

Н.Д. Заблоцкий, И.Е. Сипенков, А.Ю. Филиппов

К 50-летию школы газовой смазки Л.Г. Лойцянского

Введение

Развитие новой техники в середине прошлого столетия столкнулось с проблемой создания опор (подшипников), позволяющих обеспечить надежную работу высокооборотных узлов в различных машинах и агрегатах при скоростях вращения, достигающих сотен тысяч оборотов в минуту. Для точного приборостроения и измерительной техники потребовались подшипники с ничтожно малым трением, а в атомном и химическом машиностроении – опоры, способные работать в условиях радиации, высоких и низких температур, а также в химически активных средах. Этим запросам техники не могли удовлетворить ни подшипники скольжения с жидкой смазкой, ни подшипники качения. Поиски новых типов опор привели к выводу, что наиболее перспективными являются опоры, в которых в качестве рабочего вещества, заполняющего зазор между трущимися поверхностями, используется не жидкая смазка, а газ (например, воздух).

Возможность использования газа в качестве смазывающего вещества в подшипниках скольжения (в которых эффект поддержания шипа вала осуществляется за счет так называемого «эффекта клина»*) была известна еще в конце девятнадцатого столетия. Но только в конце сороковых годов прошлого столетия опоры скольжения на газовой смазке стали применяться в станкостроении, прежде всего благодаря работам сотрудников Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков (ЭНИМСа) под руководством профессора С.А.Шейнберга.

* Газовые подшипники, принцип действия которых основан на «эффекте клина», называют либо самоподдерживающимися, либо скоростными.

Примерно в это же время у нас в стране и за рубежом появились газовые опоры принципиально другого типа – так называемые газовые подвесы или пневмоподвесы. В этих опорах эффект поддержания (или подъемной силы) осуществляется за счет подачи газа под давлением в зазор между шипом и подшипником. При этом (что очень существенно) шип оказывается как бы свободно подвешенным в воздухе (или другом газе). От этого и произошло название «воздушные подвесы»^{**}. В таких опорах повороту шипа вокруг своей оси препятствует только трение о воздух, которое очень мало, чем они и оказываются привлекательными для использования в прецизионном приборостроении (их часто называют чувствительными элементами или сокращенно ЧЭ, конструкция которых будет описана несколькими абзацами ниже).

Интенсивные разработки новых образцов летательных аппаратов (в том числе ракет и космических объектов), а также надводных и подводных судов поставили вопрос о необходимости создания прецизионных опор на газовой смазке для навигационных приборов и других измерительных комплексов. Однако состояние экспериментальных и теоретических исследований к тому времени находилось, можно сказать, на зачаточном уровне. Необходимость глубокой разработки вопросов теории газовой смазки оказалась настолько актуальной, что академик М.В.Келдыш обратился к заведующему кафедрой гидроаэродинамики нашего Политехнического института Льву Герасимовичу Лойцянскому с просьбой заняться разработкой теории газовой смазки, в частности, вопросами аэродинамики пневмоподвесов.

Ознакомившись с состоянием дел в этой области, Лев Герасимович (Л.Г.) пришел к выводу, что у многих специалистов существует неправильное представление о причинах возникновения подъемной силы в воздушных

^{**} В литературе воздушные подвесы иногда называют «пневмоподвесами» или менее удачным термином «газостатические опоры».

подвесах. Так, считалось, что эффект поддержания возникает за счет импульса струек воздуха, бьющих в поверхность ЧЭ через так называемые отверстия наддува в стенке собственно подшипника. На специальном совещании разработчиков приборов с газовыми опорами в начале 50-х годов Л.Г. возражал против этого объяснения и высказал гипотезу, что появление подъемной силы обязано не силам инерции газовых струек, а силам вязкости, возникающим при движении воздуха в тонком зазоре между подшипником и ЧЭ. Из-за этих сил возникают градиенты давления в газовом смазочном слое. Результирующая сил давления и является той подъемной силой, которая компенсирует нагрузки, действующие на ЧЭ, и тем самым предотвращает его касание с подшипником. Проведенные вскоре оценки импульсов струек воздуха в подвесах показали, что результирующая этих импульсов на несколько порядков меньше силы, возникающей от сил давления. Тем самым была подтверждена гипотеза Л.Г., и в дальнейшем к теории струйного эффекта больше уже никогда не возвращались.

Более подробно роль Л.Г. Лойцянского в становлении Ленинградской школы газовой смазки отражена в работе И.Е. Сипенкова «Л.Г. Лойцянский – основоположник ленинградской школы газовой смазки», опубликованной в сборнике «Проблемы механики жидкости и газа», посвященном 100-летию со дня рождения Л.Г. Лойцянского (изд. СПбГТУ, 2000 год).

Методы расчета газовых подвесов

К началу 50-х годов разработчикам приборов с опорами на газовой смазке удалось, по сути, опытным путем сконструировать и изготовить работоспособные образцы воздушных подвесов. Так в НИИ 49, с которым кафедра гидроаэродинамики установила тогда творческое содружество (длившееся затем много лет), был создан цилиндрический воздушный подвес (рис.1) с ЧЭ 1 диаметром $2R=88\text{мм}$ и длиной $L=92\text{мм}$. Средний радиальный зазор h_0 между ЧЭ и собственно подшипником 2 (который называют стаканом) был порядка 40 мкм, зазор h_{01} между корпусом ЧЭ и крышками 3,

выполнявшими роль упорных подшипников, был несколько больше. Стакан с крышками помещался внутри корпуса 4, причем между торцами и стаканом было некоторое изолированное от окружающей подвес среды пространство 5, называемое камерой нагнетания и выполнявшее роль резервуара для воздуха. Из резервуара, в котором поддерживалось постоянное давление $p_H = 2,5$ ата, воздух через специальные дросселирующие устройства 6, размещенные в стенке стакана, поступал в «рабочий зазор» размером h_0 , из которого затем выходил через отверстия в крышках в окружающую среду. Величина зазора h в общем случае зависит от двух координат, например, для цилиндрической части - от окружной координаты φ и от продольной координаты z .

Дросселирующие устройства 6 (иногда их называют просто отверстиями или устройствами наддува) представляли собой один из наиболее важных элементов в конструкции подвесов, поскольку от удачного выбора их схемы и параметров, как потом стало ясно, во многом зависит работоспособность подвеса. В подвесе (рис.1) каждое устройство наддува представляло собой отверстие в стенке стакана, в которое была впрессована диафрагма 7 (примерно посередине толщины стенки стакана) с одним или несколькими отверстиями, с суммарной площадью на два порядка меньшей площади диафрагмы. Собственно диафрагма и выполняла роль дросселя. Пространство между диафрагмой и стенкой ЧЭ называлось карманом 8.

Выступавший в качестве заказчика, НИИ 49, предложил кафедре разработку теории воздушных подвесов. Лев Герасимович, к тому времени уже начавший заниматься теорией газовой смазки, создал под своим руководством небольшую группу в составе В.А.Тарасюка (ответственный исполнитель), Н.Д.Заблоцкого, И.П.Ешалова, С.Б.Заливако и Б.А.Коловандина. Несколько позже к работе группы подключились Л.Г.Степанянц, которому Л.Г. перепоручил в дальнейшем научное руководство, и И.Е.Сипенков.

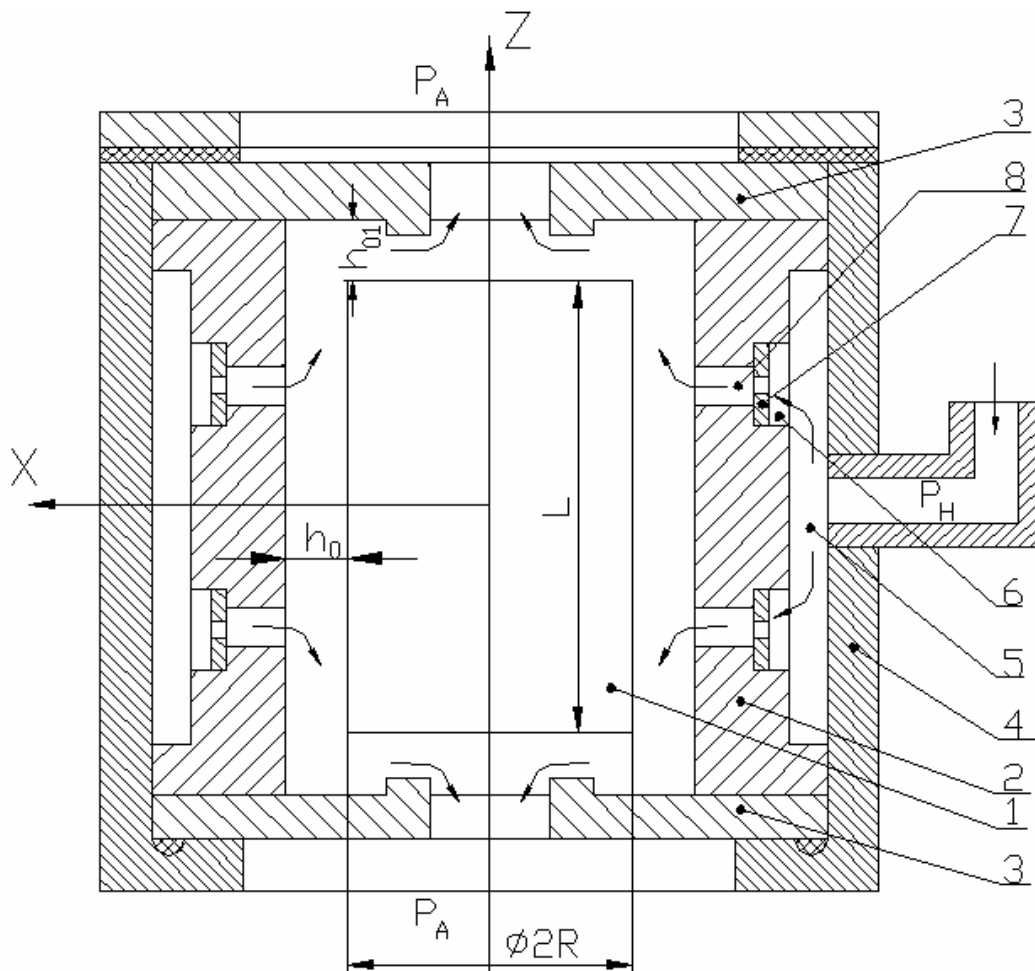


Рис.1 Цилиндрический воздушный подвес

Развивая свою гипотезу о причинах возникновения в подвесах подъемной силы, Л.Г. обратил внимание на то обстоятельство, что движение воздуха в зазоре между ЧЭ и стаканом (за исключением очень малых областей, прилегающих к отверстиям наддува) напоминает течение жидкой смазки в подшипнике скольжения, рассмотренное Рейнольдсом в 1886г. [1]. При движении воздушной смазки в подвесе влияние инерционных сил также мало по сравнению с силами давления и вязкими силами, как и в задаче Рейнольдса для несжимаемой смазки. Поэтому и распределение давления в смазочном слое определяется из решений уравнений, являющимися частными случаями одного и того же уравнения, которое, например, для цилиндрической опоры при стационарном и изотермическом режиме имеет вид (z и φ - оси цилиндрической системы координат, p - давление, ρ - плотность, μ -

коэффициент динамической вязкости, R - радиус шипа или ЧЭ, $h = h(z, \varphi)$ величина зазора, ω - частота вращения шипа)

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu\omega R \frac{\partial(\rho h)}{\partial \varphi} . \quad (1)$$

Если рассматривать изотермическое движение несжимаемой смазки ($\rho = const$) в самоподдерживающемся подшипнике, то после сокращения этого уравнения на ρ получим классическое уравнение Рейнольдса (1886г.). В случае движения газовой смазки в цилиндрической части подвеса, с учетом того, что $\rho \sim p$, а скорость поворота ЧЭ очень мала ($\omega \approx 0$), уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 . \quad (2)$$

Каждое из приведенных уравнений обычно называют уравнением Рейнольдса. Далее будет приведена еще одна более общая его форма.

Несмотря на сходство дифференциальных уравнений (1) и (2), задача для подвеса оказалась неизмеримо сложнее задачи Рейнольдса. Отличие заключалось в граничных условиях. В задаче Рейнольдса задается давление на границе односвязной области, и задача оказывается линейной. В задаче для подвеса область интегрирования - многосвязна, ограничена контурами выходных отверстий в крышках 3 (рис.1) с заданным на них давлением, равным давлению окружающей среды, и контурами отверстий наддува, на которых надо ставить граничные условия сращивания двух разнородных по своему характеру течений: «медленного» течения в смазочном слое и струйного течения при больших скоростях (иногда превышающих звуковую) в устройствах наддува. Отметим, что число отверстий наддува в зависимости от

модели подвеса доходило до 48, причем, в общем случае все отверстия наддува работают в разных условиях. Многосвязность области интегрирования сама по себе значительно усложняет процесс удовлетворения граничным условиям. Но наибольшую сложность представляет решение задачи о струйных течениях внутри устройств наддува.

В.А.Тарасюку принадлежит заслуга в нахождении оригинального выхода из этой ситуации. Суть его предложения содержала две предпосылки. Первая состояла в том, что поскольку толщина диафрагмы примерно одного порядка с диаметром отверстий в ней, то на течение воздуха через эти отверстия (представляющие собой короткие каналы) вязкость влияет незначительно. Это позволяет считать газ идеальным, а весь процесс рассматривать как изэнтропическое истечение газа через конфузорное сопло. В этом случае, как известно [2], расход газа определяется достаточно просто. Для проверки этого допущения В.А.Тарасюк проделал простой эксперимент. Из подвеса, в котором были установлены специально откалиброванные диафрагмы (с одинаковыми отверстиями), был вынут ЧЭ, а на отверстиях крышки для выхода воздуха были установлены вентили, позволяющие изменять давление внутри подвеса (противодавление). Такая экспериментальная схема позволяла, сохраняя постоянным повышенное по сравнению с окружающей средой давление в камере нагнетания и меняя с помощью вентилей противодавление, получать зависимость массового расхода воздуха через устройства наддува от противодавления, так называемую дроссельную характеристику. Полученная таким образом дроссельная характеристика с точностью до нескольких процентов совпала с известной аналитической зависимостью для идеального газа. Надо признать, что этот эксперимент был не совсем адекватен тому процессу, который в действительности происходит в подвесе, где струи «ударяются» в стенку ЧЭ, в то время как в эксперименте струи размывались в большом объеме. Однако проведенные в дальнейшем на увеличенной модели

более тщательные эксперименты (о чем будет сказано ниже) показали, что это обстоятельство не играет существенную роль.

Вторая предпосылка исходила из того, что размеры кармана устройства наддува (его диаметр и глубина) достаточно велики по сравнению с диаметром отверстий в диафрагме, поэтому можно приближенно считать давление на выходе из кармана в смазочный зазор постоянным по всему выходному краю кармана.

Основываясь на этих предпосылках, граничные условия на контуре каждого отверстия наддува ставились в следующей форме:

- давление в смазочном слое на контуре должно принимать значение, равное противодействию (давлению в кармане),
- расход газа, поступающий через контур отверстия наддува, должен быть равен расходу, проходящему через диафрагму.

Таким образом, можно было считать, что задача была поставлена достаточно корректно, однако нахождение ее решения было весьма проблематичным по следующим причинам. Во-первых, все устройства наддува, как уже было сказано, в общем случае работают в разных условиях, что выражается в том, что неизвестное противодействие в каждом устройстве наддува свое. Во-вторых, сами уравнения, получаемые из условий балансов расходов, являются нелинейными (из-за нелинейности дроссельных характеристик), что также усложняет задачу.

В.А.Тарасюк обратил внимание на то обстоятельство, что устройства наддува в подвесе распределены равномерно по окружностям, расположенным симметрично относительно среднего сечения подвеса. Это натолкнуло его на мысль аппроксимировать отверстия наддува, расположенные на одной окружности, так называемой «линией наддува», эквивалентной по расходу этим отверстиям. Таким образом, удалось в десятки раз сократить число контуров, на которых ставятся условия сращивания решений. Впервые предложенный В.А.Тарасюком метод линий наддува в дальнейшем широко вошел в практику

расчета воздушных подвесов различных модификаций. К сожалению, по причине закрытого характера исследований, связанных с газовыми опорами, этот метод, как и большинство других оригинальных результатов, не могли быть в свое время опубликованы. В изложенной постановке В.А.Тарасюку удалось решить задачу методом Фурье с разложением собственных функций в ряд по степеням эксцентриситета (параметра, определяющего величину смещения ЧЭ в радиальном направлении).

Позже Л.Г.Степанянц в своей докторской диссертации (1963г.) рассмотрел задачу о подвесе, используя прием, получивший впоследствии название метода источников [3]. Согласно этому методу каждое отверстие наддува аппроксимировалось точечным источником с такой же расходной характеристикой, как у натурального подвеса. Трудности, связанные с использованием этого метода, позволили автору получить только первое приближение при разложении решения по степеням эксцентриситета. Однако и этот результат был очень значительным, т.к. позволил оценить приближенный метод В.А.Тарасюка. Сравнение показало, что метод линий наддува имеет существенное расхождение с методом источников только в небольшой окрестности самих источников, где наблюдаются резкие пики давления. Но поскольку общая площадь, занимаемая этими пиками, на порядок меньше площади рабочей поверхности ЧЭ, то полученные этими двумя методами значения такой основной интегральной характеристики подвесов, как грузоподъемность, не будут сильно различаться. Достоинство решения Л.Г.Степанянца заключалось и в том, что оно позволило дать ответ на очень важный для разработчиков вопрос: о рациональном размещении отверстий наддува по поверхности стакана.

Полученное В.А.Тарасюком решение позволило ему впервые создать методику расчета аэродинамических характеристик цилиндрических подвесов. Особой его заслугой стоит признать определение критериев подобия для этого типа опор: параметра давления \bar{p}_a и коэффициента режима \bar{m} . Вид этих

критериев определяется после приведения задачи (уравнения Рейнольдса и граничных условий) к безразмерному виду. Так параметр давления \bar{p}_a определяется как отношение давления в окружающей подвес среде p_a к давлению в камере нагнетания p_n . Из условия баланса расходов на отверстиях наддува (или на линиях наддува) получается коэффициент режима $\bar{m} = 12\mu M^* / \pi h_0^3 p_n \rho_n$, в котором M^* - критический (максимальный) массовый расход через все диафрагмы, ρ_n - плотность газа в камере нагнетания. Благодаря этому все дальнейшие исследования стационарных режимов работы опор с наддувом различных модификаций, хотя и представляли нередко с математической (в частности, с вычислительной) стороны большие трудности, но физические основы теории таких опор не претерпевали принципиальных изменений.

Экспериментальные исследования газовых подвесов

Поскольку подавляющее большинство проводившихся на кафедре исследований по газовой смазке было связано с оборонной тематикой, то к ним предъявлялись особые требования, заключавшиеся в обязательном подтверждении основных теоретических результатов данными экспериментов на натуральных подвесах. Основные аэродинамические характеристики воздушного подвеса можно определить, если известно поле давления в зазоре между ЧЭ и стаканом. Поэтому, прежде всего, было необходимо полученные из теории поля давления сравнить с распределениями давления в натуральных подвесах. Чтобы определить поле давления в зазоре между ЧЭ и стаканом, казалось достаточно было сделать дренаж стенки стакана и измерить давление манометром. Но минимальный диаметр дренажного отверстия должен быть (по техническим обстоятельствам) не меньше 0,5мм. А высота канала (между ЧЭ и стаканом) в зависимости от величины смещения ЧЭ из соосного со стаканом положения менялась в пределах от нескольких микрон до 0,1мм. Другими словами, высота канала по сравнению с диаметром дренажного отверстия могла

быть почти на три порядка меньше. Методик измерения давления движущегося в таких узких каналах газа обнаружить не удалось. Однако Л.Г. был уверен, что в условиях, когда числа Рейнольдса $Re = \rho V_{cp} h_0 / \mu < 10^2$, такие измерения проводить можно. В последующем проведенные на увеличенной модели эксперименты подтвердили это предположение.

Большую сложность представляла также установка штуцеров в дренажные отверстия. Дело в том, что каждый штуцер необходимо было пропустить через стенку корпуса и полость (резервуар) между корпусом и стаканом, не нарушив при этом герметизацию полости и, что очень важно, не деформировав стакан. Последнее условие было наиболее трудновыполнимым, т.к. малейших усилий было достаточно, чтобы вызвать деформацию стакана в несколько микрон, что было недопустимо, т.к. соответственно на столько же микрон изменялась и толщина смазочного слоя в районе деформации. Только благодаря виртуозной работе механика высшей квалификации Э.А.Вагера удалось выполнить дренаж на нескольких подвесах, причем на каждом подвесе устанавливалось порядка восьмидесяти штуцеров. Контроль за деформациями в процессе дренажа осуществлялся с помощью оптиметра. Давление в дренажных отверстиях измерялось специально изготовленным ртутным мультиманометром с ценой деления 1мм рт. ст. Количество трубок в мультиманометре позволяло наблюдать картину распределения давления, используя одновременно все дренажные отверстия. Кроме распределения давления измерялся суммарный расход воздуха, проходивший через подвес, и смещение ЧЭ под действием приложенной к нему извне нагрузки. Нагружение осуществлялось с помощью тензодатчиков и служило для имитации перегрузок, возникавших при движении объекта с подвесом. Нагрузки достигали нескольких сотен ньютонов и вследствие этого вносили большие осложнения в эксперименты. Дело в том, что приложенная к ЧЭ нагрузка через смазочный слой передавалась на стакан, который из-за этого деформировался сам и деформировал корпус. В итоге возникала, казалось бы, тупиковая ситуация: неопределенными в ходе

эксперимента становились как положение ЧЭ относительно стакана, так и деформация стакана с корпусом. После длительных поисков, включавших в себя конструктивные изменения экспериментальной установки, введение дополнительных измерительных устройств и разработку специальной методики эксперимента, удалось провести многочисленные измерения полей давления и нагрузок для подвесов с разными геометрическими и физическими параметрами. При этом каждая экспериментальная точка многократно повторялась. Кроме того, численным интегрированием с использованием результатов измерения давления вычислялись силы и моменты, действующие на ЧЭ со стороны смазочного слоя, и сопоставлялись с данными тензометрических датчиков. Это служило дополнительным подтверждением достоверности получаемых результатов.

Описанные эксперименты, по-видимому, можно считать уникальными, поскольку до сих пор в открытой литературе нет сведений об исследованиях подобного рода и в таком объеме. Полученные результаты относятся к разделу фундаментальных, т.к. они послужили обоснованием тех основ теории газовой смазки (главным образом, наиболее сложного ее раздела – теории опор с наддувом), которые были заложены Л.Г. [2] и его учениками: Л.Г.Степанянцем, В.А.Тарасюком, Н.Д.Заблоцким, И.Е.Сипенковым [3].

Параллельно с экспериментами над цилиндрическими подвесами по заданию НИИ 49 была исследована возможность использования опор конической формы, обладающих по сравнению с цилиндрическими и сферическими подвесами двумя преимуществами. Во-первых, технология обработки их смазываемых поверхностей более проста, т.к. допускает совместную притирку поверхностей ЧЭ и стакана, во-вторых, что представлялось наиболее привлекательным, средний зазор между стаканом и ЧЭ (один из основных параметров подвесов) легко поддавался регулировке путем смещения по оси ЧЭ относительно стакана. Кроме того, по сравнению с цилиндрическим подвесом конический обладает тем преимуществом, что

воспринимает как радиальные, так и осевые нагрузки. Очень большое по объему исследование макета конического подвеса, проведенное И.П.Ешаловым, показало работоспособность такого типа опор, и возможность применения для расчета их характеристик тех же методов, которые уже были разработаны для цилиндрических подвесов.

Определение моментов увода

Точность и надежность работы измерительных и навигационных приборов, использующих опоры скольжения, во многом определяется тем, насколько малы так называемые моменты увода (МУ), создаваемые аэрогидродинамическими силами, которые приложены со стороны смазочного слоя к ЧЭ. Эти моменты стремятся повернуть ЧЭ с заданного направления и тем самым вносят ошибку в показания прибора. Несмотря на то, что опоры с газовой смазкой создают МУ на несколько порядков меньше, чем опоры с жидкой смазкой, всегда имеет место естественная потребность во все более и более точных измерительных приборах и системах. Поэтому довольно быстро встал вопрос о минимизации этих (и без того малых) МУ. Естественно, что такая задача была поставлена перед ЛПИ.

К началу работы над этой проблемой не было по сути четких представлений о причинах возникновения МУ, кроме, пожалуй, одной. Многочисленные наблюдения привели к заключению, что, по крайней мере, импульсы, создаваемые струйками устройств наддува, вносят «свой вклад» в возникновение МУ. В дальнейшем был установлен еще ряд факторов, инициирующих появление МУ. Среди них в первую очередь следует выделить один, можно сказать, «особый» фактор. Это смещение ЧЭ цилиндрического подвеса (или ротора сферического гироскопа типа ЗШГ, о котором речь пойдет несколько позже) под действием внешних нагрузок. Особенностью этого фактора является то обстоятельство, что его действие не проявляется только при определенном взаимном положении ЧЭ и стакана, что практически вряд ли осуществимо. Его влияние было впервые теоретически проиллюстрировано в

ЛПИ И.Е. Сипенковым в 1961г. на примере сферического подвеса. В дальнейшем группой сотрудников ЛПИ было проведено обширное теоретическое исследование [4] влияния смещения (в предположении, что все остальные вызывающие МУ факторы отсутствуют) на примере сферического гироскопа, способного работать как в режиме подвеса (за счет наддува) или самоподдержания (за счет эффекта клина), так и в смешанном (так называемом гибридном) режиме. Было показано, что возможностей для радикального снижения МУ не так уж много. Если опора работает в режиме подвеса, то для этого можно уменьшать средний зазор, что по технологическим причинам, к сожалению, не всегда возможно. Что касается опоры, работающей в гибридном режиме, то здесь наиболее реальной возможностью для снижения МУ представляется уменьшение эксцентриситета или (что, по сути, то же самое) увеличение жесткости смазочного слоя. Отметим, что, на первый взгляд, очевидность этого способа не вызывает сомнения. На самом деле, как было показано в работе Н.Д.Заблоцкого (1963г.), этот способ может оказаться эффективным только благодаря нелинейной связи между МУ и эксцентриситетом и близкой к линейной зависимости грузоподъемности от эксцентриситета.

Было также теоретически обнаружено, что к числу «особых» факторов, вызывающих МУ в подвесе, не имеющем никаких дефектов, следует отнести также вибрации ЧЭ и стакана. Причем эти вибрации могут носить как случайный, так и искусственный характер, предназначенный для увеличения подъемной силы подвеса (сочетание эффекта наддува с виброэффектом). Полученное решение [4] позволяет оценить порядок МУ и указать закон изменения момента в зависимости от угла между плоскостью смещения ЧЭ и плоскостью его вибраций.

Остальные вызывающие МУ факторы, обнаруженные в ходе анализа сотрудниками ЛПИ, оказались связанными либо с конструктивными особенностями опор, либо с дефектами их изготовления. Поскольку

изготовленные детали опор всегда имеют некоторые отклонения от «идеальной» формы, которые после сборки и в ходе дальнейшей эксплуатации могут увеличиться (иногда очень существенно), то естественно было предположить, что они могут повлиять на МУ. Будем условно называть все дефекты геометрии газовых опор (возникшие как при изготовлении, так и при эксплуатации) деформациями. При этом будем их подразделять на два класса: 1) макродеформации, изменяющие в целом форму детали и 2) микродеформации, включающие в себя царапины, заусеницы и т.п., и имеющие линейные размеры, характеризующие глубину (или высоту) и ширину, много меньше, чем средний зазор.

В 1961г. Л.Г.Степанянцем было получено аналитическое решение задачи [5] об обтекании сплошной средой препятствия в виде углубления (царапины) или выступа (заусеницы), которое позволило оценить момент, вызываемый этим видом деформаций. Расчеты показали, что момент от одной царапины (заусеницы) на несколько порядков меньше, допустимых по техническим требованиям моментов. В связи с этим в дальнейшем основное внимание было уделено исследованию влияния на МУ макродеформаций.

Как показали паспортные данные деталей цилиндрических подвесов и результаты многочисленных измерений их размеров в собранном и разобранном виде, проведенные в ЛПИ, наиболее распространенной и сильно выраженной формой деформации, способной (как можно полагать на основании физических представлений) вызывать МУ, являются такие деформации стакана и ЧЭ, при которых они принимают форму эллиптических цилиндров, вместо круговых. Хотя разница между большими и малыми осями цилиндров в ненагруженной опоре составляла всего несколько микрон, этого могло быть достаточно для появления МУ. Поэтому первоочередной задачей было определение порядка величины МУ и влияние на него параметров деформации, которые существенно изменяются под действием приложенной к ЧЭ нагрузки. Так разность между осями эллипса (как показали наши

измерения) порой увеличивалась на порядок. Последнее обстоятельство может оказаться особенно нежелательным для прибора, т.к. если в ненагруженном состоянии МУ можно, в принципе, с той или иной степенью точности компенсировать, то сделать это в рабочих условиях при изменяющейся нагрузке весьма проблематично.

С помощью аналитических и численных методов удалось получить основные закономерности, связывающие МУ цилиндрических и сферических опор с их физическими и конструктивными параметрами. Причем были рассмотрены не только эллиптические, но и другие формы деформации: огранка, сдвиговая деформация, деформация в форме выступа (впадины). Полученные закономерности позволяют не только оценивать порядок МУ, но и определить пути их минимизации. Следует здесь подчеркнуть, что при их выводе, а также при анализе полученных в последствии экспериментальных результатов оказалась очень полезной формула для МУ, впервые полученная Л.Г.Степанянцем (1963г.) на основе закона изменения главного момента количества движения смазки в объеме между ЧЭ и стаканом.

Исследование влияния деформаций на МУ позволило попутно дать ответ на другой важный для практики вопрос – как влияет на момент неравномерность подачи газа в смазочный слой, например, из-за неточного изготовления одного из устройств наддува. Из физических соображений можно придти к выводу о сходном характере влияния локальной деформации (например, в форме местного выступа) и местного увеличения расхода (например, через одно из устройств наддува) на течение газа между ЧЭ и стаканом. Решения, полученные разными методами Л.Г.Степанянцем (1963г.) и Б.С.Григорьевым (1979г.), подтверждают эту гипотезу.

Очень сложной и трудоемкой оказалась задача экспериментальной проверки полученных теоретических результатов. Во-первых, надо было иметь опоры с заранее заданными формами и величинами деформации, во-вторых, необходимо было обеспечить постоянство деформации при изменении условий

эксперимента (при изменениях: среднего зазора, давления наддува, величины и направления нагрузки). Непростой задачей оказалось и измерение имевших небольшие величины МУ (порядка сотых гсм), действующих на ЧЭ, к которому при этом прикладывалась радиальная нагрузка до 100н. В этих условиях нельзя было рассчитывать на полное совпадение с результатами теории, которая к тому же сама была основана на приближенных методах. Важно было подтвердить порядок получаемых величин моментов увода и характер их зависимости от параметров задачи, что в итоге и было достигнуто. Проведение этих уникальных экспериментов в сочетании с циклом теоретических решений позволило выработать и обосновать рекомендации по уменьшению МУ, вызванных деформациями проточных частей не только подвесов, но и гибридных опор.

Одной из наиболее сложных и в то же время наиболее волновавших практиков проблем была проблема определения влияния на МУ устройств наддува. Как было отмечено выше, теоретическое описание течения газа внутри карманов устройств наддува не представлялось возможным. Что касается экспериментального определения МУ от одного устройства наддува, то необходимо было бы довольно детально измерить поле скорости в кармане. Учитывая малые габариты карманов (напомним, их диаметр не превышает 2мм; такого же порядка была и глубина), сделать все это на натурном подвесе не представлялось возможным. Поэтому было решено изучить движение воздуха на увеличенной в 25 раз модели единичного устройства наддува 1 (рис.2), включающей в себя камеру нагнетания 2, одну или две диафрагмы 3, карман 4 и смазочный канал под пятой 8. Для соблюдения условий подобия необходимо было при увеличении размеров модели соответственно уменьшить в 25 раз давление наддува (давление перед диафрагмой) и давление в кармане (или на входе в смазочный слой). Поскольку в натурном подвесе давление наддува было равно $2,5 \text{ атм}$, модель устройства наддува должна была находиться в разреженной среде при давлении порядка нескольких десятков мм рт. столба.

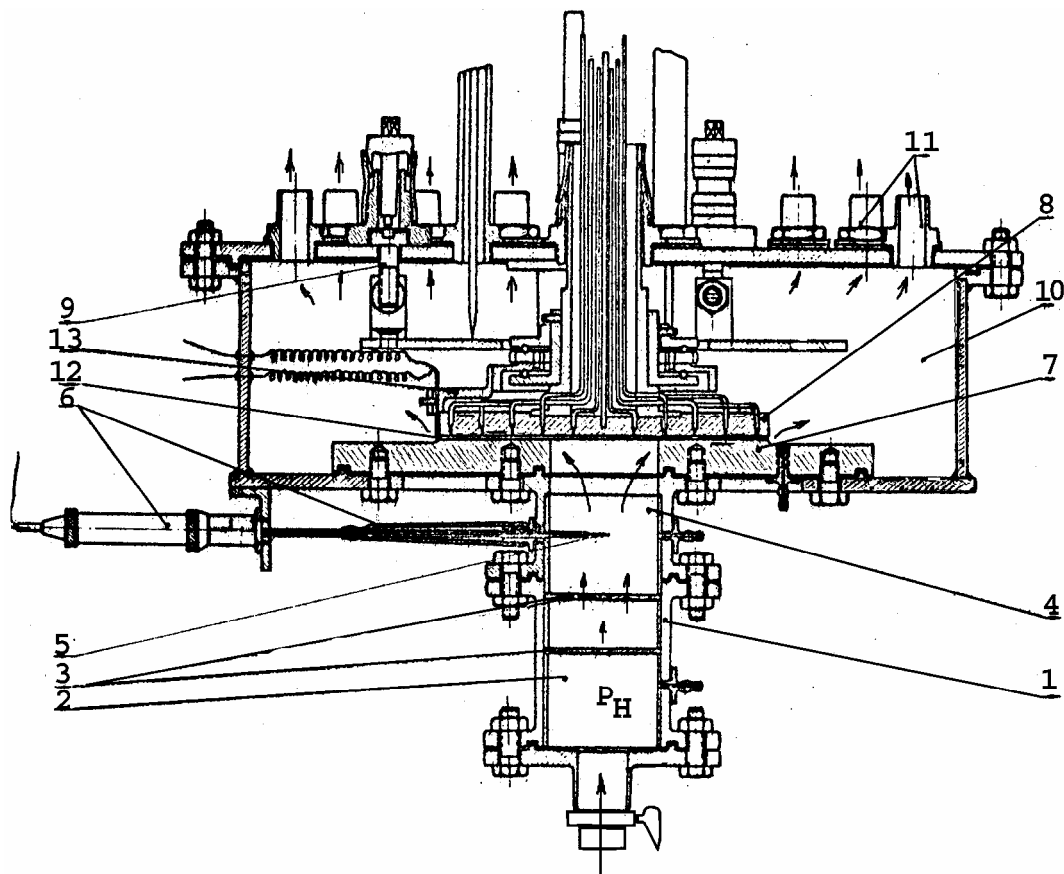


Рис.2 Установка для моделирования движения воздуха через устройство наддува

Поэтому модель была прикреплена к специальному резервуару 10, через патрубки 11 в котором вакуумными насосами осуществлялась непрерывная откачка воздуха. Экспериментальная установка предусматривала возможность изменения положения диафрагмы, замены ее диафрагмами другой конфигурации, изменения конструкции устройства наддува (например, на рис.2 показано устройство наддува с двумя диафрагмами) и т.п. Смазочный зазор (канал) был образован с помощью пяты 8 (моделирующей часть стенки ЧЭ напротив отверстия наддува) и фланца 7, к которому прикреплялась модель устройства наддува. Величина зазора в ходе эксперимента могла изменяться с помощью дистанционного механизма 9. Пята, диафрагма и стенки кармана имели дренажные отверстия общим числом более сорока с выводами шлангов через стенки резервуара на мультиманометр. Для измерения скорости потока использовались четыре термосопротивления 5 и 12, укрепленные в

координатниках 6, 13. Управление тремя координатниками было дистанционным.

Очевидно, что когда ось струи, бьющей из отверстия в диафрагме, направлена по нормали к стенке ЧЭ, и сама струя осесимметрична, ни нормальные, ни касательные напряжения, действующие на стенку ЧЭ, не создадут момента относительно оси ЧЭ. В связи с этим эксперименты были проделаны со струями, оси которых составляли с нормалью к стенке ЧЭ угол около 13° . Если ЧЭ представляет идеальный по форме круговой цилиндр, то нормальные напряжения при любом характере их распределения момента не создадут. Касательные же напряжения при их несимметричном распределении должны вызвать момент увода, что и подтвердили эксперименты. Обработка результатов экспериментов показала (Н.Д.Заблоцкий, докторская диссертация, 1973г.), что величина момента только от одного устройства наддува может достигать того же порядка, что и полная допустимая величина МУ для подвеса рассматриваемого типа. Поэтому при проектировании опор с наддувом особое внимание надо уделять конструкции устройств наддува, а также технологии их изготовления и сборки.

Установка для исследования моментов, создаваемых устройствами наддува явилась одновременно и уникальным стендом для изучения их дроссельных (расходных) характеристик. Увеличенные размеры модели позволили с помощью расходомера более точно измерять расход воздуха, а конструкция модели давала возможность изменять внутренние геометрические параметры в таком широком диапазоне, что можно было практически плавно перейти от устройства наддува типа «простая диафрагма» к устройству типа «кольцевая диафрагма» или к устройству типа «капилляр». Кроме того, можно было установить сетки или дополнительные диафрагмы (например, для разрушения струй). Были подробно исследованы дроссельные характеристики всех трех упомянутых типов устройств наддува (Н.Д.Заблоцкий, В.С.Карпов [6]), в результате чего была предложена универсальная формула для вычисления

массового расхода через устройства наддува любого из вышеперечисленных типов. Отметим также, что в ЛПИ впервые было обращено внимание на тот факт, что в гибридных опорах давление внутри смазочного слоя может за счет эффекта клина превышать давление в камере нагнетания, и тогда возникнет истечение газа из смазочного слоя обратно в камеру наддува. Этот эффект также нашел отражение в предложенной формуле.

Заключая обзор проведенных в ЛПИ исследований МУ, добавим, что струйный характер течения воздуха имеет место не только внутри смазочного слоя, но и на выходе воздуха наружу через два торцевых отверстия в цилиндрических подвесах или через два полюсных отверстия в сферических подвесах. Эти струи также могли внести свой вклад в МУ. Правда, площадь этих отверстий существенно больше суммарной площади отверстий во всех диафрагмах, поэтому скорость в выходных струях должна быть небольшой, что ставило под сомнение возможность возникновения значительного момента при взаимодействии струи с различными конструкциями, укрепленными на подвесах. Однако эксперименты показали, что при неудачном расположении этих конструкций момент, вызванный другими факторами, может даже поменять знак под действием рассматриваемых струй.

Методы расчета гибридных подшипников

Параллельно с изучением МУ на кафедре продолжались работы по созданию новых, более универсальных, методов расчета газовых гибридных опор. Первую работу по самоподдерживающимся опорам еще в начале 50-х годов выполнил Л.Г., рассмотревший сферичный подшипник [2], в котором шаровый ротор не только вращался, но и имел поступательную скорость. Автору удалось, предполагая смазку несжимаемой, получить точное решение пространственной задачи. Работа оказалась настолько актуальной и полезной, что стала, по утверждению заведующего лаборатории ЦНИИ «Электроприбор» П.И.Воробьева, настольным руководством для гироскопистов. Кроме того, она послужила толчком к творческому сотрудничеству кафедры с этим

авторитетным приборостроительным научным центром, которое продолжается уже несколько десятков лет.

Первыми работами, выполнявшимися в ЛПИ по заданию ЦНИИ «Электроприбор», были теоретические исследования газодинамических характеристик гибридных сферичных опор с наддувом*. Надо сказать, что к этому времени на кафедре уже разрабатывались численные методы решения уравнений Рейнольдса для различных типов газовых опор. Кафедра первой в ЛПИ применила для решения нелинейных уравнений в частных производных только что приобретенную институтом ЭВМ «Урал». Пионером в этом деле был сотрудник нашего коллектива, тогда еще студент, В.Е.Карякин. Ему удалось составить программу для интегрирования уравнения Рейнольдса конечно-разностным методом применительно к гибридным опорам с наддувом. К сожалению, возможности упомянутой ЭВМ были столь ограниченными, что позволяли решать только отдельные наиболее простые варианты задачи. Только после того, как удалось арендовать вычислительный комплекс БЭСМ 2М, впервые в теории смазки было получено решение уравнения Рейнольдса для гибридного сферического гироскопа типа ЗШГ-50 (рис.3) с дискретным наддувом. Ротор гироскопа 1 представляет собой гладкий шар, а собственно подшипник состоял из двух полусфер 3 с раздвижкой 5 по оси симметрии, и разделенных каждая на четыре одинаковых сектора 2 с отверстием наддува 4 в середине сектора. Наличие так расположенных дискретных отверстий не позволяло применить метод линий наддува. Поэтому Н.Д. Заблоцким и И.Е.Сипенковым был разработан новый метод постановки задачи для опор с наддувом [7,3], названный методом неравномерно распределенного наддува. Суть его состояла в том, что стенка подшипника предполагалась как бы пористой, но с неравномерной проницаемостью, причем наибольшая

* Здесь подчеркивается, что имеются в виду именно опоры с наддувом, т.к. гибридные опоры могут сочетать «эффект клина» не только с эффектом наддува, но и с так называемым «виброэффектом», который позволяет увеличивать подъемную силу за счет принудительных вибраций подшипника.

проницаемость приходилась на области, занятые отверстиями наддува. В пределе можно выбрать такое распределение проницаемости, чтобы функция, ее описывающая, была равна нулю во всей области за исключением участков, занятых отверстиями наддува. В этом случае ищется решение задачи уже для односвязной области, которое будет эквивалентным решению задачи для многосвязной области (с дискретным наддувом).

Для такой теоретической модели уравнение, аналогичное ранее приведенным вариантам уравнения Рейнольдса, будет содержать дополнительный член, учитывающий принудительную подачу газа через одну из смазываемых поверхностей. Это уравнение можно представить в более общей форме, учитывающей и «эффект клина», и «эффект наддува», а также возможную нестационарность процесса, которая, в частности, позволяет учесть и «виброэффект», если таковой используется для улучшения аэродинамических свойств опоры. Воспользуемся декартовой системой координат x, y, z , направив оси x и z вдоль, а y поперек смазочного слоя, причем так, чтобы направление оси x совпадало с направлением скорости U_0 относительного движения смазываемых поверхностей. Все величины представим в безразмерной форме, используя (как это обычно делается в теории смазки) следующие масштабы: для x и z характерный продольный размер опоры L , для y – средний зазор h_0 , для продольных u и v составляющих скорости газа – U_0 , для поперечной скорости w – $U_0 \frac{h_0}{L}$, для давления и плотности – давление p_n и ρ_n в камере нагнетания (а если наддува нет, то соответствующие величины в окружающей среде p_a и ρ_a), для времени t – некоторый характерный масштаб t_0 . Тогда записанный в безразмерном виде аналог уравнения Рейнольдса примет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial z} \right) = L \frac{\partial}{\partial x} (hp) - \bar{m} \theta(p) f(x, z) + \sigma \frac{\partial (hp)}{\partial t} ,$$

где $f(x,z)$ – заданная функция распределения критического расхода по смазываемой поверхности подшипника, удовлетворяющая условию

$$\iint_{(S)} f(x,z) dx dy = 1 \quad (S - \text{площадь смазываемой поверхности})$$

и подобранная таким образом, чтобы на всех отверстиях она принимала одно и то же постоянное значение, а в остальной области была близкой или равной нулю.

Образовавшиеся в этом уравнении комплексы $\Lambda = 6\mu U_0 L / p_n h_0^2$ – число сжимаемости, $\bar{m} = 12\mu M^* / \pi h_0^3 p_n \rho_n$ – коэффициент режима, $\sigma = 12\mu R^2 / h_0^2 p_n t_0$ – число сдавливания, а также параметр давления $\bar{p}_a = p_a / p_n$, входящий в единственное граничное условие, которому должно удовлетворять искомое решение, являются физическими критериями подобия изотермических задач теории газовой смазки.

Надо отметить, что критерии Λ и σ выражаются через общие критерии аэродинамического подобия – число Рейнольдса $Re = \frac{\rho U_0 h_0}{\mu}$, число Маха $M = \frac{U_0}{a}$, число Струхала $S = L / U_0 t_0$ и показатель адиабаты «к»:

$$\Lambda = 6k \frac{M^2 L}{Re h_0}, \quad \sigma = 2\Lambda S.$$

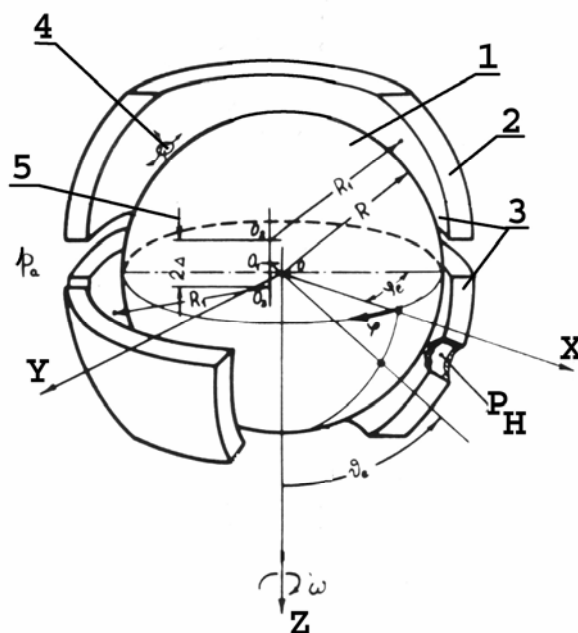


Рис.3 Сферический секторный гироскоп типа ЗШГ-50 на воздушной смазке.

Рассматриваемое уравнение можно назвать обобщенным уравнением Рейнольдса теории газовой смазки. Это уравнение применимо ко всем типам газовых опор: 1) если в опоре отсутствует наддув ($\bar{m} = 0$) и не используется виброэффект ($\sigma = 0$), а повышение давления в смазочном слое происходит за счет «эффекта клина» ($\Lambda \neq 0$), то будем иметь уравнение Рейнольдса для самоподдерживающейся опоры; 2) если $\Lambda = 0$ и $\sigma = 0$ а $\bar{m} \neq 0$ – для подвеса; 3) если $\Lambda = 0$ и $\bar{m} = 0$, а $\sigma \neq 0$, то – для виброподвеса. Еще четыре варианта этого уравнения относятся к гибридным опорам: это либо когда все три числа не равны нулю ($\Lambda \neq 0$ и $\sigma \neq 0$ а $\bar{m} \neq 0$), либо только одно из чисел равно нулю.

Применение обобщенного уравнения Рейнольдса (записанного в сферической системе координат) к решению задачи для гибридной опоры ($\sigma = 0$) гироскопа ЗШГ-50 позволило определить все необходимые газодинамические характеристики рассматриваемой опоры [3]. Для подтверждения достоверности результатов было использовано полученное на кафедре аналитическое решение так называемого «вырожденного» уравнения Рейнольдса, являющегося результатом предельного перехода в полном уравнении Рейнольдса при неограниченном возрастании числа сжимаемости.

Анализ результатов расчета подтвердил ранее установленной на примере решения простейшей модельной задачи неочевидный, на первый взгляд, факт, заключающийся в том, что наложение двух эффектов – наддува и клина – не всегда приводит к увеличению грузоподъемности и даже, наоборот, может её уменьшить. Кроме того, в секторных опорах при возрастании числа сжимаемости эффект наддува уменьшается вплоть до полного исчезновения. Что касается влияния коэффициента режима, то здесь тоже наблюдается аномалия, проявляющаяся в том, что при больших его значениях величина главного вектора сил давления уменьшается.

Далее была решена аналогичная задача для гладкого (не разделенного на сектора) сферического подшипника, имеющего два ряда отверстий наддува

симметрично расположенных относительно плоскости экватора [8]. Большое количество отверстий затрудняло использование метода неравномерно распределенного наддува, т.к. в этом случае пришлось бы брать очень мелкий шаг, что не позволяли сделать параметры БЭСМ-2М. Поэтому было решено использовать метод линий наддува: каждый из двух рядов отверстий был заменен одной линией наддува.

Чтобы убедиться в достоверности получаемых численным методом результатов, было проведено их сопоставление с частными аналитическими решениями. Одно такое решение было получено для случая осевого смещения ЧЭ в режиме подвеса. Другое – для случая радиального смещения ротора в режиме самоподдержания. Последнее решение было приближенным. Для его нахождения уравнения Рейнольдса предварительно линеаризовали разработанным в ЛПИ методом, проверенным ранее на цилиндрических подшипниках, а затем применили вариационный метод Галёркина. Третьим эталоном для проверки численного интегрирования послужило асимптотическое решение при неограниченно больших числах сжимаемости. Надо сказать, что, по-видимому, первым подобное решение обнаружил С.А.Шейнберг, который рассмотрел задачу о радиальном смещении ротора в цилиндрическом подшипнике. Я.М.Котляр (1967г.) обобщил полученный С.А.Шейнбергом результат на случай произвольного смещения ротора. Н.Д.Заблоцким в 1970г. было предложено асимптотическое решение [9] для гибридных опор (с наддувом) любой геометрии, частными случаями которого были два предыдущих решения.

Обычно, когда речь идет о сферической газовой опоре, то создается впечатление, что это небольшой по размеру подшипник (поскольку он обычно применяется в гироскопии), способный нести нагрузку в пределах нескольких десятках кг. На самом деле встречаются сферические опоры, диаметры которых измеряются метрами, а толщина смазочного слоя имеет величину порядка нескольких сантиметров. Нагрузка, которую выдерживают такие опоры,

достигает кН. Совместно с Минским институтом тепло- и массообмена в ЛПИ было проведено теоретическое исследование газодинамики одного из типов таких опор. Поскольку толщина смазочного слоя была большой (опору таких размеров с меньшим зазором изготовить было практически невозможно), а скорость вращения, наоборот, была невелика, то за счет эффекта клина нельзя было рассчитывать на получение требуемой грузоподъемности. Поэтому поддержание осуществлялось в основном благодаря принудительному наддуву через кольцевые диафрагмы. Особенностью таких опор было то обстоятельство, что числа Рейнольдса в смазочном слое были довольно большими, что ставило под сомнение допустимость пренебрежения конвективными членами в исходных уравнениях Навье-Стокса. Л.Г.Степанянцем с соавторами для расчета движения газовой смазки с учетом конвективных членов с успехом был применен метод обобщенного подобия [10], разработанный Л.Г. для ламинарного пограничного слоя.

Несколько позже П.И.Саньковым с соавторами [11] было проведено исследование влияния сил инерции газовой смазки на характеристики упорного подшипника методом Слэзкина-Тарга, которое показало, что силы инерции мало сказываются на грузоподъемности опор, когда параметры течения близки по значению к реализуемым на практике.

Работы по исследованию крупногабаритных опор проводились совместно ЛПИ (отв. исполнитель В.М.Люсин) и институтом тепло- и массообмена (отв. исп. В.И.Шаплыко и Б.И.Смирнов). Численными и аналитическими методами были определены значения параметров, при которых грузоподъемность и жесткость смазочного слоя достигает наибольших значений. Исследованы параметры вынужденного движения ротора при наличии статического и динамического дисбалансов при конечных значениях сжимаемости и различных вариантах подачи воздуха [12].

Установившийся к середине 60-х годов творческий контакт с лабораторией газовых опор (ЭНИМС), руководимой С.А. Шейнбергом, которая уже много

лет плодотворно работала в области создания газовых подшипников для металлообрабатывающих станков и измерительных приборов, инициировал на кафедре разработку методов расчета опор подобного назначения. В основном предметом исследования стали цилиндрические (радиальные) опоры.

Первой была рассмотрена задача о смазке гладкого цилиндрического подшипника конечной длины. Сначала Н.Д.Заблоцким в 1967г. было получено приближенное решение (вариационным методом Галеркина) предварительно линеаризованного уравнения Рейнольдса для радиального смещения шипа. Полученное решение вполне удовлетворительно совпадало с результатом численного интегрирования Раймонди, опубликованным ранее. Поэтому таким же методом была решена задача для случая перекоса шипа. Аналогичная задача для подвеса с двумя рядами отверстий была впервые рассмотрена в работе Л.С. Осепьян и И.Е. Сипенкова с помощью метода малого параметра [13]. В дальнейшем в своей дипломной работе Л.С. Осепьян (1970г.) самостоятельно получила решение для гибридного подшипника методом малого параметра в сочетании с методом Галеркина. Кроме того, были получены асимптотические решения для гибридных подшипников при неограниченно больших значениях как коэффициента режима, так и числа сжимаемости (о чем говорилось выше). Заканчивая перечисление результатов, полученных аналитически на начальном этапе исследований цилиндрических опор, необходимо отметить исследование Б.С. Григорьева (1970г.), которое позволило дать ответ на интересовавший практиков вопрос о влиянии места нанесения профиля на смазываемых поверхностях (на неподвижной втулке или на роторе) на грузоподъемность подшипника.

Опыт, накопленный при численном решении задач, относящихся к сферическим опорам, позволил довольно быстро перейти к рассмотрению радиальных опор. Е.Г. Грудской был выполнен большой цикл расчетов [14] как подвесов, так и гибридных подшипников. Впервые численным методом было

исследовано влияние деформаций на грузоподъемность и МУ цилиндрических подвесов [15].

При расчете опор с наддувом численными методами иногда заменяют устройства наддува точечными источниками, помещая их в узлы разностной сетки. Однако, как было выяснено недавно, такие разностные схемы расходятся. Дело в том, что расход через «сеточный источник» не аппроксимирует расход через реальный источник. Б.С. Григорьевым предложена модификация метода, устраняющая этот недостаток [16].

Методы расчета газодинамических подшипников

К концу 60-х годов стал проявляться повышенный интерес к самоподдерживающимся подшипникам с профилированной поверхностью, предназначенной для искусственного создания «эффекта клина». Объем опубликованных только школой Л.Г. оригинальных работ по этой тематике столь велик, что из-за ограниченности объемов статьи не представляется возможным передать даже краткое содержание этих исследований. Ограничимся констатацией только отдельных наиболее важных на наш взгляд результатов. Учитывая интересы наших заказчиков (ЦНИИ «Электроприбор», НИИ КП и некоторых московских организаций, в том числе НИИ АП), большое внимание сначала было уделено профилированным опорам сферической формы, основными разработчиками методов расчета которых стали Г.К. Измайлов, Б.С. Григорьев [17], В.С. Карпов, Л.А. Прокулевич [18]. Кроме того, В.С. Карпов совместно с О.Н. Тихоненковой занимались также цилиндрическими профилированными опорами [19]. Отдельный класс профилированных опор составляют опоры со спиральными канавками, которые относятся к категории особо трудных для теоретического анализа. В ЛПИ еще в конце 60-х годов такими опорами начали заниматься Б.С. Григорьев, который в своей кандидатской диссертации (1971г.) впервые в мировой практике численно проинтегрировал уравнение Рейнольдса для такой геометрии зазора, и И.Е. Сипенков, сосредоточивший внимание на аналитических методах [20].

Важное методологическое значение имела работа Б.С. Григорьева и Ю.Я. Болдырева [21], в которой интегрирование уравнения Рейнольдса проводится методом конечных элементов. В результате проведенных исследований были выяснены многие интересующие практиков вопросы (такие, например, как условия равножесткости, минимизации угла смещения и т.п.)

Исследователей газовых опор со спиральными канавками часто привлекает метод Уиппла (1958) (впоследствии названный теорией «узких канавок»), в основу которого положено предположение о малой ширине канавок и перемычек между ними по сравнению с их протяженностью, и пренебрежение концевыми эффектами. Кроме того, в этом методе производится «сглаживание» мультипериодической составляющей давления, появляющейся на каждом участке профиля, включающим канавку-выступ. Ю.Я. Болдырев провел некоторую «чисто математическую» ревизию «теории узких канавок (1991г.) и показал, как математически корректно следует проводить процедуру сглаживания давления в этой теории. В выполненной под его руководством диссертации Ю.К. Шиндер (1998г.) показано, что «теория узких канавок» при выполнении определенных условий дает строгое асимптотическое решение уравнения Рейнольдса.

К сказанному добавим, что микропрофили в виде системы спиральных канавок нашли эффективное применение в сухих (газодинамических) уплотнениях, применяемых, например, в турбокомпрессорных машинах. Это новое для ЛПИ направление нашло отражение в работах, выполненных под руководством Б.С. Григорьева, Ю.Я. Болдырева и Г.А. Лучина [22].

Другим, можно сказать, «неожиданным» применением подшипника со спиральными канавками, является использование его в качестве микрокомпрессора для обеспечения сжатым газом опор с наддувом и других технических объектов, при небольших расходах и сравнительно высокой степени сжатия (до 10 единиц). Разработкой этого «микрокомпрессорного»

направления занимается А.Ю. Филиппов, чему положила начало его дипломная работа (1972 г.).

Очевидно, что основные характеристики профилированных газовых опор определяются геометрией, формой смазываемых поверхностей, которая обычно подбиралась методом проб или анализом решений простейших задач, а часто просто интуитивно. Ю.Я. Болдыреву принадлежит инициатива применения вариационных методов к оптимизации формы профиля. Оптимизация смазочного слоя стала предметом исследований, которые вошли как в его докторскую диссертацию (1993 г.), так и в кандидатскую диссертацию его аспиранта Ю.В. Борисова (1993г.).

Существенным недостатком практически всех типов газовых опор является то обстоятельство, что равновесное положение ротора (ЧЭ) часто оказывается неустойчивым. Причина этого кроется в малой несущей и демпфирующей способности сжимаемого смазочного слоя и неизбежных вынужденных воздействиях на систему, состоящую из ротора (или ЧЭ), смазочного слоя и подшипника (стакана). Анализ устойчивости равновесия ротора (ЧЭ) на газовых опорах относится к наиболее важному классу нестационарных задач. Эти задачи намного сложнее задач для несжимаемой смазки. Во-первых, потому что уравнение Рейнольдса для газа, как уже отмечалось выше, является нелинейным, во-вторых, потому что время в него входит как переменная интегрирования, а в уравнение для жидкой смазки – как параметр, вследствие чего это квазистационарное уравнение для несжимаемой смазки интегрируется независимо от уравнений динамики ротора (ЧЭ). Уравнение же Рейнольдса для газа, вообще говоря, не удастся отделить от уравнений динамики ротора, и тогда их решают совместно различными способами. Однако, если воспользоваться методом возмущения, то можно уравнение Рейнольдса привести к квазистационарному виду, и решать независимо от системы уравнений динамики ротора (ЧЭ). Первым из политехников вопросами устойчивости начал заниматься Р.З. Алиев (1968 г.), который использовал, по

существо (как и вошедшие затем в его группу И.М. Иванова и В.М. Лыдкин) квазистационарный подход применительно к подвесам [23]. Хотя такой подход и является приближенным, но, основываясь на результатах последующих исследований (Б.С. Григорьева, Д.К. Зайцева, И.Е. Сипенкова), можно утверждать, что он, по крайней мере, не завышает размеры области устойчивости.

Много позже наиболее строгий и универсальный метод автономизации уравнения Рейнольдса предложил Б.С. Григорьев (этому посвящена его докторская диссертация, 1995): уравнение Рейнольдса для возмущения давления преобразуется к так называемому «сопряженному» уравнению, которое уже допускает автономное интегрирование. На основе разработанных им методов исследованы статические и динамические характеристики ряда опор и уплотнений. Предложен метод анализа нелинейных нестационарных проблем с использованием сопряженных уравнений, на основе которого впервые рассмотрен вопрос о математическом моделировании процессов, происходящих в опорах при переходе границы области устойчивости.

В ЭНИМСе к началу 70-х годов был разработан способ подавления неустойчивости гибридных опор для станкостроения с помощью подачи газа в смазочный слой через отверстия, соединенные на рабочей поверхности микроканавками. Однако удовлетворительных методов расчета газодинамики таких опор не было. Поэтому по предложению ЭНИМСа кафедра в лице Т.В. Маковец взялась за решение этой задачи, особая сложность которой заключалась в том, что была не ясна сама ее физическая постановка. Т.В. Маковец выбрала, по-видимому, самый рациональный путь: на установке, созданной в ЦКТИ им. И.И. Ползунова с.н.с. Г.А. Лучиным (с которым у нас поддерживались многолетние творческие контакты), она провела сначала эксперименты, позволившие ей обосновать выбранный путь решения задачи, а затем проверить полученные численным конечно-разностным методом результаты. Значительное место в исследованиях было уделено устойчивости

шипа к полускоростному вихрю, что, по-видимому, было сделано впервые (особенно если учесть большой объем полученных результатов) применительно к рассматриваемому типу подшипников. Кроме того, Т.В. Маковец на примере рассматриваемой ею газовой опоры продолжила начатое в свое время дипломантом Ю.А. Кирпинским [24] исследование «эффекта скольжения» (числа Кнудсена) на характеристики газовых опор. Прделанная работа была оформлена в виде кандидатской диссертации [25].

Следует высоко оценить результаты исследований вопросов устойчивости опор с надувом, в частности, при высоких числах сжимаемости, прделанные Е.Г. Грудской [26,27]. К числу оригинальных и имеющих большое прикладное значение следует отнести и ее исследования о влиянии на устойчивость искажения макрогеометрии подшипников.

Плодотворно занимались изучением проблем устойчивости В.С.Карпов, Л.А.Прокулевич (канд. дисс. 1988г.) и О.Н.Тихоненкова (канд. дисс. 1983г.). Одним из методов обеспечения динамической устойчивости ротора является нанесение искусственного профиля в виде ступеньки, карманов или канавок на поверхности ротора или подшипника. Большой вклад в исследование этой проблемы внесли В.С. Карпов и Л.А. Прокулевич [18], которые разработали методику теоретического определения параметров профилированных сферических опор на границе устойчивости, выявили параметры различных профилей, обеспечивающих наибольший запас устойчивости, одними из первых оценили влияние «эффекта скольжения» на устойчивость. В.С.Карпову принадлежит гипотеза (которую он проверил на конкретном примере вместе с соавторами) о возможности повысить устойчивость опоры за счет нанесения профиля на вращающуюся, а не на неподвижную поверхность [19].

Кроме вопросов устойчивости равновесных режимов рассматривались и другие прикладные вопросы динамики газовых опор. В частности, анализировались установившиеся (периодические) и переходные режимы, а также демпфирующие свойства газовых опор. Периодические режимы были

предметом исследований Р.З. Алиева (1972г.), Б.С. Григорьева (докт. дисс. 1995г.), В.С. Карпова (1979г.), В.М. Люсина [12]. Существенный вклад в изучение этой категории вопросов сделан в докторской диссертации (1998г.) сотрудника Военно-морского инженерного училища Г.Г Агишева.

Основной вклад в изучение переходных режимов работы газовых опор, наиболее критичных с точки зрения их надежности, принадлежит Д.К. Зайцеву, который на основании прямого численного интегрирования уравнения Рейнольдса совместно с уравнениями динамики установил основные закономерности динамического поведения газовых опор в режимах запуска и останова, при кратковременных перегрузках различной формы и длительности, при внезапном отключении системы наддува [28, 29]. Случай постоянной нагрузки, ограниченной длительности рассмотрел Б.С. Григорьев в своей диссертации (1995г.). В.М. Люсин и Н.Д. Закржевский [30] рассмотрели процесс запуска виброподшипника. Подобную задачу применительно к сферическим опорам рассмотрел Б.С. Григорьев. Ряд исследований по анализу демпфирующих свойств газовых опор с различными ограничителями расхода, выполненных И.Е. Сипенковым, приведен в монографии [31].

Заключение

Отметим, что отличительной чертой школы газовой смазки Л.Г. является неразрывная связь прикладных задач с общетеоретическими вопросами, имеющими отношение как непосредственно к теории газовых опор, так и к более общему классу задач, связанных с течением вязких сред в тонких щелях. Уже первые гипотезы, высказанные Львом Герасимовичем (относительно характера движения газа в тонких каналах при наличии вдува, о целесообразности применения метода обобщенного подобия, об измерении давления в узких каналах) относятся к общим вопросам газодинамики. В дальнейшем И.Е. Сипенков доказал (1967г.) единственность решения (если оно существует) уравнения Рейнольдса для определенного класса течений с наддувом. Б.С. Григорьев сначала рассмотрел вопросы существования и

единственности решений применительно к одномерной непериодической задаче, затем в соавторстве [32] для пространственной задачи. И.Е. Сипенков подверг дополнительному анализу допущения [33,34], обычно используемые при рассмотрении течений газа в узких каналах, и установил, что в нестационарных задачах неучет инерционности газового слоя может привести к результатам, противоречащим физическому смыслу. Кроме того, он обнаружил, что в некоторых ситуациях в виброподвесах надо учитывать не только инерционные эффекты, но и неизотермичность процесса.

Сплав глубокого теоретического анализа, характерного для школы Л.Г., с практическим опытом отраслевых институтов способствовал созданию новых образцов навигационных приборов. В начале статьи уже говорилось о плодотворном сотрудничестве ЛПИ и НИИ 49. Не менее плодотворное сотрудничество сложилось с ЦНИИ «Электроприбор», в котором уже к 1957г. при деятельном участии В.М. Шапиро и Г.М. Малышева были созданы два новых типа шаровых гироскопов. В дальнейшем под руководством главных конструкторов И.Б. Позерна, В.М. Грибова, М.Г. Максимова, О.Л. Мумина, О.В. Артемьевой была разработана новая серия шаровых гироскопов с опорами на газовой смазке. В конце 60-х гг. П.И. Воробьевым с сотрудниками был создан гироскоп с обращенным газодинамическим подвесом. Полезную работу в осуществлении контактов между ЦНИИ «Электроприбор» и ЛПИ, а также между другими организациями выполняет выпускник ЛПИ, а ныне начальник лаборатории ЦНИИ «Электроприбор» А.Ю. Филиппов. Круг его научных интересов частично отражен в статьях [11, 35, 36].

Вопросами газовой смазки в рассматриваемые годы занимались и многие другие НИИ, ВУЗы и промышленные предприятия Ленинграда. В ЦКТИ им.Ползунова большой вклад в разработку газовых опор внесли сотрудники под руководством Г.А. Лучина, в Военно-морском инженерном училище – А.А. Лохматов, Г.Г. Агишев, в ЛВИМУ им. С.О. Макарова – А.С. Кельзон, В.И. Яковлев, Т.С. Яковлева, в ЛИТМО – В.Н. Дроздович, Н.Г.Проскуряков, в НИИ

ХИММАШ – В.И. Кугушев, в НИИ КП – И.П.Ешалов. Между ними и сотрудниками ЛПИ поддерживались творческие контакты, чему способствовали как совместно проводимые работы, так и дискуссии на заседаниях постоянно действующего семинара в ЛПИ.

Подобные творческие контакты имели место и со многими организациями страны. Это, прежде всего, с НИИ Машиноведения (руководители работ – С.В. Пинегин, М.В. Коровчинский), НИИ ПМ (С.А. Харламов), ЭНИМС (С.А. Шейнберг, В.П. Жедь), МГУ (Н.А. Слезкин), ВЦ АН СССР (В.П. Шидловский), Ростовский ГУ (А.И. Снопов), Челябинский ПИ (Г.А. Завьялов, С.А. Дадаев, Г.А. Левина), Калужский ПИ (А.В. Емельянов), Казанский ХТИ (Г.А. Поспелов, В.А. Максимов), Куйбышевский АИ (А.И. Белоусов), Красноярский ПИ (С.Н. Шатохин), Николаевский КИ (А.М. Антонов, А.И. Тарабрин), Дальневосточные ТИ (И.Л. Шишкин) и ПИ (А.И. Самсонов), Каунасский ПИ (К.М. Рагульскис, А.В. Галинскас) и др.

По результатам исследований сотрудниками школы Л.Г. защищено четыре докторских и более двадцати кандидатских диссертаций, а также выполнено несколько десятков дипломных работ студентами Ленинградских ВУЗов. Школа Л.Г. была дважды представлена на ВДНХ и получила золотую и несколько серебряных медалей.

Заканчивая статью, хочется выразить надежду, что Лев Герасимович, был бы удовлетворен успехами, достигнутыми созданной им школы газовой смазки, и посвятил бы их 120-летнему юбилею общей теории смазки, основоположником которой признан российский ученый Н.П.Петров, опубликовавший в 1883г. первую в мире работу по теории смазки.

Литература

- 1 Гидродинамическая теория смазки. Классики естествознания /под ред. Л.С. Лейбензона. М.; Л.: Гостехиздат, 1934, 562с.
- 2 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа, М., Наука, 1987, с.840.

- 3 Stepanynts L.G., Zablotsky N.D., Sipekov I.E. Method of Theoretical Investigation of Externally Pressurized Gas-Lubricated Bearings. Transaction, of ASME, 1969, v.9, s.F, №1, pp.166-170.
- 4 Григорьев Б.С., Заблоцкий Н.Д., Измайлов Г.К., Люсин В.М., Сипенков И.Е.-Влияние газовых опор на точность измерительных приборов. Вестник машиностроения, 1979, №4.
- 5 Степанянц Л.Г. Медленное движение жидкости вблизи деформированной поверхности. Техническая гидромеханика. Тр. ЛПИ, 1961, №217, с.117-126.
- 6 Заблоцкий Н.Д., Карпов В.С. Характеристики устройств наддува газовых опор. Известия АН СССР, Механика жидкости и газа. М., 1973, с.143-149.
- 7 Заблоцкий Н.Д. Использование схемы непрерывного наддува к расчету газовых подшипников с дискретным наддувом. Тр. ЛПИ, 1965, №248, с.35-44.
- 8 Карякин Ю.Е., Сипенков И.Е., Заблоцкий Н.Д. Сферический газовый подшипник скольжения с принудительным наддувом. Механика жидкости и газа, №3, 1970, с.147-154.
- 9 Заблоцкий Н.Д. Один метод построения асимптотического решения задач газовой смазки с наддувом.- Тр. ЛПИ 1970,, №313, с.106-110.
- 10 Смага Т.И, Смирнов Б.И., Степанянц Л.Г. Об одном методе решения задач гидродинамической теории смазки при больших числах Рейнольдса, Минск, АН БССР, серия физико-энергетических наук, 1978, с.113-124.
- 11 Саньков П.И., Филиппов А.Ю., Заблоцкий Н.Д. Влияние сил инерции на грузоподъемность плоского газового подпятника./ Сб. научных трудов , изд. ЛПИ, 1983, с.65-72.

- 12 Люсин В.М., Смирнов Б.И., Шаплыко В.И. Сложное движение шипа сферической опоры при наличие статического и динамического дисбаланса, Машиноведение, 1980, №4, с.125-129.
- 13 Осепьян Л.С., Сипенков И.Е. Определение угловой жесткости цилиндрического газового подвеса.- Аэродинамика, Труды ЛПИ, 1970, №313, с.110-116.
- 14 Грудская Е.Г., Заблоцкий Н.Д. Характеристики гибридного радиального подшипника на газовой смазке. Изв. АН СССР, Машиноведение, №5, 1976, с.93-97.
- 15 Грудская Е.Г., Заблоцкий Н.Д. Влияние деформаций на характеристики цилиндрического воздушного подвеса. Изв. АН СССР, Машиноведение, №5, 1980, с.97-104.
- 16 Григорьев Б.С., Смирнов Д.Б. Расчет газостатических подшипников методом конечных разностей. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. №4. С.35-42.
- 17 Григорьев Б.С., Измайлов Г.К. Профилированные опоры на газовой смазке/ В сб.: Гидродинамика.- Л.: ЛПИ, 1983.- С.77-82.
- 18 Карпов В.С., Прокулевич Л.А. Сравнение устойчивости сферических газовых подшипников с профилями различных типов на поверхности втулки и ротора. Машиноведение, 1986, №1, с.100-107.
- 19 Карпов В.С., Тихоненкова О.Н. Определение характеристик вертикальных газовых подшипников с профилированной поверхностью вала и втулки. Машиноведение, 1983, №4, с.101-106.
- 20 Сипенков И.Е., Григорьев Б.С. Определение осевой несущей способности профилированных сферических опор с газовой смазкой./ В сб. «Проблемы развития газовой мазки», 1972, ч.1, я.87-107.
- 21 Болдырев Ю.Я., Григорьев Б.С. Численное решение уравнения Рейнольдса с помощью метода конечных элементов. Машиноведение, 1982, №54, с.78-84.

- 22 Болдырев Ю.Я., Григорьев Б.С., Лучин Г.А. О расчете сухих газовых торцевых уплотнений со спиральными канавками валов турбокомпрессорных машин. «Компрессорная техника и пневматика», 1994, вып.4-5, с.59-62.
- 23 Алиев Р.З., Иванова И.М., Лыдкин В.М. Расчет границ области устойчивости равновесия ротора в газовых подшипниках с наддувом. Труды ЛПИ, 1969, №307.
- 24 Кирпинский Ю.Д. Две задачи газовой смазки с учетом «эффекта скольжения». В сб. Газовая смазка подшипников. М., ИМАШ, 1968, 312с.
- 25 Маковец Т.В. Исследование характеристик гибридных опор с микроканавками. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н., ЛПИ, 1975, 16с.
- 26 Грудская Е.Г. Влияние вторичного дросселирования газа на динамические характеристики радиальных газовых опор. Трение и износ, 1982, №4, с.674-683.
- 27 Грудская Е.Г. Динамические характеристики радиальных подшипников при больших числах сжимаемости. Машиноведение, 1988, №4, с.108-114.
- 28 Зайцев Д.К. Исследование газовых опор в условиях ударного нагружения. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Л., ЛПИ, 1986, 213с.
- 29 Зайцев Д.К. Численное исследование процессов запуска и останова газового подпятника с наддувом. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992, №5, С.38-40.
- 30 Закржевский Н.Д., Люсин В.М. Исследование пусковых режимов газовой опоры. Машиноведение, 1981, №2, с.108-113.

- 31 Пинегин С.В., Табачников Ю.Б., Сипенков И.Е. Статические и динамические характеристики газостатических опор, М., Наука, 1982, с.259.
- 32 Григорьев Б.С., Лупуляк С.В., Шиндер Ю.К. О разрешимости уравнения Рейнольдса газовой смазки. Проблемы математического анализа, 2001, вып.22, с.35-40.
- 33 Сипенков И.Е. О взаимодействии инерционных и неизотермических эффектов в виброподвесах. Проблемы машиностроения и надежности машин, 1993, №4, с.23-31.
- 34 Сипенков И.Е. К вопросу о влиянии инерции смазочного слоя на структуру решений нестационарных задач газовой смазки. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. №3. С.35-42.
- 35 Филиппов А.Ю. О выборе параметров газодинамических подшипников микромашин. Судостроительная промышленность/ Серия-общетехническая, ЦНИИ «Электроприбор», 1991, вып.32, с.3-8.
- 36 Филиппов А.Ю. О влиянии величины смазочного зазора на качество гироскопов с неконтактным сферическим газодинамическим подшипником. Гироскопия и навигация, №3 (10),С.-Пб.,ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 1995, с.18-23.