

УДК 621.822

Т. Н. СОРОКИНА

**ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОСТАТОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДПЯТНИКА С КАРМАНАМИ РЭЛЕЯ**

Рассмотрено описание экспериментальной установки для исследования гидростатодинамического подпятника с карманами Рэлея на различных режимах эксплуатации. В работе приведены основные компоненты и системы этой установки, конструкция и устройство модернизированной экспериментальной головки, расположение и особенности нагрузочного устройства, состав и конструкция опытного образца гидростатодинамического подпятника с выравнивающим устройством, типы и назначение установленных датчиков и приборов регистрации, состав и описание автоматизированного комплекса регистрации параметров и приборов контроля.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, гидростатодинамический подпятник, экспериментальная головка, автоматизированный комплекс регистрации параметров.

**Введение.** На станках, машинах и механизмах с большими осевыми нагрузками используют упорные узлы жидкостного трения. Условия и режимы эксплуатации влияют на выбор типа упорного подшипника скольжения (УПС), выравнивающего устройства и системы подачи смазки в смазочный слой. Для проверки работоспособности упорного узла жидкостного трения используется экспериментальная установка, позволяющая проверить работоспособность его на различных режимах эксплуатации.

Основная цель работы описание экспериментальной установки для проверки работоспособности и эффективности спроектированного и изготовленного упорного узла жидкостного трения на различных режимах эксплуатации.

**Анализ исследований и публикаций, постановка проблемы.** Проверку работоспособности и эффективности упорных узлов жидкостного трения на различных режимах эксплуатации осуществляют на экспериментальных установках, позволяющих испытать УПС с выравнивающим устройством в зависимости от его типа и особенностей эксплуатации.

Стенд для проведения и результаты экспериментальных исследований гидродинамических УПС с гидростатическим подъемом приведены в работе [1].

Испытания на стенде, с учетом торцевого биения вала для гидродинамических УПС с гидравлическим выравнивающим устройством, были рассмотрены в работе [2].

Экспериментальные исследования УПС с выравнивающим устройством типа Кингсбери, которые позволили проверить работоспособность выравнивающего устройства при торцевом биении вала были проведены на стенде, приведенном в работе [3].

Экспериментальная установка и результаты исследований комбинированного подшипникового узла с гидростатодинамическим УПС приведены в работе [4]. На основании этой работы был апробирован усовершенствованный метод расчета статических характеристик для гидростатодинамического УПС с учетом турбулентного неизотермического течения смазки. Данный метод расчета представлен нами в работах [5, 6]. Однако, приведенных в работе [4] экспериментальных данных для гидростатодинамического УПС оказалось недостаточно. Поэтому представляется актуальным проведение экспериментальных исследований на стенде, с целью проверки работоспособности гидростатодинамического УПС и сравнение

полученных результатов с теоретическими исследованиями, приведенных в работах [5, 6].

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является описание стенда для проведения испытаний гидростатодинамического УПС на различных режимах эксплуатации, проверка адекватности предложенной теории и работоспособности УПС в условиях турбулентного течения смазки.

**Описание экспериментальной установки.** Для экспериментальных исследований гидростатодинамического УПС использовался стенд, приведенный в работе [3]. Стенд был создан проф., д. т. н. Хлопенко Н. Я., описание его представлено в работе [7]. Модернизация стенда заключалась в доработке масляной системы, нагрузочного устройства, места под установку опытного образца подпятника, установка, монтаж автоматизированного комплекса регистрации параметров и приборов контроля. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Нагрузочное устройство установлено в верхней части экспериментальной головки 11 на плите 13 и служит для плавного изменения дополнительной осевой нагрузки на разных эксплуатационных режимах. Для создания нагрузки использовался динамометр сжатия 14 с штатно установленным индикатором 15.

Масляная система обеспечивает подачу смазки под давлением в опытный образец подпятника и слив масла из внутренней полости экспериментальной головки 11. Она состоит из масляного бака 8, масляного насоса с приводом от электродвигателя 10, масляного коллектора, манометра 9, крана регулировки подачи смазки, шлангов подачи 6 и слива 7 смазки с экспериментальной головки 11, и системы слива избыточной смазки. В качестве смазки использовалось маловязкое масло СГТ [8].

Автоматизированный измерительный комплекс состоит из персонального компьютера 1, программного обеспечения с программой обработки и сохранения информации от установленных датчиков, платы сопряжения с компьютером, токовихревого преобразователя 2, контрольно-измерительного прибора 3, шины подключения датчиков, термопар и токовихревого датчика перемещения, установленных в корпусе опытного образца подпятника. Напряжения от термопар, токовихревого преобразователя 2 поступало на плату сопряжения с компьютером, обрабатывалось и сохранялось при помощи установленной программы. Контроль напряжений от термопар и токовихревого

© Т. Н. Сорокина. 2015

преобразователя осуществлялся цифровым мультиметром. Данный измерительный комплекс производит непрерывные измерения и сохранение истинных значений электрических сигналов с их визуализацией на экране монитора персонального компьютера.

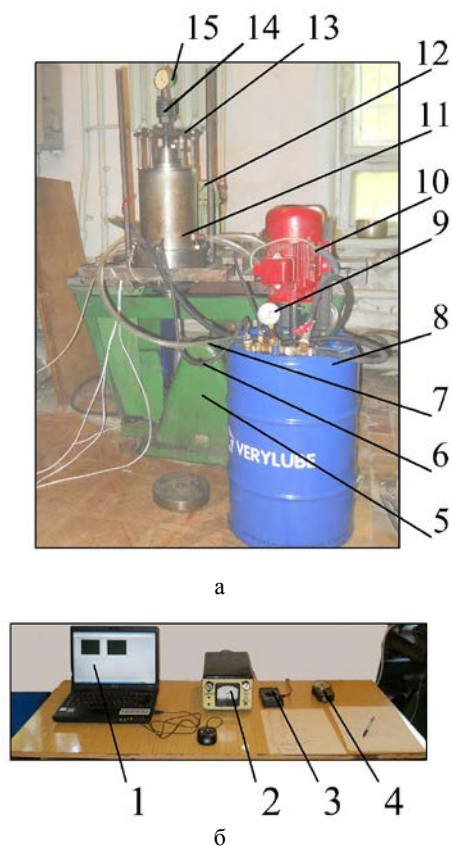


Рис. 1 – Общий вид экспериментальной установки: а – экспериментальный стенд; б – автоматизированный комплекс и приборы контроля; 1 – персональный компьютер; 2 – токовихревой преобразователь; 3 – цифровой мультиметр; 4 – тахометр ИО-10; 5 – станина стенда; 6 – шланг подачи масла; 7 – шланг слива масла; 8 – масляный бак; 9 – манометр МТП-1М; 10 – электродвигатель привода масляного насоса; 11 – экспериментальная головка; 12 – электродвигатель привода экспериментальной головки; 13 – плита крепления динамометра сжатия; 14 – динамометр сжатия ДСП-1; 15 – индикатор ИЧ-10

Она состоит из экспериментальной головки с нагрузочным устройством, масляной системы и автоматического измерительного комплекса. Экспериментальная головка 11, внутри которой установлен опытный образец подпятника, закреплена на плите стенда 5 и имеет привод вращения от электродвигателя 12. Электродвигатель привода 12 приводит во вращение нижний вал экспериментальной головки при помощи ременной передачи с клиновыми шкивами. Привод экспериментальной головки обеспечивает четыре скорости вращения вала.

Для определения скорости вращения электродвигателей приводов 10 и 12 использовался тахометр 4.

Продольный разрез экспериментальной головки представлен на рис. 2. Она состоит из корпуса 26 с двумя торцовыми крышками подшипников 4 и 13, закрепленного к плите стенда 27. Подвижная часть головки представляет собой массивный ротор, состоящий из нижнего 28 и верхнего 11 валов, соединенных

между собой при помощи гайки 23. Нижний вал 28 опирается на подшипник 5 с торцевым уплотнением 3 и подшипник 9. Верхний вал 11 опирается на подшипник 12. Для уменьшения биения сопряжения валов установлены подшипники 10. Установленные радиальные подшипники 10 позволяют валам вращаться независимо друг от друга. Они фиксируются торцевой крышкой 21 при помощи болтов. Опытный образец подпятника 8 установлен между нижним валом 28 и корпусом головки 26 в нижней ее части. Подача масла в подпятник осуществляется по гибким шлангам 7 через головку подачи масла 6, для слива масла используются установленные штуцера 25 с гибкими шлангами 24, которые осуществляют слив масла в масляный бак. Динамометр сжатия 17 с индикатором 18 установлен на плите 16 в верхней части корпуса головки при помощи стоек 14. Передачу нагрузки от динамометра сжатия 17 на верхний вал 11 осуществляется через упорный подшипник 15, величина нагрузки определялась по индикатору 18.

**Опытный образец гидростатодинамического подпятника с карманами Рэлея.** Основные детали и общий вид опытного образца гидростатодинамического подпятника представлены на рис. 3.

Опытный образец состоит из следующих деталей: секторного не реверсивного подпятника, датчиков температуры и перемещения, выравнивающего устройства и системы подачи смазки.

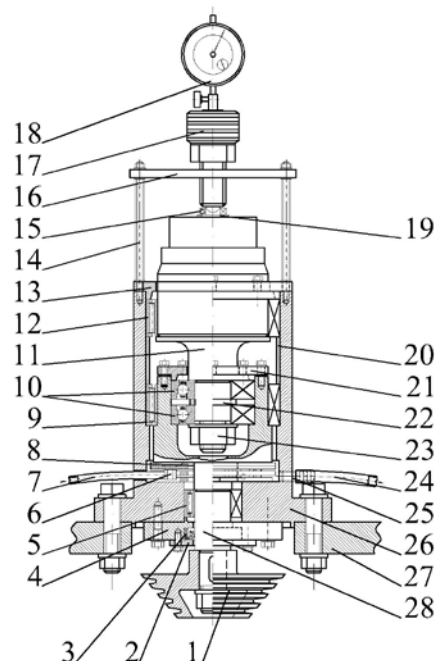


Рис. 2 – Продольный разрез экспериментальной головки: 1 – шкив привода; 2 – торцевая крышка уплотнения; 3 – торцевое уплотнение; 4 – торцевая крышка нижнего подшипника; 5 – нижний игольчатый подшипник; 6 – головка подачи масла со штуцером; 7 – шланг подачи масла; 8 – опытный образец подпятника; 9 – верхний игольчатый подшипник; 10 – радиально упорные подшипники; 11 – верхний вал; 12 – игольчатый подшипник верхнего вала; 13 – торцевая крышка верхнего подшипника; 14 – стойка крепления динамометра; 15 – подшипник динамометра; 16 – плита крепления динамометра; 17 – динамометр сжатия ДСП-1; 18 – индикатор ИЧ-10; 19 – шайба; 20 – верхнее промежуточное кольцо; 21 – торцевая крышка радиально-упорного подшипника; 22 – нижнее промежуточное кольцо; 23 – гайка; 24 – шланг слива масла; 25 – штуцер шланга слива масла; 26 – корпус экспериментальной головки; 27 – плита стенда; 28 – нижний вал.

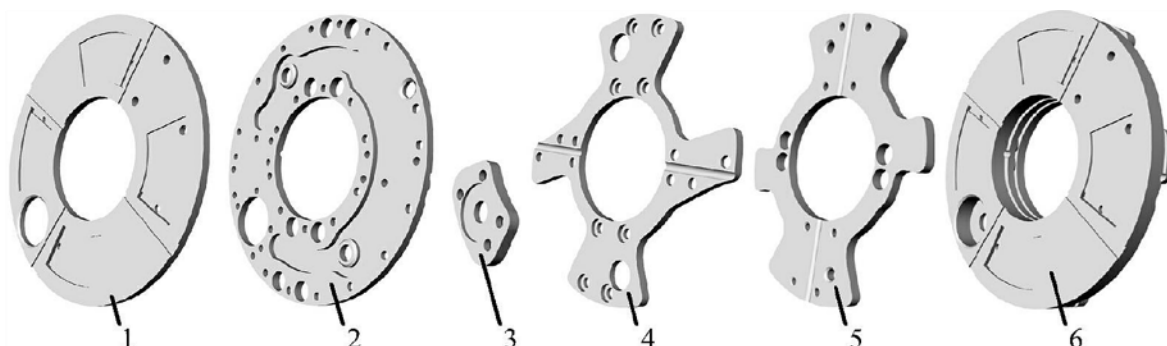


Рис. 3 – Основные детали и общий вид опытного образца гидростатодинамического подпятника со ступенью Рэля: 1 – верхний диск; 2 – нижний диск; 3 – крышка токовихревого датчика; 4 – верхняя крестовина; 5 – нижняя крестовина; 6 – опытный образец в сборе

Рабочая поверхность подпятника диск 1 состоит из четырех секторов с закрытыми ступенями (карманами). Карман глубиной 1300 мкм расположен в начале сектора. Питающая канавка глубиной 2200 мкм с питателем расположена в начале кармана. Между секторами выполнены дренажные канавки глубиной 900 мкм. Датчики термопар установлены и закреплены в корпусе дисков 1 и 2, три из них выходят на рабочую поверхность диска 1, а один в канал подачи масла диска 2. Токовихревой датчик закреплен к диску 2 с помощью крышки 3. Выравнивающее устройство карданного типа на роликах состоит из диска 2, верхней 4, нижней 5 крестовин, а также установленных между ними роликов и пружин. Ход выравнивающего устройства - 5 мм. Выравнивающее устройство обеспечило параллельность рабочих поверхностей пяты и подпятника при торцевом биении вала.

Подача смазки к питателям осуществляется от шлангов масляной системы (рис. 2, поз. 7) через головки со штуцерами (рис. 2, поз. 6) и каналу подачи масла в диске 2.

**Автоматизированный комплекс регистрации параметров.** Основными показателями эффективности работы УПС являются толщина и перегрев смазочного слоя между рабочими поверхностями пяты и подпятника. Контроль и сохранение этих параметров непрерывно по времени с их визуализацией на экране монитора персонального компьютера обеспечивается автоматизированным комплексом регистрации параметров.

Основная аппаратная часть автоматизированного комплекса реализована на базе персонального компьютера и устройства сбора данных National Instruments (NI) USB-6009. Устройство сбора данных NI USB-6009 работает под управлением программного продукта Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) и выполняет основные функции, необходимые для сбора и сохранения параметров.

Общее описание автоматизированного комплекса, его структура, функциональная схема и основные компоненты представлены в работах [2, 9]. Примеры создания виртуальных приборов на базе платформы LabVIEW представлены в работе [10]. Для создания виртуального прибора контроля, визуализации, обработки и сохранения параметров показаний датчиков использовалась среда разработки и платформа для выполнения программ LabVIEW 2012, использующая

графический язык программирования «G» фирмы National Instruments (США).

**Расположение и установка датчиков.** Расположение датчиков на опытном образце гидростатодинамического подпятника с карманами Рэля показано на рис. 4.

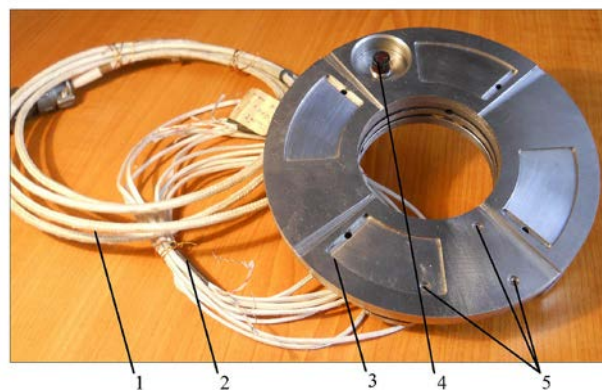


Рис. 4 – Фотография опытного образца гидростатодинамического подпятника с карманами Рэля в сборе после установки датчиков: 1 – шлейф токовихревого датчика; 2 – выходы концов термопар; 3 – опытный образец в сборе; 4 – токовихревой датчик; 5 – термопары

Токовихревой датчик, предназначенный для измерения толщины масляной пленки между поверхностями ротора вала и подпятника (рис.4, поз.4) установлен за карманом в одном из секторов, в противоположном секторе установлены термопары (рис. 4, поз. 5). Токовихревой датчик закреплен в крышке вихревого датчика (рис. 3, поз. 3) на 420 мкм ниже от рабочей поверхности подпятника. Место установки токовихревого датчика закрывается заглушкой. Токовихревой датчик подключен через армированный изоляционным экраном шлейф (рис. 4, поз. 1) к токовихревому преобразователю (рис. 1, поз. 2). При проходе шлейфа через отверстие в экспериментальной головке установлено сальниковое уплотнение. Для снятия и регистрации выходного сигнала токовихревого датчика напряжение от преобразователя подается на плату сопряжения с компьютером и на цифровой мультиметр (рис. 1, поз. 3).

Хромель-алюмелевые термопары (рис. 4, поз. 5) установлены: одна в кармане, две на рабочей поверхности подпятника и одна в области подвода смазки.

Расположение термопар позволяет контролировать температуру подаваемой смазки в области питателя, смазочного слоя в кармане и рабочей поверхности подпятника. Термопары установлены в глухих отверстиях сектора подпятника заподлицо с рабочей поверхностью и карманом и залиты эпоксидной смолой. После затвердения смолы рабочая поверхность сектора подпятника в районе термопар шлифовалась по 9 классу чистоты. Провода от термопар подаются через шину подключения датчиков на плату сопряжения с компьютером и на цифровой мультиметр (рис. 1, поз. 3), через отверстие в корпусе экспериментальной головки, с сальниковым уплотнением.

Индикатор часового типа ИЧ-10 (рис. 2, поз. 18), предназначен для определения дополнительной нагрузки от динамометра сжатия ДСП-1 (рис. 2, поз. 17), установлен на штатном креплении в динамометре. Сам динамометр сжатия был установлен на плиту крепления (рис. 2, поз. 16) в верхней части экспериментальной головки. Он позволяет плавно прикладывать нагрузку непосредственно на верхний вал экспериментальной головки через упорный подшипник (рис. 2, поз. 15).

Частоту вращения вала экспериментальной головки контролировали тахометром ИО-10.

Давление подачи смазки в масляную систему после шестеренчатого насоса контролировали при помощи манометра МТП-1М с ценой деления 0,2 МПа.

### Выводы

1. Нагрузочное устройство, состоящее из динамометра сжатия ДСП-1 с индикатором ИЧ-10, позволяет плавно изменять нагрузку на подпятник при различных режимах его эксплуатации.

2. Опытный образец подпятника позволил проверить его работоспособность на различных режимах, включая режим старта и остановки. В карманах подпятника исследован турбулентный режим смазки.

3. Модернизированная экспериментальная установка позволяет проводить испытания гидростатодинамического УПС на различных режимах, исследовать влияние гидростатической и гидродинамической составляющих на конструкцию подпятника при турбулентном течении смазки.

**Список литературы:** 1. Токарь, И. Я. Проектирование и расчет опор трения [Текст] / И. Я. Токарь – М.: Машиностроение, 1971. –

168 с. 2. Романовский, Г. Ф. Динамика упорных подшипников скольжения судовых турбомашин: монография [Текст] / Г. Ф. Романовский, Н. Я. Хлопенко – Николаев: НУК, 2007. – 140 с. 3. Хлопенко, Н. Я. Экспериментальные исследования опытного образца подшипника Кингсбери при торцовых биениях гребня [Текст] / Н. Я. Хлопенко, Д. Л. Кошкин // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2003. – № 1. – С. 57–61. 4. Уилкок, Уин. Повышение долговечности установок с подшипниками качения благодаря использованию комбинированного подшипника [Текст] / Уилкок, Уин // Проблемы трения и смазки: Тр. Америк. о-ва инж.-мех. – М.: Мир, 1970. – № 3. – С. 34–42. 5. Хлопенко, Н. Я. Турбулентная неизотермическая смазка ступенчатого подпятника Рэлея [Текст] / Н. Я. Хлопенко, Т. Н. Сорокина // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2013. – №4. – С. 40–45. 6. Хлопенко, Н. Я. Разностные схемы и точность решения термогидродинамических уравнений смазки подпятника Рэлея [Текст] / Н. Я. Хлопенко, Т. Н. Сорокина // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2015. – №2. – С. 101–106. 7. Хлопенко, Н. Я. Динамика главных упорных подшипников СЭУ [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.08.05 / Николай Яковлевич Хлопенко. – Николаев, 1983. – 201 с. 8. ГОСТ 10289-79. Масло для судовых газовых турбин. Технические условия. [Текст]. – Введ. 1981-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 3 с. 9. Хлопенко, Н. Я. Автоматизированный измерительный комплекс для мониторинга рабочих процессов в упорных подшипниках скольжения судовых турбомашин [Текст] / Н. Я. Хлопенко, С. А. Гаврилов // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2007. – №1. – С. 18–22. 10. Батоврин, В. К. LabVIEW: практикум по основам измерительной технологии: Учебное пособие для вузов [Текст] / В. К. Батоврин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин, В. Ф. Папуловский – М.: ДМК Пресс, 2005. – 208 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Tokar', I. Ja. (1971). Proektirovanie i raschet opor trenija. Moscow: Mashinostroenie, 168 2. Romanovskij, G. F., Hlopenko, N. Ja. (2007). Dinamika upornyh podshipnikov skol'zhenija sudovyh turbomashin: monografija. Nikolaev: NUK, 140 3. Hlopenko, N. Ja., Koshkin, D. L. (2003). Jeksperimental'nye issledovanija opytного obrazca podshipnika. Kingsberi pri torcovyh bienijah grebnja. Problemi tribologii (Problems of Tribology), 57–61. 4. Uil'kok, Uin. (1970). Povyshenie dolgovechnosti ustanovok s podshipnikami kachenija blagodarja ispol'zovaniju kombinirovannogo podshipnika. Problemy trenija i smazki: Tr. Amer. o-va inzh.-meh., Moscow: Mir, 3, 34–42.5. Hlopenko, N. Ja., Sorokina, T. N. (2013). Turbulentnaja neizotermicheskaja smazka stupenчатого podpjatnika Rjeleja. Problemi tribologii (Problems of Tribology), 2013, 4, 40–45. 6. Hlopenko, N. Ja., Sorokina, T. N. (2015). Raznostnye shemy i tochnost' reshenija termogidrodinamicheskikh uravnenij smazki podpjatnika Rjeleja. Problemi tribologii (Problems of Tribology), 2, 101–106. 7. Hlopenko, N. Ja. (1983). Dinamika glavnyh upornyh podshipnikov SjeU : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.08.05. Nikolaev, 201. 8. GOST 10289-79. (1978). Maslo dlja sudovyh gazovyh turbin. Tehnicheskie uslovija. Vved. 1981-01-01. Moscow: Izd-vo standartov, 3. 9. Hlopenko, N. Ja., Gavrilov, S. A. (2007). Avtomatizirovannyj izmeritel'nyj kompleks dlja monitoringa rabochih processov v upornyh podshipnikah skol'zhenija sudovyh turbomashin. Problemi tribologii (Problems of Tribology), 1, 18–22. 10. Batovrin, V. K., Bessonov, A. S., Moshkin, V. V., Papulovskij, V. F. (2005). LabVIEW: praktikum po osnovam izmeritel'noj tehnologii: Uchebnoe posobie dlja vuzov. Moscow: DMK Press, 208.

Поступила (received) 20. 12. 2015

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Сорокина Татьяна Николаевна** – аспирант кафедры автоматики, Николаевский национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025; e-mail: [tan-sorokina@yandex.ru](mailto:tan-sorokina@yandex.ru).

**Sorokina Tanya** – postgraduate student at department of automatic Nikolayev National Makarov University, pr. Geroev Stalingrada, 9, Nikolaev, Ukraine, e-mail: [tan-sorokina@yandex.ru](mailto:tan-sorokina@yandex.ru).