

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СТУПЕНЧАТОГО ГАЗОВОГО СЛОЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПОРАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО И ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. С. Курзаков 

Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

 kurzakov@list.ru

В статье представлены результаты разработки и исследования подхода, позволяющего построить расчётную сетку тонкого ступенчатого газового слоя, обеспечивающего несущую способность в опорах измерительного и диагностического оборудования высокой точности. Отмечается, что традиционные методы для автоматической генерации расчётной сетки обычно приводят к искажению исходной геометрии и, как следствие, к невозможности корректного моделирования течения газа.

Автором предложена методика, основанная на разложении модели на простые тела, которая позволяет формировать расчётную сетку правильной структуры с требуемой формой и ориентацией элементов. Важным компонентом предложенной методики является комплекс настроек, применяемых к модели с целью обеспечения межзонных интерфейсов, настройки граничных условий, а также для последующей инициализации решения и обеспечения сходимости при расчётах в системе ANSYS Fluent.

В исследовании также приведены результаты, иллюстрирующие ход тестовых расчётов и подтверждающие эффективность разработанного подхода при моделировании состояния смазочного газового слоя.

Ключевые слова: газостатический подшипник, тонкий смазочный слой, структурированная сетка, ANSYS Fluent, межзонные интерфейсы, распределение давления, моделирование течения

Для цитирования: Курзаков А. С. Формирование и исследование модели ступенчатого газового слоя для применения в опорах измерительного и диагностического оборудования. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 102–111. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-102-111>. EDN: NWVIQC.



© Курзаков А. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FORMATION AND INVESTIGATION OF A STEPPED GAS-LAYER MODEL IN MEASURING AND DIAGNOSTIC EQUIPMENT SUPPORTS

A. S. Kurzakov 

Siberian Federal University,
Svobodnyy Ave., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

 kurzakov@list.ru

The article demonstrates the results of the development and research of an approach that allows constructing a computational grid of a thin stepped gas layer that provides load-bearing capacity in the supports of high-precision measuring and diagnostic equipment. Moreover, it is noted that traditional methods for automatic generation of the computational grid usually lead to distortion of the initial geometry and, as a result, to the impossibility of correct modeling of the gas flow.

The author suggests a method based on decomposing the model into simple bodies, which allows forming a computational grid of the correct structure with the required shape and orientation of the elements.

An important component of the proposed methodology is a set of settings applied to the model in order to provide interband interfaces, adjust boundary conditions, as well as for subsequent initialization of the solution and ensure convergence in calculations in the ANSYS Fluent system.

In addition, the author presents the results that demonstrate the course of test calculations and validate the effectiveness of the proposed approach during the simulation of the lubricating gas layer.

Keywords: gasostatic bearing, thin lubricating layer, structured mesh, ANSYS Fluent, zone interfaces, pressure distribution, flow modeling

For citation: Kurzakov A. S. Formation and investigation of a stepped gas-layer model in measuring and diagnostic equipment supports. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):102–111. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-102-111>. EDN: NWVIQC. (In Russ.).



© Kurzakov A. S., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Газостатические опоры известны с конца XIX в., когда были получены результаты первых исследований в данной области. Известные работы, отражающие исследования газовых подшипников узлов вращения, а также уплотнений для направляющих различной конфигурации, послужили основой при дальнейшей разработке газостатических и газодинамических опор различных разновидностей [1, 2]. Теория расчёта газовых опор получила значительное развитие во второй половине XX в., когда методы расчёта и анализа газовых опор были обобщены, а также были усовершенствованы подходы к решению нелинейных уравнений, описывающих течение газа в несущем слое [3]. В дальнейшем были разработаны численные схемы блочного типа, а также различные методы линеаризации, позволившие получать численные решения уравнения Рейнольдса [4, 5]. Кроме этого, были предложены методы орбит и скачков нагрузки, призванные обеспечить возможность моделирования динамического состояния ротора на газовом подвесе [6, 7].

Совершенствование методик расчёта, а также развитие доступной вычислительной техники привело к усложнению используемых моделей, в которые был введён учёт геометрических отклонений, значительных нелинейностей и эффектов неустойчивости различного типа. Проведённые исследования позволили заключить, что даже незначительные изменения геометрии поверхностей, формирующих газовый слой, могут приводить к принципиальным изменениям в основных характеристиках опор (прежде всего, несущей способности и податливости) [8, 9]. В то же время развитие теории газовой смазки продолжало основываться на подходах, заложенных Рейнольдсом.

С развитием промышленности ужесточались требования к точности, достоверности и надёжности измерительного и диагностического оборудования. Данным тенденциям применение газостатических опор полностью соответствовало, поэтому такие опоры нашли применение в качестве опор высокоточных шпинделей приборов, в координатно-измерительных машинах, в установках для изготовления микросхем с использованием литографии и во многих подобных системах, где критически важным оказывается возможность реализации по-

зиционирования с точностью до долей микрометра и даже до нанометров^{1,2} [10, 11].

В оптическом приборостроении, а также при реализации технологических процессов микрообработки ключевую роль играет подавление возможных вибраций, при этом газостатические опоры проявляют свои преимущества в полной мере. Кроме того, в подобных применениях они обеспечивают очень высокую повторяемость позиционирования и стабильность перемещений, что обусловлено полным отсутствием трения покоя и чрезвычайно малым трением скольжения [12]. Газостатические опоры успешно применяются в контактных измерительных устройствах (профилометры, стилусные датчики). В данных приборах востребованы стабильность характеристик и отсутствие трения, а также возможность обеспечить практически постоянную величину нагрузки на чувствительный элемент [13–15].

В современных приборах высокой точности, требующих обеспечения прецизионных перемещений, находят применение газостатические направляющие с дросселями типа «простая диафрагма», характеризующиеся наличием карманов малого объёма. При корректном выборе параметров таких опор возможно значительное улучшение динамических характеристик, а также подавление микровибраций, обусловленных флуктуациями газового потока [16–18]. Наличие работ, направленных на анализ и исследование особенностей возникающих турбулентных режимов и вихревых потоков вблизи питающих отверстий, в частности при наличии микроканалов, говорит об актуальности исследований, направленных на моделирование особенностей потока в масштабах долей микрометра [19–23].

Применение газостатических опор в обрабатывающем оборудовании, используемом в машиностроении, носит ограниченный характер. Это объясняется тем, что в силу отсутствия жидкой либо пластичной смазки значительно возрастает риск повреждения поверхностей опоры при непреднамеренном контакте движущихся узлов, поскольку традиционная механическая обработка зачастую характеризуется достаточно жёсткими режимами эксплуатации. Напротив, измерительное либо диагностическое оборудование используется преиму-

¹ Пинегин С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой. Москва: Машиностроение, 1984. 215 с.

² Пешти Ю. В. Газовая смазка. Москва: Изд-во МГТУ, 1993. 381 с. ISBN 5-7038-0942-8.

щественно в условиях измерительных лабораторий, а эксплуатация данного оборудования осуществляется исключительно подготовленным персоналом. Соответственно, условия работы газовых опор, потенциально применяемых в оборудовании данных лабораторий, оказываются гораздо более безопасными с точки зрения сохранности рабочих поверхностей. Другим немаловажным фактором является качество подготовки воздуха, требуемого для работы газостатических опор, который может осушаться и очищаться специальным оборудованием лаборатории в противовес техническому сжатому воздуху, используемому в основных пневматических сетях машиностроительного предприятия.

Если вернуться в рамках данного краткого обзора к развитию вычислительной техники и сопутствующих технологий, можно отметить, что в 1960–1970-х гг. наблюдался активный рост числа исследований, связанных с использованием численного моделирования. Внимание исследователей в области газовой смазки было направлено на численное решение уравнений течения смазочной среды и соответствующее определение величин, характеризующих поток, а также на исследование устойчивости [24–26]. Однако нельзя не отметить, что требуемые затраты вычислительных ресурсов остаются весьма существенными несмотря на прогресс ЭВМ. Методы, основанные на вычислительной гидро- и газодинамике (Computational Fluid Dynamics, CFD), позволяют достичь высокой точности при осуществлении численного моделирования, а также использовать удобные для исследователей средства анализа и визуализации потоков, однако их использование сопряжено со сложностями настройки моделей и с необходимостью обеспечить значительные вычислительные мощности [27]. Данные обстоятельства ограничивают применение методов CFD в случае необходимости выполнения массовых расчётов, например, при решении задач оптимизации. В известной степени альтернативой являются конечно-элементные методы (Finite Element Method, FEM), которые позволяют разрабатывать и исследовать модели газовых опор, хорошо согласующиеся с моделями механики деформируемого тела, а также с мультифизическими моделями, учитывающими тепловые, электрические и другие процессы [28, 29].

Одним из перспективных направлений развития конечно-элементного моделирования является использование р-FEM формулировок, подразумевающих повышение порядка полиномов, аппроксимирующих функции распределения параметров потока между ячейками. Этим обеспечивается быстрое достижение непрерывности давлений на границах ячеек, а также получение высокой точности при моделировании потоков, характеризующихся значительными градиентами. Также известны работы, в которых подход на основе FEM используется комплексно — не только для моделирования газовых потоков, но и для моделирования взаимодействующих с ними твердотельных структур. В результате упрощается и повышается точность анализа обратного влияния деформации этих структур на характеристики рабочего состояния газовых опор [30–32]. Соответственно, такое объединение в общей вычислительной среде программных модулей, реализующих решение уравнений газового потока, с модулями расчёта состояния деформированного твёрдого тела позволяет исследовать весь комплекс значимых параметров приборов и определять ре-

комендуемые либо оптимальные значения данных параметров в условиях, во-первых, сложной геометрии, с учётом реальных погрешностей изготовления узлов, и, во-вторых, ограниченных временных и вычислительных ресурсов [33–35].

Определение цели и задач

Газостатические опоры широко применяются в измерительном и диагностическом оборудовании, что объясняется их существенными преимуществами перед традиционными контактными опорами и значительным объёмом проведённых в прежние годы исследований и накопленных знаний, в том числе в области вычислительного моделирования, базирующегося на основе построения расчётных сеток для несущих газовых слоёв с характерной геометрией. В то же время, известные публикации направлены, прежде всего, на развитие и совершенствование различных математических моделей.

Распространённые системы конечноэлементного моделирования предлагают инструменты, обеспечивающие возможность выполнения автоматической генерации сетки, однако их использование приводит к неприемлемому искажению геометрии получаемого слоя и, как следствие, к ошибкам либо невозможности дальнейшего моделирования. Соответственно, возникает необходимость в разработке специализированной методики дискретизации расчётного домена, обеспечивающей требуемую форму и ориентацию элементов домена.

Следовательно, целью данного исследования является разработка воспроизводимого метода построения расчётной сетки, пригодной для эффективного моделирования газостатических опор при обеспечении сходимости и устойчивости расчёта.

Основная часть

Подача смазки (жидкости либо газа) в бесконтактные опоры выполняется через совокупность каналов, карманов, дросселей и других элементов, имеющих разнообразную форму, а также масштаб. Суммарный объём упомянутых элементов для газостатических опор имеет принципиальное значение, поскольку наличие значительных объёмов приводит к неустойчивости по причине сжимаемости газа (очевидно, для гидростатических опор данное обстоятельство имеет гораздо меньшее значение). Соответственно, в случае гидростатических опор создание сеток для многих элементов тракта подачи смазочной среды обычно не вызывает затруднений. В то же время для газостатических опор, содержащих в конструкции щелевые дроссели, практически весь тракт нагнетания представляет собой тонкие газовые слои толщиной 20 мкм и менее. В данной ситуации использование автоматических средств генерации сетки оказывается невозможным в силу ряда обстоятельств.

Если для описанных задач используется комплекс ANSYS, в нём применяется специальная функция, обеспечивающая расширенное управление размерами ячеек (Advanced Size Function), которая позволяет упростить получение приемлемой для расчётов сетки. Совокупность параметров данной функции настраивается автоматически в модуле Meshing на основе того, какая физическая модель (твердотельная либо жидкостная) была задана. В случае задачи газовой смазки была выбрана модель CFD. Модуль Meshing, будучи использованным в качестве компонента системы Fluid Flow, представленного в проекте среды ANSYS Workbench, получа-

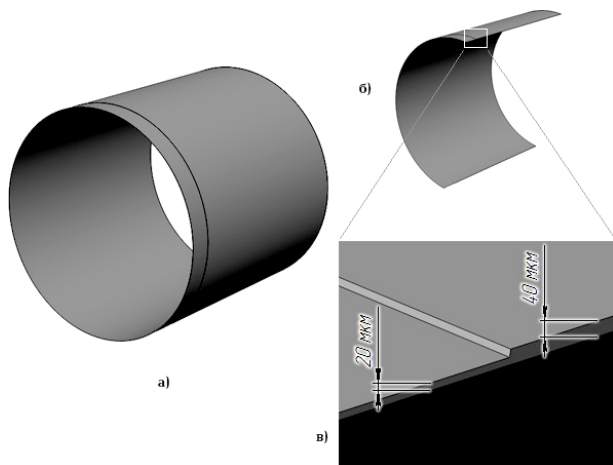


Рис. 1. Моделируемый ступенчатый слой:
а) общий вид; б) разрез вдоль оси вращения;
в) увеличенное изображение ступени
Fig. 1. Modeled stepped layer:
a) general view; б) cross-sectional view along
the axis of rotation;
в) enlarged view of the step
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

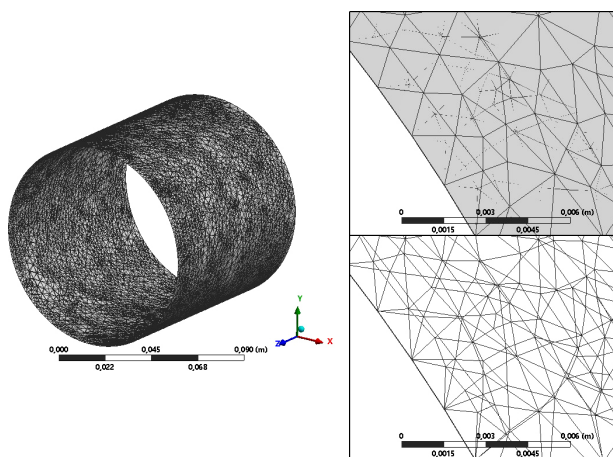


Рис. 2. Сетка из тетраэдрических элементов
Fig. 2. Tetrahedral mesh
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

ет соответствующие настройки автоматически. В то же время, если модуль Meshing представлен в виде самостоятельного компонента среды Workbench, режимом создания сетки является значение по умолчанию (Mechanical), и в этом случае расширенное управление размерами ячеек оказывается отключённым. Данное обстоятельство принципиально важно при создании сетки для модели газового потока, поскольку получаемая при этом сетка оказывается практически непригодной для моделирования.

При выполнении данного исследования производилось построение конечно-элементной сетки для фрагмента несущего слоя в виде части цилиндрического подшипника Адамса, имеющего ступенчатую конфигурацию (рис. 1). Кольцевая область имела длину в осевом направлении 100 мм при таком же диаметре.

Запуск генерации расчётной сетки в модуле ANSYS Meshing при включённом режиме CFD приводит к тому, что создаётся сравнительно про-

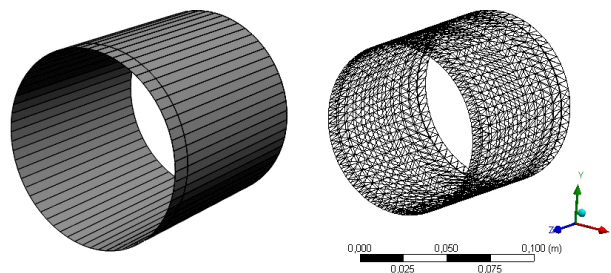


Рис. 3. Многогранный слой
Fig. 3. Multisurface layer
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

стая сеточная структура, содержащая 11082 узла и 32442 элемента. Однако, как показывает анализ, качество сгенерированной сетки является неприемлемым (рис. 2). Можно отметить, что полученная сетка в основном образована тетраэдрами. Их размещение в пределах исходной геометрии возможно только при наклонном положении рёбер и граней. В то же время ожидаемое направление течения газового потока, очевидно, должно располагаться вдоль оси вращения модели. В результате наклонные рёбра и грани пересекают поток под острым углом. По этой причине расход смазочной среды между ячейками учитывается некорректно. Ещё более существенным фактором является то, что происходит автоматическое упрощение исходных геометрических форм: ступень, присутствующая в исходной геометрии (рис. 1в), исчезает. В результате возникает новая конфигурация наружной поверхности, и общая форма несущего слоя подшипника нарушается.

Поскольку автоматическое упрощение сетки (defeaturing) является отключаемой опцией, можно отказаться от его использования. Такой вариант позволяет избежать уничтожения ступени, однако в этом случае при генерации сетки имеет место попытка создания чрезмерно большого количества элементов. Соответственно, в то время как для многих задач анализа течения газа автоматическая генерация является вполне приемлемым вариантом, для задач газовой смазки при характерной толщине газовых тел 20 мкм и менее получаемые сетки делают расчёт в ANSYS Fluent невозможным по причине исчезновения важных компонентов геометрии.

С целью решения обозначенной проблемы был разработан подход, предусматривающий использование многогранного тела вместо гладкого цилиндра (рис. 3). В результате все рёбра гладкой геометрии приобретают исключительно прямолинейную форму. В рассматриваемом здесь примере было принято разбиение внутренней поверхности, образующей несущий слой, на 64 грани. Аналогичным образом было выполнено разбиение совокупности внешних граней. Все торцевые поверхности были представлены тремя объединёнными гранями, что составило 195 исключительно плоских граней. Для такой модели возможна генерация сетки в модуле Meshing с использованием всех параметров, задаваемых по умолчанию, однако анализ показывает, что сглаживание ступени также имеет место. Если же отключить режим автоматического упрощения, автоматическая генерация сетки происходит успешно и с сохранением ступени.

Однако данная сетка вновь строится на основе тетраэдров, пересекающих слой под острым углом,

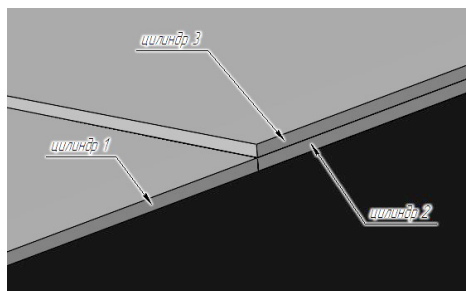


Рис. 4. Стык простых цилиндрических тел (разрез)

Fig. 4. Junction of simple cylindrical bodies (cross-section)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

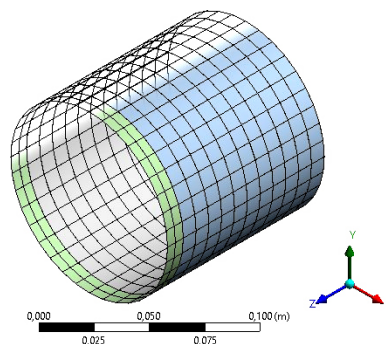


Рис. 5. Сетка, сгенерированная на основе простых цилиндрических тел

Fig. 5. Mesh generated from simple cylindrical bodies

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

что приводит к невозможности корректного расчёта параметров потока в модуле Fluent. На основе проведённых исследований был сделан вывод о том, что доступные способы автоматического создания расчётной сетки не могут обеспечить её приемлемое качество.

Помимо рассмотренных инструментов были исследованы и другие подходы к созданию требуемой структуры сетки. Одним из таких подходов является использование виртуальной топологии. Он состоит в добавлении дополнительных точек и рёбер на исходной модели, однако подобные действия для моделей, используемых в газовой смазке, оказываются чрезвычайно трудоёмкими. Кроме того, виртуальная топология размещается на внешних поверхностях и слабо влияет на внутреннюю структуру сетки. В качестве ещё одной альтернативы был рассмотрен метод переноса геометрии. Его суть состоит в реализации возможности копирования контуров рёбер с одних поверхностей на другие. Однако для тонких слоёв такой перенос происходит некорректно. Следовательно, применение подхода, называемого многозонным, также оказывается недоступным.

Получение расчётной сетки, отвечающей требованиям моделирования газовых потоков в тонком слое, в автоматическом режиме оказывается возможным лишь в том случае, когда исходная геометрия газовых слоёв представлена в виде совокупности максимально упрощённых тел. Для такой геометрии модуль Meshing может качественно сформировать требуемые элементы даже при малой толщине слоя. Наиболее простым элементом в данном контексте можно было бы считать гексаэдр, однако для их получения потребовалось бы разделить многогранное тело на весьма большое количество частей (в упоминавшемся примере возникло бы 192 гексаэдра). Если же представить рассматриваемую модель в виде совокупности цилиндров, то в нашем случае таковых окажется только три.

Соответственно, рассматриваемая модель была разбита на три цилиндрических тела, каждое из которых имело толщину 20 мкм (рис. 1). При общей длине моделируемого слоя 100 мм два больших цилиндра, вложенных один в другой, имеют длину 90 мм в осевом направлении, а малый цилиндр (по конфигурации он представляет собой кольцо, но здесь будем использовать общий термин) пристыкован к большому внутреннему цилиндру с меньшим диаметром (рис. 4). В результате для указанных простых тел становится возможной автоматическая генерация расчётной сетки, не препятству-

ющей корректному выполнению моделирования. При этом формируются элементы гексаэдрической формы, грани которых оказываются практически перпендикулярны направлению потока. Здесь следует отметить, что направлением ещё большего упрощения геометрии является использование объединённого цилиндра длиной 90 мм с толщиной слоя, равной 40 мкм. Однако в таком случае топология с малого цилиндрического слоя переносится на торец большого объединённого цилиндра и имеет место (неуспешная) попытка развить эту топологию в большом цилиндре, а генерация сетки в автоматическом режиме оказывается невозможной.

Полученная описанным способом сетка содержит в совокупности 1944 узла и 864 элемента (рис. 5). В зоне больших цилиндров присутствует два элемента по толщине, а в зоне малого слоя — один элемент по толщине слоя. Данная сетка характеризуется высоким ортогональным качеством и может быть успешно использована для моделирования течения газа в модуле Fluent.

Модуль Fluent при выполнении данного исследования являлся частью проекта, сформированного в среде ANSYS Workbench. Загрузка сгенерированной сетки в этот модуль выполнялась из предшествующих модулей проекта, представленных ячейками «Geometry» и «Mesh». Кроме того, связь между модулями проекта обеспечивала передачу любой другой вспомогательной информации. В данной работе активно использовались именованные выборы, позволяющие на этапе разработки геометрической модели газового тела заранее подготовить процесс автоматического присвоения корректных типов зонам модели.

Движение смазки в газовом слое обеспечивается заданием корректных граничных условий. Для рассматриваемой здесь модели вход газа осуществляется со стороны свободного торца больших цилиндров (рис. 5). Указанные торцы были включены в соответствующий именованный выбор. С целью автоматизации определения модулем Fluent типа границ в названиях именованных выборов были использованы особые префиксы. В целом возможно задание данным способом различных типов границ, например, скорости, массового расхода, давления. В рассматриваемом случае известной величиной является давление, поэтому использовались соответствующие префиксы pressure_inlet (входное давление) и pressure_outlet (давление на выходе).

Поскольку в модели присутствует два больших цилиндра, были использованы имена NS_Pressure_Inlet1 и NS_Pressure_Inlet2. На выходном торце, расположенном на малом цилиндре, использовалось имя NS_Pressure_Outlet. Здесь содержится дополнительный префикс «NS» (Named Selection, именованный выбор), который для распознавания модулем генерации сетки (Meshing) не является обязательным. Однако данный префикс применяется специальными модулями ANSYS, встраиваемыми в сторонние системы трёхмерного моделирования. В рамках данного исследования был использован пакет SolidWorks, а на этапе построения модели в данном пакете были заданы упомянутые имена, которые в дальнейшем автоматически распознаются (при задании соответствующей настройки) в компонентах рабочего проекта среды Workbench.

Наличие именованных выборов в конечном итоге приводит к тому, что модуль Fluent назначает корректные типы граничных условий соответствующим поверхностям модели. В ходе данного исследования на входных зонах было задано давление (Gauge Total Pressure), равное 0,2 МПа. Также задавалось значение исходного давления, используемое в процессе стандартной инициализации решения. Как показали исследования, если оставить данное давление нулевым (значение по умолчанию), получаемое при инициализации поле давлений существенно искажается, что резко увеличивает продолжительность вычислений.

Поскольку расчётная сетка построена на основе самостоятельных цилиндрических тел (рис. 1), геометрически соприкасающиеся зоны модели не трактуются в модуле Fluent в качестве взаимно проницаемых. В результате возникает необходимость ручного задания интерфейсов, которые организуют взаимосвязь зон для обеспечения беспрепятственного протекания газового потока.

Следует отметить, что формирование проницаемых границ между зонами в модуле Fluent также доступно, для чего требуется выполнение нескольких условий. Прежде всего было выполнено объединение трёх тел модели в единую деталь. Для этого была использована соответствующая команда собственного редактора комплекса ANSYS DesignModeler. Кроме того, была осуществлена специальная настройка в модуле Meshing, предотвращающая создание соединений (Connections) на этапе импорта геометрии. Таким образом, в модуль Fluent не передаются какие-либо предварительно созданные контактные области. В дополнение к упомянутым действиям выполнялась проверка модели на отсутствие интерфейсных зон (тип «interface»), которые могут привести к невозможности автоматического создания стыков в модели.

При соблюдении упомянутых условий модуль Fluent может автоматически распознать все пространственные зоны как компоненты одной общей детали. На стыках исходных тел формируются зоны внутреннего типа «interior», не препятствующие протеканию газового потока и обеспечивающие возможность выполнения моделирования течения.

В качестве альтернативы редактора параметрического моделирования ANSYS DesignModeler был рассмотрен редактор ANSYS SpaceClaim, основанный на принципах прямого моделирования. Анализ показал, что данный редактор не обладает функционалом формирования общей детали из нескольких тел. Использование соответствующей команды формирования компонента (Move To New

Component) данного редактора выполняет группировку, но получаемая группа не трактуется модулем Meshing в качестве одной детали. Соответственно, геометрия газового тела не передаётся далее в модуль Fluent в качестве единого тела с зонами. Помимо указанного обстоятельства, редактор SpaceClaim не обладает функционалом изменения типа объекта с твердотельного на жидкостный. Следовательно, соответствующие настройки модели на последующих этапах требуется выполнять вручную, иначе корректное построение сетки предложенными методами окажется недостижимым.

Полученная описанным способом сетка газового слоя, позволяющая реализовать движение газа между зонами расчётного домена, была использована для расчёта в стационарном (steady) режиме, который задавали в разделе General → Solver → Time. Материалом рабочей среды являлся воздух. Важное значение может иметь формулировка плотности материала, и в рамках данной работы были исследованы характеристики вычислительного процесса в случае использования постоянной плотности, закона идеального газа либо сжимаемой жидкости. Однако исследования позволили сделать вывод, что в случае стационарного режима расчёта получаемое распределение давления в газовом слое практически не зависит от этого обстоятельства.

Известно, что количество выполняемых итераций (всего при стационарном расчёте либо на каждый временной шаг при нестационарном) требуется задать вручную. В случае достижения сходимости (отслеживаемой по величине конечных разностей) решения выполняются не все итерации, а происходит завершение вычислений (либо переход к следующему шагу).

Однако при решении нестационарных задач, если сходимость не достигается на данном временном шаге, весьма вероятным оказывается расхождение расчёта на последующих шагах. Во избежание этого приходится задавать увеличенное количество итераций (в нашем случае — 100 и более). Проблемой является то, что в силу специфики моделирования газостатических опор, решения, получаемые на последовательных временных шагах, мало отличаются. По этой причине возникает значительное масштабирование конечных разностей, в результате чего задаваемый по умолчанию порог сходимости (имеет значение 0,001) оказывается недостижимым. Таким образом, на каждом шаге (при нестационарном расчёте) происходит выполнение всех запланированных итераций. Имеющиеся средства автоматического отслеживания выполняют проверку конечных разностей, но их значения искажаются масштабированием.

Как показывают исследования, масштабированные конечные разности по компонентам скорости x и y , а также по непрерывности потока заметно снижаются в течение первых 10–15 итераций (рис. 6). Конечные разности по компоненте скорости z продолжают снижаться в течение примерно 40 итераций. Соответственно, значимая часть вычислений практически выполняется в течение 15–40 итераций, и дальнейшие расчёты являются излишними, значительно увеличивая затраты времени.

С целью решения обозначенной проблемы потребовалось отключить масштабирование конечных разностей (опция Solution → Monitors → Residual → Residual Values → Scale). При такой настройке модуль Fluent происходит мониторинг абсолютных,

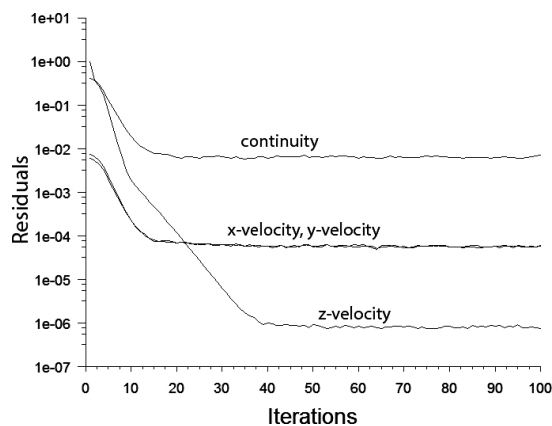


Рис. 6. Масштабированные конечные разности
Fig. 6. Scaled finite differences
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

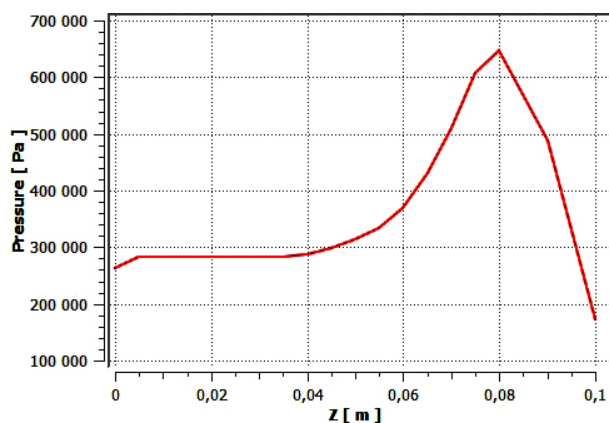


Рис. 7. Распределение давления по координате Z
для несоедшегося решения
Fig. 7. Pressure distribution along the Z coordinate
for a non-converged solution
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

а не масштабированных конечных разностей, что позволяет констатировать сходимость решения за примерно 18 итераций, что даёт пятикратную экономию времени при максимальном количестве итераций равном 100.

Как было указано ранее, выбор модели плотности рабочей среды практически не влияет на распределение давлений в газовом слое при стационарном режиме. Однако в случае нестационарной задачи модель плотности существенно влияет на сходимость. Для исследования данного феномена выполнялось моделирование сжатия газового прямоугольного параллелепипеда, у которого торцевая стенка смещалась со скоростью 0,1 м/с. Для оценки сходимости анализировалась динамика изменения давления, плотности и температуры, а также требуемое количество итераций на каждом временном шаге. При настройках по умолчанию (временной шаг 0,1 с и 20 итераций на каждом шаге) сходимость при расчётах не достигалась. Более того, при увеличении количества итераций до 200 и даже до 500 не наблюдалось значимого снижения конечных разностей, и только при их дальнейшем увеличении сходимость достигалась. Отсюда можно сделать вывод, что требуется особая настройка критериев оценки сходимости, а также режима её отслеживания.

Тестовые расчёты выполнялись в основном при задании плотности воздуха по закону идеального газа. В случае задания плотности по закону сжимаемой жидкости скорость сходимости возрастала, и она достигалась за 571 итерацию. Исследования показали, что скорость сходимости определяется, прежде всего, величиной временного шага. Так, десятикратное уменьшение шага (до 0,01 с) приводило к достижению сходимости за несколько десятков итераций. Дополнительное уменьшение шага по времени уже не приводило к экономии вычислительных ресурсов: например, несмотря на то, что при каждом шаге в 0,001 с сходимость достигалась примерно за три итерации, их общее количество увеличивалось до 3267. При этом на каждом временном шаге происходит перестроение сетки расчётного домена, что приводит к дополнительным затратам общего расчётного времени.

В качестве фактора, заметно влияющего на сходимость вычислений, следует также отметить ре-

жим точности расчётов. При стандартной точности, используемой по умолчанию, сходимость итераций достигается гораздо медленнее, чем при выборе режима двойной точности (Double Precision). Данный режим является рекомендуемым при выполнении связанных расчётов, направленных на анализ процесса взаимодействия газового и твёрдого тела.

С целью анализа динамики скалярных значений, характеризующих свойства газового потока, были использованы дополнительные средства (мониторы), создаваемые в соответствующем разделе модуля Fluent (Solution → Monitors → Surface Monitors → Create). Для каждого монитора задавали способ вывода данных, выбирали отслеживаемую величину и зоны модели, в которых данная величина должна оцениваться. В стационарных задачах задавали количество итераций и параметры вывода текущих данных, характеризующих ход вычислений (например, частота вывода информации в консоль и на графики конечных разностей). При нестационарном расчёте в дополнение к упомянутым настройкам задавали временной шаг и количество таких шагов, суммарно определяющих продолжительность моделируемого переходного процесса.

Сравнение результатов расчётов, выполненных при различных исходных условиях, выполняли при помощи инструментов, встроенных в модуль Fluent и в среду Workbench. В противном случае требуется индивидуальная выгрузка результатов и их обработка во внешнем приложении. При использовании встроенного модуля постобработки CFD-Post выполняли отслеживание промежуточных результатов расчёта, которые позволяют анализировать особенности процесса вычислений ещё до его завершения. В качестве примера можно рассмотреть распределение давления вдоль осевой координаты z при недостаточном количестве выполненных итераций (рис. 7). Здесь можно отметить, что давления в газовом слое чрезмерны и не соответствуют ожидаемому распределению.

Приведённая здесь характеристика распределения давлений может в конечном итоге негативно сказаться на результатах связанного расчёта, поскольку при передаче нагрузок, создаваемых этим давлением, в модуль твердотельного моделирования (Transient Structural), реакция структуры будет некорректной. Соответственно, устойчивость связан-

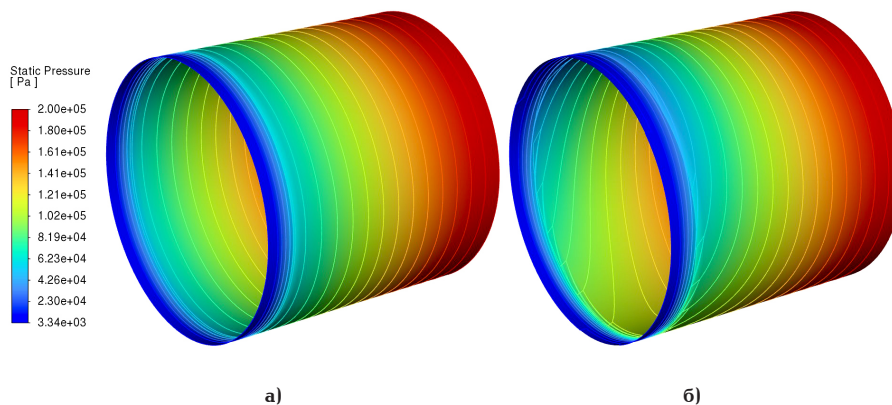


Рис. 8. Распределение давлений:
а) без эксцентриситета; б) с эксцентриситетом 15 мкм
Fig. 8. Pressure distributions:

а) without eccentricity; б) with an eccentricity of 15 μm

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

ного расчёта будет отсутствовать. Данный пример подчёркивает необходимость получения сошедшегося решения не только на каждом временном шаге, но и на каждой итерации связанного расчёта.

С использованием полученной модели газового слоя были выполнены расчёты домена, по результатам которых были построены контуры распределения давлений при сошедшемся решении (рис. 8).

При отсутствии эксцентриситета (рис. 8а) распределение давлений соответствует симметричной модели, при этом давление в зоне ступени составляет около 0,7 МПа. При смещении внутренней поверхности, формируемой цапфой вала на 15 мкм (максимально возможное смещение до контакта здесь составляет 20 мкм), давления перераспределяются (рис. 8б). При этом вертикальная реакция, действующая на цапфу, составляет 177 Н. Можно отметить, что полученные значения соответствуют ожидаемому результату.

Заключение

Представленное исследование демонстрирует, что традиционно используемые автоматические методы генерации расчётной сетки в модуле ANSYS Meshing не позволяют получить приемлемого результата в случае моделирования тонких ступенчатых газовых слоёв по причине нарушения структуры моделируемого объекта и невозможности выполнения расчётов во Fluent. В этом случае требуется специальный подход, исключающий возможность автоматического упрощения исходной геометрии газового слоя и формирование тетраэдрических элементов.

Исходная модель была преобразована в набор простых тел, что позволило получить качественно структурированную расчётную сетку, грани элементов которой ориентированы в основном перпендикулярно направлению газового потока. Выполненный анализ способов формирования интерфейсов между зонами показал неприемлемость типового определения контактных зон, однако был предложен метод настройки модели, позволяющий воспользоваться автоматическим распознаванием таких зон с получением проницаемых интерфейсов.

Расчёты, выполненные на полученной модели, продемонстрировали, что на скорость сходимости решения и на затраты машинного времени значительное влияние имеют особенности инициализации решения, настройка мониторинга крите-

риев сходимости, величина временного шага. Для моделей газовых слоёв рекомендовано снижение временного шага (до определённого уровня), оценка абсолютных значений конечных разностей, а также использование режима двойной точности. Сгенерированная сетка в совокупности с рекомендованными настройками расчётного модуля позволили получить корректное распределение давлений в ступенчатом слое, что открывает возможность дальнейшего использования модели в связанных расчётах.

В результате, разработана воспроизводимая методика получения конечно-элементной модели ступенчатой газостатической опоры, имеющая практическую значимость для задач проектирования и исследования газовых опор измерительного и диагностического оборудования.

Список источников / References

1. Gross W. A. Gas Film Lubrication. New York: John Wiley & Sons, 1962. 413 p.
2. Hamrock B. J. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. New York: McGraw-Hill, 2004. 728 p. ISBN 9780203021187.
3. Шейнберг С. А. Газовая смазка подшипников скольжения // Трение и износ в машинах. 1953. № 8. С. 107–204. Sheynberg S. A. Gazovaya smazka podshipnikov skol'zheniya. *Treniye i Iznos v Mashinakh*. 1953;8:107–204. (In Russ.).
4. Castelli V., Pirvics J. Review of Numerical Methods in Gas Bearing Film Analysis. *Journal of Lubrication Technology*. 1968;90(4):777–790. <https://doi.org/10.1115/1.3601719>.
5. Табачников Ю. Б. Методика расчета плоских кольцевых газостатических опор с круговой микроканавкой и ее экспериментальная проверка // Машиноведение. 1974. № 1. С. 96–103. Tabachnikov Yu. B. Metodika rascheta ploskikh kol'tsevykh gazostaticheskikh opor s krugovoy mikrokanavkoy i ee eksperimental'naya proverka. *Mashinovedeniye*. 1974;1:96–103. (In Russ.).
6. Castelli V., Elrod H. G. Solution of the Stability Problem for 360 Deg Self-Acting, Gas-Lubricated Bearings. *Journal of Basic Engineering*. 1965;87(1):199–210. <https://doi.org/10.1115/1.3650508>.
7. Elrod H. G., McCabe J. T., Chu T. Y. Determination of Gas-Bearing Stability by Response to a Step-Jump. *Journal of Lubrication Technology*. 1967;89(4):493–498. <https://doi.org/10.1115/1.3617042>.
8. Stout K. J., Pink E. G. Orifice compensated EP gas bearings: the significance of errors of manufacture. *Tribology*

International. 1980;13(3):105–111. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(80\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(80)90052-3).

9. Kwan Y.-B. P., Post J. B. A tolerancing procedure for inherently compensated, rectangular aerostatic thrust bearings. *Tribology International*. 2000;33(8):581–585. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00109-2).

10. Tsai M. H., Hsu T. Y., Pai K. R., Shih M. Ch. Precision position control of pneumatic servo table embedded with aerostatic bearing. *Journal of System Design and Dynamics*. 2008;2(4):940–949. <https://doi.org/10.1299/jsdd.2.940>.

11. Chen D., Bian Ya., Fan J. Experiments and Identification of the Unbalance of Aerostatic Guideways on the Micro-Scale. *Sensors*. 2014;14(3):4416–4427. <https://doi.org/10.3390/s140304416>.

12. Ding J., Chang Y., Chen P. [et al.]. Dynamic modeling of ultra-precision fly cutting machine tool and the effect of ambient vibration on its tool tip response. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2020;2(2):025301. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7b59>.

13. Leach R. K., Giusca C. L., Naoi K. Development and characterization of a new instrument for the traceable measurement of areal surface texture. *Measurement Science and Technology*. 2009;20(12):125102. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/12/125102>.

14. Thomsen-Schmidt P. Characterization of a traceable profiler instrument for areal roughness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2011;22(9):094019. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094019>.

15. Lee K.-W., Noh Y.-J., Gao W. [et al.]. Experimental investigation of an air-bearing displacement sensor for on-machine surface form measurement of micro-structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2011;12(4):671–678. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0087-7>.

16. Lian H. Ch. Rong, Li Yu. Influence of operating temperature on the static characteristics of an externally pressurized thrust bearing lubricated with refrigerant gas. *Tribology Letters*. 2021;69:123. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01501-2>.

17. Lu Z.-W., Zhang J.-A., Liu B. Study on the gas film flow field and its influencing factors at the outlet of the orifice of the aerostatic bearing. *Shock and Vibration*. 2020;2020:8891382. <https://doi.org/10.1155/2020/8891382>.

18. Majumdar B. C. Zero-load stability of a rigid rotor supported on pressurized porous gas bearing. *Mechanism and Machine Theory*. 1977;12(4):303–310. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(77\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0094-114X(77)90006-4).

19. Chen M. F., Lin Y. T. Static behavior and dynamic stability analysis of grooved rectangular aerostatic thrust bearings by modified resistance network method. *Tribology International*. 2002;35(5):329–338. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00012-9).

20. Chen X.-D., He X.-M. The effect of the recess shape on performance analysis of the gas-lubricated bearing in optical lithography. *Tribology International*. 2006;39(11):1336–1341. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.10.005>.

21. Aoyama T., Kakinuma Y., Kobayashi Y. Numerical and experimental analysis for the small vibration of aerostatic guideways. *CIRP Annals*. 2006;55(1):419–422. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60449-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60449-1).

22. Zhu J., Chen H., Chen X. Large eddy simulation of vortex shedding and pressure fluctuation in aerostatic bearings. *Journal of Fluids and Structures*. 2013;40:42–51. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.03.012>.

23. Li Y., Lin Y., Zhu H., Sun Z. Research on the gas pressure fluctuation characteristics inside an aerostatic thrust bearing with a pocketed orifice-type restrictor. *Tribology Transactions*. 2014;57(1):28–35. <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.840406>.

24. Ramachandra S. A Solution of Reynolds equation for a full finite journal bearing. *Journal of Basic Engineering*. 1961;83(4):589–593. <https://doi.org/10.1115/1.3662273>.

25. Pandian M. C. A new method for the numerical solution

of the Reynolds equation for gas-lubricated slider bearings. *Journal of Engineering Mathematics*. 1985;19:3–19. <https://doi.org/10.1007/BF00055036>.

26. Anaya-Dufresne M., Sinclair G. B. Some Exact Solutions of Reynolds Equation. *Journal of Tribology*. 1995;117(3):560–562. <https://doi.org/10.1115/1.2831292>.

27. Miyatake M., Yoshimoto Sh. Numerical investigation of static and dynamic characteristics of aerostatic thrust bearings with small feed holes. *Tribology International*. 2010;43(8):1353–1359. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.01.002>.

28. Зернин М. В. Проблемы и перспективы построения эффективного конечно-элементного описания течения масла в зазоре опор жидкостного трения с учетом неоднородного распределения температур и деформаций поверхностей // Проблемы трибологии. 1997. № 1. С. 73–78. EDN: UQYQFH.

Zernin M. V. Problemy i perspektivy postroyeniya effektivnogo konechnoelementnogo opisaniya techeniya masla v zazore opor zhidkostnogo treniya s uchetom neodnorodnogo raspredeleniya temperatur i deformatsiy poverkhnostey. *Tribology Problems*. 1997;1:73–78. EDN: UQYQFH. (In Russ.).

29. Chang S. H., Chan C. W., Jeng Y. R. Numerical analysis of discharge coefficients in aerostatic bearings with orifice-type restrictors. *Tribology International*. 2015;90:157–163. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.030>.

30. Chen Y. S., Chiu C. C., Cheng Y. D. Influences of operational conditions and geometric parameters on the stiffness of aerostatic journal bearings. *Precision Engineering*. 2010;34(4):722–734. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.04.001>.

31. Рыбкин Н. Н., Зернин М. В., Шилько С. В., Дробыш Т. В. Конечно-элементный анализ упругогидродинамического трения: учет деформаций деталей опор скольжения // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 3. С. 254–267. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-3-254-267>. EDN: BGXNBN.

Rybkin N. N., Zernin M. V., Shil'ko S. V., Drobysht T. V. Finite Element Analysis of Elasto-Hydrodynamic Friction: Taking into Account the Deformations of Sliding Bearing Parts. *Friction and Wear*. 2021;42(3):254–267. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-3-254-267>. EDN: BGXNBN. (In Russ.).

32. Брунгардт М. В., Вавилов Д. В., Лукин Р. С. [и др.]. Численное исследование переходных процессов в самоустанавливающейся адаптивной гидростатической опоре // Технология машиностроения. 2016. № 2. С. 49–53. EDN: WAONYB.

Brungardt M. V., Vavilov D. V., Lukin R. S. [et al.]. Chislennoye issledovaniye perekhodnykh protsessov v samoustanavlivayushchey adaptivnoy gidrostaticheskoy opore. *Tekhnologiya Mashinostroyeniya*. 2016;2:49–53. EDN: WAONYB. (In Russ.).

33. Wang W., Cheng X., Zhang M. Effect of the deformation of porous materials on the performance of aerostatic bearings by fluid-solid interaction method. *Tribology International*. 2020;150:106391. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106391>.

34. 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. *Tribology International*. 2019;135:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.020>.

35. Gao Q., Lu L., Chen W. [et al.]. A novel modeling method to investigate the performance of aerostatic spindle considering the fluid-structure interaction. *Tribology International*. 2017;115:461–469. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.016>.

Информация об авторе:

КУРЗАКОВ Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Сибирского федерального университета, г. Красноярск.

SPIN-код: 4977-0192

AuthorID (РИНЦ): 361924

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-9743>

AuthorID (SCOPUS): 55850380100

ResearcherID: OYD-6605-2025
e-mail: kurzakov@list.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 06.12.2025; одобрена после рецензирования 13.04.2026; принята к публикации 08.06.2026.

Information about the author:

KURZAKOV Andrey Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Design and Technological Support

for Mechanical Engineering Production Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

SPIN-code: 4977-0192

AuthorID (RSCI): 361924

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-9743>

AuthorID (SCOPUS): 55850380100

ResearcherID: OYD-6605-2025

e-mail: kurzakov@list.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 06.12.2025; approved after reviewing 13.04.2026; accepted for publication 08.06.2026.