенный таким образом, составил $M(\varphi_{min}, 0) = -62,9$ Н·м.

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

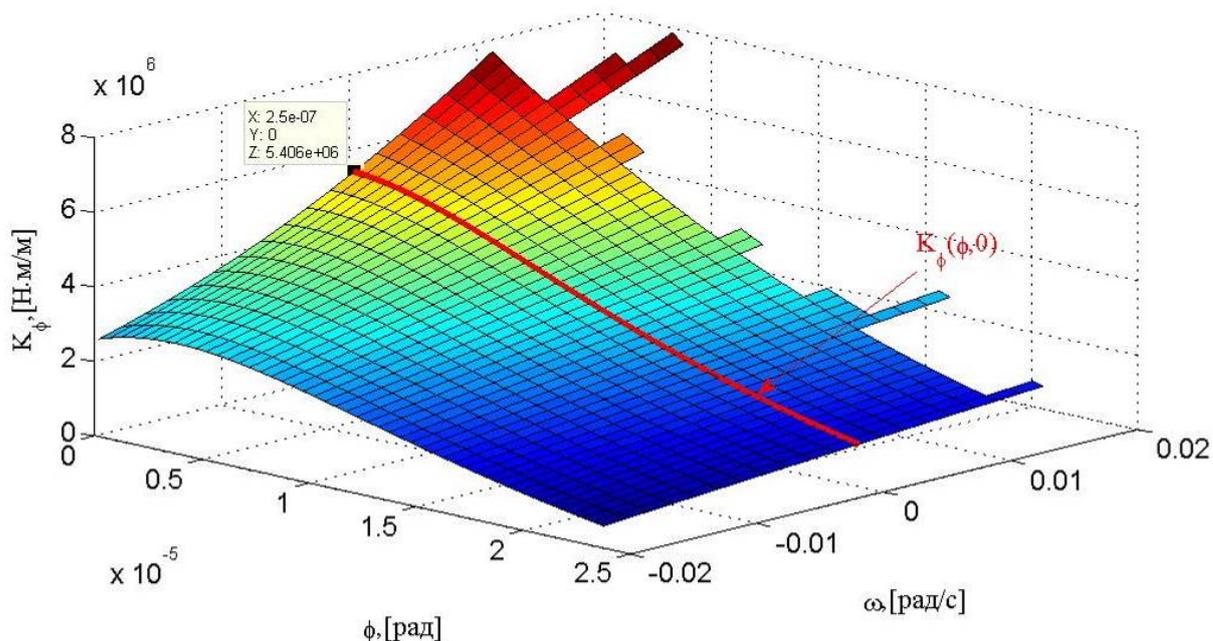


Рисунок 10 – Зависимость угловой жесткости K_ϕ от угла поворота ϕ и угловой скорости ω

Приведем значение касательной жесткости вблизи положения равновесия $K_\phi(0,0)=5,41e6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{рад}^{-1}$. При изменении угла ϕ касательная жесткость в угловом направлении существенно падает.

На рисунке 11 представлено «касательное демпфирование» в угловом направлении $D_\phi(\phi,\omega)$, которое также меняется от величины углового смещения ϕ и угловой скорости ω . Отмеченная линия на рисунке 11 соответствует демпфированию при нулевой угловой скорости $D_\phi(\phi,0)$, описывающему поведение опоры при медленно меняющейся нагрузке. В отличие от поступательного смещения (Рисунок 8) увеличение угла поворота существенно снижает демпфирование опоры. В положении покоя, при отсутствии угла поворота ϕ и угловой скорости ω демпфирование опоры составляет $D_\phi(0,0)=2970 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$.

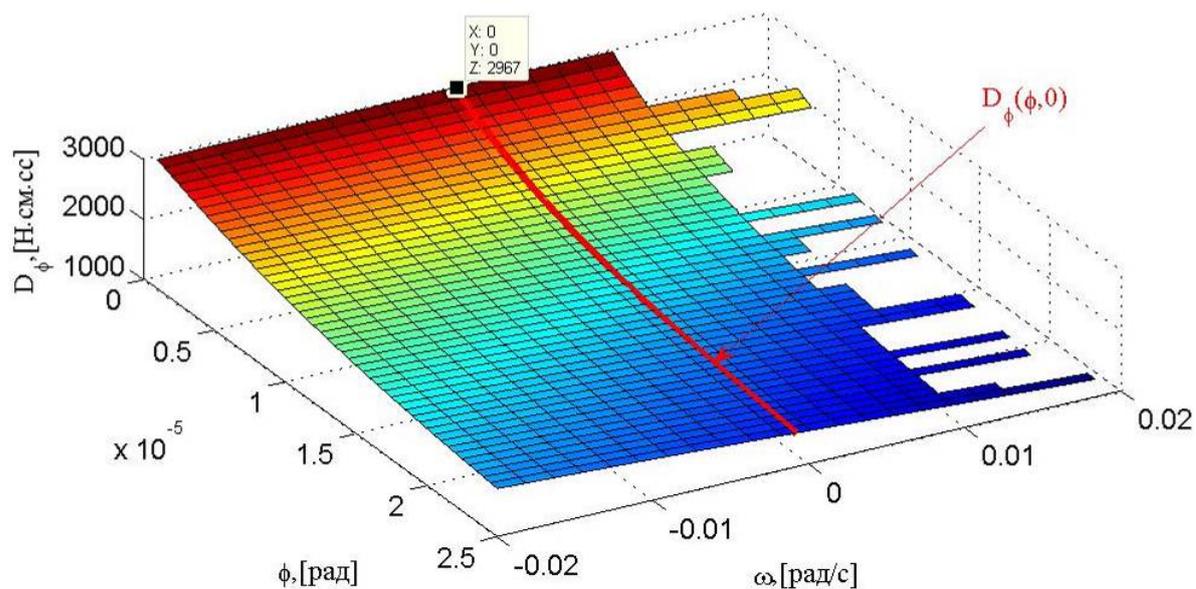


Рисунок 11 – Зависимость углового демпфирования D_ϕ от угла поворота ϕ и угловой скорости ω

1.1.7. 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 не являются постоянными и приведенные значения описывают малые и медленные колебания относительно положения равновесия с максимальной жесткостью.

Таблица 3 – Результаты расчета плоской аэростатической опоры

Характеристика	Размерность	Значение
Требуемый зазор h_0^{opt}	мкм	7,75
Постоянная прижимающая сила $F^{opt}=F(h_0^{opt},0)$	Н	3045
Расход воздуха	$м^3 \cdot с^{-1}$ (л·мин ⁻¹)	2,84e-4 (17,0)
Вертикальное направление Несущая способность $F(0,5 \cdot h_0^{opt}, 0) - F(h_0^{opt}, 0)$	Н	1055
Жесткость $K(h_0^{opt}, 0)$	Н·м ⁻¹	3,063e8
Демпфирование $D(h_0^{opt}, 0)$	Н·с·м ⁻¹	1,27e5
Угловое направление Несущая способность M	Н·м	62,9
Жесткость K_ϕ	Н·м	5,41e6
Демпфирование D_ϕ	Н·с·м	2970

Экспериментальное исследование разброса проницаемости пористого графита

Для изготовления аэростатических опор был специально изготовлен низкопористый 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 отличается от способов крепления, применяемых в аэростатических опорах при изготовлении ООО «Ресурс точности», что усложняет интерпретацию полученных по ней результатов.

При эксперименте была использована упрощенная установка, схема которой представлена на рисунке 12. Измерение проводилось 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 измерялся 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 $\Delta p = \Delta h \rho_w g \approx 98$ Па.

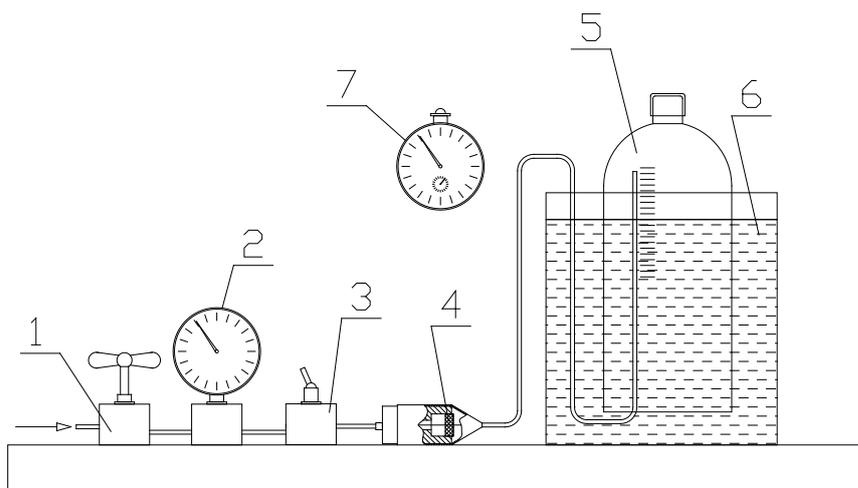


Рисунок 12 – Принципиальная схема установки для определения проницаемости

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 выражается через давление подачи $p_{под}$ и с учетом сжимаемости воздуха и закона Дарси, описывающего движение вязкой среды через пористый материал, [6]

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

где δ_0 и D_0 - толщина и диаметр пористой вставки; $p_{atm} \approx 101325$ Па - давление на выходе из пористой вставки. Предполагается изотермическое, ламинарное, сплошное движение 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 $p_{nod} \approx 392400$ Па (4 атм). Результаты измерения расхода приведены в таблице 4.

Таблица 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% $k_{p \text{ min}} = 5,27 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_{p \text{ max}} = 10,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

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 таких данных почти не встречается. 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 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] приводятся 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 проницаемости на характеристики опоры исследуются в следующем разделе.

Сравнение характеристик опоры при различной проницаемости

Чтобы узнать, насколько сильно влияет неоднородность проницаемости ограничителей наддува на характеристики аэростатических опор, рассмотрим два крайних

случая. В одном из них предположим минимальный коэффициент проницаемости, а в другом – максимальный. Для обоих вариантов определены статические силовые характеристики $F(h_0, 0)$, которые на рисунке 13 сравниваются с силовой характеристикой, полученной при средней проницаемости (Рисунок 6). На рисунке 13 красным отмечены точки характеристик с усилием F^{opt} , в которых опора будет находиться в нейтральном состоянии при силовом замыкании. Зеленым отмечены точки, с одинаковым зазором h_0^{opt} , в которых опора будет находиться при кинематическом замыкании.

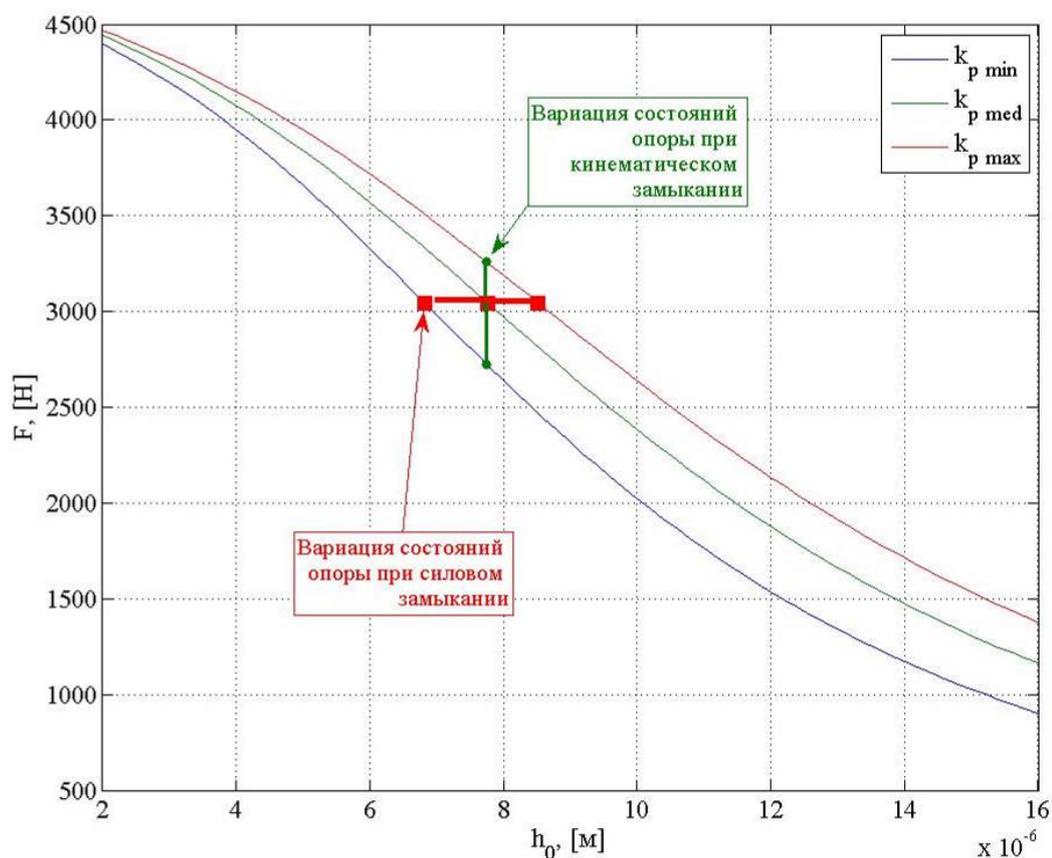


Рисунок 13 – Силовые и расходные характеристики для различных значений проницаемости k_p

В каждой точке опора будет обладать различной жесткостью, расходом воздуха и демпфированием. Разброс значения проницаемости может приводить к существенному различию характеристик опоры в нейтральном состоянии, и негативно сказываться на качестве аэростатических опор. Численные характеристики опор при различных способах замыкания сравниваются в двух следующих разделах.

Разброс характеристик при силовом замыкании опоры

Если состояние опоры определяется внешней прижимающей силой $F_{вн}$ (Рисунок 1), то в зависимости от проницаемости ограничителей наддува k_p меняется аэростатический зазор в нейтральном положении, а также 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	мкм	6,82	7,75	8,52	22,1
Прижимающая сила $F^{opt} = F(h_0^{opt}, 0)$	Н	3045	3045	3045	0
Расход воздуха	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (л·мин ⁻¹)	1,94e-4 (11,62)	2,84e-4 (17,0)	3,78e-4 (22,63)	64,5
Вертикальное направление Несущая способность $F(0,5 \cdot h_0^{opt}, 0) - F(h_0^{opt}, 0)$	Н	937	1055	1230	27,3
Жесткость $K(h_0^{opt}, 0)$	Н·м ⁻¹	3,49e8	3,063e8	2,79e8	22,5
Демпфирование $D(h_0^{opt}, 0)$	Н·с·м ⁻¹	1,82e5	1,27e5	0,979e5	62,0
Угловое направление Несущая способность M	Н·м	67,6	62,9	59,4	12,9
Жесткость K_ϕ	Н·м	6,15e8	5,41e6	4,91e8	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 (Рисунок 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.

Таблица 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	мкм	7,75	7,75	7,75	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)	2,36e-4 (14,2)	2,84e-4 (17,0)	3,20e-4 (19,2)	30,0
Вертикальное направление Несущая способность $F(0,5 \cdot h_0^{\text{opt}},0) - F(h_0^{\text{opt}},0)$	Н	1260	1055	914	32,1
Жесткость $K(h_0^{\text{opt}},0)$	Н·м ⁻¹	3,37e8	3,063e8	2,75e8	20,2
Демпфирование $D(h_0^{\text{opt}},0)$	Н·с·м ⁻¹	1,46e5	1,27e5	1,09e5	29,1
Угловое направление Несущая способность M	Н·м	59,6	62,9	63,5	6,29
Жесткость K_ϕ	Н·м	5,89e6	5,41e6	4,92e6	17,9
Демпфирование D_ϕ	Н·с·м	3340	2970	2710	20,9

4. Обсуждение результатов

1. Рассмотренные расчетные случаи позволяют сказать, что предпочтительнее кинематическое замыкание опоры, поскольку в этом случае меньше разброс всех характеристик, кроме несущей способности в вертикальном направлении. Несущая способность в вертикальном направлении имеет незначительно меньший разброс при силовом замыкании.

2. Разброс жесткости в обоих случаях замыкания сопоставим. При силовом замыкании разброс жесткости составляет 22-33%, при кинематическом 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, несущая способность, жесткость и расход воздуха.

4. При замыкании опоры с помощью силы желательно иметь возможность изменять прижимающую силу. Регулировка прижимающей силы по величине зазора позволит реализовать кинематическое замыкание опоры. За счет этого можно уменьшить разброс характеристик опоры. В этом плане предпочтительнее использование вакуумного прижима, чем систем с постоянными магнитами, поскольку давление вакуума регулировать намного проще.

5. Изготовление пористых аэростатических 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.

5. Заключение

1. Разработана модель для расчета основных характеристик плоских аэростатических опор с пористыми ограничителями наддува: линейной и угловой жесткости, несущей способности, демпфирования и расхода воздуха.

2. Для графита, используемого при изготовлении аэростатических 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 аэростатической опоры при ее кинематическом и силовом замыкании.

4. Сделаны рекомендации по уменьшению разброса характеристик аэроэстатических опор.

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 аэроэстатической опоры с учетом смещений и скорости шпинделя // Инженерный журнал: наука и инновации: электронное научно-техническое издание. 2012. № 6. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/272.html> (дата обращения 18.07.2013).
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. Пинегин С.В., Поспелов Г.А., Пешти Ю.В. Опоры с газовой смазкой в турбомашинах ограниченной мощности. М.: Наука, 1977. 149 с.
5. Пошехонов Р.А. Расчет сферических аэроэстатических опор при заданном смещении и скорости шпинделя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. DOI: [10.7463/1012.0467949](https://doi.org/10.7463/1012.0467949)
6. Константинеску В. Н. Газовая смазка. М.: Машиностроение, 1968. 709 с.
7. Космынин А.В., Кабалдин Ю.Г., Виноградов В.С., Чернобай С.П. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов. М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2005. 218 с.
8. Satoshi Kumamoto, Kuniharu Kawakami, Keisuke Uchida. Process for manufacturing a hydrostatic bearing of porous material: USA patent № 6342270 B1. 2002.

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.1744-7402.2012.02751.x
11. Uhlmann E., Neumann C. Air bearings based on porous ceramic composites // Intelligent Production Machines and Systems. 2nd I*PROMS Virtual International Conference, 3-13 July, 2006. Amsterdam, Elsevier, 2006. P. 211-216.
12. Drew D. Analysis of Pressurized Porous Air Bearings Problem // Proc. of the 20th Annual Workshop on Mathematical Problems in Industry University of Delaware. Newark, 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.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2011. Режим доступа: <http://www.rae.ru/monographs/119> (дата обращения 01.07.2013).
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. Сайт ООО "Ресурс точности". Режим доступа: www.ultraprecision.ru/ (дата обращения 21.02.2013).
16. Индукаев К.В., Осипов П.А. Бесконтактное аэромагнитное линейное направляющее устройство (варианты): пат. 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. 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.

**Influence of permeability inhomogeneity of deboosters
on characteristics of plain aerostatic bearings**

08, August 2013

DOI: **10.7463/0813.0611443**

Poshekhonov R .A., Gus'kov A.M.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

roma-rio@list.rugousskov_am@mail.ru

A mathematical model was developed for plane aerostatic bearings with porous deboosters; this model allows to determine the main performance characteristics such as damping stiffness of load capacity in linear and angular directions and a consumable air flow. Experimental determination of permeability inhomogeneity for porous graphite deboosters was conducted. Influence of permeability variation on characteristics of an aerostatic bearing was evaluated by means of calculations with maximum and minimum values of the permeability index. This influence appeared to be smaller with a constant aerostatic gap than with constant load. On the basis of the obtained results, recommendations on manufacturing plane aerostatic bearings were given.

Publications with keywords: [rigidity](#), [load capacity](#), [damping](#), [porous restrictors boost](#), [flat aerostatic bearing](#), [permeability heterogeneity](#)

Publications with words: [rigidity](#), [load capacity](#), [damping](#), [porous restrictors boost](#), [flat aerostatic bearing](#), [permeability heterogeneity](#)

References

1. Poshekhonov R.A. Primery rascheta sfericheskoy aerostaticheskoy opory s uchetom smeshcheniy i skorosti shpindelya [Spherical aerostatic bearing calculation examples, taking into account the spindle velocity and displacement]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 6. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/272.html> , accessed 18.07.2013.
2. Grigor'ev S.N., Masterenko D.A., Koval'skiy M.G., Emel'yanov P.N. Opyt MGTU "STANKIN" v razrabotke koordinatno-izmeritel'nykh mashin submikronnoy tochnosti [An experience of MSTU "STANKIN" in development of submicron precision coordinate inspection machine]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2012, no. 12, pp. 25-30.

3. Sipenkov I.E., Filippov A.Yu., Boldyrev Yu.Ya., Grigor'ev B.S., Zablotskiy N.D., Luchin G.A., Panich T.V. *Pretsizionnye gazovye podshipniki* [Precision gas bearings]. St. Petersburg, Publication of Central research Institute "Elektropribor", 2007. 504 p.
4. Pinegin S.V., Pospelov G.A., Peshti Yu.V. *Opory s gazovoy smazkoy v turbomashinakh ogranichennoy moshchnosti* [Supports with gas lubrication in turbomachines of limited power]. Moscow, Nauka, 1977. 149 p.
5. Poshekhonov R.A. Raschet sfericheskikh aerostaticeskikh opor pri zadannom smeshchenii i skorosti shpindelya [Calculation of spherical aerostatic bearings with a given displacement and spindle speed]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 10. DOI: [10.7463/1012.0467949](https://doi.org/10.7463/1012.0467949)
6. Konstantinesku V.N. *Gazovaia smazka* [Gas lubrication]. Transl. from Romanian. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 718 p.
7. Kosmynin A.V., Kabaldin Yu.G., Vinogradov V.S., Chernobay S.P. *Ekspluatatsionnye kharakteristiki gazovykh opor vysokoskorostnykh shpindel'nykh uzlov* [The operational characteristics of gas supports of high-speed spindle units]. Moscow, Publishing House "Akademiya Estestvoznaniya", 2005. 218 p.
8. Satoshi Kumamoto, Kuniharu Kawakami, Keisuke Uchida. *Process for manufacturing a hydrostatic bearing of porous material*. USA Patent, no. 6342270 B1, 2002.
9. Kosmynin A.V., Shalomov V.I. Poristye ogranichiteli raskhoda gazostaticeskikh podshipnikov [Porous flow restrictors of gas-static bearings]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2006, no. 3, pp. 70-73. Available at: <http://www.science-education.ru/11-338> , accessed 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.1744-7402.2012.02751.x
11. Uhlmann E., Neumann C. Air bearings based on porous ceramic composites. In: *Intelligent Production Machines and Systems. 2nd I*PROMS Virtual International Conference*, 3-13 July 2006. Amsterdam, Elsevier, 2006, pp. 211-216.
12. Drew D. Analysis of Pressurized Porous Air Bearings Problem. *Proc. of the 20th Annual Workshop on Mathematical Problems in Industry University of Delaware*. Newark, Delaware, 2004, pp. 1-16.
13. Kosmynin A.V., Vinogradov S.V., Vinogradov V.S., Shchetinin V.S., Smirnov A.V. *Chastichno poristye gazostaticheskie opory shpindel'nykh uzlov. Teoriya i eksperiment* [Partially porous gasostatic support of spindle units. Theory and experiment]. Moscow, Publishing House "Akademiya Estestvoznaniya", 2011. Available at: <http://www.rae.ru/monographs/119> , accessed 01.07.2013.
14. Ostrovskiy V.S., Virgil'ev Yu.S., Kostikov V.I., Shipkov N.N. *Iskusstvennyy grafit* [Artificial graphite]. Moscow, Metallurgiya, 1986. 272 p.
15. *Sayt OOO "Resurs tochnosti"* [Website of Open Company "Resource accuracy"]. Available at: www.ultraprecision.ru/ , accessed 21.02.2013.

16. Indukaev K.V., Osipov P.A. *Beskontaktnoe aeromagnetnoe lineynoe napravlyayushchee ustroystvo (varianty)* [Contactless aeromagnetic linear guide device (options)]. Patent RF, no. 2451590, 2012.
17. Sheynberg S.A., Zhed' V.P., Shishev M.V., Balasan'yan V.S., Zabolotskiy N.D. *Opory skol'zheniya s gazovoy smazkoy* [Sliding support with gas lubrication]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 335 p.
18. Drozdovich V.N. *Gazodinamicheskie podshipniki*. [Gas-dynamic bearings]. Leningrad, Mashinostroenie, 1976. 208 p.
19. Poshekhonov R.A., Gus'kov A.M. Segmentnaya model' dlya rascheta sfericheskikh aerostaticeskikh opor [Segment model of spherical aerostatic bearings]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/353914.html> , accessed 18.04.2012.
20. GOST 26283-93. *Materialy spechennye pronitsaemye. Opreделение pronitsaemosti zhidkostey* [State Standard 26283-93. Permeable sintered metal materials. Determination of fluid permeability]. Moscow, Standards Publishing House, 1996. 20 p.
21. Lyamkina E.M., Kosmylin A.V., Vinogradov V.S. *Poristyy vkladysk gazostaticeskogo podshipnika i sposob ego obrabotki* [The porous insert of gas-static bearing and a method of its processing]. Patent RF, no. 2186268, 2002.