УДК 621.822.574 EDN: IQXSOM

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ДЛЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ

А.С. Курзаков kurzakov@list.ru

СФУ, г. Красноярск, Российская Федерация

Аннотация

Разработаны и проанализированы численные модели газостатических опор, применяемых в высокоточных измерительных и диагностических системах. Рассмотрена эволюция методов расчета газовых слоев — от классических решений уравнения Рейнольдса до современных FSI-моделей, позволяющих учитывать совместное поведение газового потока и упругих элементов конструкции. Использование двухстороннего FSI-моделирования существенно повышает точность прогноза несущей способности и жесткости опор при малой толщине газовой пленки. Приведены связанные расчеты в среде ANSYS Workbench, включая особенности импорта геометрии, генерации сеток и настройки обмена данными между модулями Fluent, Meshing и Mechanical. Исследованы методы динамической перестройки сетки при изменении газового зазора — пружины, линейно-эластичный, диффузионный и основанный на радиальных базисных функциях. На основе расчетов для эталонных и сложных геометрий выполнено сравнение устойчивости, равномерности перестроения и способности предотвращать появление отрицательных объемов ячеек. Показано, что при значительных деформациях наилучшее качество сетки обеспечивает метод, основанный на радиальных базисных функциях, тогда как классический метод пружины приемлем при умеренных смещениях и корректной настройке параметров. Полученные результаты позволяют формировать надежные методики FSI-моделирования газостатических опор и повышать точность расчета прецизионных измерительных систем

Ключевые слова

Газостатические опоры, динамическая сетка, радиальные базисные функции, численное моделирование, конечно-элементное моделирование

Поступила 30.12.2025
Принята 27.04.2026
© Автор(ы), 2026

Введение. Газостатические подшипники представляют собой особый класс опор, использующих тонкий слой газа в качестве несущей среды. Их развитие связано с эволюцией теории смазочных слоев, восходящей

к работам по уравнению Рейнольдса и первым численным методам анализа [1–3]. Первые расчеты газовых опор на основе дискретного моделирования выполнялись методами конечных разностей и конечных элементов, что позволило учесть сложные граничные условия и особую геометрию газовых слоев [4–6]. С развитием вычислительных методов внимание исследователей сместилось к численным моделям, позволившим учитывать нестационарные процессы, тепловые эффекты и турбулентность потока в тонких зазорах [7–9].

Во второй половине XX века развитие теоретических моделей позволило активизировать разработки инженерных конструкций газостатических опор. Их преимущества — отсутствие трения, высокая точность позиционирования и стабильность геометрических зазоров — определили широкое распространение газостатических опор в измерительных и технологических установках высокой точности. Газостатические опоры стали ключевыми узлами в координатно-измерительных машинах, установках для обработки оптических элементов и оборудовании для микрообработки [10–12]. В производстве полупроводников и медицинских приборов применение газостатических опор обеспечило требуемую чистоту и долговечность [12]. Конструкции с диафрагмами и пористыми ограничителями получили развитие для применения в направляющих различного типа [13, 14], а в шпинделях микрообработки достигались скорости более 400 000 об/мин при микрометровых радиальных биениях [15, 16]. Благодаря упомянутым преимуществам газостатические опоры стали важной частью измерительных приборов и опор высокоточных шпиндельных систем [17–19].

Одновременно усилилось внимание к численным методам исследования газостатических опор. Классические FEM- и FDM-модели использовались для решения стационарных и динамических уравнений Рейнольдса с учетом влияния формы камер, параметров дросселей и толщины газового слоя [18, 20–22]. В приведенных работах показана важность корректного выбора граничных условий и параметров сетки для исключения зависимости результатов моделирования от параметров разбиения на элементы [23]. Однако в методах, основанных только на гидродинамических расчетах, не учитывается деформация твердых тел под действием давления газа, что ограничивает точность прогнозов при малой толщине газового слоя.

Для преодоления этого ограничения введен подход FSI (Fluid-Structure Interaction), описывающий совместное поведение газового потока и упругой структуры [7–9, 24]. Модели FSI позволили количественно оценить влияние деформаций на несущую способность и жесткость подшипников [25–30]. В высокоточных шпинделях и направляющих, где толщина газового слоя

сопоставима с деформацией твердотельных структур, это взаимодействие определяет динамическую устойчивость и точность позиционирования [31, 32]. В результате исследований определено, что игнорирование упругих эффектов приводит к завышению расчетной жесткости, тогда как двухстороннее FSI-моделирование дает результаты, согласующиеся с результатами экспериментов [7, 32], что делает методику эффективным инструментом для анализа и проектирования газостатических опор. Таким образом, развитие газостатических подшипников прошло путь от классических теоретических моделей смазочного слоя до многопараметрического конечно-элементного моделирования с учетом взаимодействия газовой пленки и твердого тела. Современные программные комплексы объединяют разработку геометрических моделей, генерацию сеток и выполнение связанных расчетов взаимодействия газовой среды и структуры в единой вычислительной системе.

Современные работы, в том числе направленные на исследование газостатических опор, сосредоточены на совершенствовании численной устойчивости и эффективности расчета. При этом классические методы перестроения сетки в CFD-пакетах зачастую приводят к отрицательным объемам ячеек либо к потере сходимости при обновлении формы газового зазора [33]. Для устранения этих проблем разработаны адаптивные алгоритмы деформирования сетки, включая методы радиальных базисных функций, обеспечивающие плавную коррекцию ячеек и стабильность при моделировании FSI-эффектов [31, 34].

Несмотря на существенный прогресс в развитии методов анализа газостатических опор, вопросы корректного перестроения динамической сетки в газовых слоях при значительных их деформациях остаются недостаточно исследованными. Разнообразие доступных методов перестроения приводит к возможным ошибкам при их выборе и настройке, что снижает достоверность получаемых результатов моделирования.

Цель настоящей работы — проанализировать методы динамической деформации сетки газовых слоев и сформулировать практически реализуемый подход к моделированию газостатических опор.

Для достижения цели решены следующие задачи: проанализированы возможности среды моделирования ANSYS для выполнения связанных расчетов; проведено сравнительное исследование доступных методов динамического перестроения сетки с оценкой ее качества; проанализированы особенности метода радиальных базисных функций; даны рекомендации по выбору параметров моделирования сетки.

Постановка задачи и методика моделирования. Разработана методика исследования, основанная на использовании инструментов програм-

много комплекса ANSYS, в составе которого предусмотрена интегрирующая платформа Workbench, предназначенная для объединения и совместного использования множества вычислительных модулей. Применение этой платформы не является строго обязательным для обеспечения обмена данными между отдельными системами и их компонентами, однако ее использование заметно упрощает визуальную организацию проекта и управление многоступенчатыми схемами моделирования. Интегрирующая платформа Workbench обеспечивает единый интерфейс, через который пользователь получает доступ ко всем подсистемам: необходимые расчетные системы добавляются в рабочую область (Project Schematic), после чего между ними формируются связи и происходит передача данных. Кроме того, внутри каждой отдельной системы (например, подсистемы Fluid Flow) автоматизируется обмен информацией между входящими в нее компонентами. Скриншот подсистемы Fluid Flow (Fluent) (ее ключевым вычислительным модулем является Fluent) в Workbench приведен на рис. 1.

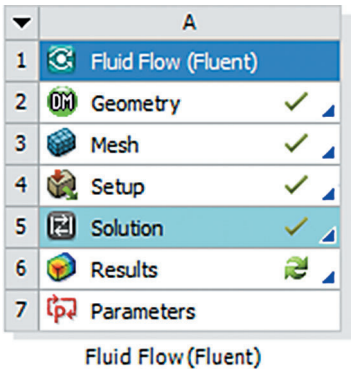


Рис. 1. Скриншот подсистемы Fluid Flow (Fluent) с ключевым вычислительным модулем Fluent в Workbench

Для управления запуском и последовательностью операций с модулем используются отдельные ячейки — Setup, Solution и Results. Наличие нескольких ячеек, связанных с модулем Fluent, объясняется тем, что каждая ячейка служит для определенного типа взаимодействия между Workbench и модулем: например, очистка настроек в ячейке Solution не отменяет глобальные параметры Fluent, тогда как результаты, сформированные в ячейке Results, могут быть использованы другими системами в рамках Workbench для дальнейшей обработки и анализа.

Кроме модуля Fluent, в приведенной конфигурации система может обмениваться данными с редактором геометрии DesignModeler через ячейку Geometry и генератором сеток Meshing через ячейку Mesh. При работе в Workbench поддерживается автоматическая согласованность между модулями, отраженная в соответствующих ячейках: при открытии модуля Meshing геометрическая модель автоматически передается в него, а сетка, сформированная в Meshing, доступна модулю Fluent при его запуске. Это обеспечивает своевременное отражение любых изменений в проекте и хранение единой версии данных в папке проекта. Информационная

совместимость модулей обеспечивает корректную интерпретацию размерностей, наименований геометрических элементов и других атрибутов проекта.

Для корректной организации сопряженных расчетов, связанных с исследованием газостатических опор, введены дополнительные параметры настройки Workbench:

– Tools → Options… → Geometry Import → Basic Options → Named Selections → On — включение импорта именованных выборок, что обеспечивает корректную передачу групп поверхностей и тел из сторонних CAD-редакторов;

– Tools → Options → Meshing → Auto Detect Contact On Attach → → Off — выключение автоматического распознавания контактных областей в процессе присоединения геометрии к сетке;

– Tools → Options → Mechanical → Auto Detect Contact On Attach → → Off — отключение механизма автоматического создания контактных областей в модуле Transient Structural, что важно при моделировании тонких газовых слоев, когда автоматическая генерация контактов может привести к неадекватному объединению близко расположенных поверхностей;

– Tools → Options → Fluent → Default Options for New Fluent System → → Launcher → Precision → Double Precision — выбор двойной точности в качестве значения по умолчанию для новых систем Fluent, что рекомендуется при связанном расчете для повышения числовой точности;

– Tools → Options… → Geometry Import → General Options → → Preferred → Geometry Editor → DesignModeler — опциональная установка параметрического редактора DesignModeler как предпочтительного средства редактирования геометрии (альтернативой является редактор SpaceClaim Direct Modeler, реализующий прямой тип моделирования).

В процессе совместного (связанного) расчета сетка, описывающая слой газа в моделируемой конструкции, может изменять свою форму и расположение узлов. Для учета таких изменений применяется функциональность динамической сетки (Dynamic Mesh). Применение этого механизма возможно только при переходе в нестационарный режим расчета (Setup → → General → Time → Transient). При настройке динамической сетки необходимо выбрать режим перестроения, для чего доступны три варианта: Smoothing (сглаживание/корректировка элементов), Layering (изменение числа слоев) и Remeshing (полное перестроение сетки). В рассматриваемых задачах наиболее оправданным можно считать режим Smoothing, поскольку режим Layering предназначен преимущественно для явно слои-

стых структур и не всегда применим, а вариант Remeshing приводит к значительному увеличению вычислительной нагрузки и может породить сетку с непредсказуемой локальной структурой.

Режим Smoothing реализован тремя методами перераспределения узлов сетки: Spring (модель пружин), Diffusion (диффузионный подход) и Linearly Elastic Solid (модель линейно-упругого твердого тела). Метод Linearly Elastic Solid прост в применении: сетка масштабируется в соответствии с изменением граничных размеров разбиваемой области, что приемлемо в ситуации, когда не ожидается возникновение трудных для сходимости расчетных участков. При применении метода Diffusion обычно получают высокое качество перестроения сетки, но требуются существенные вычислительные ресурсы, вследствие чего метод Diffusion применяется реже. Баланс между качеством и затратами обеспечивает метод Spring, который используется по умолчанию, поскольку возможен допуск для уплотнения сетки в тех местах, где наблюдаются интенсивные перемещения или большие градиенты полей. При использовании метода Spring контролируются такие параметры, как Spring Constant Factor (коэффициент жесткости условных пружин) и Elements (перечень элементов), к которым применяется корректировка сетки.

Для наглядного анализа процессов деформации сетки подготовлена простая эталонная модель — прямоугольный параллелепипед, для которого сформирована сетка и исследованы ее изменения в результате смещения граней.

В модуле Fluent слои жидкости или газа структурируются в виде набора зон, которые могут быть объемными (cell zones) или поверхностными (surface zones). При загрузке сетки для параллелепипеда автоматически образуются зоны interior (внутренняя объемная область) и wall (поверхностная область, охватывающая все шесть граней). В рассматриваемой задаче требуется более детальная разбивка поверхностей: одна из граней должна оставаться зафиксированной, противоположная (имеющая наибольшее значение координаты z) — перемещаться как единое твердое тело, и четыре боковых грани подлежат деформации. Для получения в модуле Fluent корректного набора зон с необходимыми атрибутами перемещений и деформаций удобнее всего именованные выборы (Named Selections) формировать еще на этапе Meshing — на выбранных поверхностях именованные группы создаются командой Create Named Selection. Содержимое групп можно просмотреть и корректировать через таблицу Selection Information, доступную при выборе элементов в интерфейсе Meshing.

В рассматриваемой конфигурации левая грань параллелепипеда включена в именованную группу move, четыре боковые грани — в группу walls, а правая грань — в группу bottom.

После экспортирования сетки из модуля Meshing в модуль Fluent именованные выборы автоматически преобразуются в соответствующие зоны. При этом возможна автоматическая генерация зон специальных типов: если именованная группа имеет название pressure_inlet или pressure_outlet, во Fluent соответствующие границы автоматически получат типы входной или выходной зон с возможностью задания давления.

В модуле Fluent доступны операции Merge (объединение) и Fuse (сшивание) зон сетки, применимые как к объемным, так и к поверхностным зонам. Операция Merge выполняет комбинирование зон без требования геометрической стыковки: объединяемые области могут не соприкасаться и даже располагаться раздельно, что позволяет собирать воедино несколько логически связанных областей. Операция Merge, по сути, эквивалентна логической группировке и возможна тогда, когда зоны принадлежат одной группе ячеек (cell zone). При моделировании газостатических опор часто объединяли совокупности отдельных газовых тел в единую зону ячеек. Перед этим, если необходимо, выполнялось объединение самих зон ячеек через Outline View → Cell Zone Conditions. Например, для модели с двумя отдельными трактами течения газа можно сначала получить две зоны ячеек, а затем посредством упрощения связанной схемы расчета объединить эти зоны в одну общую Fluid-зону. Несмотря на то, что объединенная зона может быть геометрически разъединенной, работа связанной модели остается корректной.

Операция Fuse предполагает более строгие условия: требуется совпадение узлов смежных зон (допускаются малые погрешности), в результате чего формируется единая непрерывная зона.

Все действия по объединению или переименованию зон сохраняются в проекте, если он управляется через Workbench. Это позволяет при повторном открытии автоматически воспроизводить те же преобразования. Если необходимо отменить или изменить последовательность операций над сеткой (например, при изменении постановки задачи или исправлении ошибок), то используется интерфейс управления записанными операциями (File → Recorded Mesh Operations…). Удалив или изменив запись, можно выполнить повторную загрузку модели через команду Reload. Следует учитывать, что иногда при загрузке проекта модуль Fluent может автоматически «подхватить» ранее созданный файл и применить к нему старые операции. В таких случаях для обновления конфигурации зон требуется

предварительно очистить сгенерированные данные командой Clear Generated Data, доступной из контекстного меню ячейки Setup в системе Fluid Flow.

Для формирования движения зон сетки в соответствии с заранее заданным законом перемещений (профилем) в режиме Smoothing выбран метод Spring. Типичные значения параметров при стандартной настройке следующие: Spring Constant Factor = 1 (коэффициент жесткости условных пружин) и Number of Iterations = 20 (число итераций перестроения сетки). В системе Dynamic Mesh в разделе Dynamic Mesh Zones → Create/Edit… для каждой зоны указывают ее тип: для walls задают Deforming (зона может деформироваться), для bottom — Stationary (фиксированная), для move — Rigid Body (жесткое тело). Тип Rigid Body позволяет связать движение зоны с заданным профилем в виде отдельного файла с расширением .prof, задающим временные законы перемещений.

Профиль перемещений оформляется в текстовом файле специального формата, который содержит набор параметров, описывающих движение центра тяжести заданной зоны во времени. Первая строка файла содержит наименование профиля и число описанных в нем точек; вторая строка — список моментов времени, для которых заданы значения; последующие строки содержат относительные координаты центра тяжести соответствующих моментов времени. В приведенном примере (листинг файла) перемещения по осям x и y отсутствуют, тогда по оси z заданы следующие значения: 2 м при $t = 0$; 1 м при $t = 10$ с; 0,1 м при $t = 20$ с. Между этими временными узлами значения интерполируются линейно.

Листинг файла профиля перемещения:

```
((move_lin 3 point)
(time 0 10 20)
(x 0 0 0)
(y 0 0 0)
(z 2 1 0.1))
```

При необходимости профиль можно задавать не только через абсолютные перемещения, но и через компоненты скорости (vx, vy, vz), углы поворота (theta x, theta y, theta z) или угловые скорости (omega x, omega y, omega z). Важно учитывать принципиальное различие: если в профиле указаны перемещения, то по окончании временного интервала движение прекращается; если заданы скорости, то движение продолжается и после последней точки профиля с постоянной скоростью, равной значению в последней точке.

Загрузка файла профиля в модель возможна через интерфейс управления профилями: команда Physics → Zones → Profiles… в ленте инструментов (или Profiles… на странице граничных условий в дереве проекта Outline View → Setup → Boundary Conditions). После выполнения команды Read… окно управления профилями загрузит файл и имя профиля (в рассматриваемом случае move_lin) станет доступным для привязки в настройках динамической зоны как закон перемещений.

После определения закона смещения подвижной зоны проверялись реальный ход ее перемещения и связанная с этим деформация расчетной сетки. Для визуализации движения подвижной зоны применялся инструмент Dynamic Mesh → Display Zone Motion…, а для анализа преобразования сеточной структуры — Dynamic Mesh → Preview Mesh Motion… (в стационарных расчетах steady-формата аналогичная функция располагается в разделе Update Dynamic Mesh…). Следует учитывать, что команда Preview Mesh Motion… проводит деформацию непосредственно над текущей расчетной моделью и не допускает последующего отката внесенных изменений.

Для активации алгоритма изменения сетки в режиме пружины выбрана последовательность Dynamic Mesh → Mesh Methods → Smoothing (сглаживание), затем в разделе Settings → Smoothing в поле Method указан вариант Spring (пружина).

Результаты моделирования и анализ деформаций сетки. Приведены результаты выполненного исследования, а также сравнение методов перестроения сетки расчетного домена и их обсуждение.

Профиль перемещений (см. листинг) задает смещение на 1 м за первые 10 с. Деформации сетки приведены на рис. 2. Для анализа задано отклонение подвижной зоны за 3 с, что соответствует перемещению 0,3 м. При просмотре траектории (Display Zone Motion) движение зоны move отображается корректно, однако при попытке выполнить перестроение сетки возникала ошибка отрицательного объема ячейки. После уменьшения шага перемещения до 1 с ошибка исчезала. Полученная конфигурация сетки приведена на рис. 2, *а*. Перемещение подвижной поверхности практически не передается на остальные элементы, ограничиваясь лишь ближайшими ячейками. Это объясняется тем, что в параметрах перестроения (Mesh Methods → Settings… → Smoothing → Parameters → Elements) по умолчанию активна опция Tet in Tet Zones. Если заменить ее параметром All, деформация будет распространяться на всю сетку.

После повторного задания перемещения за 3 с формируется сетка, приведенная на рис. 2, *б*. В этом случае смещения передаются на несколько

соседних слоев, однако распределяются неоднородно. При больших деформациях сохраняется риск формирования ячеек с отрицательным объемом и аварийного завершения расчета. Для повышения равномерности деформации дополнительно используют параметры жесткости виртуальной пружины (Spring Constant Factor) и числа итераций (Number of Iterations).

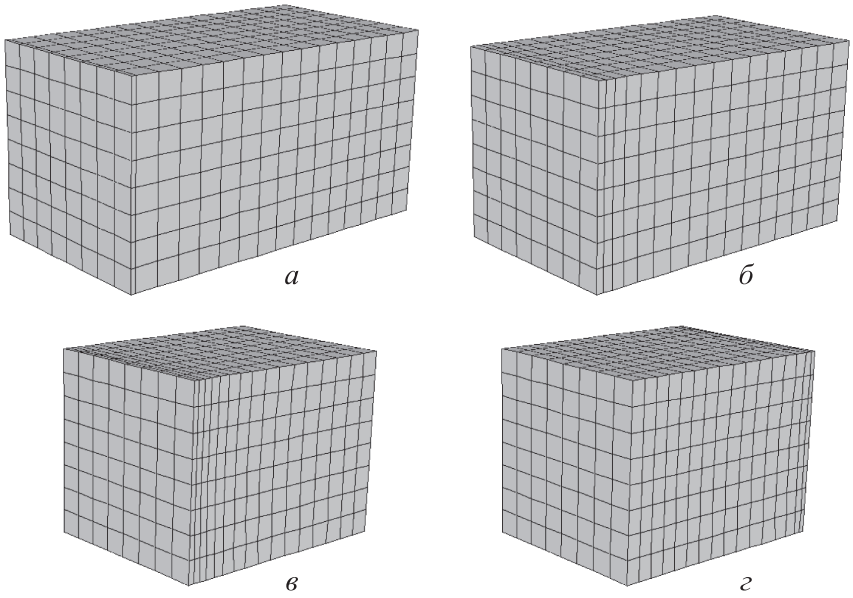


Рис. 2. Деформации сетки: перемещение подвижной зоны на 0,3 м за 3 с (*а*), повторное перемещение на 0,3 м за 3 с (*б*), перемещение на 0,7 м (*в*); уменьшение жесткости виртуальной пружины до 0,02 (*г*)

При снижении Spring Constant Factor с 1 до 0,05 и одновременном увеличении до 0,7 м перемещения за один шаг формируется сетка, приведенная на рис. 2, *в*. Дополнительное уменьшение до 0,02 жесткости при таких же условиях дает результат, приведенный на рис. 2, *г*. Зависимость качества перестроения сетки от этого параметра становится особенно значимой при больших деформациях в течение одного временного шага. В моделях тонких газовых и жидкостных слоев сетка деформируется более неравномерно и влияние значения параметра Spring Constant Factor оказывается труднопредсказуемым.

В случае перемещения подвижной зоны на 0,7 м увеличивали число итераций перестроения от 20 до 100. В результате исследований выявлено, что увеличение числа итераций существенно уменьшает локальные искажения при использовании метода Spring в режиме Smoothing. Однако

чрезмерный рост числа итераций увеличивает вычислительные затраты при частых обновлениях конфигурации сетки. Если характер смещения за один временной шаг невелик, то параметр по умолчанию оказывается достаточным: крупные перемещения распределяются на несколько шагов, и итоговое число итераций обеспечивает требуемую точность.

Для задач газо- и гидростатической смазки целесообразно умеренное увеличение числа итераций (до 100 и более) при одновременном снижении Spring Constant Factor с 1,0 до 0,05 и менее. Такие настройки уменьшают вероятность появления ячеек с отрицательным объемом, что, в свою очередь, может привести к аварийному останову вычислений.

При использовании модели линейно-эластичного твердого тела (Dynamic Mesh → Mesh Methods → Smoothing; Settings → Smoothing → → Method → Linearly Elastic Solid) сетка изменяет форму более равномерно (рис. 3, поз. *1*). Однако, как и на других режимах, необходимо указывать поверхности, допускающие деформацию. Если, например, выходной участок оставить недеформируемым, то сетка в этой зоне искажается (рис. 3, поз. *2*), что может исказить результаты расчета. При сжатии модели существует риск формирования ячеек с отрицательным объемом.

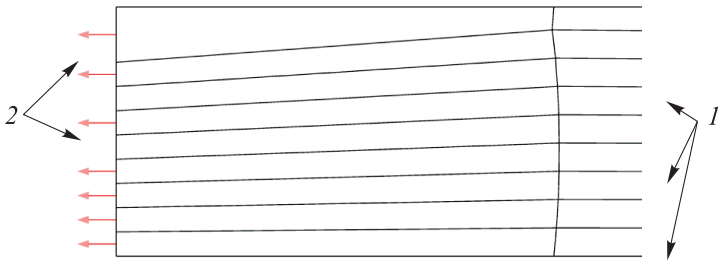


Рис. 3. Изменение сетки в линейно-эластичном режиме:
1 — равномерная деформация; *2* — искажение при недеформируемой выходной зоне

Согласно результатам выполненных исследований, даже при корректных настройках линейно-эластичного режима возможны неприемлемые деформации сетки, поскольку ее изменения не компенсируются при обратных перемещениях ячеек, что особенно заметно в случае значительных относительных смещений.

Режим диффузии является настройкой по умолчанию. Модификация сетки на данном режиме определяется уравнением диффузии

$$\nabla\left(\gamma\nabla\vec{u}\right)=0.$$

Здесь $\vec{u}$ — вектор скорости смещения узлов сетки;

$$\gamma = \frac{1}{d^{\alpha}}$$

— параметр диффузии, характеризующий степень неравномерности деформации, где d — расстояние от границы домена до ячейки; $\alpha \geq 0$ — пользовательский коэффициент, равный по умолчанию 1,5 и задаваемый через меню Dynamic Mesh → Mesh Methods → Settings…; Smoothing → → Method → Diffusion → Advanced… → Diffusion Parameter.

Из уравнения диффузии следует, что основные изменения локализуются в ячейках, примыкающих к движущимся стенкам, поскольку именно в этих областях относительные скорости максимальны. Сетка в этих зонах сгущается. Для оценки влияния режима диффузии перестроения выполнена серия расчетов газового слоя, включающего в себя два плоских участка прямоугольной формы (20 × 100 мм толщиной 20 мкм; 80 × 100 мм толщиной 40 мкм), соединенных плавным переходным элементом. Ступенчатая модель газового слоя приведена на рис. 4. Сетка модели содержала девять слоев по толщине, 24 800 узлов и 21 330 элементов. Ортогональное качество исходных ячеек составляло не менее 0,949.

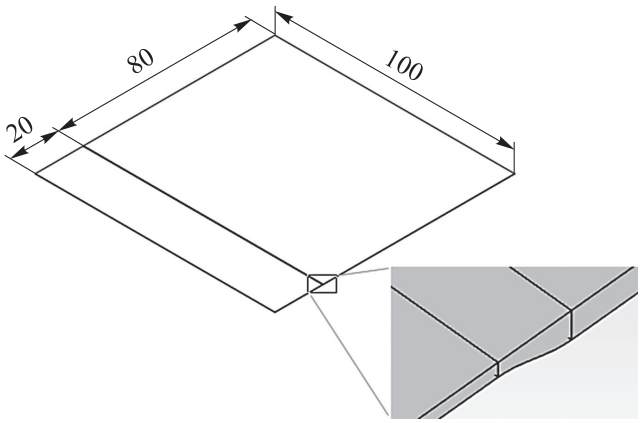


Рис. 4. Ступенчатая модель газового слоя

Отметим, что использование режима диффузии с настройками по умолчанию не подходит для анализа газостатических опор, поскольку, несмотря на полезное сгущение сетки рядом со стенками, разрежение сетки в центральной части расчетной области при использовании режима диффузии (рис. 5) приводит к искажению результатов. Моделирование профиля перемещений при $\alpha = 0$ продемонстрировало равномерность деформаций, более предпочтительную для подобных задач. Однако при последовательных растяжениях–сжатиях газового слоя изменения сетки

носят необратимый характер и имеют тенденцию к накоплению искажений. При значительном сжатии такой сетки может возникнуть отрицательный объем ячейки.

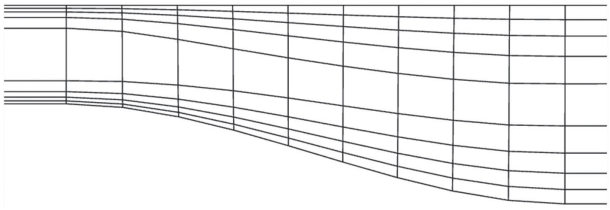


Рис. 5. Разрежение сетки в центральной части расчетной области при использовании режима диффузии

Режим диффузии, как и линейно-эластичный режим, может давать сетку с недопустимыми искажениями (рис. 6). При росте скоростей потока вследствие отсутствия сходимости (например, слишком крупного шага по времени или недостаточного числа итераций) сетка деформируется и дальнейший расчет невозможен.

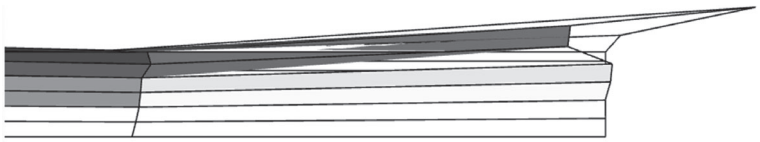


Рис. 6. Недопустимое искажение сетки

Подобные искажения могут проявляться и при других методах перестроения, когда узлы выходят за пределы допустимого расположения. Это возможно при корректном указании типа поверхности (Deforming). Одним из способов устранения проблемы является жесткое указание геометрии поверхности, к которой должны принадлежать узлы зоны. Данная настройка выполнялась через меню Dynamic Mesh Zones (Outline View → → Setup → Boundary Conditions → Dynamic Mesh). Вкладка Geometry Definition позволяет выбрать вариант Definition → plane и задать точку на плоскости и вектор нормали. В более сложных случаях применяется пользовательская геометрическая функция (Definition → user-defined).

При сравнении трех рассмотренных методов выявлено, что для задач газовой смазки наибольшую стабильность обеспечивает режим Spring. Дополнительно может применяться более современный способ сглаживания динамической сетки — метод радиальной базисной функции, суть которого состоит в интерполяции поля перемещений на основе смещений узлов

граничных областей. При этом используется встроенный функционал модуля Fluent, не предполагающий пользовательских настроек.

При моделировании изменения толщины газовых пленок сетка модуля Meshing подвергается деформациям. Хотя их характер применительно к простой модели рассмотрен ранее, в реальных конструкциях с локальными особенностями геометрии возможны чрезмерные деформации отдельных элементов. Такие дефекты могут приводить к ухудшению сходимости, дивергенции или возникновению отрицательных объемов. Из-за специфики моделей газостатических опор поиск таких элементов осложнен. Для их визуализации использовали отображение трехмерных контуров (Outline View → Results → Graphics → Contours), задавая параметры Contours of → → Mesh…, Cell Volume. При отключении опции Global Range и установке Max = 0 в модели отображаются только ячейки с отрицательным объемом.

Для диагностики потенциальных повреждений сетки задавали смещение подвижных зон по заданному профилю, затем выполняли расчет на 100 временных шагах с отключенными уравнениями потока. В качестве базового метода сглаживания использовали метод пружины с пониженным Spring Constant Factor (до 0,05 и менее). В результате исследования определено, что по качеству итоговой сетки базовый метод уступает современному методу Radial Basis Function [35]. Его включение выполнялось через Dynamic Mesh → Mesh Methods → Settings…; Smoothing → Method → → Radial Basis Function. При использовании возможна настройка относительного допуска сходимости (Advanced… → Relative Convergence Tolerance). Повышение данного допуска от 0,00001 до 0,001 и более не ухудшает качество сетки, но заметно ускоряет процесс перестроения. Внешний вид сетки вблизи поворота газового слоя при различных методах перестроения приведен на рис. 7.

Минимальный коэффициент асимметрии ячеек получен для варианта, приведенного на рис. 7, *г*. На основе проведенных исследований можно заключить, что при значительном уменьшении толщины газового слоя (в примере с 14 до 4 мкм) наиболее корректное перестроение сетки обеспечивается методом радиальной базисной функции.

Заключение. Проведен комплексный анализ методов численного моделирования газостатических опор с учетом динамической деформации расчетной сетки и особенностей сопряженных FSI-процессов. Рассмотрены функциональные возможности среды ANSYS Workbench и модуля Fluent, обеспечивающие корректную интеграцию геометрии сетки и настроек динамического расчета. Особое внимание уделено сравнительному исследованию трех основных алгоритмов перестроения сетки — пружинного,

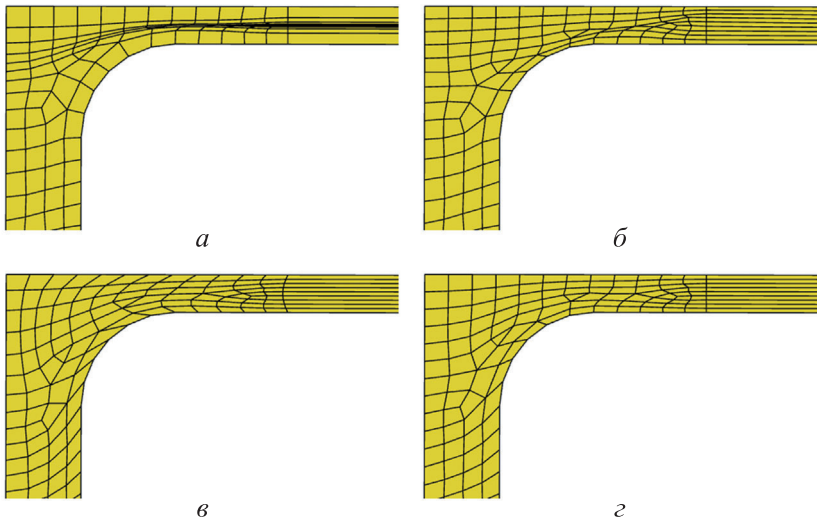


Рис. 7. Внешний вид сетки вблизи поворота газового слоя при различных методах перестроения:
а — диффузионном; *б* — пружины; *в* — линейно-эластичном; *г* — радиальной базисной функции

линейно-эластичного и диффузионного, а также анализу современного метода радиальных базисных функций.

В результате установлено, что классические алгоритмы динамической коррекции ограничены рисками возникновения отрицательных объемов, локальных искажений и ухудшения сходимости при значительных градиентах перемещений или малой толщине газового слоя. В частности, диффузионный и линейно-эластичный методы склонны к чрезмерному разрежению или искажению сетки, что снижает надежность рассчитываемых полей давления и скорости. Метод пружины обеспечивает более высокую устойчивость, однако требует тщательной настройки параметров жесткости и числа итераций, что увеличивает затраты времени на подготовку модели.

Наиболее стабильным и воспроизводимым оказался метод радиальных базисных функций, обеспечивающий равномерное перераспределение узлов и минимальный уровень асимметрии элементов даже при существенных деформациях газового зазора. Его применение позволяет значительно снизить вероятность появления критических дефектов сетки, а также улучшить точность моделирования специфических конструкций рассмотренного типа.

Полученные результаты формируют основу для разработки надежных процедур FSI-моделирования газостатических опор, применимых как в фундаментальных исследованиях, так и в инженерном проектировании

высокоточных измерительных и шпиндельных систем. Использование рекомендованных подходов позволяет повысить качество и устойчивость численного решения, расширяя возможности анализа динамических процессов в газовых смазочных слоях.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Reynolds O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 1886, no. 177, pp. 157–234.

[2] Michael W.A. Approximate methods for time-dependent gas-film lubrication problems. *J. App. Mechanics*, 1963, vol. 30, no. 4, pp. 509–517. DOI: http://doi.org/10.1115/1.3636611

[3] White J.W., Nigam A. A factored implicit scheme for the numerical solution of the reynolds equation at very low spacing. *J. of Lubrication Tech*., 1980, vol. 102, no. 1, pp. 80–85. DOI: http://doi.org/10.1115/1.3251442

[4] Reddi M.M., Chu T.Y. Finite element solution of the steady-state compressible lubrication problem. *J. of Lubrication Tech*., 1970, vol. 92, no. 3, pp. 495–502. DOI: http://doi.org/10.1115/1.3451453

[5] Rohde S.M., Oh K.P. Higher order finite element methods for the solution of compressible porous bearing problems. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 1975, vol. 9, no. 4, pp. 903–911. DOI: http://doi.org/10.1002/nme.1620090409

[6] Mitsuya Y. Molecular mean free path effects in gas lubricated slider bearings: an application or the finite element solution. *Bull. JSME*, 1979, vol. 22, no. 168, pp. 863–870. DOI: http://doi.org/10.1299/jsme1958.22.863

[7] Gao S., Cheng K., Ding H., et al. Multiphysics-based design and analysis of the high-speed aerostatic spindle with application to micro-milling. *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 2015, vol. 230, no. 7, pp. 852–871. DOI: http://doi.org/10.1177/1350650115619609

[8] Su H., Lu L., Liang Y., et al. Thermal analysis of the hydrostatic spindle system by the finite volume element method. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 71, no. 9, pp. 1949–1959. DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-014-5627-8

[9] Gao Q., Lu L., Zhang R., et al. Investigation on the thermal behavior of an aerostatic spindle system considering multi-physics coupling effect. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 102, no. 9, pp. 3813–3823. DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-019-03509-4

[10] Kwan Y.-B.P., Post J.B. A tolerancing procedure for inherently compensated, rectangular aerostatic thrust bearings. *Tribol. Int.*, 2000, vol. 33, no. 8, pp. 581–585. DOI: http://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00109-2

[11] Shinno H., Yoshioka H., Taniguchi K. A newly developed linear motor-driven aerostatic *x–y* planar motion table system for nano-machining. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56, no. 1, pp. 369–372. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.086

[12] Chen G., Ju B., Fang H., et al. Air bearing: academic insights and trend analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 106, no. 3, pp. 1191–1202.
DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-019-04663-5

[13] Wunsch H.L. The design of air bearings and their application to measuring instruments and machine tools. *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1961, vol. 1, no. 3, pp. 198–208.
DOI: http://doi.org/10.1016/0020-7357(61)90003-8

[14] Slocum A., Basaran M., Cortesi R., et al. Linear motion carriage with aerostatic bearings preloaded by inclined iron core linear electric motor. *Precis. Eng.*, 2003, vol. 27, no. 4, pp. 382–394. DOI: http://doi.org/10.1016/S0141-6359(03)00037-0

[15] Jahanmir S., Ren Z., Heshmat H., et al. Design and evaluation of an ultrahigh speed micro-machining spindle. *Mach. Sci. Technol.*, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 224–243.
DOI: http://doi.org/10.1080/10910344.2010.489406

[16] Jahanmir S. Surface integrity in ultrahigh speed micromachining. *Procedia Eng.*, 2011, vol. 19, pp. 156–161. DOI: http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.095

[17] Chang S.H., Chan C.W., Jeng Y.R. Discharge coefficients in aerostatic bearings with inherent orifice-type restrictors. *J. Tribol.*, 2015, vol. 137, no. 1, art. 011705.
DOI: http://doi.org/10.1115/1.4028737

[18] Neves M.T., Schwarz V.A., Menon G.J. Discharge coefficient influence on the performance of aerostatic journal bearings. *Tribol. Int.*, 2010, vol. 43, no. 4, pp. 746–751.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.11.001

[19] Liu Z.S., Zhang G.H., Xu H.J. Performance analysis of rotating externally pressurized air bearings. *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 2009, vol. 223, no. 4, pp. 653–663.
DOI: http://doi.org/10.1243/13506501JET510

[20] Lo C.-Y., Wang C.-C., Lee Y.-H. Performance analysis of high-speed spindle aerostatic bearings. *Tribol. Int.*, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 5–14.
DOI: h.ttp://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.008

[21] Gao S., Cheng K., Chen S., et al. Computational design and analysis of aerostatic journal bearings with application to ultra-high speed spindles. *Proc. Inst. Mech. Eng. C*, 2017, vol. 231, no. 7, pp. 1205–1220. DOI: http://doi.org/10.1177/0954406216639344

[22] Cui H., Wang Y., Yang H., et al. Numerical analysis and experimental research on the angular stiffness of aerostatic bearings. *Tribol. Int.*, 2018, vol. 120, pp. 166–178.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.040

[23] Eleshaky M.E. CFD investigation of pressure depressions in aerostatic circular thrust bearings. *Tribol. Int.*, 2009, vol. 42, no. 7, pp. 1108–1117.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.03.011

[24] Deng C., An C., Wei B., et al. Investigation on the influence of aerostatic pressure upon surface generation in flycutting. *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 2019, vol. 233, no. 4, pp. 1136–1143. DOI: http://doi.org/10.1177/0954405418780164

[25] Lu L., Gao Q., Chen W., et al. Investigation on the fluid–structure interaction effect of an aerostatic spindle and the influence of structural dimensions on its performance. *Proc. Inst. Mech. Eng. J*, 2017, vol. 231, no. 11, pp. 1434–1440.
DOI: http://doi.org/10.1177/1350650117697826

[26] Wang W., Cheng X., Zhang M., et al. Effect of the deformation of porous materials on the performance of aerostatic bearings by fluid-solid interaction method. *Tribol. Int.*, 2020, vol. 150, art. 106391. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106391

[27] Jin X., Xia P., Liu Z., et al. Thermo-hybrid lubrication FSI-CFD model for the static characteristics of hybrid porous tilting pad bearings. *Tribol. Int.*, 2022, vol. 167, art. 107397. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107397

[28] Yan R., Wang L., Wang S. Mechanical research on aerostatic guideways in consideration of fluid-structure interaction. *Ind. Lubr. Tribol.*, 2020, vol. 72, no. 3, pp. 285–290. DOI: http://doi.org/10.1108/ILT-07-2019-0288

[29] Yao J., Yin Z., Chai N., et al. Design of an eccentric vacuum preloaded aerostatic bearing to improve the lateral stiffness of guideway. *Tribol. Trans.*, 2022, vol. 65, no. 2, pp. 321–336. DOI: http://doi.org/10.1080/10402004.2022.2028049

[30] Wen Z.P., Wu J.W., Zhang Y., et al. Improving the rotational stiffness of compact aerostatic guideway by micro-structures optimization. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 55780–55787. DOI: http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913497

[31] Gao Q., Qi L., Gao S., et al. A FEM based modeling method for analyzing the static performance of aerostatic thrust bearings considering the fluid-structure interaction. *Tribol. Int.*, 2021, vol. 156, art. 106849. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106849

[32] Gao Q., Lu L., Chen W., et al. A novel modeling method to investigate the performance of aerostatic spindle considering the fluid-structure interaction. *Tribol. Int.*, 2017, vol. 115, pp. 461–469. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.016

[33] Gao Q., Chen W., Lu L., et al. Aerostatic bearings design and analysis with the application to precision engineering: State-of-the-art and future perspectives. *Tribol. Int.*, 2019, vol. 135, pp. 1–17. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.020

[34] Chang S.H., Chan C.W., Jeng Y.R. Numerical analysis of discharge coefficients in aerostatic bearings with orifice-type restrictors. *Tribology Int.*, 2015, vol. 90, pp. 157–163. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.030

[35] Buhmann M.D. Radial basis functions. *Acta Numer.*, 2000, vol. 9, pp. 1–38. DOI: http://doi.org/10.1017/S0962492900000015

Курзаков Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств СФУ (Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, Свободный пр-т, д. 79).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Курзаков А.С. Разработка и анализ моделей газостатических опор для систем измерения и диагностики. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 3 (156), с. 63–84. EDN: IQXSOM

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF GASOSTATIC BEARING MODELS FOR MEASUREMENT AND DIAGNOSTICS SYSTEMS

A.S. Kurzakov kurzakov@list.ru

SibFU, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract

The article focuses on the development and analysis of numerical models of gasostatic bearings used in high-precision measurement and diagnostic systems. It examines the evolution of methods for calculating gas films — from classical solutions of the Reynolds equation to modern fluid-structure interaction (FSI) models that account for the coupled behavior of the gas flow and elastic structural elements. It is shown that two-way FSI significantly improves the accuracy of predicting load capacity and stiffness when the gas-film thickness is small. A substantial part of the work addresses the organization of coupled simulations in *ANSYS Workbench*, including geometry import, mesh generation, and data-exchange configuration between *Fluent*, *Meshing*, and *Mechanical* modules. Methods of dynamic mesh adaptation under varying gas gaps are analyzed separately: spring-based, linear-elastic, diffusion-based, and radial basis function (RBF) approaches. Based on simulations for reference and complex geometries, the study compares stability, uniformity of mesh deformation, and the ability to prevent negative cell volumes. It is shown that for large deformations, the RBF method provides the highest mesh quality, while the classical spring-based method remains acceptable for moderate displacements with proper parameter tuning. The results support the development of reliable FSI modeling methodologies for gasostatic bearings and improve the accuracy of computations in high-precision measurement systems

Keywords

Gasostatic bearings, dynamic mesh, radial basis functions, numerical simulation, finite element modeling

Received 30.12.2025
Accepted 27.04.2026
© Author(s), 2026

REFERENCES

[1] Reynolds O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 1886, no. 177, pp. 157–234.

[2] Michael W.A. Approximate methods for time-dependent gas-film lubrication problems. *J. App. Mechanics*, 1963, vol. 30, no. 4, pp. 509–517.
DOI: http://doi.org/10.1115/1.3636611

[3] White J.W., Nigam A. A factored implicit scheme for the numerical solution of the reynolds equation at very low spacing. *J. Lubr. Technol.*, 1980, vol. 102, no. 1, pp. 80–85. DOI: http://doi.org/10.1115/1.3251442

[4] Reddi M.M., Chu T.Y. Finite element solution of the steady-state compressible lubrication problem. *J. Lubr. Technol.*, 1970, vol. 92, no. 3, pp. 495–502. DOI: http://doi.org/10.1115/1.3451453

[5] Rohde S.M., Oh K.P. Higher order finite element methods for the solution of compressible porous bearing problems. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 1975, vol. 9, no. 4, pp. 903–911. DOI: http://doi.org/10.1002/nme.1620090409

[6] Mitsuya Y. Molecular mean free path effects in gas lubricated slider bearings: an application or the finite element solution. *Bull. JSME*, 1979, vol. 22, no. 168, pp. 863–870. DOI: http://doi.org/10.1299/jsme1958.22.863

[7] Gao S., Cheng K., Ding H., et al. Multiphysics-based design and analysis of the high-speed aerostatic spindle with application to micro-milling. *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 2015, vol. 230, no. 7, pp. 852–871. DOI: http://doi.org/10.1177/1350650115619609

[8] Su H., Lu L., Liang Y., et al. Thermal analysis of the hydrostatic spindle system by the finite volume element method. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 71, no. 9, pp. 1949–1959. DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-014-5627-8

[9] Gao Q., Lu L., Zhang R., et al. Investigation on the thermal behavior of an aerostatic spindle system considering multi-physics coupling effect. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 102, no. 9, pp. 3813–3823. DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-019-03509-4

[10] Kwan Y.-B.P., Post J.B. A tolerancing procedure for inherently compensated, rectangular aerostatic thrust bearings. *Tribol. Int.*, 2000, vol. 33, no. 8, pp. 581–585. DOI: http://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00109-2

[11] Shinno H., Yoshioka H., Taniguchi K. A newly developed linear motor-driven aerostatic *x–y* planar motion table system for nano-machining. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56, no. 1, pp. 369–372. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.086

[12] Chen G., Ju B., Fang H., et al. Air bearing: academic insights and trend analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 106, no. 3, pp. 1191–1202. DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-019-04663-5

[13] Wunsch H.L. The design of air bearings and their application to measuring instruments and machine tools. *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1961, vol. 1, no. 3, pp. 198–208. DOI: http://doi.org/10.1016/0020-7357(61)90003-8

[14] Slocum A., Basaran M., Cortesi R., et al. Linear motion carriage with aerostatic bearings preloaded by inclined iron core linear electric motor. *Precis. Eng.*, 2003, vol. 27, no. 4, pp. 382–394. DOI: http://doi.org/10.1016/S0141-6359(03)00037-0

[15] Jahanmir S., Ren Z., Heshmat H., et al. Design and evaluation of an ultrahigh speed micro-machining spindle. *Mach. Sc. Technol.*, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 224–243. DOI: http://doi.org/10.1080/10910344.2010.489406

[16] Jahanmir S. Surface integrity in ultrahigh speed micromachining. *Procedia Eng.*, 2011, vol. 19, pp. 156–161. DOI: http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.095

[17] Chang S.H., Chan C.W., Jeng Y.R. Discharge coefficients in aerostatic bearings with inherent orifice-type restrictors. *J. Tribol.*, 2015, vol. 137, no. 1, art. 011705. DOI: http://doi.org/10.1115/1.4028737

[18] Neves M.T., Schwarz V.A., Menon G.J. Discharge coefficient influence on the performance of aerostatic journal bearings. *Tribol. Int.*, 2010, vol. 43, no. 4, pp. 746–751. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.11.001

[19] Liu Z.S., Zhang G.H., Xu H.J. Performance analysis of rotating externally pressurized air bearings. *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 2009, vol. 223, no. 4, pp. 653–663. DOI: http://doi.org/10.1243/13506501JET510

[20] Lo C.-Y., Wang C.-C., Lee Y.-H. Performance analysis of high-speed spindle aerostatic bearings. *Tribol. Int.*, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 5–14. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.008

[21] Gao S., Cheng K., Chen S., et al. Computational design and analysis of aerostatic journal bearings with application to ultra-high speed spindles. *Proc. Inst. Mech. Eng. C*, 2017, vol. 231, no. 7, pp. 1205–1220. DOI: http://doi.org/10.1177/0954406216639344

[22] Cui H., Wang Y., Yang H., et al. Numerical analysis and experimental research on the angular stiffness of aerostatic bearings. *Tribol. Int.*, 2018, vol. 120, pp. 166–178. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.040

[23] Eleshaky M.E. CFD investigation of pressure depressions in aerostatic circular thrust bearings. *Tribol. Int.*, 2009, vol. 42, no. 7, pp. 1108–1117. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.03.011

[24] Deng C., An C., Wei B., et al. Investigation on the influence of aerostatic pressure upon surface generation in flycutting. *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 2019, vol. 233, no. 4, pp. 1136–1143. DOI: http://doi.org/10.1177/0954405418780164

[25] Lu L., Gao Q., Chen W., et al. Investigation on the fluid–structure interaction effect of an aerostatic spindle and the influence of structural dimensions on its performance. *Proc. Inst. Mech. Eng. J.*, 2017, vol. 231, no. 11, pp. 1434–1440. DOI: http://doi.org/10.1177/1350650117697826

[26] Wang W., Cheng X., Zhang M., et al. Effect of the deformation of porous materials on the performance of aerostatic bearings by fluid-solid interaction method. *Tribol. Int.*, 2020, vol. 150, art. 106391. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106391

[27] Jin X., Xia P., Liu Z., et al. Thermo-hybrid lubrication FSI-CFD model for the static characteristics of hybrid porous tilting pad bearings. *Tribol. Int.*, 2022, vol. 167, art. 107397. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107397

[28] Yan R., Wang L., Wang S. Mechanical research on aerostatic guideways in consideration of fluid-structure interaction. *Ind. Lubr. Tribol.*, 2020, vol. 72, no. 3, pp. 285–290. DOI: http://doi.org/10.1108/ILT-07-2019-0288

[29] Yao J., Yin Z., Chai N., et al. Design of an eccentric vacuum preloaded aerostatic bearing to improve the lateral stiffness of guideway. *Tribol. Trans.*, 2022, vol. 65, no. 2, pp. 321–336. DOI: http://doi.org/10.1080/10402004.2022.2028049

[30] Wen Z.P., Wu J.W., Zhang Y., et al. Improving the rotational stiffness of compact aerostatic guideway by micro-structures optimization. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 55780–55787. DOI: http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913497

[31] Gao Q., Qi L., Gao S., et al. A FEM based modeling method for analyzing the static performance of aerostatic thrust bearings considering the fluid-structure interaction. *Tribol. Int*., 2021, vol. 156, art. 106849. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106849

[32] Gao Q., Lu L., Chen W., et al. A novel modeling method to investigate the performance of aerostatic spindle considering the fluid-structure interaction. *Tribol. Int*., 2017, vol. 115, pp. 461–469. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.016

[33] Gao Q., Chen W., Lu L., et al. Aerostatic bearings design and analysis with the application to precision engineering: State-of-the-art and future perspectives. *Tribol. Int*., 2019, vol. 135, pp. 1–17. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.020

[34] Chang S.H., Chan C.W., Jeng Y.R. Numerical analysis of discharge coefficients in aerostatic bearings with orifice-type restrictors. *Tribology Int*., 2015, vol. 90, pp. 157–163. DOI: http://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.030

[35] Buhmann M.D. Radial basis functions. *Acta Numer*., 2000, vol. 9, pp. 1–38. DOI: http://doi.org/10.1017/S0962492900000015

Kurzakov A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Design and Technological Support of Machine-Building Production, SibFU (Svobodniy prospekt 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kurzakov A.S. Development and analysis of gasostatic bearing models for measurement and diagnostics systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 3 (156), pp. 63–84 (in Russ.). EDN: IQXSOM