

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ БЕЗМАСЛЯНЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ СИСТЕМ БЫСТРОХОДНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ РОТОРНОГО ТИПА ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н. А. Райковский

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В работе выполнен анализ перспектив применения основных типов конструкций безмасляных подшипниковых узлов для условий работы в роторных агрегатах автономных мобильных установок. Проведенный анализ позволил установить современный уровень развития безмасляных подшипниковых технологий, имеющиеся ограничения их применения в агрегатах автономных мобильных установок и актуальные проблемы, решение которых требует проведения исследований и дальнейшего совершенствования конструкций подшипниковых узлов.

Ключевые слова: безмасляный подшипник, роторный агрегат, мобильный объект, газовая смазка, порошковая смазка, магнитный подшипник, условия эксплуатации.

Введение

В области проектирования роторных агрегатов в настоящее время из всей совокупности требований, предъявляемых мобильным установкам, наиболее актуальными становятся повышение их мобильности и автономности, обеспечивающие высокую транспортабельность (малый вес, малые габаритные размеры, возможность транспортирования с высокой скоростью, высокая проходимость по бездорожью) и малое время перевода из походного состояния в рабочее и обратно, надежность, большие межремонтные периоды, минимальный ЗИП, возможность эксплуатации в широком диапазоне атмосферных условий без дополнительной подготовки и применения специальных предпусковых систем, приспособленность к жестким условиям транспортировки (температура, давление, инерционные перегрузки, вибрация, ударные воздействия, изменение пространственной ориентации и т. п.), простоту обслуживания и эксплуатации при минимальном количестве обслуживающего персонала или при полном его отсутствии [1]. Это невозможно без совершенствования или полного отказа от системы смазки таких объектов, прежде всего, путем внедрения безмасляных подшипниковых узлов трения.

Технические решения подшипниковых узлов, способные обеспечить безмасляный режим работы роторного агрегата, включают:

- магнитный подвес на базе активных и постоянных магнитов;
- газовый подвес на газодинамическом и газостатическом принципе работы;
- подшипниковые узлы «сухого» трения на базе твердых и порошковых самосмазывающихся материалов.

Магнитный подвес на базе постоянных магнитов не способен обеспечить устойчивую левитацию ротора и требует применения комбинированных вариантов подшипниковых узлов, которые здесь

не рассматриваются по причине усложнения конструкции, снижения надежности и т.д. [2–5].

1. Перспективы применения безмасляных подшипниковых систем в быстроходных роторных агрегатах автономных мобильных установок

В табл. 1, 2 представлены диапазоны режимов работы и характеристики основных типов безмасляных подшипниковых систем, которые соответствуют современному уровню их развития [2–78].

Из анализа табл. 1, 2 следует, что из дальнейшего рассмотрения для применения в роторных агрегатах автономных мобильных установок можно исключить магнитный подвес, газостатические подшипниковые узлы трения и самосмазывающиеся подшипниковые узлы трения на базе полимерных и углеграфитовых материалов. Подшипники на базе полимерных и углеграфитовых материалов не удовлетворяют комплексному требованию обеспечения высокого ресурса в условиях сравнительно больших скоростей скольжения [79–88]. Активные магнитные и газостатические подшипниковые узлы также не имеют перспектив к широкому применению в агрегатах автономных мобильных установок в связи с крайне низкими массогабаритными показателями их вспомогательных систем, энергозависимостью работы подшипников и/или их вспомогательных систем [2–32].

Кроме того, для работы магнитного подвеса необходима сложная система управления, которая должна иметь двойное или даже тройное дублирование, такие подшипники имеют низкую ремонтопригодность и высокую стоимость. Поэтому далее более подробно остановимся на двух наиболее перспективных для автономных мобильных объектов безмасляных подшипниковых технологиях, а именно на газодинамических подшипниковых узлах и узлах «сухого» трения с порошковой смазкой [17–78].

Таблица 1. Область режимов применения безмасляных подшипниковых узлов роторных агрегатов

Table 1. Scope of application modes of oil-free bearing units of rotary units

№	Наименование	Диапазон режимов эксплуатации			
		Рабочая температура	Несущая способность	Скорость скольжения	Работа в вакууме
		°С	МПа	м/с	
1	Активные магнитные подшипники	-253 ... +200	0 ... 0,6	0 ... 200	да
2	Газостатические подшипники	-260 ... +800	0 ... 1	0 ... 300	нет
3	Газодинамические подшипники	-260 ... +800	0 ... 0,4	50 ... 300	нет
4	Полимерные и углеграфитовые подшипники	-269 ... +250	0 ... 100	0 ... 5	да
5	Подшипники с порошковой смазкой	-200 ... +600	0 ... 100	0 ... 100	да

Таблица 2. Характеристики безмасляных подшипниковых узлов роторных агрегатов

Table 2. Characteristics of oil-free bearing units of rotary units

№	Наименование	Характеристики		
		Автономность	Массогабаритные характеристики	Ресурс
1	Активные магнитные подшипники	нет	неудовлетворительные	теоретически неограниченный
2	Газостатические подшипники	нет	неудовлетворительные	теоретически неограниченный
3	Газодинамические подшипники	да	умеренные	ограничен числом пусков-остановов
4	Полимерные и углеграфитовые подшипники	да	минимальные	малый
5	Подшипники с порошковой смазкой	да	минимальные	теоретически неограниченный

2. Развитие и перспективы применения газодинамических подшипниковых узлов в быстроходных роторных агрегатах автономных мобильных установок

Газовая смазка неприменима в компрессорных и расширительных роторных агрегатах объемного принципа действия. Это обусловлено сравнительно малыми частотами вращения их роторов и сравнительно большими, для таких частот вращения, нагрузками, что в целом не позволяет реализовать требуемую несущую способность путем газового подвеса [18, 19, 29, 89, 90, 91]. Поэтому ниже выполнен анализ развития и применения таких подшипников в области быстроходных турбоагрегатов.

Свойства газа определяют конструкцию элементов газового подшипника, которые должны обеспечить требуемую грузоподъемность с необходимыми характеристиками жесткости и демпфирования. Рабочий зазор в газовом подшипнике существенно меньше, чем в масляном, и составляет 5...15 мкм. Линейные скорости на поверхности шейки вала находятся в диапазоне 100...300 м/с [18, 19, 29], что создает избыточное давление в газовом слое на уровне 0,1 МПа. Жесткость лепестков должна

обеспечивать их упругое деформирование при таком избыточном давлении. При проектировании газовых подшипников жесткость лепестков принимается ориентировочно равной 150 Н/мм из расчета на каждый сантиметр площади проекции рабочей поверхности подшипника [29]. Этот показатель может варьироваться в диапазоне $\pm 50\%$. При этом более «мягкие» подшипники не обеспечивают должного уровня динамической устойчивости ротора, а более жесткие — имеют избыточную чувствительность к воздействию высокой температуры, к перекосам, погрешности изготовления и сборки [29].

В 60-е годы XX века получили распространение лепестковые подшипники [17–21, 29]. Лепестки представляли собой упругие пластины, закрепленные на внутренней поверхности муфты под некоторым углом. В настоящее время известны два основных типа лепестковых газодинамических подшипников — подшипники с подкладными упругими элементами (фольговыми) и подшипники с перекрывающимися лепестками.

Стремление избавиться от утечек газа через зазоры между лепестками, снижающих несущую способность лепесткового подшипника, привело к концепции фольгового подшипника. В результате

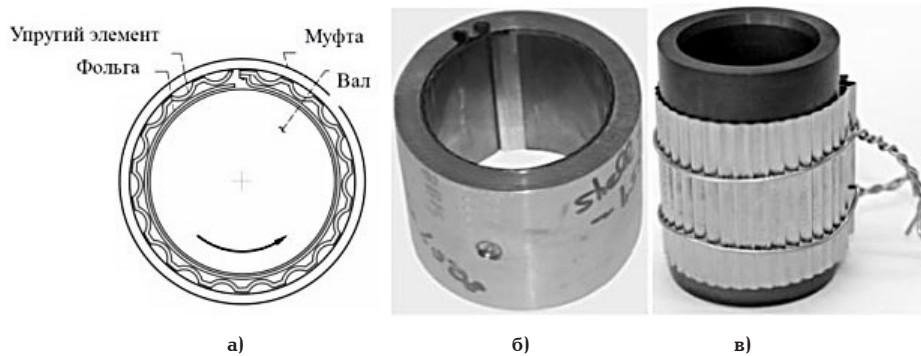


Рис. 1. Фольговый подшипник I поколения (а) с полноохватным лепестком на упругом основании (б), сделанном из гофрированной ленты (в)
 Fig. 1. Foil bearing of the 1st generation (a) with a full-circle lobe on an elastic base (б) made of corrugated tape (в)

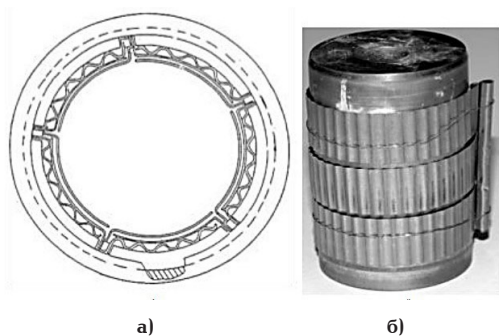


Рис. 2. Многолепестковый фольговый подшипник II поколения (а) и упругое основание (б), выполненное из нескольких гофрированных лент, закрепленных со смещением
 Fig. 2. Multi-petal foil bearing of the II generation (a) and an elastic base (б) made of several corrugated tapes fixed with an offset

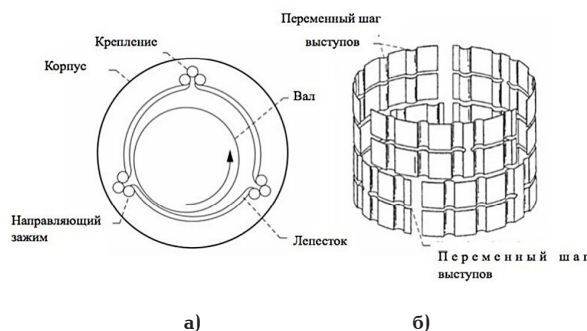


Рис. 3. Фольговый подшипник III поколения с оптимальной деформацией опорных лепестков (а) и упругой конструкцией с нерегулярным шагом упругих элементов, её обеспечивающей (б)
 Fig. 3. Foil bearing III generation with optimal deformation of the supporting petals (a) and an elastic design with an irregular step of elastic elements that provides it (б)

отработки различных решений оставили один полноохватный лепесток, под которым располагается упругое основание (рис. 1).

В 1980-х годах [17, 29] с небольшими изменениями был изобретен новый тип лепесткового подшипника, который в дальнейшем упоминается как поколение II (рис. 2). В этих подшипниках упругая жесткость основания была адаптирована в одном направлении (гофрированная лента была разрезана на отдельные полосы, которые размещались таким образом, что гофры отдельных лент оказывались смещены относительно друг друга), как правило, в осевом направлении, чтобы приспособиться к гидродинамическим эффектам, таким как краевая утечка. Этот тип подшипника, демонстрирует грузоподъемность почти вдвое большую по сравнению с более примитивными конструкциями поколения I.

Развитие лепестковых подшипников получило импульс в начале 1990-х годов с изобретением третьего поколения (рис. 3) фольговых подшипников [17, 29]. Подшипники поколения III имеют более сложную упругую пружинную и опорную конструкцию, в которой жесткость регулируется, по крайней мере, в двух направлениях, как правило, по окружности и в осевом направлении. Подшипники поколения III удвоили грузоподъемность по сравнению с поколением II [17, 29].

На рис. 4 рассмотрены области режимных параметров работы фольговых подшипников различных поколений [17]. Фольговые газодинамические под-

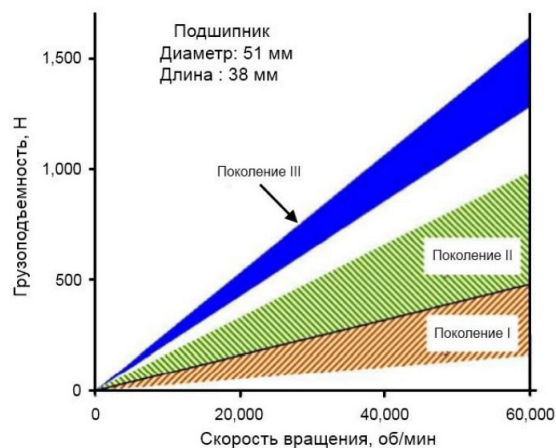
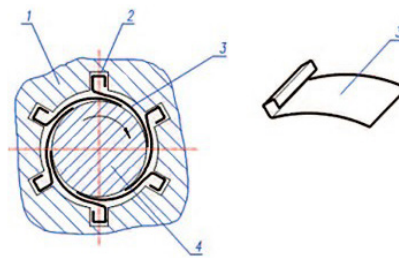


Рис. 4. Зависимость несущей способности фольговых газодинамических подшипников I, II, III поколений от скорости скольжения (частоты вращения ротора) [17]
 Fig. 4. Dependence of the bearing capacity of foil gas-dynamic bearings of I, II, III generations on the sliding speed (rotor speed) [17]

шипники с подкладным упругим элементом имеют сравнительно большую статическую несущую способность и, благодаря этому, получили широкое применение в высокоскоростных турбомашинах, работающих в стационарных режимах.



a)



б)

Рис. 5. Лепестковые газодинамические подшипники с перекрывающимися лепестками конструкции НИУ МЭИ
 Fig. 5. Gas dynamic petal bearings with overlapping petals designed by NIU MEI

В целом фольговые газодинамические подшипники являются перспективной и конкурентной технологией создания безмасляных турбоагрегатов для условий применения при стационарных эксплуатационных условиях работы.

Однако для турбоагрегатов мобильных объектов важнейшее значение приобретают демпфирующие свойства подшипников, их способность работать в условиях вибрационных и ударных нагрузок. Для такого использования наиболее подходят лепестковые подшипники (рис. 5), что обусловлено многоклиновой формой зазора [18–29], для которых несущая способность, в лучшем случае, достигает 0,1 МПа при оптимальных условиях их работы.

В целом несущая способность, жесткость и демпфирующие свойства газодинамического подшипника зависят от его исполнения, климатических факторов и режимов работы агрегата [17, 29].

Учитывая мобильность и универсальность применения таких объектов, в том числе в условиях разреженной атмосферы (в условиях высокогорья, в условиях авиатехники и др.), несущая способность подшипников с газовой смазкой может существенно снизиться (рис. 6), вплоть до двух раз.

В настоящее время в области создания газодинамических подшипников отсутствуют самосмазывающиеся материалы, которые имели бы необходимый комплекс физико-механических свойств (механические свойства, низкие скорости износа, низкие значения коэффициента трения), адаптированные к широкому диапазону температур эксплуатации, тем более работоспособных при больших скоростях их изменения [29]. Одни материалы имеют требуемые свойства при комнатных температурах и плохие при повышенных, другие — наоборот. Отсутствие твердых смазочных материалов, с высокими физико-механическими характеристиками в широком диапазоне температур, для режимов пуск/останов (например, агрегаты турбонаддува) приводят к снижению несущей способности подшипников из фольги III поколения более чем в 3 раза [17, 29, 92].

Сложность применения таких подшипников в широком диапазоне температур также обусловлено изменением рабочего зазора из-за тепловых деформаций элементов конструкции. При этом уменьшение зазора относительно оптимального расчетного значения приводит к существенному снижению несущей способности узла (до 4-х раз) [92]. Это обусловлено чрезмерной предварительной нагруженностью подшипника (поджатие лепестков к ротору), что приводит к сильному его разогреву, износу и повреждению покрытия на роторах

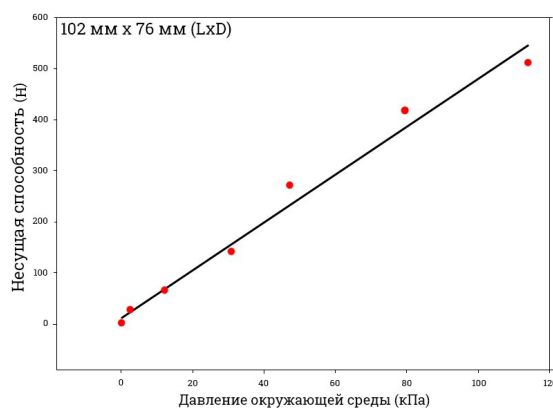


Рис. 6. Зависимость несущей способности газодинамического фольгового подшипника от давления окружающей среды [92]
 Fig. 6. Dependence of the bearing capacity of a gas-dynamic foil bearing on the ambient pressure [92]

«разбега/останова» ротора [92]. В конечном счете, тепловые деформации подшипникового узла могут привести к заклиниванию подшипника и выходу из строя всего агрегата.

С увеличением зазора относительно оптимальных значений грузоподъемность подшипника снижается не столь существенно, в пределах 20 %, однако увеличенные зазоры приводят к снижению жесткости и демпфирующих свойств подшипникового узла [92].

С изменением температуры изменяется и вязкость воздуха, которая оказывает прямое влияние на несущую способность подшипникового узла. Например, двукратному изменению несущей способности подшипникового узла соответствует изменение температуры рабочего газа в подшипниковом узле от 20 °С до 500 °С. При изменении температуры окружающей среды от 20 °С до –50 °С несущая способность снижается, примерно, на 20 %.

Также необходимо учитывать, что наличие в воздухе мелкодисперсного песка приведет к абразивному и эрозионному износу трущихся поверхностей подшипникового узла, учитывая диапазон рабочих скоростей газодинамических подшипников (до 350 м/с) [29] и чувствительность их работы к трению и износу рабочих поверхностей. Поэтому применение газодинамических подшипников в таких условиях нецелесообразно. Кроме того, сочетание наличия мелкодисперсной неабразивной пыли, а также климатических факторов влажности и температуры может привести к загрязнению рабочих

Таблица 3. Влияние факторов, воздействующих на объекты ВВСТ, на характеристики газодинамических подшипниковых узлов [17, 28, 29, 92, 93, 97]

Table 3. Influence of factors affecting the objects of armament and military equipment, on the characteristics of gas-dynamic bearing units [17, 28, 29, 92, 93, 97]

№	Фактор	Характер воздействия	Результат воздействия	Величина воздействия
1	Температура окружающей среды и эксплуатационная температура элементов конструкции подшипникового узла агрегата	Изменяются физические свойства газа	Снижается динамическая несущая способность	До 2 раз
		Изменяются физико-механические свойства материалов	Снижаются жесткость и демпфирующие свойства	Данные отсутствуют
		Изменяются геометрические размеры рабочего зазора	Снижается статическая несущая способность	До 3 раз
2	Давление окружающей среды (разряжение)	Изменяются физические свойства газа	Снижается динамическая несущая способность	До 2 раз
3	Запыленность воздуха	Изменяются физико-механические свойства газа	Абразивный и эрозионный износ поверхностей трения	Данные отсутствуют
4	Режимы работы агрегата	Изменяется частота вращения ротора	Снижаются динамическая несущая способность и ресурс	До сухого трения
		Число пусков и остановов	Снижается ресурс	Данные отсутствуют

поверхностей подшипникового узла и изменению его рабочих характеристик.

Несущая способность таких подшипников практически линейно зависит от частоты вращения ротора агрегата. В типичных случаях работа подшипника в режиме сухого трения продолжается вплоть до достижения частоты вращения более 40 % от номинальной [93], что ограничивает применение таких подшипников в агрегатах, работающих с переменной частотой вращения ротора и в условиях частых пусках-остановах, а также в сравнительно тихоходных агрегатах (частота вращения менее 10 000 об/мин). Например, к объектам, работающим в таких условиях, можно отнести агрегаты турбонаддува, частота вращения ротора которых на холостых оборотах двигателя составляет 5000... 10 000 об/мин при рабочей частоте 50 000... 200 000 об/мин [94–96], для малоразмерных турбоагрегатов; для агрегатов турбонаддува двигателей большой мощности (например, судовые ДВС) рабочая частота вращения ротора составляет 6500... 7000 об/мин [94–96]; агрегаты климатических систем транспортных и стационарных объектов работают в режиме пуск-останов большую часть времени.

Результаты анализа влияния различных факторов на характеристики газодинамических подшипников, ограничивающих область их применения в роторных агрегатах мобильных автономных установок, сведены в табл. 3.

Таким образом, газодинамический подшипник эффективен в одних условиях работы, может выйти из строя с изменением этих условий. Поэтому к применению таких подшипниковых узлов в роторных агрегатах мобильных автономных установок универсального климатического исполнения следует относиться с осторожностью.

3. Развитие и перспективы применения подшипниковых узлов с порошковой смазкой в быстроходных роторных агрегатах автономных мобильных установок

Поиск решения по созданию подшипниковых узлов трения для применения в условиях высоких

температур привел к разработке технологии смазки мелкодисперсным антифрикционным порошковым материалом. При этом порошковый материал рассматривается в качестве псевдожидкости, способной проявлять свойства гидродинамической смазки. Первый, кто упоминал о потоке твердых частиц, был Рейнольдс (1885 г.). На основании ряда исследований Хешмат в 1988 году предложил концепцию о том, что динамические свойства среды, состоящей из мелких частиц различной формы, протекающей в узкой сужающейся щели, аналогичны свойствам жидкой пленки. Это уникальное свойство он назвал «квазигидродинамическая смазка сухими трибодисперсными материалами» [39].

Наиболее объемные и комплексные исследования таких подшипниковых узлов проводила компания Miti под руководством доктора Хешмата, начиная, примерно, с 1988 года.

В рамках этих исследований изучены следующие вопросы:

1. Доказано, что псевдожидкость, образованная из трибочастиц и газа, независимо от того, образовалась ли она в результате износа или преднамеренно введена в зазор подшипникового узла, может выдерживать внешние нагрузки, при этом уровни трения в порошковых псевдожидкостях значительно ниже ожидаемых от «сухих» контактов, а поведение пленок трибочастиц, например, форма профиля скорости и давления, наличие боковой утечки, зависимость коэффициента трения от безразмерного числа Зоммерфельда аналогичны поведению гидродинамических пленок [33, 39, 41, 60, 63, 65, 98].

2. Получены свойства широкого круга мелкодисперсных антифрикционных порошковых материалов (сульфиды, селениды, оксиды и др.), в том числе морфология, плотность от давления (до 350 МПа), динамическая вязкость (при скоростях скольжения до 0,1 м/с), напряжения и деформации сдвига, трибологические свойства [98].

Предложен диапазон размеров частиц, как наиболее пригодный для смазки подшипников скольжения с минимальным износом сопрягающихся поверхностей. Согласно данным Heshmata, применение частиц большого размера (более 20 мкм)

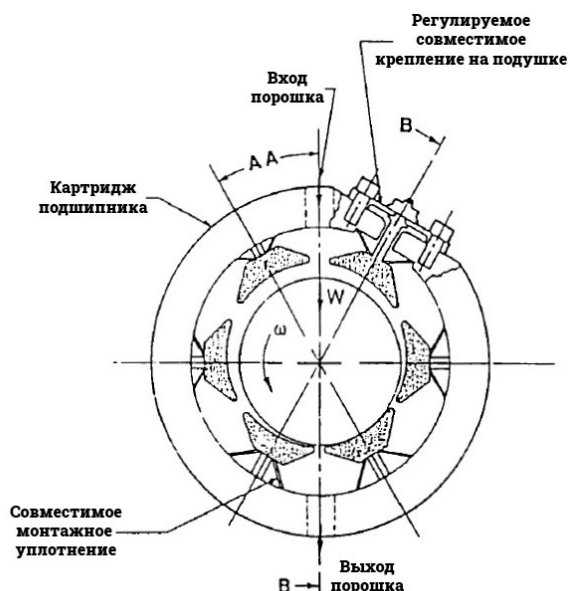


Рис. 7. Схема сегментного подшипника с порошковой смазкой
 Fig. 7. Scheme of a segmented bearing with powder lubrication

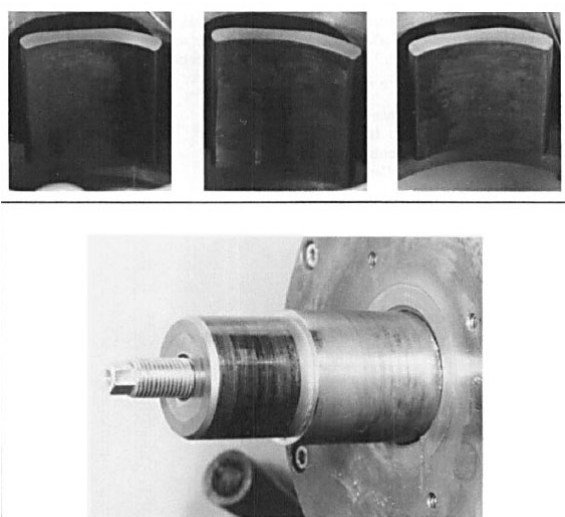


Рис. 8. Состояние подшипника скольжения после испытания [33] (наблюдается тонкая пленка MoS2)
 Fig. 8. The state of the plain bearing after the test [33] (a thin film of MoS2 is observed)

приводит к абразивному износу поверхностей трения, менее 5 мкм способствует интенсивной агломерации микрочастиц порошка с преимущественно твердым трением, а размер частиц в диапазоне 5 ... 20 мкм обеспечивает возможность реализации квазигидродинамической смазки.

3. На основе аналогии с гидродинамической смазкой разработаны полуэмпирические методики расчета характеристик подшипников скольжения смазываемых порошковой псевдожидкостью. Представленные отдельные результаты расчетных исследований показывают характер зависимостей, который в целом аналогичен гидродинамической смазке жидкостями. Прогнозируемые и достижимые значения коэффициента трения от реализации такой технологии в среднем находятся в диапазоне 0,02 ... 0,2.

4. Проведены испытания в широком диапазоне скоростей скольжения (до 100 м/с), нагрузок (до 240 Н) и температур (до 600 °С), в ходе которых подтверждены работоспособность и высокие триботехнические характеристики подшипников скольжения. В качестве наиболее актуальных порошковых смазочных материалов рассмотрены MoS2 и WS2.

В работе [33] описывается серия проведенных в 1994 году экспериментов, направленных на демонстрацию основных возможностей опорного подшипника скольжения (с пятью колодками) с порошковой смазкой MoS2 для высокотемпературных и агрессивных сред (рис. 7).

В ходе испытаний подшипник продемонстрировал работоспособность при частоте вращения 58 000 об/мин, что соответствовало 97 м/с в диапазоне условий нагружения до 227 Н. Подача порошковой смазки — осевая, транспортировка — сухим воздухом комнатной температуры. Отдельные результаты испытаний представлены в табл. 4 и на рис. 8.

В работе [37] описывается серия проведенных в 1996 году экспериментов, направленных на демонстрацию основных возможностей опорного подшипника скольжения (с тремя колодками) с порошковой смазкой WS2. Для подачи порошка использовался сухой воздух. Испытания проводились при нагрузках до 236 Н и частотах вращения ротора до 30 000 об/мин (скорость скольжения 53,4 м/с). При каждой комбинации нагрузка/скорость испытание проводилось в течение времени, достаточного для достижения стабильных тепловых условий. Результаты этих испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 4. Результаты испытаний гидродинамического подшипника скольжения с порошковой смазкой MoS2 [33]
 Table 4. Test results of a hydrodynamic plain bearing with MoS2 powder lubrication [33]

Масса (кг)	Среднее DN (мм × об/мин.) × 10 ⁶	Среднее время (сек.)	F × D (Н × м) × 10 ⁶	Максимальная потеря мощности (л.с.)	Максимальная температура колодки (°С)
1,8	0,6	870	0,15	0,24	63,3
2,7	0,4	210	0,035	0,23	86,7
7,3	1,3-2,0	1020	1,77	2,5	121,1 – 148,9
14,5	0,6	450	0,38	1,0	135 – 176,7
23,1	0,27	180	0,02	0,16	93,3 – 121,1
Всего	—	2730	2,36	—	—
Размеры подушки: L = 20 мм, B = 17,8 мм, D = 34 мм; количество подушек — 5 шт.					

Таблица 5. Испытание подшипника с порошковой смазкой WS2 [37]
Table 5. WS2 powder lubricated bearing test [37]

Нагрузка (Н)	Скорость (об/мин.)	Время работы (мин.)	Суммарное время работы под нагрузкой (мин.)	Нагрузка (Н)	Скорость (об/мин.)	Время работы (мин.)	Суммарное время работы под нагрузкой (мин.)			
14,06	1,000	355,50	357,50	71,88	20,000	4,00	8,00			
	3,000	2,00			25,000	4,00				
22,95	1,000	4,00	4,00	80,78	3,000	3,00	86,00			
25,18	4,000	15,00	15,00		4,000	9,50				
27,40	3,000	2,00	3,00		10,000	32,00				
	4,000	1,00			15,000	2,00				
36,30	1,000	2,50	124,50		20,000	32,00		70,00		
	2,000	1,50			25,000	7,50				
	3,000	11,50		103,02	3,000	1,00				
	4,000	7,00			5,000	8,00				
	5,000	5,50			7,500	4,00				
	7,000	3,00		10,000	57,00					
	10,000	2,00		125,26	10,000	7,00	7,00			
	15,000	2,00		147,50	5,000	9,50	51,50			
	20,000	47,50			9,000	30,50				
	25,000	38,00			10,000	11,50				
30,000	4,00	191,99	5,000	30,00	88,00					
40,75	1,000		4,50	6,000		30,00				
45,19	3,000		23,00	7,000		28,00				
47,42	20,000	29,50	29,50	236,47	4,000	0,50	11,00			
51,87	25,000	4,00	4,00		5,000	10,50				
54,09	20,000	3,00	3,00	58,54	-	-	-			
58,54	1,000	3,00	220,50					-	-	-
	4,000	13,50								
	6,000	1,00								
	9,000	1,50								
	10,000	43,00								
	15,000	7,00								
	20,000	119,50								
	25,000	32,00								

Общее время работы = 1110,00

Авторами [37] отмечается, что, по сравнению с предыдущими испытаниями с применением порошкового материала MoS₂, порошковый материал WS₂ обеспечивал меньшие потери на трение.

В целом порошки MoS₂ и WS₂ обеспечивали хорошую защиту от износа поверхности шейки вала и подушек подшипника. В ходе ограниченных по времени испытаний (до 1 часа) для порошковых материалов MoS₂ и WS₂ в целом наблюдается отсутствие повреждений поверхностей трения и наличие порошковой пленки на трущихся поверхностях подшипника толщиной 2,5...7,5 мкм [37].

Анализ публикаций по направлению создания узлов трения с порошковой смазкой показал, что основной объем публикаций приходится на ученых из следующих стран: США, КНР, Индии и Франции.

Таким образом, анализ показал большой потенциал в области создания узлов трения с вводом в зону трения порошкового смазочного материала, так как позволяет существенно расширить диапазон применения твердой смазки как по скорости скольжения, так и температуре при высоких фрикционных показателях и долговечности узла трения.

Технология псевдожидкой смазки, разработанная доктором Хешматом, требует проведения дополнительных исследований и проверки, прежде всего на предмет перспектив и надежности ее применения в условиях переменной влажности для мобильных объектов.

Закключение

Учитывая, географические размеры, многообразие климатических условий, низкую плотность населения и слабо развитую инфраструктуру за пределами крупных городов, особенно в северных районах РФ, создание роторных агрегатов автономных мобильных установок является актуальной задачей. Большой потенциал для повышения комплекса технических характеристик мобильных установок имеется в полном упразднении системы смазки и применении перспективных конструкций безмасляных подшипниковых узлов. Анализ выявил две наиболее перспективные технологии создания таких объектов: путем применения газодинамических подшипниковых узлов трения; путем приме-

нения подшипниковых узлов трения с порошковой смазкой.

Исследования в области создания газодинамических подшипников продолжается уже более 100 лет. С 60-х годов XX века в этом направлении были достигнуты большие успехи, прежде всего в области увеличения несущей способности и расширения диапазона рабочих температур. Однако применение таких подшипниковых узлов в роторных агрегатах мобильного назначения вызывает значительные трудности, обусловленные комплексным характером воздействия негативных факторов, прежде всего климатических и режимных. Также очевидно, что применение газодинамических подшипников в роторных агрегатах объемного принципа действия практически невозможно.

Потенциал подшипников с порошковой смазкой полностью еще не раскрыт, так как системные исследования в данном направлении продолжаются не более 30 лет. При этом физический принцип, лежащий в основе функционирования таких узлов трения, позволяет их применять как в турбоагрегатах, так и в агрегатах объемного принципа действия. Данная подшипниковая технология перспективна, так как включает все известные преимущества самосмазывающихся узлов трения (простота конструкции и обслуживания, низкая стоимость, автономность, отсутствие влияния климатических условий на их работу и др.), при этом существенно расширяет диапазон режимных параметров работы как по скорости скольжения в зоне трения, так и по диапазону рабочих температур.

Список источников

1. Юша В. Л. Создание и совершенствование ступеней компрессоров объемного действия для автономных мобильных установок: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2008. 434 с.
2. Jansen M., Montague G., Provenza A. [et al.]. High speed, high temperature, fault tolerant operation of a combination magnetic-hydrostatic bearing rotor support system for turbomachinery // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2004. Vol. 6. P. 599–606.
3. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. Санкт-Петербург: Политехника, 2003. 208 с. ISBN 5-7325-0655-1.
4. Bleuler H. Magnetic levitation: a challenge for control design in mechatronics // *Toshiba Chair for Intelligent Mechatronics*. 2011. Vol. 44, no. 12. P. 578–583.
5. Schweitzer G., Maslen E. H. Introduction and Survey // *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 1–26.
6. Kingsbury magnetic bearings. Active Magnetic Bearings & High Speed Motors/Generators. URL: <http://www.magnetic-bearings-s2m.com> (дата обращения: 10.04.2022).
7. Schmied J., Nijhuis A. B. M., Shultz R. R. Rotordynamic Design Considerations for a 23 MW Compressor with Magnetic Bearings // *IMEchE Fluid Machinery Symposium*. The Hague. 1999. P. 118–130. URL: https://www.delta-js.ch/file/354/NAM_Paper.pdf (дата обращения: 06.04.2022).
8. API Standard 617-2002. Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services. URL: <https://dokumen.tips/documents/api-std-617-2002.html> (дата обращения: 06.04.2022).
9. Clark D. J., Jansen M. J., Montague G.T. An overview of magnetic bearing technology for gas turbine engines. NASA/TM-2004-213177. URL: http://archive.org/details/nasa_techdoc_20040110826 (дата обращения: 06.04.2022).
10. Provenza A. J., Montague G. T., Jansen M. J. [et al.]. High temperature characterization of a radial magnetic bearing for

turbomachinery // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2005. Vol. 127 (2). P. 437–444.

11. Zaretsky E.V., Bamberger E. N., Singer H. Operating characteristics of 120 mm bore ball bearings at 3x106 DN. NASA TN D-7837. URL: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750004258_1975004258.pdf. (дата обращения: 26.03.2022).
12. Shrestha G., Polinder H., Bang D. J. [et al.]. Direct drive wind turbine generator with magnetic bearing. URL: <http://www.123seminarsonly.com/Seminar-Reports/049/21649129-Magnetic-Bearing.pdf> (дата обращения: 26.03.2022).
13. Polinder H., Morren J. Developments in wind turbine generator systems // *8th International conference on modeling and simulation of electric machines, converters and systems*. Hammamet, Tunisia, 2005. P. 67–78.
14. Polinder H., van der Pijl F. F. A., de Vilder G. J. [et al.]. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21 (3). P. 725–733.
15. Alwre P. E., Maslen E. H., Kim H. C. [et al.]. Design of a magnetic bearing-supported prototype centrifugal artificial heart pump // *Tribology Transactions*. 1996. Vol. 39, no. 3. P. 663–669.
16. Akamatsu T., Yoshino Y., Tsukiya T. Studies of performance and operating condition of centrifugal blood pump with magnetically suspended impeller // *Artificial Organs*. 1994. Vol. 18, no. 3. P. 244.
17. Heshmat H., Walton J. F., Cordova J. L. Technology Readiness of 5th and 6th Generation Compliant Foil Bearing for 10 MWE S-CO₂ Turbomachinery Systems // *In Proceeding of the 6th International Supercritical CO₂ Power Cycles Symposium*, March 27–29. 2018. Pittsburgh, Pennsylvania.
18. Константиnescу В. Н. Газовая смазка / пер. с румын. Г. П. Махо; под ред. М. В. Коровчинского. Москва: Машиностроение, 1968. 718 с.
19. Максимов В. А. Перспективы применения подшипников с газовой смазкой // *Газотурбинные технологии*. 2004. № 7. С. 10.
20. Космынин А. В., Виноградов В. С. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования. Владивосток: Дальнаука, 2002. 326 с. ISBN 5-8044-0228-5.
21. Пинегин С. В., Поспелов Г. А., Пешти Ю. В. Опоры с газовой смазкой в турбомашинках ограниченной мощности. Москва: Наука, 1977. 149 с.
22. Курзаков А. С., Шатохин С. Н. Анализ методов теоретического исследования и расчета адаптивных аэростатических шпиндельных опор // *СТИН*. 2003. № 5. С. 7–11.
23. Swanson E. E., Walton J. F., Heshmat H. A Test Stand for Dynamic Characterization of Oil-Free Bearings for Modern Gas Turbine Engines // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Amsterdam, 2002. Vol. 1. P. 39–48.
24. Bulat P. V., Bulat M. P. Basic Classification of the Gas-Lubricated Bearings // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 28 (10). P. 1444–1448.
25. Сипенков И. Е., Филиппов А. Ю., Болдырев Ю. А. [и др.]. Прецизионные газовые подшипники / под ред. А. Ю. Филиппова, И. Е. Сипенкова. Санкт-Петербург: Электроприбор, 2007. 503 с. ISBN 5-900780-63-5.
26. Peng, Z.-C., Khonsari M. M. A Thermohydrodynamic Analysis of Foil Journal Bearings // *Journal of Tribology*. 2006. Vol. 128 (3). P. 534–541.
27. Della Corte C. Stiffness and Damping Coefficient Estimation of Compliant Surface Gas Bearings for Oil-Free Turbomachinery. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110003624/downloads/20110003624.pdf> (дата обращения: 12.04.2022).
28. Румянцев М. Ю., Захарова Н. Е., Сигачев С. И. Применение лепестковых газодинамических подшипников в турбогенераторных агрегатах малой мощности // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2014. Т. 1, № 4 (22). С. 61–68.
29. Темис М. Ю. Влияние конструкции лепестков радиального газового подшипника на характеристики жесткости

и демпфирования в опоре (обзор) // *Авиационные двигатели*. 2020. № 2 (7). С. 57–77. DOI: 10.54349/26586061_2020_2_57.

30. Heshmat H., Walton J. F., Corte C. D. [et al.]. Oil-Free Turbocharger Demonstration Paves Way to Gas Turbine Engine Applications // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Munich, Germany, 2000. P. 1–8.

31. Foshage G. K., Lovelace E. C. An Integrated Magnetic/Foil Bearing and Methods for Supporting a Shaft Journal Using the Same. Patent No. WO2007/011366A3, filed September 16th 2005; published January 25th 2007.

32. Tian Y., Sun Y., Yang L.-H. [et al.]. Steady-State Control of Hybrid Foil-Magnetic Bearings // *Conference: ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2012. DOI: 10.1115/GT2012-68394.

33. Heshmat H. On the Theory of Quasi-Hydrodynamic Lubrication with Dry Powder: Application to Development of High-speed Journal Bearings for Hostile Environments // *Tribology and Interface Engineering Series*. 1994. Vol. 27 (C). P. 45–64. DOI: 10.1016/S0167-8922(08)70296-7.

34. Heshmat H., Brew D. Performance of Powder-Lubricated Journal Bearings With MoS₂ Powder-Experimental-Study of Thermal Phenomena // *Journal of Tribology*. 1995. Vol. 117 (3). P. 506–512.

35. Jordanoff I., Berthier Y., Descartes S. A Review of Recent Approaches for Modeling Solid Third Bodies [et al.] // *Journal of Tribology*. 2002. Vol. 124 (4). P. 725–735. DOI: 10.1115/1.1467632.

36. Kaur R. G., Higgs C. F., Heshmat H. Pin-on-Disc Tests of Pelletized Molybdenum Disulfide // *Tribology Transactions*. 2001. Vol. 44 (1). P. 79–87.

37. Heshmat H., Brew D. E. Performance of a Powder Lubricated Journal Bearing With WS₂ Powder: Experimental Study // *Journal of Tribology*. 1996. Vol. 118 (3). P. 484–491.

38. Heshmat H., Kaur R. G. Powder lubricated bearing operation to pv of half a million // *Boundary and Mixed Lubrication: Science and Applications*. Elsevier Science B.V., 2002. P. 477–480.

39. Heshmat H. The Rheology and Hydrodynamics of Dry Powder Lubrication // *Tribology Transactions*. 1991. Vol. 34 (3). P. 433–439.

40. Heshmat H. High Temperature, Solid-Lubricated Bearing Development-Dry-Powder-Lubricated Traction Testing // *Journal of Propulsion and Power*. 1991. Vol. 7 (5). P. 814–820.

41. Heshmat H. Development of Rheological Model for Powder Lubrication: MTI Technical Report 91TR3 1, prepared for Propulsion Directorate, U.S. / Army Aviation Research and Technology Activity, NASA-Lewis Research Center. Cleveland, Ohio, (June 1991).

42. Nikolakakis I., Pilpel N. Effects of Particle Shape and Size on the Tensile Strengths of Powder // *Powder Technology*. 1988. Vol. 56, no. 2. P. 95–103.

43. Heshmat H. High Temperature Solid-Lubricated Bearing Development-Dry Powder-Lubricated Traction Testing // *Journal of Propulsion and Power*. 1991. Vol. 7 (5). P. 814–820.

44. Kawakita K., Luddle K. H. Some Considerations on Powder Compression Equations // *Powder Technology*. 1970. Vol. 4, no. 1. P. 61–68.

45. Dill J., Heshmat H. Bearing technology for advanced propulsion systems MTI 86TR56: Final Report prepared for DARPA MDA903-86-C-0050. October 1991.

46. Kaur R. G. Heshmat H. 100 mm Diameter Self-Contained Solid/Powder Lubricated Auxiliary Bearing Operated at 30,000 rpm // *Lubrication Engineering*. 2002. Vol. 58 (6). P. 13–20.

47. Heshmat H. The Quasi-Hydrodynamic Mechanism of Power Lubrication. 1: Lubricant Flow Visualization // *Lubrication Engineering*. 1992. Vol. 48 (2). P. 96–104.

48. Heshmat H., Heshmat C. A. Effect of Slider Geometry on the Performance of a Powder Lubricated Bearing // *Tribology Transactions*. 1999. Vol. 42 (3). P. 640–646.

49. Higgs C. F., Heshmat C. A., Heshmat H. S. Comparative Evaluation of MoS₂ and WS₂ as Powder Lubricants in High

Speed, Multi-Pad Journal Bearings // *Journal of Tribology*. 1999. Vol. 121 (3). P. 625–630.

50. Hirata A., Igarashi M., Kaito T. Study on Solid Lubricant Properties of Carbon Onions Produced by Heat Treatment of Diamond Clusters or Particles // *Tribology International*. 2004. Vol. 37 (11-12). P. 899–905.

51. Heshmat H. Rolling and Sliding Characteristics of Powder-Lubricated Ceramics at High-Temperature and Speed // *Lubrication Engineering*. 1993. Vol. 49 (10). P. 791–797.

52. Tsai H. J., Jeng Y. R. Characteristics of Powder Lubricated Finite-Width Journal Bearings: A Hydrodynamic Analysis // *Journal of Tribology*. 2006. Vol. 128 (2). P. 351–357.

53. Cizaire L., Vacher B., Le Mogne T. [et al.]. Mechanisms of Ultra-Low Friction by Hollow Inorganic Fullerene-Like MoS₂ Nanoparticles // *Surface and Coatings Technology*. 2002. Vol. 16 (2-3). P. 282–287.

54. Rapoport L., Leshchinsky V., Lvovsky M. [et al.]. Superior Tribological Properties of Powder Materials With Solid Lubricant Nanoparticles // *Wear*. 2003. Vol. 255 (7-12). P. 794–800.

55. McKeague K. T., Khonsari M. M. An Analysis of Powder Lubricated Slider Bearings // *Journal of Tribology*. 1996. Vol. 118 (1). P. 206–214.

56. Heshmat H., Brew D. E. On the Cognitive Approach To ward Classification of Dry Triboparticulates // *Tribology Series*. 1994. Vol. 27 (C). P. 303–328.

57. Bridgwater J. Fluid Effects in Powder Mechanics // *Powder Technology*. 1984. Vol. 37. P. 245–254.

58. Tardos G. I., McNamara S., Talu I. Slow and Intermediate Flow of a Frictional Bulk Powder in the Couette Geometry // *Powder Technology*. 2003. Vol. 131 (1). P. 23–39.

59. Zhou L., Khonsari M. M. Flow Characteristics of a Powder Lubricant Sheared Between Parallel Plates // *Journal of Tribology*. 2000. Vol. 122. P. 147–154.

60. Heshmat H. Wear Reduction Systems for Coal-Fueled Diesel Engines. II: Experimental Results and Hydrodynamic Model of Powder Lubrication // *Wear*. 1993. Vol. 162–164. Part A. P. 518–528.

61. Tardos G. I. A Fluid Mechanistic Approach to Slow, Frictional Flow of Powders // *Powder Technology*. 1997. Vol. 92 (1). P. 61–74.

62. Heshmat H. High-Temperature Solid-Lubricated Bearing Development-Dry Powder-Lubricated Traction Testing // *Journal of Propulsion and Power*. 1991. Vol. 7 (5). P. 814–820.

63. Mathia T., Louis F. Powder Mechanics in Tribology // *Powder Technology*. 1984. Vol. 37. P. 155–167.

64. Heshmat H. The Effect of Slider Geometry on the Performance of a Powder Lubricated Bearing-Theoretical Considerations // *Tribology Transactions*. 2000. Vol. 43 (2). P. 213–220.

65. Barois-Cazenave A., Marchal P., Falk V. [et al.]. Experimental Study of Powder Rheological Behaviour // *Powder Technology*. 1999. Vol. 103 (1). P. 58–64.

66. Heshmat H. Powder-Lubricated Piston Ring Development Program: Report MTI 89TR28 / Army Aviation Systems Command, Propulsion Directorate, Lewis Research Center, 1989.

67. Heshmat H. Powder-Lubricated Wedge Damper. Patent U. S. No. 1242-93 (2-D-814), filed April 12th 1988.

68. Wallerstein S. Application of a Powder Lubrication system to a Gas Turbine Engine. Part II. AFAPL-TR-65-43. 1966.

69. Wallerstein S. Application of a Powder Lubrication system to a Gas Turbine Engine. Part III. AFAPL TR-65-43. 1966.

70. Heshmat H. Static and Dynamic Characteristics of High-Temperature, Powder-Lubricated Materials: Interim Report for July 1987 to June 1990 / Aero Propulsion and Power Directorate, Wright Laboratory, Air Force Systems Command, Wright Patterson Air Force Base, 1992. WL-TR-92-2050.

71. Dareing D. W., Atluri S. Traction Behavior and Physical Properties of Powder Graphite Lubricants Compacted to Hertzian Pressure Levels // *Tribology Transactions*. 1997. Vol. 40, no. 3. P. 413–420. DOI: 10.1080/10402009708983675.

72. Tsai H.-J., Jeng Y.-R. Characteristics of powder lubricated finite-width journal bearings: A hydrodynamic analysis // *Journal of Tribology*. 2006. Vol. 128 (2). P. 351–357.
73. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Performance investigations of powder lubricated circular/elliptic bore journal bearings and stability analysis of rigid rotors mounted on such bearings // *41st Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Leeds, UK, 2014.
74. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Powder and granular lubrication of journal and thrust bearings: A review // *Indian Journal of Tribology*. 2015. Vol. 7. P. 39–43.
75. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Dynamic Characteristics of a Finite-Width Journal Bearing Lubricated with Powders // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 144. P. 841–848.
76. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Performance behaviour of elliptical-bore journal bearings lubricated with solid granular particulates // *Particuology*. 2016. Vol. 27. P. 51–60.
77. Wei W., Xiaojun L., Kun L. [et al.]. Experimental study on the tribological properties of powder lubrication under plane contact // *Tribology Transactions*. 2010. Vol. 53 (2). P. 274–279. DOI: 10.1080/10402000903402660.
78. Jang J. Y., Khonsari M. M. On the Role of Enduring Contact in Powder Lubrication // *Journal of Tribology*. 2006. Vol. 128 (1). P. 168–175.
79. Гаркунов Д. Н. Триботехника: конструирование, изготовление и эксплуатация машин. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во МСХА, 2002. 629 с. ISBN 5-94327-093-0.
80. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков Вал. И., Калистратова Л. В. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. Москва: Машиностроение, 2005. 239 с. ISBN 5-217-03288-X.
81. Машков Ю. К., Кропотин О. В. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. 322 с. ISBN 978-5-8149-0804-9.
82. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, износ, смазка. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва: Физматлит, 2007. 367 с. ISBN 978-5-9221-0824-9.
83. Браун Э. Д., Буше Н. А., Буяновский И. А. [и др.] Основы трибологии: трение, износ, смазка / под ред. А. В. Чичинадзе. Москва: Наука и техника, 1995. 778 с. ISBN 5-900359-10-7.
84. Полимеры в узлах трения машин и приборов: справ. / Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1988. 328 с. ISBN 5-217-00239-5.
85. Браун Э. Д. [и др.] Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К. В. Фролов. Москва: Изд-во АКИ, 2008. 476 с. ISBN 978-5-382-00518-8.
86. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Москва: Машиностроение, 1992. 730 с. ISBN 5-217-01919-0.
87. Машков Ю. К., Полещенко К. Н., Поворознюк С. Н., Орлов П. В. Трение и модифицирование материалов трибосистем / под ред. Ю. К. Машкова. Москва: Наука, 2000. 280 с. ISBN 5-02-002491-0.
88. Райковский Н. А. Обеспечение работоспособности несмазываемых охлаждаемых подшипников скольжения маломощных турбоагрегатов на основе моделирования тепловых процессов и совершенствования конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2012. 238 с.
89. Харазов Э. Г. Исследование сил, действующих на опоры винтового компрессора: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1978. 212 с.
90. Паранин Ю. А., Якупов Р. Р., Бурмистров А. В. Математическая модель рабочего процесса спиральных машин сухого сжатия в условиях сплошной среды. Ч. 1. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16, № 19. С. 267–271.
91. Зеленецкий С. Б., Рябков Е. Д., Микеров А. Г. Ротационные пневматические двигатели. Ленинград: Машиностроение, 1976. 239 с.
92. Radil K., Howard S., Dykas B. The Role of Radial Clearance on the Performance of Foil Air Bearings // *Tribology Transactions*. 2002. Vol. 45 (4). P. 485–490.
93. Булат М. П. Оценка эффективности применения гибридного газового подшипника в высокооборотных турбомашинах: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2017. 107 с.
94. Симсон А. Э., Каминский В. Н., Моргулис Ю. Б. [и др.]. Турбонаддув высокооборотных дизелей. Москва: Машиностроение, 1976. 286 с.
95. Крутов В. И. Регулирование турбонаддува ДВС. Москва: Высшая школа, 1978. 213 с.
96. Межеричкий А. Д. Агрегаты систем турбонаддува судовых двигателей. — Мурманск: Кн. изд-во, 1983. 176 с.
97. Heshmat H., Walton J. F. Starved Hydrodynamic Gas Foil Bearings-Experiment, Micromechanical Phenomenon and Hypotheses // *Journal of Tribology*. 2016. Vol. 138 (4). 041703. DOI: 10.1115/1.4032911.
98. Heshmat H. *Tribology of Interface Layers*. Boca Raton: CRC Press, 2010. 464 p. ISBN 9780429116483.

РАЙКОВСКИЙ Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.
SPIN-код: 9140-9356
AuthorID (РИНЦ): 684470
ORCID: 0000-0002-2783-8298
AuthorID (SCOPUS): 57190974742
Адрес для переписки: n_raykovskiy@mail.ru

Для цитирования

Райковский Н. А. Анализ развития безмасляных подшипниковых систем быстроходных компрессорных и энергетических агрегатов роторного типа для мобильных условий эксплуатации // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2022. Т. 6, № 2. С. 36–49. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-36-49.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022 г.
© Н. А. Райковский

THE ANALYSIS OF DEVELOPMENT OF OIL-FREE BEARING SYSTEMS OF HIGH-SPEED COMPRESSOR AND ROTARY-TYPE POWER UNITS FOR MOBILE OPERATING CONDITIONS

N. A. Raykovskiy

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article considers an analysis of prospects for the use of oil-free bearings for working conditions in rotary units of autonomous mobile installations. The analysis made it possible to establish the current level of development of oil-free bearing technologies, the existing limitations of their use in units of autonomous mobile installations and urgent problems, the solution of which requires research and further improvement of the designs of bearing units.

Keywords: oil-free bearing, rotary units, mobile object, gas lubricant, powder lubricant, magnetic bearing, conditions of application.

References

1. Yusha V. L. Sozdaniye i sovershenstvovaniye stupeney kompressorov ob'yemnogo deystviya dlya avtonomnykh mobil'ny ustanovok [Creation and improvement of positive displacement compressor stages for autonomous mobile installations. Omsk, 2008. 434 p. (In Russ.).
2. Jansen M., Montague G., Provenza A. [et al.]. High speed, high temperature, fault tolerant operation of a combination magnetic-hydrostatic bearing rotor support system for turbomachinery // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2004. Vol. 6. P. 599–606. (In Engl.).
3. Zhuravlev Yu. N. Aktivnyye magnitnyye podshipniki: teoriya, raschet, primeneniye [Active magnetic bearings: theory, calculation, application]. St. Peterburg, 2003. 208 p. ISBN 5-7325-0655-1. (In Russ.).
4. Bleuler H. Magnetic levitation: a challenge for control design in mechatronics // Toshiba Chair for Intelligent Mechatronics. 2011. Vol. 44, no. 12. P. 578–583. (In Engl.).
5. Schweitzer G., Maslen E. H. Introduction and Survey // Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 1–26. (In Engl.).
6. Kingsbury magnetic bearings. Active Magnetic Bearings & High Speed Motors/Generators. URL: <http://www.magnetic-bearings-s2m.com> (accessed: 10.04.2022). (In Engl.).
7. Schmied J., Nijhuis A. B. M., Shultz R. R. Rotordynamic Design Considerations for a 23 MW Compressor with Magnetic Bearings // IMechE Fluid Machinery Symposium. The Hague. 1999. P. 118–130. URL: https://www.delta-js.ch/file/354/NAM_Paper.pdf (accessed: 06.04.2022). (In Engl.).
8. API Standard 617-2002. Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services. URL: <https://dokumen.tips/documents/api-std-617-2002.html> (accessed: 06.04.2022). (In Engl.).
9. Clark D. J., Jansen M. J., Montague G. T. An overview of magnetic bearing technology for gas turbine engines. NASA/TM-2004-213177. URL: http://archive.org/details/nasa_techdoc_20040110826 (accessed: 06.04.2022). (In Engl.).
10. Provenza A. J., Montague G. T., Jansen M. J. [et al.]. High temperature characterization of a radial magnetic bearing for turbomachinery // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2005. Vol. 127 (2). P. 437–444. (In Engl.).
11. Zaretsky E. V., Bamberger E. N., Singer H. Operating characteristics of 120 mm bore ball bearings at 3x106 DN. NASA TN D-7837. URL: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750004258_1975004258.pdf. (accessed: 26.03.2022). (In Engl.).
12. Shrestha G., Polinder H., Bang D. J. [et al.]. Direct drive wind turbine generator with magnetic bearing. URL: <http://www.123seminaronly.com/Seminar-Reports/049/21649129-Magnetic-Bearing.pdf> (accessed: 26.03.2022). (In Engl.).
13. Polinder H., Morren J. Developments in wind turbine generator systems // 8th International conference on modeling and simulation of electric machines, converters and systems. Hammamet, Tunisia, 2005. P. 67–78. (In Engl.).
14. Polinder H., van der Pijl F. F. A., de Vilder G. J. [et al.]. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. Vol. 21 (3). P. 725–733. (In Engl.).
15. Alwre P. E., Maslen E. H., Kim H. C. [et al.]. Design of a magnetic bearing-supported prototype centrifugal artificial heart pump // Tribology Transactions. 1996. Vol. 39, no. 3. P. 663–669. (In Engl.).
16. Akamatsu T., Yoshino Y., Tsukiya T. Studies of performance and operating condition of centrifugal blood pump with magnetically suspended impeller // Artificial Organs. 1994. Vol. 18, no. 3. P. 244. (In Engl.).
17. Heshmat H., Walton J. F., Cordova J. L. Technology Readiness of 5th and 6th Generation Compliant Foil Bearing for 10 MWE S-CO2 Turbomachinery Systems // In Proceeding of the 6th International Supercritical CO2 Power Cycles Symposium, March 27–29. 2018. Pittsburgh, Pennsylvania. (In Engl.).
18. Konstantinesku V. N. Gazovaya smazka [Gas lubricant] / trans. from Romanian G. P. Makho; by ed. M. V. Korovchinskogo. Moscow, 1968. 718 p. (In Russ.).
19. Maksimov V. A. Perspektivy primeneniya podshipnikov s gazovoy smazkoy [Prospects for the use of bearings with gas lubrication] // Gazoturbinnyye tekhnologii. *Gas Turbine Technologies*. 2004. No. 7. P. 10. (In Russ.).
20. Kosmynin A. V., Vinogradov V. S. Gazovyye podshipniki vysokoskorostnykh turboprivodov metalloobrabatyvayushchego oborudovaniya [Gas bearings for high-speed turbo drives of metalworking equipment]. Vladivostok, 2002. 326 p. ISBN 5-8044-0228-5. (In Russ.).
21. Pinegin S. V., Pospelov G. A., Peshti Yu. V. Opory s gazovoy smazkoy v turbomashinakh ogranichennoy moshchnosti

- [Gas lubricated bearings in limited capacity turbomachines]. Moscow, 1977. 149 p.
22. Kurzakov A. S., Shatokhin S. N. Analiz metodov teoreticheskogo issledovaniya i rascheta adaptivnykh aerostaticeskikh shpindel'nykh opor [Analysis of methods for theoretical research and calculation of adaptive aerostatic spindle supports] // STIN. STIN. 2003. No. 5. P. 7–11. (In Russ.).
23. Swanson E. E., Walton J. F., Heshmat H. A Test Stand for Dynamic Characterization of Oil-Free Bearings for Modern Gas Turbine Engines // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Amsterdam, 2002. Vol. 1. P. 39–48. (In Engl.).
24. Bulat P. V., Bulat M. P. Basic Classification of the Gas-Lubricated Bearings // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 28 (10). P. 1444–1448. (In Engl.).
25. Sipekov I. E., Filippov A. Yu., Boldyrev Yu. A. [et al.]. Prensionnyye gazovyye podshipniki [Precision gas bearings] / by ed. A. Yu. Filippova, I. E. Sipekova. St. Petersburg, 2007. 503 p. ISBN 5-900780-63-5. (In Russ.).
26. Peng, Z.-C., Khonsari M. M. A Thermohydrodynamic Analysis of Foil Journal Bearings // Journal of Tribology. 2006. Vol. 128 (3). P. 534–541. (In Engl.).
27. Della Corte C. Stiffness and Damping Coefficient Estimation of Compliant Surface Gas Bearings for Oil-Free Turbomachinery. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110003624/downloads/20110003624.pdf> (accessed: 12.04.2022). (In Engl.).
28. Rumyantsev M. Yu., Zakharova N. E., Sigachev S. I. Primeneniye lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikov v turbogeneratornykh agregatakh maloy moshchnosti [Application of flap gas-dynamic bearing in turbine-generator units of low power] // Izvestiya MGTU «MAMI». *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014. Vol. 1, no. 4 (22). P. 61–68. (In Russ.).
29. Temis M. Yu. Vliyaniye konstruksii lepestkov radial'nogo gazovogo podshipnika na kharakteristiki zhestkosti i dempirovaniya v opore (obzor) [Influence of the foil design in radial foil gas bearings characteristics of stiffness and damping in the support (review)] // Aviatsonnyye dvigateli. *Aviation Engines*. 2020. No. 2 (7). P. 57–77. DOI: 10.54349/26586061_2020_2_57. (In Russ.).
30. Heshmat H., Walton J. F., Corte C. D. [et al.]. Oil-Free Turbocharger Demonstration Paves Way to Gas Turbine Engine Applications // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Munich, Germany, 2000. P. 1–8. (In Engl.).
31. Foshage G. K., Lovelace E. C. An Integrated Magnetic/Foil Bearing and Methods for Supporting a Shaft Journal Using the Same. Patent No. WO2007/011366A3, filed September 16th 2005; published January 25th 2007. (In Engl.).
32. Tian Y., Sun Y., Yang L.-H. [et al.]. Steady-State Control of Hybrid Foil-Magnetic Bearings // Conference: ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. 2012. DOI: 10.1115/GT2012-68394. (In Engl.).
33. Heshmat H. On the Theory of Quasi-Hydrodynamic Lubrication with Dry Powder: Application to Development of High-speed Journal Bearings for Hostile Environments // Tribology and Interface Engineering Series. 1994. Vol. 27 (C). P. 45–64. DOI: 10.1016/S0167-8922(08)70296-7. (In Engl.).
34. Heshmat H., Brewe D. Performance of Powder-Lubricated Journal Bearings With MoS₂ Powder-Experimental-Study of Thermal Phenomena // Journal of Tribology. 1995. Vol. 117 (3). P. 506–512. (In Engl.).
35. Iordanoff I., Berthier Y., Descartes S. A Review of Recent Approaches for Modeling Solid Third Bodies [et al.] // Journal of Tribology. 2002. Vol. 124 (4). P. 725–735. DOI: 10.1115/1.1467632. (In Engl.).
36. Kaur R. G., Higgs C. F., Heshmat H. Pin-on-Disc Tests of Pelletized Molybdenum Disulfide // Tribology Transactions. 2001. Vol. 44 (1). P. 79–87. (In Engl.).
37. Heshmat H., Brewe D. E. Performance of a Powder Lubricated Journal Bearing With WS₂ Powder: Experimental Study // Journal of Tribology. 1996. Vol. 118 (3). P. 484–491. (In Engl.).
38. Heshmat H., Kaur R. G. Powder lubricated bearing operation to pv of half a million // Boundary and Mixed Lubrication: Science and Applications. Elsevier Science B.V., 2002. P. 477–480. (In Engl.).
39. Heshmat H. The Rheology and Hydrodynamics of Dry Powder Lubrication // Tribology Transactions. 1991. Vol. 34 (3). P. 433–439. (In Engl.).
40. Heshmat H. High Temperature, Solid-Lubricated Bearing Development-Dry-Powder-Lubricated Traction Testing // Journal of Propulsion and Power. 1991. Vol. 7 (5). P. 814–820. (In Engl.).
41. Heshmat H. Development of Rheological Model for Powder Lubrication: MTI Technical Report 91TR3 1, prepared for Propulsion Directorate, U.S. / Army Aviation Research and Technology Activity, NASA-Lewis Research Center. Cleveland, Ohio, (June 1991). (In Engl.).
42. Nikolakakis I., Pilpel N. Effects of Particle Shape and Size on the Tensile Strengths of Powder // Powder Technology. 1988. Vol. 56, no. 2. P. 95–103. (In Engl.).
43. Heshmat H. High Temperature Solid-Lubricated Bearing Development-Dry Powder-Lubricated Traction Testing // Journal of Propulsion and Power. 1991. Vol. 7 (5). P. 814–820. (In Engl.).
44. Kawakita K., Luddle K. H. Some Considerations on Powder Compression Equations // Powder Technology. 1970. Vol. 4, no. 1. P. 61–68. (In Engl.).
45. Dill J., Heshmat H. Bearing technology for advanced propulsion systems MTI 86TR56: Final Report prepared for DARPA MDA903-86-C-0050. October 1991. (In Engl.).
46. Kaur R. G., Heshmat H. 100 mm Diameter Self-Contained Solid/Powder Lubricated Auxiliary Bearing Operated at 30,000 rpm // Lubrication Engineering. 2002. Vol. 58 (6). P. 13–20. (In Engl.).
47. Heshmat H. The Quasi-Hydrodynamic Mechanism of Power Lubrication. 1: Lubricant Flow Visualization // Lubrication Engineering. 1992. Vol. 48 (2). P. 96–104. (In Engl.).
48. Heshmat H., Heshmat C. A. Effect of Slider Geometry on the Performance of a Powder Lubricated Bearing // Tribology Transactions. 1999. Vol. 42 (3). P. 640–646. (In Engl.).
49. Higgs C. F., Heshmat C. A., Heshmat H. S. Comparative Evaluation of MoS₂ and WS₂ as Powder Lubricants in High Speed, Multi-Pad Journal Bearings // Journal of Tribology. 1999. Vol. 121 (3). P. 625–630. (In Engl.).
50. Hirata A., Igarashi M., Kaito T. Study on Solid Lubricant Properties of Carbon Onions Produced by Heat Treatment of Diamond Clusters or Particles // Tribology International. 2004. Vol. 37 (11-12). P. 899–905. (In Engl.).
51. Heshmat H. Rolling and Sliding Characteristics of Powder-Lubricated Ceramics at High-Temperature and Speed // Lubrication Engineering. 1993. Vol. 49 (10). P. 791–797. (In Engl.).
52. Tsai H. J., Jeng Y. R. Characteristics of Powder Lubricated Finite-Width Journal Bearings: A Hydrodynamic Analysis // Journal of Tribology. 2006. Vol. 128 (2). P. 351–357. (In Engl.).
53. Cizaire L., Vacher B., Le Mogne T. [et al.]. Mechanisms of Ultra-Low Friction by Hollow Inorganic Fullerene-Like MoS₂ Nanoparticles // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 16 (2-3). P. 282–287. (In Engl.).
54. Rapoport L., Leshchinsky V., Lvovsky M. [et al.]. Superior Tribological Properties of Powder Materials with Solid Lubricant Nanoparticles // Wear. 2003. Vol. 255 (7-12). P. 794–800. (In Engl.).
55. McKeague K. T., Khonsari M. M. An Analysis of Powder Lubricated Slider Bearings // Journal of Tribology. 1996. Vol. 118 (1). P. 206–214. (In Engl.).
56. Heshmat H., Brewe D. E. On the Cognitive Approach To ward Classification of Dry Triboparticulates // Tribology Series. 1994. Vol. 27 (C). P. 303–328. (In Engl.).
57. Bridgwater J. Fluid Effects in Powder Mechanics // Powder Technology. 1984. Vol. 37. P. 245–254. (In Engl.).

58. Tardos G. I., McNamara S., Talu I. Slow and Intermediate Flow of a Frictional Bulk Powder in the Couette Geometry // *Powder Technology*. 2003. Vol. 131 (1). P. 23–39. (In Engl.).
59. Zhou L., Khonsari M. M. Flow Characteristics of a Powder Lubricant Sheared Between Parallel Plates // *Journal of Tribology*. 2000. Vol. 122. P. 147–154. (In Engl.).
60. Heshmat H. Wear Reduction Systems for Coal-Fueled Diesel Engines. II: Experimental Results and Hydrodynamic Model of Powder Lubrication // *Wear*. 1993. Vol. 162–164. Part A. P. 518–528. (In Engl.).
61. Tardos G. I. A Fluid Mechanistic Approach to Slow, Frictional Flow of Powders // *Powder Technology*. 1997. Vol. 92 (1). P. 61–74. (In Engl.).
62. Heshmat H. High-Temperature Solid-Lubricated Bearing Development-Dry Powder-Lubricated Traction Testing // *Journal of Propulsion and Power*. 1991. Vol. 7 (5). P. 814–820. (In Engl.).
63. Mathia T., Louis F. Powder Mechanics in Tribology // *Powder Technology*. 1984. Vol. 37. P. 155–167. (In Engl.).
64. Heshmat H. The Effect of Slider Geometry on the Performance of a Powder Lubricated Bearing-Theoretical Considerations // *Tribology Transactions*. 2000. Vol. 43 (2). P. 213–220. (In Engl.).
65. Barois-Cazenave A., Marchal P., Falk V. [et al.]. Experimental Study of Powder Rheological Behaviour // *Powder Technology*. 1999. Vol. 103 (1). P. 58–64. (In Engl.).
66. Heshmat H. Powder-Lubricated Piston Ring Development Program: Report MTI 89TR28 / Army Aviation Systems Command, Propulsion Directorate. Lewis Research Center, 1989. (In Engl.).
67. Heshmat H. Powder-Lubricated Wedge Damper. Patent U.S. No. 1242-93 (2-D-814), filed April 12th 1988. (In Engl.).
68. Wallerstein S. Application of a Powder Lubrication system to a Gas Turbine Engine. Part II. AFAPL-TR-65-43. 1966. (In Engl.).
69. Wallerstein S. Application of a Powder Lubrication system to a Gas Turbine Engine. Part III. AFAPL TR-65-43. 1966. (In Engl.).
70. Heshmat H. Static and Dynamic Characteristics of High-Temperature, Powder-Lubricated Materials: Interim Report for July 1987 to June 1990 / Aero Propulsion and Power Directorate, Wright Laboratory, Air Force Systems Command, Wright Patterson Air Force Base, 1992. WL-TR-92-2050. (In Engl.).
71. Dareing D. W., Atluri S. Traction Behavior and Physical Properties of Powder Graphite Lubricants Compacted to Hertzian Pressure Levels // *Tribology Transactions*. 1997. Vol. 40, no. 3. P. 413–420. DOI: 10.1080/10402009708983675. (In Engl.).
72. Tsai H.-J., Jeng Y.-R. Characteristics of powder lubricated finite-width journal bearings: A hydrodynamic analysis // *Journal of Tribology*. 2006. Vol. 128 (2). P. 351–357. (In Engl.).
73. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Performance investigations of powder lubricated circular/elliptic bore journal bearings and stability analysis of rigid rotors mounted on such bearings // 41st Leeds-Lyon Symposium on Tribology. Leeds, UK, 2014. (In Engl.).
74. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Powder and granular lubrication of journal and thrust bearings: A review // *Indian Journal of Tribology*. 2015. Vol. 7. P. 39–43. (In Engl.).
75. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Dynamic Characteristics of a Finite-Width Journal Bearing Lubricated with Powders // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 144. P. 841–848. (In Engl.).
76. Rahmani F., Dutt J. K., Pandey R. K. Performance behaviour of elliptical-bore journal bearings lubricated with solid granular particulates // *Particuology*. 2016. Vol. 27. P. 51–60. (In Engl.).
77. Wei W., Xiaojun L., Kun L. [et al.]. Experimental study on the tribological properties of powder lubrication under plane contact // *Tribology Transactions*. 2010. Vol. 53 (2). P. 274–279. DOI: 10.1080/10402000903402660. (In Engl.).
78. Jang J. Y., Khonsari M. M. On the Role of Enduring Contact in Powder Lubrication // *Journal of Tribology*. 2006. Vol. 128 (1). P. 168–175. (In Engl.).
79. Garkunov D. N. Tribotekhnika: konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin [Tribotechnics: design, manufacture and operation of machines]. 5th ed. Moscow, 2002. 629 p. ISBN 5-94327-093-0. (In Russ.).
80. Mashkov Yu. K., Ovchar Z. N., Surikov Val. I., Kalistratova L. V. Kompozitsionnyye materialy na osnove politetraftoretlena. Strukturnaya modifikatsiya [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Moscow, 2005. 239 p. ISBN 5-217-03288-X. (In Russ.).
81. Mashkov Yu. K., Kropotin O. V. Tribofizika i stuktornaya modifikatsiya materialov tribosistem [Tribophysics and structural modification of tribosystem materials]. Omsk, 2009. 322 p. ISBN 978-5-8149-0804-9. (In Russ.).
82. Myshkin N. K., Petrokovets M. I. Treniye, iznos, smazka. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskiye prilozheniya tribologii [Friction, wear, lubrication. Physical foundations and technical applications of tribology]. Moscow, 2007. 367 p. ISBN 978-5-9221-0824-9. (In Russ.).
83. Braun E. D., Bushe N. A., Buyanovskiy I. A. [et al.]. Osnovy tribologii: treniye, iznos, smazka [Fundamentals of tribology: friction, wear, lubrication] / by ed. A. V. Chichinadze. Moscow, 1995. 778 p. ISBN 5-900359-10-7. (In Russ.).
84. Polimery v uzlakh treniya mashin i priborov: sprav. [Polymers in friction units of machines and devices: handbook / By ed. A. V. Chichinadze. 2th ed. Moscow, 1988. 328 p. ISBN 5-217-00239-5. (In Russ.).
85. Braun E. D. [et al.]. Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy [Modern tribology: results and prospects] / Resp. ed. K. V. Frolov. Moscow, 2008. 476 p. ISBN 978-5-382-00518-8. (In Russ.).
86. Spravochnik po tribotekhnike. V 3 t. T. 3. Tribotekhnika antifriktsionnykh, friktsionnykh i stepnykh ustroystv. Metody i sredstva tribotekhnicheskikh ispytaniy [Reference book on tribotechnics. In 3 vols. Vol. 3. Tribotechnics of antifriction, friction and coupling devices. Methods and means of tribological testing] / By ed. M. Khebdy, A. V. Chichinadze. Moscow, 1992. 730 p. ISBN 5-217-01919-0. (In Russ.).
87. Mashkov Yu. K., Poleshchenko K. N., Povoroznyuk S. N., Orlov P. V. Treniye i modifitsirovaniye materialov tribosistem [Friction and modification of tribosystem materials] / by ed. Yu. K. Mashkova. Moscow, 2000. 280 c. ISBN5-02-002491-0. (In Russ.).
88. Raykovskiy N. A. Obespecheniye rabotosposobnosti nesmazyyayemykh okhlazhdayemykh podshipnikov skol'zheniya maloraskhodnykh turboagregatov na osnove modelirovaniya teplyykh protsessov i sovershenstvovaniya konstruktsiy [Ensuring the performance of non-lubricated cooled plain bearings of low-flow turbine units based on modeling thermal processes and improving designs]. Omsk, 2012. 238 p. (In Russ.).
89. Kharazov E. G. Issledovaniye sil, deystvuyushchikh na opory vintovogo kompressora [Investigation of the Force Detected on the Supports of a Screw Compressor]. Leningrad, 1978. 212 p. (In Russ.).
90. Paranin Yu. A., Yakupov R. R., Burmistrov A. V. Matematicheskaya model' rabocheho protsessa spiral'nykh mashin sukhogo szhatiya v usloviyakh sploshnoy sredy. Ch. 1. [Mathematical model of the working process of dry compression spiral machines in continuum conditions. Part 1] // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Bulletin of the Technological University*. 2013. Vol. 16, no. 19. P. 267–271. (In Russ.).
91. Zelenetskiy S. B., Ryabkov E. D., Mikerov A. G. Rotatsionnyye pnevmaticheskiye dvigateli [Rotary air motors]. Leningrad, 1976. 239 c. (In Russ.).
92. Radil K., Howard S., Dykas B. The Role of Radial Clearance on the Performance of Foil Air Bearings // *Tribology Transactions*. 2002. Vol. 45 (4). P. 485–490. (In Engl.).
93. Bulat M. P. Otsenka effektivnosti primeneniya gibridnogo gazovogo podshipnika v vysokoobrotnykh turbomashinakh

[Evaluation of the efficiency of using a hybrid gas bearing in high-speed turbomachines]. St. Peterburg, 2017. 107 p. (In Russ.).

94. Simson A. E., Kaminskiy V. N., Morgulis Yu. B. [et al.]. Turbonadduv vysokooborotnykh dizeley [Turbocharging of high-speed diesel engines]. Moscow, 1976. 286 p. (In Russ.).

95. Krutov V. I. Regulirovaniye turbonadduva DVS [ICE turbocharging regulation]. Moscow, 1978. 213 p. (In Russ.).

96. Mezheritskiy A. D. Agregaty sistem turbonaduva sudovykh dvigateley [Units of turbocharging systems for marine engines]. Murmansk, 1983. 176 p. (In Russ.).

97. Heshmat H., Walton J. F. Starved Hydrodynamic Gas Foil Bearings-Experiment, Micromechanical Phenomenon and Hypotheses // Journal of Tribology. 2016. Vol. 138 (4). 041703. DOI: 10.1115/1.4032911. (In Engl.).

98. Heshmat H. Tribology of Interface Layers. Boca Raton: CRC Press, 2010. 464 p. ISBN 9780429116483. (In Engl.).

RAYKOVSKIY Nikolay Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration

and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9140-9356

AuthorID (RSCI): 684470

ORCID: 0000-0002-2783-8298

AuthorID (SCOPUS): 57190974742

Correspondence address: n_raykovskiy@mail.ru

For citations

Raykovskiy N. A. The analysis of development of oil-free bearing systems of high-speed compressor and rotary-type power units for mobile operating conditions // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 36 – 49. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-36-49.

Received April 11, 2022.

© N. A. Raykovskiy