



УДК 537.84

О повышении надежности технологического оборудования предприятий ТЭК при использовании магнитожидкостных герметизирующих комплексов

А. В. Радионов¹⁾¹⁾ ООО «НПВП «Феррогидродинамика», ул. Б. Морская, 45/5, Николаев, Украина, 54030**Article info:**

Paper received:

07 Jul 2014

The final version of the paper received:

08 September 2014

Paper accepted online:

07 November 2014

Correspondent Author's Address:¹⁾ ferrohydrodynamica@gmail.com

С учетом повышенных требований к эксплуатационной надежности, работоспособности и долговечности оборудования промышленных предприятий рассмотрены условия эксплуатации подшипниковых узлов. Так как до 90 % случаев аварийного разрушения подшипников связано с уплотнительными системами, то предложены магнитожидкостные герметизаторы, которые характеризуются практически полной герметичностью. Для расширения их области применения введено понятие магнитожидкостного герметизирующего комплекса. Проанализированы конструкция и внедрение такого комплекса на центробежном шахтном вентиляторе главного проветривания ВОД-30М.

Ключевые слова: магнитожидкостный герметизирующий комплекс, надежность, подшипниковый узел.

1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современное состояние экологической безопасности основных отраслей промышленности (нефтеперерабатывающая, горнодобывающая, химическая и т. д.) Украины характеризуется обострением ряда проблем, обусловленных прежде всего старением оборудования, что связано с недостаточностью средств, вкладываемых в его обновление. Последствия длительной эксплуатации изношенного оборудования проявляются в резком ухудшении техногенной безопасности как составляющей части экологической безопасности по конечному результату влияния на окружающую среду и безопасную деятельность людей [1].

Несмотря на это, характерной тенденцией развития данных предприятий в настоящее время является стремление увеличить время работы между капитальными ремонтами до 2 – 3 лет, без значительного снижения уровня экологической безопасности, для повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Статистические данные свидетельствуют, что для многих видов оборудования (электродвигатели, редукторы, мешалки, вентиляторы и т. д.) наработка на отказ чаще всего определяется надежностью подшипниковых узлов.

Применение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) в системах защиты подшипников, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях (абразив, влага, запыленность и т.д.), является одним из перспективных способов повышения эксплуатационной надежности оборудования. Согласно литературным данным [3, 4] до 90 % случаев аварийных разрушений таких подшипников вызвано

неудовлетворительной работой уплотнений. Магнитная жидкость (МЖ) удерживается в рабочем зазоре между валом и магнитопроводом под действием поля постоянного магнита и может обеспечить практически полную герметичность. Величина зазора в начале эксплуатации составляет 0,2-0,25 мм, но значительно увеличивается по мере износа оборудования.

Потенциальные возможности традиционных уплотнений (манжетных, сальниковых, торцовых, лабиринтных и других типов) в значительной степени исчерпали себя, и обеспечить абсолютную герметичность они не в состоянии [5].

В МЖГ используются в первую очередь два свойства МЖ: она втягивается в область неоднородного магнитного поля; на немагнитное тело, погруженное в магнитную жидкость, действует выталкивающая сила, имеющая магнитное происхождение (магнитолевитационный эффект) [6, 7]. Поэтому в МЖГ немагнитные частицы, попадающие в рабочий зазор герметизатора, заполненный магнитной жидкостью, выталкиваются из него.

Основными преимуществами МЖГ перед традиционными уплотнениями, помимо практически полной герметичности, являются минимальный износ вследствие чисто жидкостного трения, низкие энергетические потери, высокая ремонтпригодность, простота техобслуживания, работоспособность в статике и динамике, самовосстановление в случае аварийного прорыва уплотняемой среды [8 – 12].

Основными недостатками МЖГ является проблема совместимости МЖ и уплотняемой среды. Герметизаторы прекрасно работают при уплотнении

газов, паров, аэрозолей, мелкодисперсных сыпучих сред, однако при уплотнении жидких сред возможно гидродинамическое перемешивание уплотняемой среды и МЖ, что будет вести к нарушению работоспособности герметизатора. Эти проблемы возникают при достаточно высоких оборотах вращения вала. Поэтому при уплотнении жидких сред либо воздуха, содержащего большое количество жидкости (например, жидкого смазочного масла при уплотнении подшипниковых узлов), необходимо принять меры, минимизирующие контакт уплотняемой среды с магнитной жидкостью, находящейся в зазоре между валом и концентраторами магнитного потока на полюсных наконечниках МЖГ.

Другие недостатки МЖГ определяются сравнительно небольшой областью применения этого типа уплотнений. Они связаны с ограниченностью температурного диапазона и удерживаемого перепада давления, что вытекает из свойств магнитных жидкостей и жидкостей вообще.

Описанные в литературе методы повышения надежности, работоспособности и долговечности МЖГ не решают вопросов расширения области применения МЖГ. Кроме того, их сложно реализовать на практике.

Так, создание различных буферных пространств и разделительных газовых объемов, подробно описанных в [13], в целях уменьшения расхода МЖ в краевой области в месте ее контакта с уплотняемой средой либо вообще невозможно выполнить в реальной конструкции, либо конструкция уплотнения настолько усложняется, что затрудняет его эксплуатацию. При этом нужно учитывать, что подбор немагнитной жидкости, хорошо работающей в контакте с МЖ и исключаяющей их смешивание, – трудноразрешимая задача, особенно для высокоскоростных МЖГ.

Методы, направленные на исключение гидродинамической неустойчивости, возникающей при вращении вала уплотнения [10], требуют изменений в конструкции технологического оборудования, что при проведении модернизации недопустимо.

В литературе отсутствуют данные по возможности эксплуатации МЖГ при рабочих зазорах более 0,3 мм. В то же время анализ условий работы технологических установок показывает, что этот параметр должен быть увеличен как минимум до 0,5 – 0,8 мм.

Поэтому рассмотрение новых путей расширения области применения МЖГ на промышленных предприятиях является актуальным.

Целью работы является обоснование применения магнитоидкостных герметизирующих комплексов (МЖГК) для повышения эксплуатационной надежности, работоспособности и долговечности технологического оборудования предприятий ТЭК.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Одним из возможных путей расширения области применения МЖГ является создание комбинированных уплотнений, объединяющих достоинства традиционных и магнитоидкостных систем герметизации. Основной целью должно быть обеспечение полной герметичности.

Здесь уместно по аналогии с торцовыми уплотнениями ввести понятие магнитоидкостного гермети-

зирующего комплекса (МЖГК), под которым будем подразумевать комбинированную герметизирующую систему, в состав которой входят магнитоидкостный герметизатор и вспомогательные устройства, оптимизирующие условия его работы.

МЖГК позволяют повысить надежность герметизирующей системы путем параллельного соединения ее элементов. Основным элементом комплекса служит магнитоидкостный герметизатор, решающий основную задачу – обеспечение полной герметичности. Совместно с ним работает одно или несколько вспомогательных уплотнений, предназначенных для разгрузки основного от повышенного перепада давлений, уменьшения пятна контакта магнитной жидкости с уплотняемой средой и т. д. К вспомогательным элементам комплекса также необходимо включить группу устройств для обеспечения нормального функционирования основного уплотнения – дозаправка магнитной жидкостью, системы охлаждения и т. п. В случае необходимости МЖГК могут быть оснащены системами аварийной защиты, приборами контроля и т. д.

В практике применение МЖГ для герметизации агрессивных сред или сред, которые плохо сочетаются с жидкостью-носителем МЖ, хорошие результаты дает сочетание МЖГ и гидрозатвора [10].

Полезно устанавливать МЖГ после лабиринтных, щелевых, манжетных и других широко применяемых уплотнений, если они компенсируют значительные перепады давлений экологически вредных или агрессивных сред. В этом случае используется свойство практически полной герметичности МЖГ не позволяющее парам агрессивных или вредных сред попадать в атмосферу, а перепад давления удерживается традиционным уплотнением [14].

При длительном использовании МЖГ может происходить уменьшение объема герметизирующей МЖ вследствие испарения. Поэтому в конструкции герметизатора должно быть предусмотрено устройство для восполнения объема магнитной жидкости.

Основные характеристики МЖГ определяются параметрами магнитного поля в рабочем зазоре. Для проектирования МЖГ для каждого типоразмера вала и при различных значениях зазоров между валом и герметизатором (особенно это актуально для высоких линейных скоростей в зазоре и величинах зазора больше 0,3 мм) была разработана компьютерная методика расчета магнитного поля, удельных магнитных сил и гидродинамических процессов в рабочей зоне [15].

В качестве примера рассмотрим типичный случай из производственной практики, когда обслуживающий персонал не удовлетворяло качество работы уплотнений и единственным решением вопроса было применение магнитоидкостного герметизирующего комплекса.

Шахтные вентиляторные установки главного проветривания осуществляют непрерывное проветривание горных выработок, что является одним из условий обеспечения безопасности труда персонала, работающего в шахте. Поэтому в составе шахтных вентиляторных установок главного проветривания предусматриваются два вентилятора – рабочий и резервный. Каждый должен иметь высокую надежность и долговечность и попеременно работать круг-

лосуточно без остановки в течение определенного срока, после чего включается в работу вентилятор, находящийся в резерве. Мы подробно остановимся на осевом шахтном вентиляторе ВОД-30М, эксплуатирующемся на шахте «Терновская» (г. Павлоград).

Шахтные вентиляторные установки главного проветривания при работе на всасывание перемещают шахтный воздух, отличающийся от атмосферного наличием в нем различных газов, пара, кислот, значительного количества штыба, пыли, воды.

Поэтому при эксплуатации шахтных вентиляторов обязательно будет происходить налипание пыли на поверхность лопаток, попадание влаги и пыли в пустотелые лопатки, что будет приводить к дисбалансу ротора, появлению повышенной вибрации подшипниковых узлов и в итоге к необходимости остановки вентилятора для очистки и обслуживания.

Повышенная вибрация и изгиб вала с консольной нагрузкой ведут, в свою очередь, к необходимости увеличения зазоров в уплотняющих устройствах подшипниковых опор и, соответственно, к ухудшению их работы. Кроме того, конструктивно даже новые крупные подшипники качения будут иметь значительные радиальные зазоры. Действительно, для двухрядных радиальных сферических роликоподшипников с диаметром отверстия 200–225 мм (3 группа), используемых в указанных типах вентиляторов, величина зазора составляет 0,22–0,29 мм, что вносит дополнительный негативный вклад в работу уплотняющих устройств [16].

Рекомендованные предельное биение вала и несоосность посадочного места относительно оси вала для армированных манжет, используемых в указанных выше вентиляторах, составляют соответственно 0,15 и 0,20 мм, что уже ниже реально существующих [17].

Дополнительным фактором, негативно влияющим на работу уплотнений подшипниковых опор, является наличие большого количества твердых частиц в перекачиваемом воздухе. Интенсивно попадающие под кромку уплотнения частицы вызывают износ поверхности вала и уменьшение герметизирующей способности уплотнения, выражающейся как в увеличении протечек масла, так и попадании твердых частиц в смазочное масло и в подшипники, что может привести к самым негативным последствиям.

Учитывая данные факторы, приходится констатировать, что уплотнения, используемые в подшипниковых опорах упомянутых вентиляторов, работают недостаточно эффективно.

В связи с использованием в шахтных вентиляторах главного проветривания подшипников качения срок службы вентиляторов главного проветривания определяется сроком эксплуатации подшипниковых узлов и любой фактор, отрицательно влияющий на надежность подшипникового узла, автоматически будет как ухудшать надежность вентилятора в целом, так и уменьшать срок его дальнейшей эксплуатации [18].

Задача по разработке магнитоэластического герметизирующего комплекса подшипникового узла шахтного вентилятора ВОД-30М была достаточно сложной.

Как показал опыт эксплуатации и сравнительных испытаний, для защиты подшипниковых узлов с подшипниками качения и жидкой смазкой с успехом можно использовать МЖГК, состоящий из наружно-

го магнитоэластического герметизатора и внутреннего манжетного уплотнения, взаимно усиливающий преимущества и компенсирующий недостатки каждого типа уплотнений. МЖГК предохраняет узел от проникновения твердых частиц снаружи, выталкивая их из рабочего зазора, заполненного магнитной жидкостью, манжета, работающая в условиях обильной смазки, предотвращает вытекание смазочного масла из подшипникового узла и попадание масла в рабочий зазор собственно МЖГ [19, 20]. В случае разъемных уплотнений в них используются стандартные резиновые армированные манжеты, разрезаемые в одном месте для возможности установки на вал без разборки всего вентилятора. Стык манжеты при установке манжеты в крышку располагается сверху (подобное техническое решение используют некоторые зарубежные фирмы, выпускающие разъемные манжеты различных конструкций).

Несмотря на большой размер штатной крышки подшипникового узла, место для размещения уплотнения оказалось крайне ограниченным в размерах, как в осевом, так и в радиальном направлении – со стороны подшипника центральную часть крышки охватывало Г-образное в сечении маслосбрасывающее кольцо, закрепленное на валу, с наружной стороны вблизи торцевой поверхности крышки находились ступеньки на поверхности вала. Поэтому выполнить МЖГК в виде двух самостоятельных узлов было невозможно и пришлось разрабатывать совершенно новую конструкцию.

При создании герметизатора вентилятора ВОД-30М были приняты следующие технические решения:

- внешнюю часть крышки подшипникового узла с фланцем сохранить в виде отдельной детали, центральную часть крышки срезать;

- МЖГ выполнить в виде отдельного блока, размещаемого на месте центральной части крышки,

- магнитную систему МЖГ с радиальным расположением магнитов и внутренним полюсным наконечником разместить на месте срезанного канавочного уплотнения;

- второй (наружный) полюсный наконечник сделать съемным в виде крышки, плотно входящей в кольцевую проточку на торцевой поверхности фланца МЖГ и закрепляемой болтами;

- между внутренними торцевыми поверхностями магнитной системы МЖГ и наружного полюсного наконечника организовать полость и разместить в ней разрезную манжету 300x340 ГОСТ 8752;

- центральную часть наружного полюсного наконечника выполнить с конусным выступом, входящим под стенку манжеты, что позволит увеличить осевую длину рабочего зазора под полюсным наконечником (сечение центральной части наружного полюсного наконечника при этом по форме напоминает «сапожок»);

- концентраторы магнитного потока нарезать только на центральной части наружного полюсного наконечника («сапожке»);

- в связи со значительным радиальным зазором в подшипниках рабочий зазор в МЖГ увеличить до 0,4 – 0,9 мм.

Конструкция герметизатора показана на рис. 1 и 2.

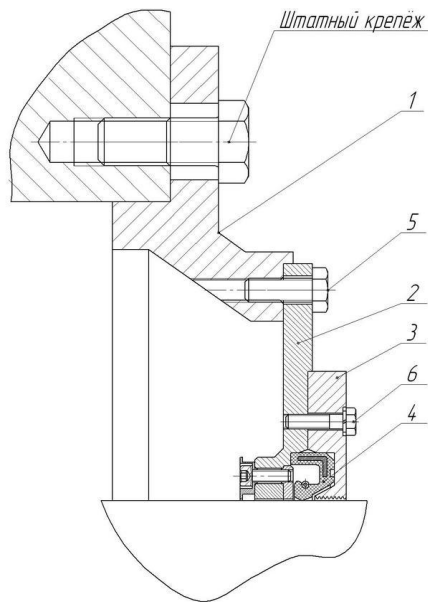


Рис. 1. Герметизатор подшипникового узла:
1 – корпус большой; 2 – МЖГ; 3 – крышка передняя («сапожок»); 4 – манжета 300x340 ГОСТ 8752; 5 – болт М10; 6 – болт М6

Как и крышка подшипникового узла вентилятора, МЖГК выполнен разъемным.

Герметизирующий комплекс состоит из трех частей – корпуса большого 1, повторяющего внешнюю часть штатной крышки подшипникового узла и крепящегося при помощи штатных болтов, собственно МЖГ 2, устанавливаемого на торце корпуса большого, и крышки передней («сапожка») 3. В полости между ними размещается манжета 4 – выполняющая функции предварительной ступени уплотнения. МЖГ 2 закрепляется на торцевой поверхности корпуса большого 1 болтами 5.

Магнитожидкостный герметизатор (МЖГ) состоит из корпуса с фланцем и магнитной системы.

В данном МЖГ функцию второго полюсного наконечника герметизатора выполняет крышка передняя («сапожок») 3, вставляемая в проточку на торцевой поверхности фланца МЖГ и прижимаемая к нему болтами 6 М6. На обращенной к поверхности вала поверхности крышки передней («сапожка») 3 нарезаны концентраторы

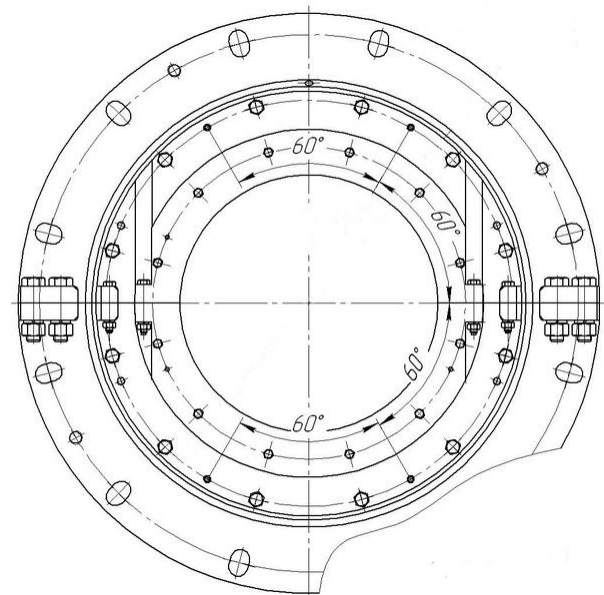


Рис. 2. Герметизатор подшипникового узла. Вид спереди

магнитного потока – кольцевые зубцы с канавками между ними. На наружной цилиндрической поверхности фланца МЖГ 2 имеется отверстие для заправки магнитной жидкости, заглушаемое винтом М5.

Анализ распределения магнитного поля в зазоре МЖГ, выполненный по методике, подробно изложенной в [15], показал, что примененная конструкция магнитной системы МЖГ должна обеспечить надежную работу всего магнитожидкостного герметизирующего комплекса в диапазоне рабочих зазоров до 0,9 мм (рис. 3, 4), несмотря на прогнозируемое снижение величины магнитной индукции. Интересным является факт, что при $\delta \geq 1,0$ мы уже не можем говорить о резко неоднородном поле, которое достигалось наличием концентраторов магнитного потока. На рис. 4 г ясно видно отсутствие пиковых зон, что в целом свидетельствует о недостаточности магнитного поля для удержания жидкости в зазоре.

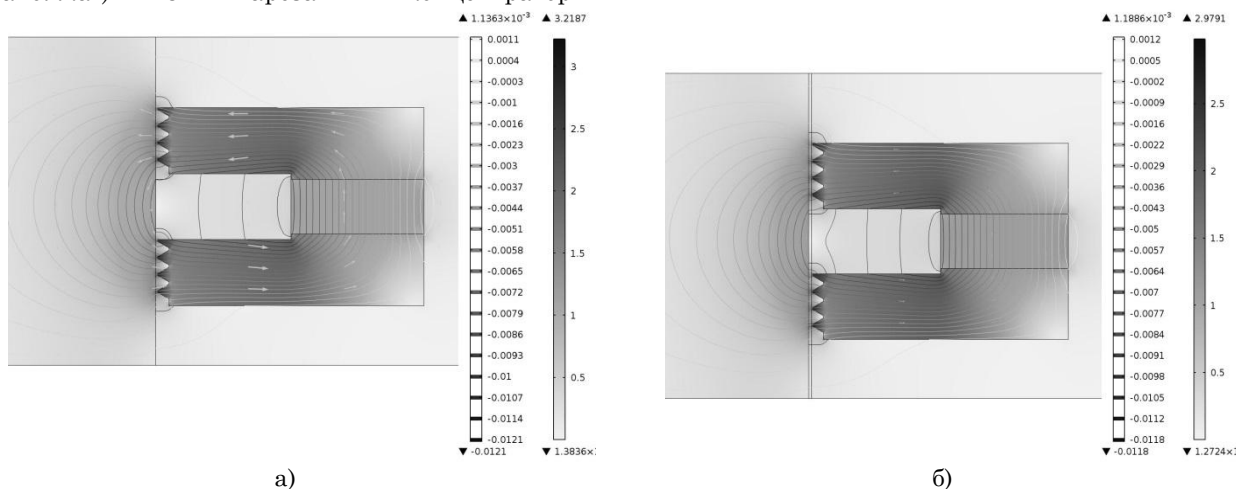


Рис. 3, лист 1. Распределение в активной зоне МЖГ силовых линий (изолинии $A\varphi$), вектора магнитной индукции: а) зазор 0,1 мм; б) зазор 0,4 мм

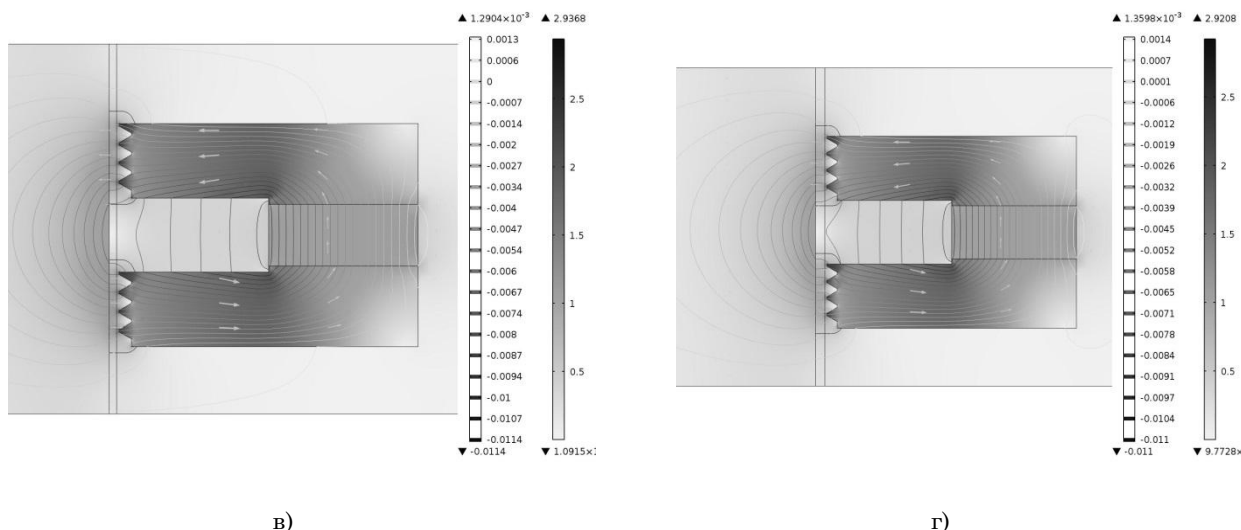


Рис. 3, лист 2. Распределение в активной зоне МЖГ силовых линий (изолинии $A\varphi$), вектора магнитной индукции: в) зазор 0,7 мм; г) зазор 1 мм

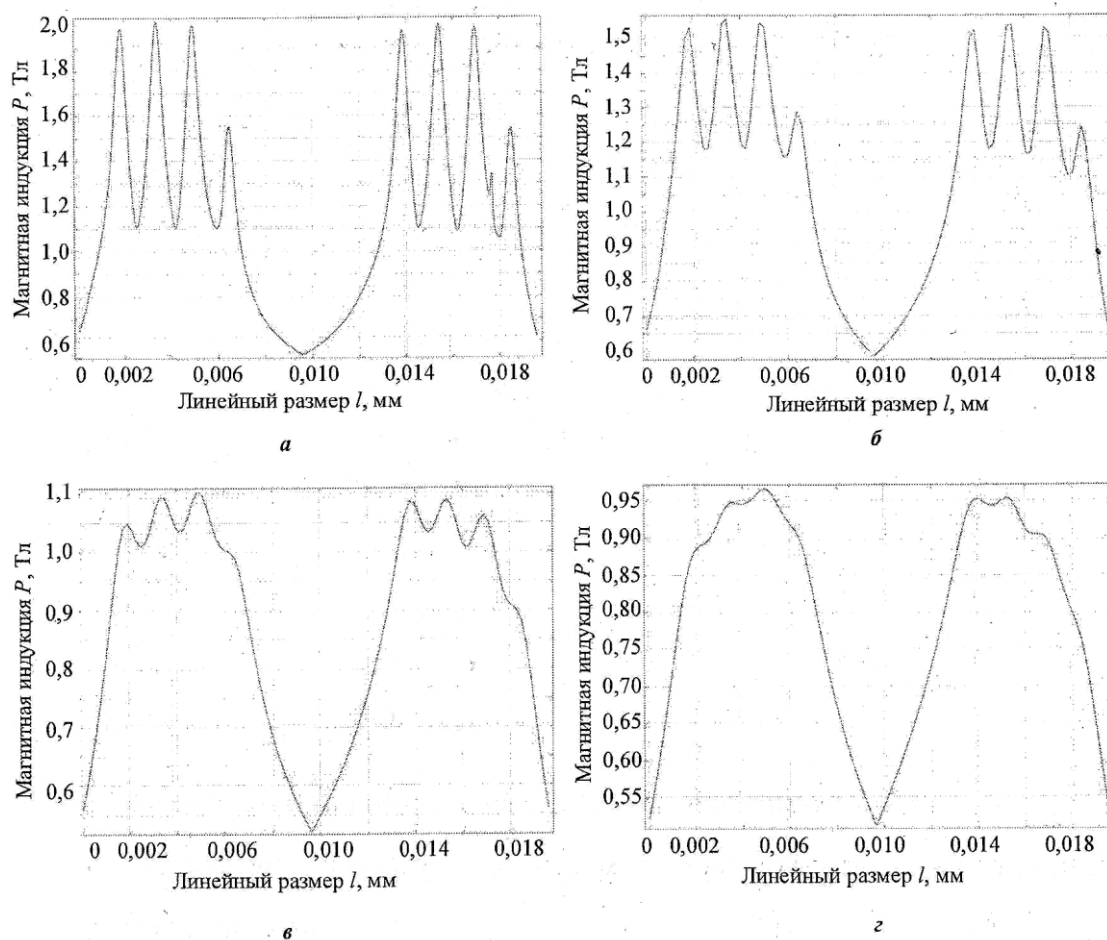


Рис. 4. Распределение радиальной компоненты магнитной индукции на поверхности вала с зазором: а) 0,1 мм; б) 0,4 мм; в) 0,7 мм; г) 1 мм

МЖГК вентилятора ВОД-30М были установлены на шахте «Терновская» в июне 2011 г. Обслуживающий персонал шахты ежемесячно проводит контроль за работой МЖГК. Данные заносятся в специальный журнал. За три года эксплуатации выбросов масла не наблюдалось. Магнитная жидкость дозправляется с периодичностью

один раз в полгода. Срок эксплуатации в несколько раз превысил срок ранее применяемых уплотнений. В табл. 1 приведены величины рабочих зазоров между втулкой, надетой на вал, и полюсными наконечниками МЖГ.

Таблица 1 – Размеры рабочих зазоров

Блок опорный передний (со стороны двигателя)			Блок опорный задний		
Слева (со стороны двигателя)	Вверху	0,9	Слева (со стороны двигателя)	Вверху	0,6
	Внизу	0,6		Внизу	0,6
	Справа	0,9		Справа	0,6
	Слева	0,9		Слева	0,6
Справа	Вверху	0,6	Справа	Глухая крышка	
	Внизу	0,45			
	Справа	0,4			
	Слева	0,6			

3. ВЫВОДЫ

Повышенные требования к эксплуатационной надежности и ресурсу технологического оборудования промышленных предприятий активизировали работы по совершенствованию уплотнительных систем с целью достижения практически полной герметичности.

Проведенный анализ показал, что с помощью традиционных уплотнений проблему решить невозможно.

Полной герметичности можно добиться применением магнитожидкостных герметизаторов. Однако

узкая область применения МЖГ, связанная с проблемами совместимости МЖ и уплотняемой среды, ограничениями по удерживаемому перепаду давлений и т. д., сдерживает внедрение данного типа герметизаторов.

Предложено создание магнитожидкостных герметизирующих комплексов, в состав которых совместно с МЖГ включаются вспомогательные уплотнения, предназначенные для разгрузки основного.

Приведен пример конструкции МЖГК и проанализирован опыт его эксплуатации на шахте «Терновская» (г. Павлоград).

On increasing the reliability of the process equipment of energy companies using magnetic-sealing systems

A. Radionov¹⁾

¹⁾ LLC «NSAIDs «Ferrohydrodynamica», 45/5, B. Morskaya str., Nikolaev, Ukraine, 54030

The operating conditions of bearing assemblies are considered with the increasing demands of operational reliability, working capacity and durability of the equipment of industrial enterprises. Since up to 90% of accidental destruction of the bearing due to the sealing system, the magnetic fluid seals which are characterized by an almost complete integrity are proposed. In order to expand their areas of application the concept of magnetic fluid sealing complexes is introduced. The design and implementation of this complex on the centrifugal mine main fan ВОД-30М are analyzed.

Key words: magnetic fluid sealing complex, reliable, bearing assembly.

Про підвищення надійності технологічного обладнання підприємств ПЕК при використанні магніторідинних герметизуючих комплексів

О. В. Радіонов¹⁾

¹⁾ ТОВ «НПЗП «Ферогідродинаміка», вул. В. Морська, 45/5, Миколаїв, Україна, 54030

З урахуванням підвищених вимог до експлуатаційної надійності працездатності та довговічності устаткування промислових підприємств розглянуті умови експлуатації підшипникових вузлів. Оскільки до 90 % випадків аварійного руйнування підшипників пов'язано з ущільнювальними системами, то запропоновані магніторідинні герметизатори, що характеризуються практично повною герметичністю. Для розширення їх галузі застосування введено поняття магніторідинного герметизуючого комплексу. Проаналізована конструкція і впровадження такого комплексу на відцентровому шахтному вентиляторі головного провітрювання ВОД-30М.

Ключові слова: магніторідинний герметизуючий комплекс, надійність, підшипниковий вузол.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов С. А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС / С. А. Белов, В. В. Литвак, С. С. Солод. – Томск : Изд-во НТЛ, 2008. – 218 с.
2. Быков А. А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы / А. А. Быков // Проблемы анализа риска.

– 2012. – Т. 9, №3. – С. 4 – 8.

3. Черменский О. Н. Подшипники качения: Справочник-каталог / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.

4. Павлицев В. Т. Підшипники кочення: Основні параметри, конструкції опор, змащування, ущільнення та розрахунки ресурсу / В. Т. Павлицев. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка» (Інформаційно-видавничий центр «ІНТЕЛЕКТ») Інституту підвищення кваліфікації та перепідготовки кадрів). «Інтелект-Захід», 2001. – 136 с.
5. Курбатова О. А. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования / О. А. Курбатова, В. М. Павлюченко: учеб. пособие. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
6. Казаков Ю. Б. Герметизаторы на основе нанодispersных магнитных жидкостей и их моделирование / [Ю. Б. Казаков, Н. А. Морозов, Ю. И. Страдомский, С. М. Перминов]. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2010. – 184 с.
7. Берковский Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. – М. : Химия, 1989. – 240 с.
8. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / Р. Розенцвейг. – М. : Мир, 1989. – 357 с.
9. Такетоми С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1989. – 357 с.
10. Морозов Н. А. Нанодispersные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н. А. Морозов, Ю. Б. Казаков. – Иваново : ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2011. – 264 с.
11. Радионов А. В. Магнитожидкостные герметизаторы на химических заводах: опыт внедрения и перспективы / А. В. Радионов, А. Н. Виноградов, В. Н. Веревкин // Химическая техника. – 2003. – №1. – С. 28 – 32.

REFERENCES

1. Belov S. A., Litvak V. V., Solod S. S. (2008). Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniya TES. Tomsk, Izd-vo NTL, 218 p. [in Russian].
2. Byikov A. A. (2012). Problemyi analiza riska, Issue 9, Vol. 3, pp. 4–8. [in Russian].
3. Chermenskiy O. N., Fedotov N. N. (2003). Podshipniki kacheniya: Spravochnik-katalog. M., Mashinostroenie, 576 p. [in Russian].
4. Pavlishev V. T. (2001). Pidshipniki kochennya: Osnovni parametri, konstruktsiyi opor, zmaschuvannya, uschilnennya ta rozrahunki resursu. Lviv, «Intelekt-Zahid», 136 p. [in Ukrainian].
5. Kurbatova O. A., Pavlyuchenko V. M. (2004). Montazh i remont gornyih mashin i elektrooborudovaniya. Vladivostok, Izd-vo DVGTU, 286 p. [in Russian].
6. Kazakov Yu. B., Morozov N. A., Stradomskiy Yu. I., Perminov S. M. (2010). Germetizatoryi na osnove nanodispersnyih magnitnyih zhidkostey i ih modelirovanie. Ivanovo, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvenniy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina, 184 p. [in Russian].
7. Berkovskiy B. M., Medvedev V. F., Krakov M.S. (1989). Magnitnyie zhidkosti. M., Himiya, 240 p. [in Russian].
8. Rozentsveyg R. (1989). Ferrogidrodinamika. M., Mir, 357 p. [in Russian].
9. Taketomi S., Tikadzumi S. (1989). Magnitnyie zhidkosti. M., Mir, 357 p. [in Russian].
10. Morozov N. A., Kazakov Yu. B. (2011). Nanodispersnyie magnitnyie zhidkosti v tehnike i tekhologiyah. Ivanovo, FGBOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvenniy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina», 264 p. [in Russian].

12. Радионов А. В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике / А. В. Радионов // Гірничя електромеханіка та автоматика. – Вип. 87. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 134 – 138.
13. Pislara-Danescu L. Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering / [L. Pislara-Danescu, A. M. Morega, G. Telipan, M. Morega] // IEEE Transactions on magnetics. – Vol. 49. – № 0.11, November. – 2013. – P. 5489 – 5498.
14. Радионов А. В. Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой / А. В. Радионов, А. Н. Виноградов // Збагачення корисних копалин: наук. техн. зб. – 2009. – Вип. 35 (76). – С. 148 – 155.
15. Радионов А. В. Конечнo-элементный анализ магнитного поля и течения магнитной жидкости в активной зоне магнитожидкостного герметизатора вращающегося вала / [А. В. Радионов, А. Д. Подольцев, А. В. Загоруйко] // Виброндежность и герметичность центробежных машин. – Сумы, 2011. – С. 77 – 87.
16. Чичинадзе А. В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / [А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.
17. Новиков Д. К. Опоры и уплотнения авиационных двигателей и энергетических установок: [электр. учеб. пособие]. [Электронный ресурс] / Д. К. Новиков, С. В. Фалалеев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 124 с.
18. Бабак Г. А. Шахтные вентиляторные установки главного проветривания: справочник / [Г. А. Бабак, К. П. Богаров, А. Т. Волохов и др.]. – М. : Недра, 1982. – 296 с.

11. Radionov A. V., Vinogradov A. N., Vinogradov V. N. (2003). Himicheskaya tehnika, Vol. 1, pp. 28 – 32. [in Russian].
12. Radionov A. V. (2011). Girnicha elektromehanika ta avtomatika, Vip. 87, pp. 134 – 138. [in Russian].
13. Pislara-Danescu L., Morega A. M., Telipan G., Morega M. (2013). IEEE Transactions on magnetics, Vol. 49, pp. 5489–5498. [in Russian].
14. Radionov A. V., Vinogradov A. N. (2009). Zbagachennya korisnih kopalin: nauk. tehn. zb., 2009, Vol. 35 (76), pp. 148–155. [in Russian].
15. Radionov A. V., Podoltsev A. D., Zagorulko A. V. (2011). Vibronadezhnost i germetichnost tsentrobezhnyih mashin, Sumy, pp. 77–87. [in Russian].
16. Chichinadze A. V., Berliner E. M., Braun E. D. i dr. (2003). Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika). M., Mashinostroenie, 576 p. [in Russian].
17. Novikov D. K., Falaleev S. V. (2011). Oporyi i uplotneniya aviatsionnyih dvigateley i energeticheskikh ustanovok: [elektr. ucheb. posobie]. [Elektronniy resurs]. Samara, Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 124 p. [in Russian].
18. Babak G. A., Bogarov K. P., Volohov A. T. i dr. (1982). Shahtnyie ventilyatornyie ustanovki glavnogo provetrivaniya: spravochnik. M., Nedra, 296 p. [in Russian].