

ГЕРВИКОН
HERVICON

ЭККОН
ЕККОН



6 - 9 сентября 2011, СумГУ, г. Сумы, Украина

XIII Международная научно-техническая конференция "ГЕРВИКОН-2011"

Международный форум "НАСОСЫ-2011"

Семинар "ЭККОН-11"

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С ВКЛАДЫШАМИ НА ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ПОДВЕСЕ

Марцинковский В.С.¹, Юрко В.И.², Тарельник В.Б.³, Филоненко Ю.С.⁴

АННОТАЦИЯ

Разработана конструкция радиального подшипника скольжения с самоустанавливающимися вкладышами на гидростатическом подвесе, позволяющая устранить недостатки традиционных подшипников скольжения. Описаны этапы совершенствования конструкции и технологии изготовления подшипников, приведены сравнительные эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: Подшипник скольжения, гидростатический подвес, вибрация ротора, демпфирование, КПД, электроэрозионное легирование

Узлами, определяющими надежность работы современных высокоскоростных турбокомпрессоров, турбохолодильных машин, мультипликаторов, насосов являются подшипники скольжения.

Подшипники скольжения традиционной конструкции, которые в настоящее время являются штатными на большинстве агрегатов, имеют ряд недостатков, среди которых в первую очередь можно выделить следующее:

¹ Марцинковский Василий Сигизмундович, к.т.н., директор ООО «ТРИЗ», ул. Машиностроителей, 1, 40020, г. Сумы, Украина

² Юрко Владимир Иванович, зав. бюро расчетов и программирования, ООО «ТРИЗ», ул. Машиностроителей, 1, 40020, г. Сумы, Украина

³ Тарельник Вячеслав Борисович, д.т.н., проф., Сумский национальный аграрный университет, кафедра эксплуатации и ремонта машин, ул. Кирова, 160, 40021, г. Сумы, Украина

⁴ Филоненко Юрий Сергеевич, руководитель проекта, ООО «ТРИЗ», ул. Машиностроителей, 1, 40020, г. Сумы, Украина

- имеют недостаточную несущую и демпфирующую способность, что приводит к их интенсивному износу, повышенным потерям мощности и расхода смазки в переходных режимах и режимах отличных от номинальных;
- подвержены повышенному механическому износу опорных поверхностей колодок (т.н. «просадка подшипника»);
- требуют повышенных зазоров в лабиринтных уплотнениях из-за большой прецессии ротора при пуске, остановке;
- способны вызывать автоколебания силами масляного возбуждения, возникающими в гидродинамическом слое подшипников;
- не защищены от электроэрозионного износа.

В частности, в работе [1] описывается использование для различных условий эксплуатации подшипников различных конструкций: многоклиновых, сегментных, комбинированных, но ни одна из этих конструкций не обеспечивает надежной работы на пусковых и переходных режимах и эффективного демпфирования во всем спектре частот вибраций.

Как следствие из вышесказанного, штатные подшипники не соответствуют требованию непрерывной 2-х...4-х годичной эксплуатации динамического оборудования. Наиболее эффективным способом расширения диапазона устойчивой работы системы «ротор - подшипник» является применение опор, способных не только противостоять возникновению автоколебаний, но и активно гасить возникающую вибрацию.

В 1970 г. фирма “Pioneer Motor Bearing Co” разработала и успешно внедрила радиальный подшипник с самоустанавливающимися вкладышами на гидростатическом подвесе [2], который лишен основных недостатков традиционных подшипников скольжения. Благодаря высоким эксплуатационным качествам, конструкция опорного подшипника с самоустанавливающимися вкладышами на гидростатическом подвесе широко и успешно применяется фирмой «ТРИЗ» при решении различных задач эксплуатации динамического оборудования [3].

Особенностью таких подшипников (рис. 1) является наличие самогенерируемого гидростатического подвеса самоустанавливающихся вкладышей, формирующегося за счет отвода части смазки из несущего гидродинамического слоя через отверстие во вкладыше в гидростатический карман, расположенный на тыльной стороне вкладыша. В кармане таким образом создается гидростатическое давление, за счет чего вкладыш всплывает, а смазка дросселируется по спинке вкладыша.

Отсутствие механических контактов вкладышей не только позволяет упростить конструкцию, но и предотвращает истирание опорных поверхностей спинки вкладыша и корпуса подшипника и избавляет от

проблем, связанных с т.н. "просадкой подшипника", обеспечивает длительный ресурс работы узла без замены вкладышей.

Дополнительная степень свободы у вкладышей подшипников на гидростатическом подвесе обеспечивает их подвижность в поперечном и в угловом направлении. Наличие гидростатического подвеса позволяет вкладышам отслеживать колебания вала и демпфировать их за счет сил вязкости гидростатического слоя, чего нет в подшипниках традиционных конструкций. Благодаря этой особенности подшипники данного типа обладают повышенной демпфирующей способностью, позволяющей (что уже неоднократно подтверждено на практике) за счет эффективного демпфирования колебаний вала снижать уровень вибраций в несколько раз независимо от их источника, и это является их существенным преимуществом перед подшипниками скольжения остальных типов.

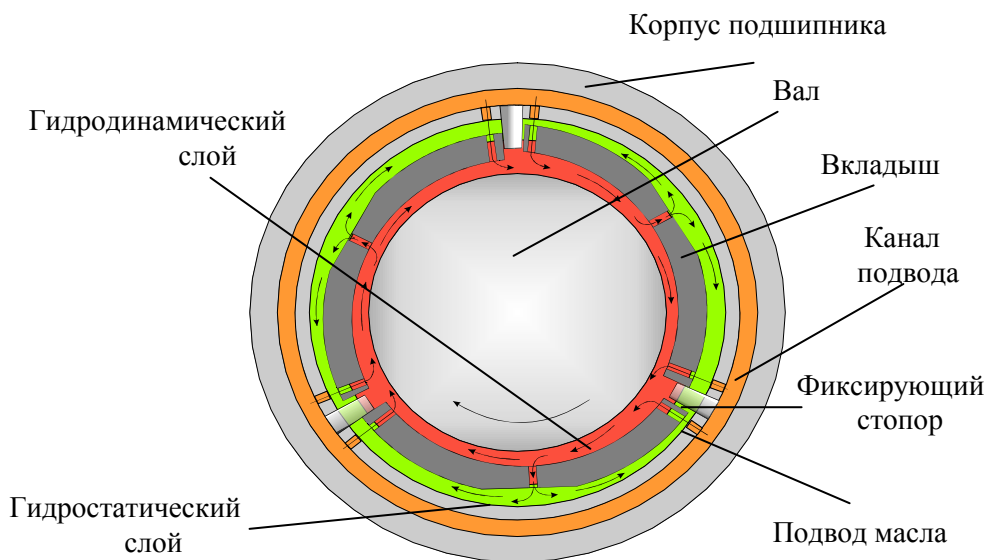


Рисунок 1 – Радиальный подшипник с вкладышами на гидростатическом подвесе

Впервые трехсегментные демпферные подшипники на гидростатической пленке, разработанные специалистами фирмы “ТРИЗ”, были использованы в 1990 г. в составе центробежного компрессора высокого давления установки для сайклинг-процесса на Тимофеевском газоконденсатном месторождении. Во время проведения пусконаладочных работ данной компрессорной установки (УКСП-500) мощностью 16 МВт столкнулись с проблемой повышенных вибраций ротора компрессора высокого давления,

обусловленных аэродинамическим возбуждением в проточной части. Гидродинамический подшипник с пятью самоустанавливающимися колодками при запуске опытного образца компрессора на природном газе демпфировал недостаточно эффективно. При выходе на рабочий режим (11300 об/мин) виброперемещения ротора достигали 400 мкм.

После установки трехсегментного демпферного подшипника вибрация ротора уменьшилась в десять раз. Для снижения температуры несущей гидродинамической пленки были приняты специальные конструктивные меры (рис. 2): распределительная канавка у входной кромки была выполнена со щелевым каналом, направленным от канавки к торцу подушки против направления вращения вала, а у выходной кромки выполнен паз для отвода нагретой смазки. Для эффективного снятия с вала горячей смазки в пазу установлен скребок, выполненный из износостойкого противозадирного материала. Причем в конструкции скребка предусмотрена такая форма, которая обеспечивает перемещение скребка вокруг его продольной оси для компенсации его износа при счисте горячего масла. Как показывают расчеты, применение маслосъемных скребков позволяет снизить максимальную температуру смазочного слоя примерно на 10...20°C, за счет чего несущая способность может быть повышена в 1,5...2 раза в тех случаях, когда она ограничена максимальной температурой смазочного слоя [4].

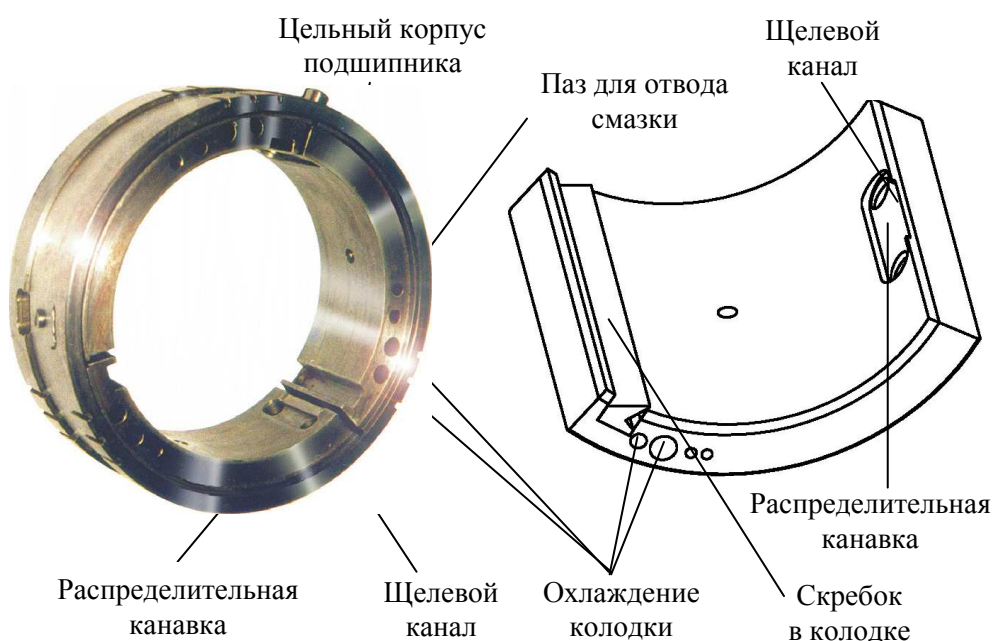


Рисунок 2 – Трехсегментный демпферный подшипник на гидростатической пленке компрессора сайклинг-процесса

В итоге, все перечисленные меры в комплексе позволили снизить температуру подшипника до допустимых значений и выйти на рабочую частоту вращения, оставив вибрацию ротора в пределах нормы.

Таким образом, эксплуатация и доводка опорных демпферных подшипников на гидростатической пленке дает необходимый материал для совершенствования конструкции подшипников, улучшения их эксплуатационных характеристик. В 1991 г. впервые корпус подшипника был выполнен разъемным, а маслоъемные скребки установлены между колодками [6], [7], [8].

Такие усовершенствования облегчают сборку подшипника, а также повышают его ремонтпригодность (рис. 3).

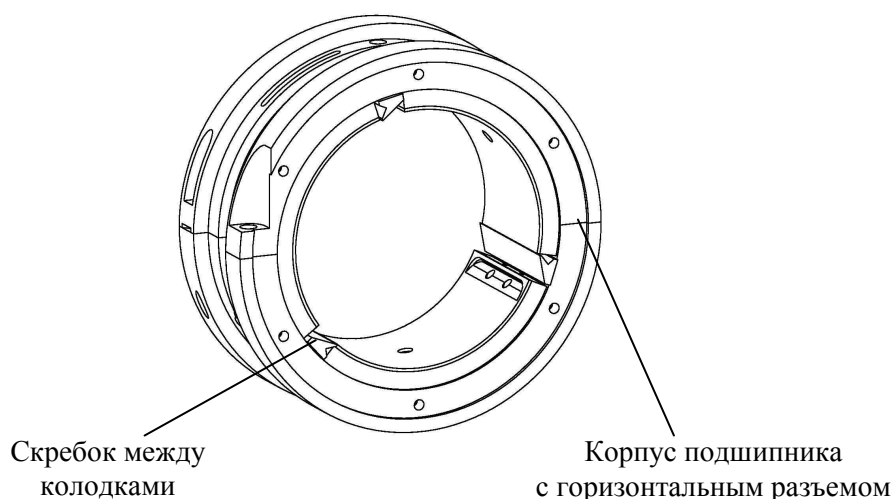


Рисунок 3 – Модернизированный демпферный опорный подшипник на гидростатической пленке

Наряду с совершенствованием конструкции, специалистами фирмы "ТРИЗ" проводились разработки, направленные на повышение износостойкости подшипников и шеек валов. В 1991 г. был разработан метод упрочнения шеек валов электроэрозионным легированием с последующей пластической деформацией (ЭЭЛ с ППД). Технология была апробирована и одобрена на предприятиях ЗАО «МХК «ЕвроХим», г.Новомосковск, ОАО «ДнепрАЗОТ», г.Днепродзержинск, Мироновская и Углеродская ГРЭС, Концерн «ОРИАНА», г.Калуш.

Благодаря своей надежности и высоким демпфирующим свойствам опорные подшипники с вкладышами на гидростатическом подвесе, проектируемые и изготавливаемые фирмой «ТРИЗ», успешно

эксплуатируются и эффективно помогают решать проблемы динамической устойчивости роторов центробежных компрессорных и насосных агрегатов, турбин, электродвигателей, генераторов большой мощности на различных предприятиях химической и нефтегазовой промышленности стран СНГ. В табл. 1 приведены некоторые примеры изменения вибросостояния после применения демпферных опорных подшипников на гидростатической пленке на компрессорных и насосных агрегатах.

Как правило, вибрации ротора на демпферных подшипниках в рабочем режиме снижались в 1,5...2 раза по сравнению с вибрациями ротора на штатных подшипниках скольжения при нормальном уровне вибраций до замены, и в 2...3 раза при повышенном уровне вибраций.

Таблица 1 – Изменение вибросостояния после применения демпферных опорных подшипников на гидростатической пленке

Наименование агрегата	Вибрация ротора	
	До установки демпферных подшипников	После установки демпферных подшипников
Компрессор К-1290-121-1 (ОАО "ДнепрАЗОТ")	5 мм/с	1,69 мм/с
Компрессор 11ТК-1 (НАК "АЗОТ")	70...85 мкм	20...35 мкм
Компрессор GB-101, КВД (ОАО "Концерн СТИРОЛ")	50...60 мкм	15...20 мкм
Насос НМР 3512 (НАК "АЗОТ")	25...30 мкм	8...15 мкм
Турбина ТК синтез-газа 103JT (Одесский припортовый завод)	50...60 мкм	20...30 мкм

При этом опорные подшипники на гидростатической пленке демонстрировали высокие демпфирующие свойства во всем диапазоне спектра частот вибрации, а также работоспособность вблизи помпажной зоны и критических частот вращения.

Показательным является сравнение эксплуатационных характеристик опорных подшипников турбины поз. 103-JT цеха производства аммиака ОПЗ штатной конструкции и конструкции фирмы "ТРИЗ" (см. табл. 2): по несущей способности, удельной нагрузке и удельному расходу подшипники фирмы "ТРИЗ" превосходят штатные примерно в 1,5 раза, при этом уровень вибраций ротора турбины после установки демпферных подшипников снизился в 5 раз.

Наряду с повышением надежности и снижением уровня вибрации применение демпферных опорных подшипников на гидростатической пленке способствует повышению экономичности агрегатов. Это обусловлено тем, что величина зазоров в лабиринтных уплотнениях и их износ в процессе эксплуатации напрямую зависят от величины прецессии ротора в опорных подшипниках.

Таблица 2 – Эксплуатационные характеристики опорных подшипников турбины поз. 103-ТТ цеха производства аммиака ОПЗ штатной конструкции и конструкции фирмы "ТРИЗ"

Модификации подшипников	Несущая способность, F, кгс	Скорость скольжения, V, м/сек	Удельное давление, P, кгс/см ²	Удельный расход смазки, Q, л/мин/т	Вибрация ротора, δ, мкм
Штатные подшипники ПО-120	2300	70	28	15	35
Подшипники фирмы «ТРИЗ» ПД-120	3600	70	42	11	7

Как показывает практика, именно увеличение зазоров в штатных уплотнениях по причине повышенной вибрации ротора на пусковых и нерасчетных режимах эксплуатации становится причиной постепенного снижения производительности компрессора.

Кроме того, в подшипниках скольжения традиционной конструкции в результате механического износа в процессе эксплуатации происходит увеличение зазора, т. н. "просадка подшипника" (см. фотографии на рис. 7), соответственно, увеличивается зазор и в лабиринтных уплотнениях. Применение демпферных подшипников позволяет снизить прецессию вала в 1,5...2 раза [9] и, благодаря отсутствию механических контактов и "просадки", обеспечивает высокую стабильность зазоров в процессе эксплуатации, за счет чего в лабиринтных уплотнениях изначально можно устанавливать меньший зазор по сравнению со штатными подшипниками. Уменьшение потерь мощности, связанных с перетоками газа в лабиринтных уплотнениях, позволяет повысить КПД агрегата и снизить потребляемую мощность на 0,8...1,5%, что, например, для газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16 эквивалентно экономии 128...240 кВт мощности.

Наиболее эффективное снижение протечек через лабиринтные уплотнения достигается при совместном применении демпферных опорных

подшипников и лабиринтных уплотнений, изготовленных из полимерного материала «РЕЕК», что позволяет дополнительно снизить расход протечек на 12% по сравнению со штатными подшипниками и в сумме на 80% по сравнению со штатными подшипниками и уплотнениями из алюминия.

В то же время из графиков рис.8 видно, что замена штатных подшипников на магнитные снижает экономичность агрегата. В силу того, что зазоры в магнитных подшипниках больше, чем в традиционных подшипниках скольжения (радиальный зазор составляет примерно 0,5 мм), в лабиринтных уплотнениях зазоры также должны быть соответственно больше. В результате существенно возрастает расход протечек через уплотнения, и это приводит к снижению КПД агрегата примерно на 1-2%, что, например, для ГПА Ц-16 эквивалентно потере 160-320 кВт мощности. Кроме того, магнитные подшипники неустойчиво работают и не обеспечивают необходимую надежность на переходных режимах и во внештатных ситуациях, что в лучшем случае приводит к замене страховочных шарикоподшипников, в худшем к замене, или к капитальному ремонту внутреннего корпуса с ротором.

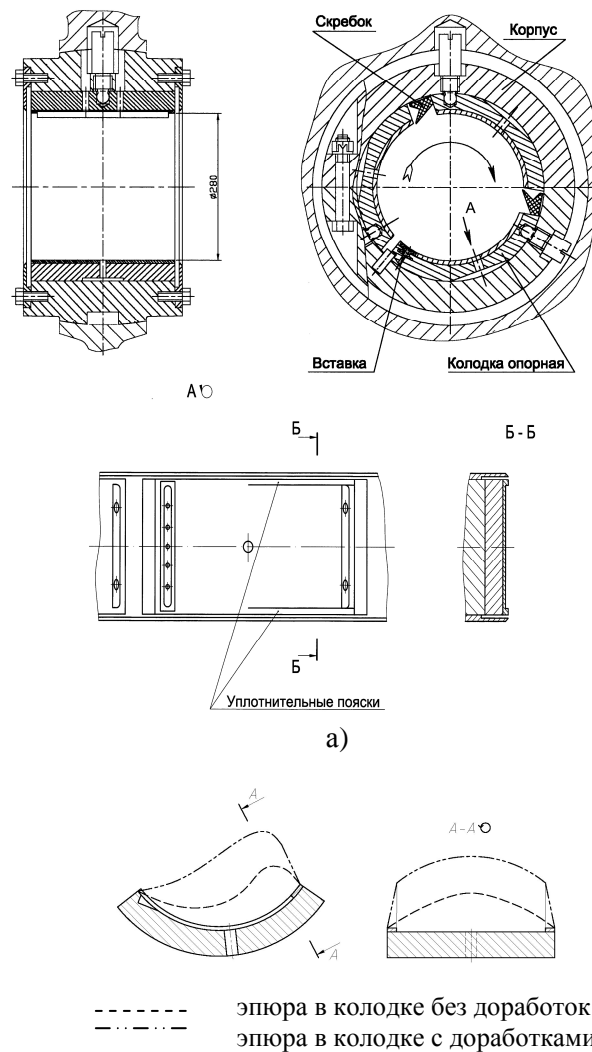
В 1999 г. при проектировании подшипника для турбогенератора ТГ-30 мощностью 25 МВт, вес ротора которого составляет 17000 кгс, встал вопрос о значительном повышении несущей способности без изменения размеров подшипников. Для этого были приняты конструктивные меры по наполнению эпюры несущего гидродинамического слоя, в частности на баббитовой поверхности по краям колодок были выполнены эллиптические пояски, предотвращающие утечки масла из гидродинамического клина в осевом направлении. Наиболее нагруженная колодка была выполнена с большим углом охвата, чем две остальные, и на выходе из нее вместо традиционного скребка была установлена вставка из противозадирного материала (рис. 4), объединяющая в себе функции скребка и уплотнения, предотвращающего утечки в окружном направлении, что также наполняет эпюру давления гидродинамического слоя [10], [11]. Эти конструктивные решения способствовали повышению несущей способности, согласно выполненным расчетам, примерно на 25% [4].

Для предотвращения электроэрозионного износа в опорных демпферных подшипниках используются маслосъемные скребки, изготовленные из электропроводного материала [6], [7], [8].

Повышению надежности и эксплуатационных характеристик узлов подшипников скольжения способствует использование в технологии их изготовления и ремонта метода электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) [13].

В 2003 г. была разработана и внедрена технология повышения качества сцепления баббитового слоя за счет переходных слоев электроискровым способом, суть которой сводится к тому, что на стальную подложку электроискровым способом наносится слой меди, на который, в свою

очередь, осуществляется заливка баббита (рис. 5). Такая технология позволяет повысить прочность соединения стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем на 35% за счет более прочной адгезионной связи между баббитом и медью и образования диффузионной связи между медью и стальной подложкой [14], [15].



б)
 Рисунок 4 – Демпферный опорный подшипник с повышенной несущей способностью: а) схема подшипника; б) изменение эпюры давления гидродинамического слоя

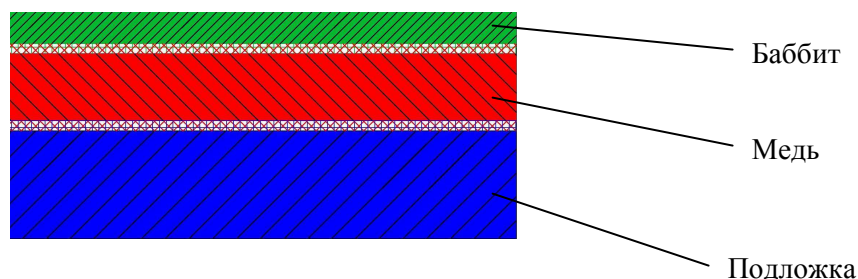


Рисунок 5 – Повышение качества сцепления баббитового слоя

Применение в подшипниках бронзовых колодок вместо стальных позволяет за счет более высокого коэффициента теплопроводности бронзы улучшить теплоотвод от несущего гидродинамического клина, снизить его температуру и повысить несущую способность подшипника. В 2004 г. специалистами фирмы «ТРИЗ» в качестве приработочных покрытий для бронзовых колодок были разработаны комбинированные электроэрозионные покрытия состава: «серебро + медь + баббит»; «серебро + свинец + серебро»; «серебро + медь + баббит + серебро» [16], [17]. Бронзовые колодки с такими покрытиями (рис. 6) хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации. В 2004 г. было также разработано антифрикционное покрытие с регулярным микрорельефом, способствующее повышению несущей способности подшипника за счет изменения эпюры гидродинамического слоя.

В 2005 г. была разработана конструкция подшипника с гидростатическим карманом, расположенным на внутренней поверхности корпуса подшипника (рис. 7).



Рисунок 6 – Бронзовые колодки с комбинированным антифрикционным покрытием

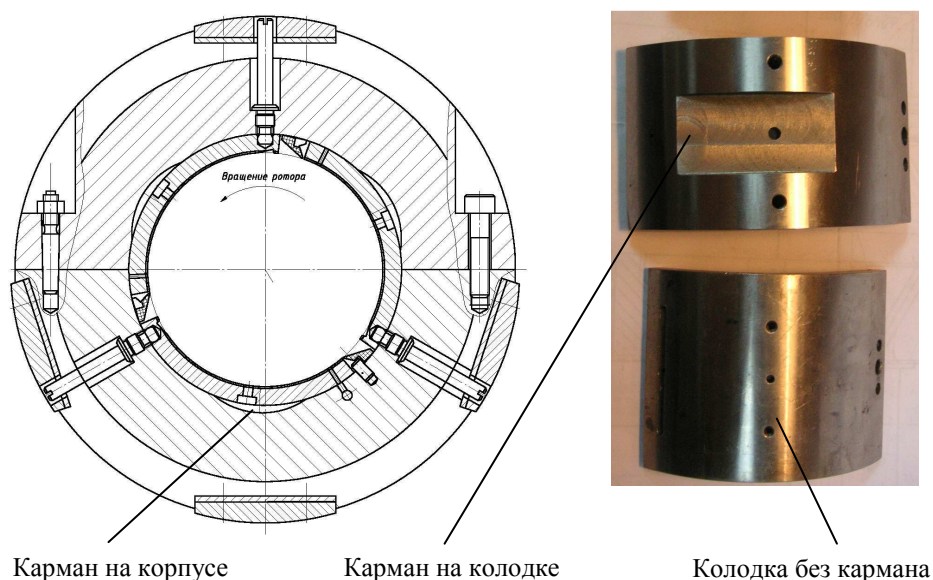


Рисунок 7 – Демпферный опорный подшипник с карманом на корпусе

Перенесение кармана из колодки на внутреннюю поверхность корпуса подшипникового узла позволяет уменьшить толщину самоустанавливающейся колодки и ее массу, что сводит к минимуму ее инерционность и улучшает динамические характеристики, повышает устойчивость системы ротор-подшипник [6], [7], [8].

В 2006 г. был разработан реверсивный демпферный опорный подшипник со свойствами нереверсивных вкладышей на гидростатической пленке, несущая способность и демпфирующие свойства которых такие же, как и у традиционных нереверсивных вкладышей конструкции фирмы «ТРИЗ» [12]. Этого удалось достичь за счет того, что на тыльной стороне вкладыша выполнен не один, а два симметрично расположенных гидростатических кармана. За счет неодинакового давления в гидростатических карманах положение равнодействующей эпюры на спинке вкладыша смещено относительно его середины по направлению вращения, что равносильно смещению гидростатического кармана, и таким образом обеспечиваются свойства нереверсивных вкладышей: высокая несущая способность и устойчивая вертикальная траектория шипа.

Реверсивность подшипника обеспечивается за счет симметричного расположения карманов относительно середины вкладыша, так как при изменении направления вращения вала величины давлений в гидростатических карманах взаимно поменяются, и соответственно

перераспределится эюра гидростатического давления, адаптируясь к новому направлению вращения (рис. 8).

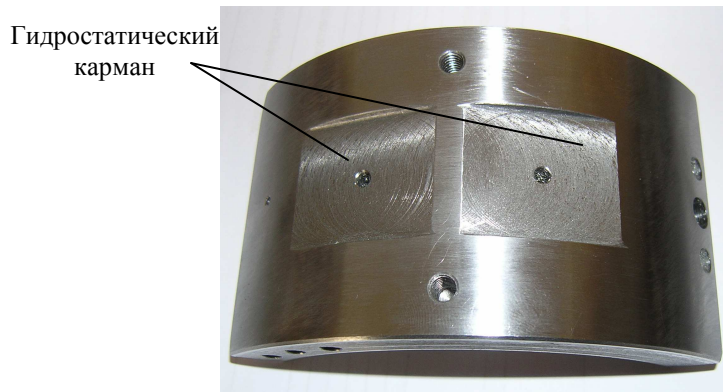
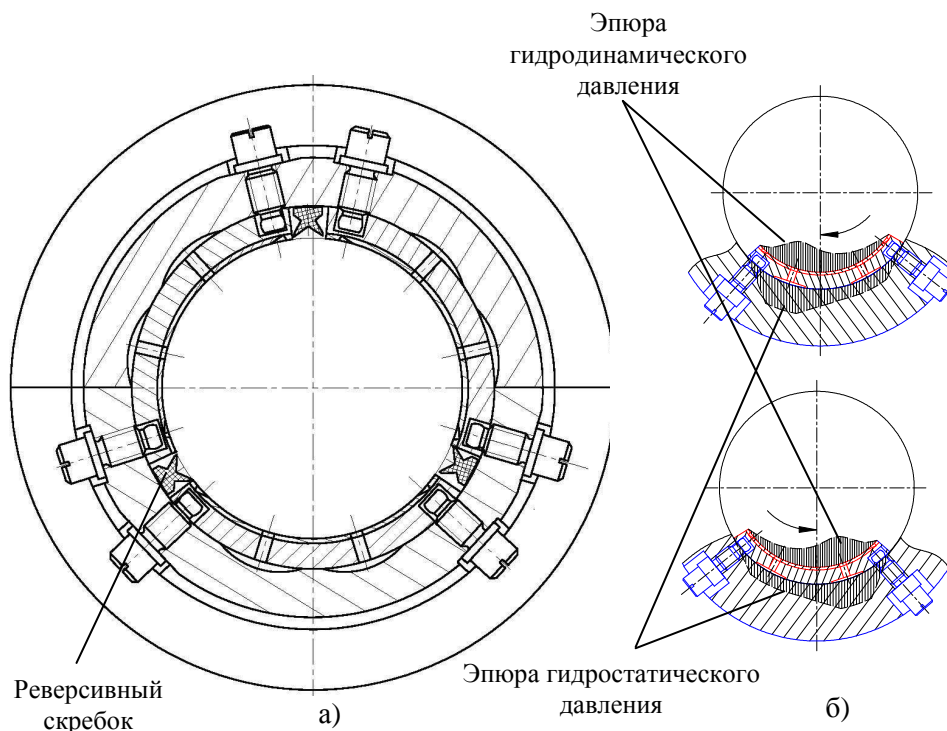


Рисунок 8 – Реверсивный подшипник со свойствами нереверсивных вкладышей: а) – схема подшипника; б) – эюры гидродинамического и гидростатического давления при различном направлении вращения вала; в) – колодка с двумя гидростатическими карманами

Для обеспечения реверсивной работы подшипника были спроектированы реверсивные маслоъемные скребки, конструкция которых позволяет им выполнять свои функции независимо от направления вращения ротора.

В 2007 г. был разработан новый метод упрочнения подшипниковых шеек валов электроэрозионным легированием совместно с безабразивной ультразвуковой финишной обработкой поверхности (ЭЭЛ+БУФО). Такой метод позволяет достичь следующих характеристик обработанной поверхности:

- снижение шероховатости (Ra) с 1,25 до 0,05 мкм;
- увеличение сжимающих напряжений с 70 до 150 МПа;
- формирование поверхностного слоя с регулярным профилем микротвердостью 800 HV.

Подшипники на гидростатическом подвесе производства ООО «ТРИЗ» защищены патентами Украины, Российской Федерации и Республики Беларусь. Диапазон поставляемых в настоящее время подшипников характеризуется следующими параметрами:

- диаметр шеек валов от 45 до 280 мм;
- частота вращения от 1500 до 30000 об/мин,;
- нагрузки на подшипники от 60 кгс до 17000 кгс.

Опыт эксплуатации свидетельствует о том, что установка демпферных подшипников с самогенерируемой гидростатической масляной опорой позволяет повысить надежность и экономичность агрегата, снизить уровень вибрации, в том числе на переходных и нестационарных режимах работы, обеспечивает мягкий переход через критическую частоту. Даже в самых благополучных с точки зрения динамики агрегатах демпферные подшипники уменьшают прецессию вала в 1,5...2 раза, обеспечивая при этом стабильность зазоров в подшипниках, межступенчатых и концевых уплотнениях, повышают надёжность работы всей роторной системы, предотвращают падение производительности и экономичности агрегата к концу межремонтного периода, увеличивают срок службы и снижают затраты на ремонт агрегата в целом.

В настоящий момент фирма «ТРИЗ» продолжает вести разработки по дальнейшему совершенствованию подшипников скольжения в следующих направлениях:

- разработка и исследование демпферных подшипников с тонкостенными вкладышами;
- использование толстослойного антифрикционного покрытия, полученного электроэрозионным легированием;
- разработка технологии электроэрозионной цементации и азотирования.

Таким образом, радиальные демпферные подшипники с вкладышами на гидростатической пленке с конструкторскими и технологическими решениями ООО "ТРИЗ" устраняют недостатки подшипников скольжения традиционных конструкций.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Леверов А.В. Многоклиновые, сегментные и комбинированные подшипники John Crane. // Газотурбинные технологии. 2008. № 6. С. 8-10.
2. Нельсон, Холлингсворт. Радиальный подшипник с самоустанавливающимися вкладышами, снабженными жидкостными опорами. // Проблемы трения и смазки. 1977. Серия F, №1. С. 127-134.
3. Марцинковский В.С., Юрко В.И. Подшипники для динамического оборудования // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2002. № 11. С. 32-37.
4. Марцинковский В.С., Юрко В.И. Расчетная оценка влияния маслосъемных скребков и уплотнительных поясков на характеристики опорных подшипников с самоустанавливающимися колодками // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2008. № 1(11). С.55-60.
5. А.с. 1682661 А1, СССР, МКИ F16C 32/06, Опорный подшипник скольжения. В.С.Марцинковский, О.Б.Лоза, Л.В.Черепов и др.
6. Патент на корисну модель 74963, Україна, F16C32/00. Опорний підшипниковий вузол (варіанти). В.С.Марцинковський.
7. Патент на полезную модель. 62184, Россия, F16C 31/00. Опорный подшипниковый узел (варианты). В.С.Марцинковский.
8. Патент на полезную модель. 3489, Республика Беларусь, F16C 32/00. Опорный подшипниковый узел (варианты). В.С.Марцинковский, И.В.Овсейко.
9. Марцинковский В.С., Симоновский В.И., Гриценко В.Г. и др. Радиальный подшипник с самоустанавливающимися вкладышами на гидростатической пленке //Тр. VI научно-технической конференции “Уплотнения и вибрационная надежность центробежных машин”. - Сумы, 1991. - С.239-246.
10. Патент на винахід 53751, Україна, F16C 32/06. Опорний підшипниковий вузол. В.С.Марцинковський, В.Г.Гриценко.
11. Патент на изобретение 2193123, Россия, F16C 32/06. Опорный подшипниковый узел. В.С.Марцинковский, В.Г.Гриценко.
12. Патент на винахід 82289, Україна, F16C32/00. Реверсивний підшипник ковзання. В.С.Марцинковський.

DESIGNING HYDROSTATICALLY SUPPORTED TILTING PAD JOURNAL BEARINGS

Vasily Martsinkovsky, Vladimir Yurko, Yuriy Filonenko,
TRIZ Ltd

Vyacheslav Tarelnik,
Sumy National Agrarian University

SUMMARY

Hydrostatically supported tilting pad journal bearing design, eliminating defects of conventional journal bearings, is developed. Stages of the bearing design and manufacturing improving are described, comparative operating characteristics are given.

Keywords: Journal bearing, hydrostatic support, rotor vibration, damping, efficiency, electroerosion alloyage