

УДК 621.039.534

## **ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ В СРЕДЕ ТЯЖЕЛЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ**

© 2009 Ю. Н. Дроздов<sup>1</sup>, А. В. Безносков<sup>2</sup>, В. В. Макаров<sup>3</sup>, В. Н. Пучков<sup>1</sup>, М. А. Антоненков<sup>2</sup>,  
Д. В. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет,

<sup>3</sup>ОКБ «Гидропресс», г. Подольск

Представлено экспериментальное оборудование, разработанное для решения трибологических проблем, возникающих при использовании узлов трения, работающих в среде тяжелых жидких металлов в качестве теплоносителей для контуров ядерных энергетических установок. Проведены исследования фреттинг-коррозии теплообменных труб в узлах сопряжения с дистанционирующими решетками (ДР) создана установка, моделирующая виброизнос пары трения «ТВЭЛ-ДР» с целью обоснования вибропрочности и ресурса парогенератора реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. Разработана установка для исследования и ресурсных испытаний цилиндрических зубчатых зацеплений с эвольвентным профилем и подшипников скольжения, работающих в реакторах на быстрых нейтронах в среде свинцового теплоносителя. Созданы экспериментальные образцы циркуляционных насосов реакторных установок, с помощью которых исследованы процессы изнашивания стальных и чугунных подшипниковых опор скольжения, работающих в среде свинца, а также эвтектических сплавов свинец—висмут и свинец—литий. Показана возможность работы зубчатых зацеплений, изготовленных из стали 40X13 и чугуна СЧ 20, в свинцовом теплоносителе на протяжении 500 и 400 ч соответственно при температуре 450°С, содержании термодинамически активного кислорода в свинце, близком к насыщению, контактном напряжении в зацеплении 758 МПа, частоте вращения шестерни 500 мин<sup>-1</sup> или менее и передаточном числе зацепления 1,5 (окружная скорость шестерни и колеса на делительной окружности 2,1 м/с).

*Узлы трения, экспериментальное оборудование, ядерные установки, тяжелые высокотемпературные теплоносители, износ, ресурс*

В 50 - 70 гг. прошлого века были созданы и успешно эксплуатировались центробежные насосы в составе реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем на отечественных серийных атомных подводных лодках. В последние годы возобновился интерес к теплоносителям на основе свинца применительно к реакторам деления тяжелых ядер быстрыми нейтронами, ускорительно-управляемым системам, системам теплоотвода от бланкета и дивертора термоядерных реакторов.

В настоящее время в России проектируются реакторы на быстрых нейтронах со свинцовым (БРЕСТ) и свинцово-висмутовым (СВБР-75/100) теплоносителями, при работе которых возникает необходимость исследования трения, схватывания, фреттинг-коррозии и ускоренного изнашивания в узлах сопряжения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) с дистанционирующими решетками (ДР) тепловыделяющих сборок, а также в зубчатых зацеплениях и в подшипниках скольжения. В главных циркуляционных насосах реакторных контуров, в механизмах перегрузки ядерного топлива имеются ра-

бочие узлы с элементами, находящимися в относительном движении в среде жидкого металла при рабочих температурах 400...550°С. Работоспособность и надежность зубчатых зацеплений, подшипниковых опор скольжения, наряду с другими факторами, определяются физико-химическими характеристиками теплоносителя, в среде которого они работают. При разработке экспериментального оборудования учитывается значительное количество факторов, чтобы обеспечить проведение экспериментальных исследований в условиях, максимально приближенных к натурным условиям.

**Исследования пары трения «ТВЭЛ – ДР».** Прочность парогенератора реакторов на быстрых нейтронах связана с процессами вибрационного изнашивания и схватывания образцов материалов сопряжения «ТВЭЛ–ДР». Ускоренное изнашивание и схватывание контактирующих пар могут привести к опасным последствиям в установках с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями [1, 2].

Выбор материалов трущихся пар является определяющим для обеспечения безопасности функционирования атомных энергетических установок. Для обеспечения надежности теплообменников парогенератора были исследованы материалы пары трения «ТВЭЛ-ДР» парогенератора в жидком свинцовом теплоносителе. Изучались механизмы и интенсивность изнашивания образцов, проводились металлографические и профилометрические исследования.

Для проведения ресурсных испытаний образцов материалов парогенератора в условиях фреттинг-изнашивания и схватывания была разработана экспериментальная установка, моделирующая контакт пары трения «ТВЭЛ-ДР», работающей в условиях фреттинг-изнашивания, а также технологическое оборудование, обеспечивающее необходимое качество теплоносителя - свинца. Испытательная установка (рис. 1) состоит из корпуса 1, в котором на стержне-траверсе размещены два образца теплообменной трубки парогенератора 7, диаметром 17×3 мм. К наружным поверхностям трубок прижимаются с заданными усилиями два пальца 6, вырезанные из этих же трубок. Каждый палец подвешен на двух консольных плоских пружинах 12. Усилия поджатия пальцев обеспечиваются гирями 13 заданного веса. Полость корпуса заполняется свинцовым теплоносителем.

Теплоноситель полностью закрывает зону трения пары «трубчатый образец – палец». Вход теплоносителя в корпус модели перед испытаниями и дренаж его после испытаний осуществляются через штуцер на его днище. Уровень теплоносителя в корпусе модели контролируется по датчику уровня 17. Через штуцер на боковой стенке установки вводится инертный газ.

В крышке корпуса предусмотрен воздушник 21 для сброса давления. Середине траверсы, на которой закреплены образцы трубок, с помощью вибратора через сильфоны 9 и толкатель 4 задаются виброперемещения с фиксированными параметрами.

Снаружи установки имеют электрообогрев 15 и теплоизоляцию 16. В крышке корпуса для контроля суммарной глубины износа пары «образец трубки–палец» устанавливаются два индуктивных датчика перемещения, 19. Температура теплоносителя

измеряется с помощью термоэлектрического преобразователя 10.

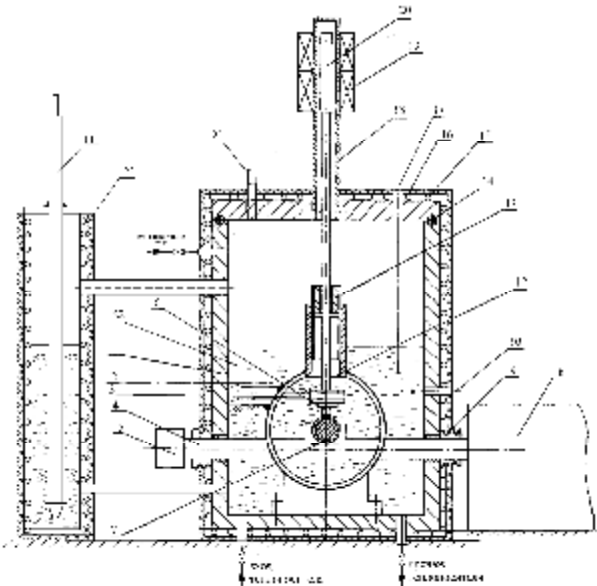


Рис. 1. Установка для испытаний материалов труб тепловыделяющих элементов и ДР парогенератора на износ в условиях фреттинга в среде свинцового теплоносителя: 1 – корпус; 2 – вытеснитель; 3 – держатель пальца (испытываемого образца); 4 – толкатель; 5 – пьезоакселерометр; 6 – палец (испытываемый образец); 7 – образец теплообменной трубки; 8 – вибратор; 9 – сильфон; 10 – термоэлектрический преобразователь; 11 – датчик контроля кислорода; 12 – плоская пружина; 13 – гиря; 14 – металлическая прокладка; 15 – электрообогрев; 16 – теплоизоляция; 17 – датчик уровня; 18 – разделительная трубка; 19 – индуктивный датчик; 20 – якорь индуктивного датчика; 21 – воздушник; 22 – свинцовый теплоноситель; 23 – стакан

Содержание кислорода в теплоносителе определяется датчиком контроля термодинамической активности кислорода 11, который установлен в отдельном стакане 23, соединенном с корпусом 1 двумя трубками, как сообщающиеся сосуды. На экспериментальной установке проведены эксперименты, в которых испытывали пары образцов материалов по схеме «палец–трубчатый образец» (рис. 2).

Частоты вынужденных колебаний задавались равными 34 и 66 Гц, находящимися в диапазоне расчетных частот вынужденных колебаний витых участков труб в поперечном потоке теплоносителя. Температуры поддерживались равными 440 и 540 С, соответствующими температурам теплоносителя на входе и выходе из парогенератора. Величины амплитуд виброперемещений 0,25 и 0,5 мм и нормальной силы 3,3; 4,5 и 7 Н выбраны исходя из проектных зазоров и несомкнутостей отверстий дистанционирующих решеток и труб.

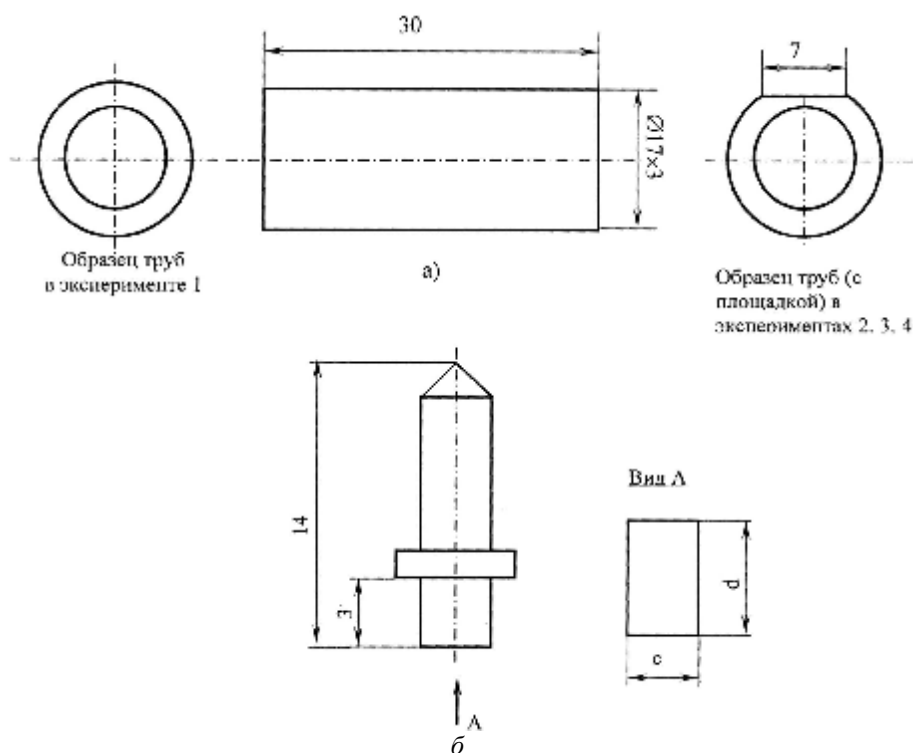


Рис. 2. Образцы для испытаний: трубчатый образец (а); контрольный образец (палец) (б)

Испытания прекращались после отрезка времени работы, достаточного для определения интенсивности изнашивания материала трубчатого образца.

**Зубчатые зацепления и подшипники скольжения.** На рис. 3 представлены фотография и схема экспериментальной установки. Условия испытаний: теплоноситель – свинец при температуре 400...550°C с контролируемым содержанием примеси термодинамически активного кислорода; защитный газ – аргон, водород, аргоноводородная смесь, аргонокислородная смесь; передача – прямозубая, цилиндрическая, наружного зацепления с эвольвентным профилем; частота вращения шестерни  $n = 100 \dots 3500 \text{ мин}^{-1}$  при контактных напряжениях в зацеплении  $\sigma_H = 295 \dots 920 \text{ МПа}$ ; межосевое расстояние зубчатых зацеплений 50 мм; материалы шестерни и зубчатого колеса – конструкционные стали и чугуны.

В энергетических контурах указанных установок с применением свинцово-висмутового и свинцового теплоносителей одними из важнейших и специфичных единиц оборудования являются циркуляционные насосы. Боковая и моноблочная компоновка энергетических контуров с тяжелыми жидкими металлами обуславливает использование циркуляционных насосов погружного типа.

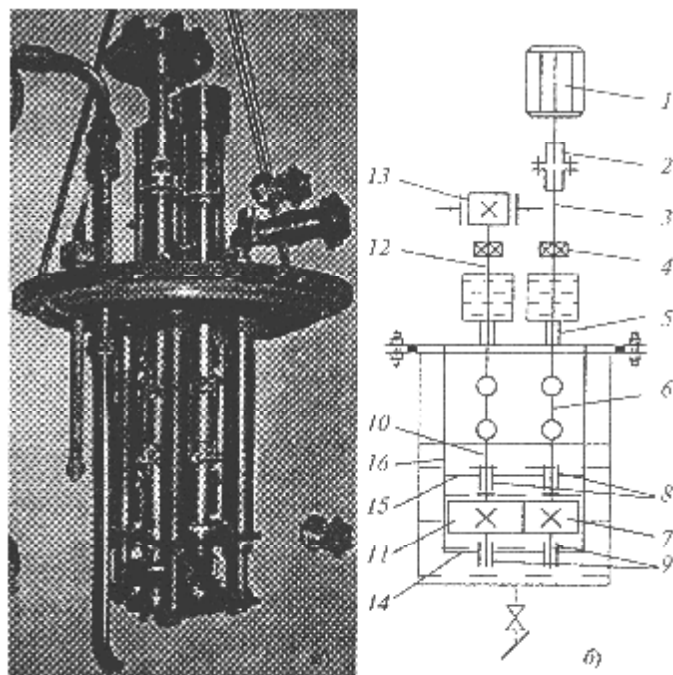


Рис. 3. Фотография (а) и схема (б) экспериментальной установки:

1 — электродвигатель; 2 — пальчиковая муфта; 3 — вал привода шестерни; 4 — радиально-упорный подшипник; 5 — радиальный подшипник скольжения; 6 — карданный вал; 7 — шестерня; 8 — радиально-упорный ГДП; 9 — радиальный ГДП; 10 — вал зубчатого колеса; 11 — зубчатое колесо; 12 — вал тормоза; 13 — ленточный тормоз; 14 и 15 — нижняя и верхняя опорные плиты; 16 — штанга крепления

В конструкциях насосов такого типа с "длинным" валом обязательна установка подшипников скольжения, работающих в среде

тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ). Специфика взаимодействия контактных поверхностей подшипников в среде свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей определяется их физико-химическими свойствами, условиями нагружения и состоянием поверхностей трения. По типу взаимодействия контактных поверхностей конструкции подшипников скольжения, согласно традиционной классификации, подразделяются на гидростатические, гидродинамические и подшипники сухого трения [2,3].

**Гидростатические подшипники.** Все экспериментальные и часть главных циркуляционных насосов для перекачки свинцово-висмутового теплоносителя в реакторных установках опытной и серийных отечественных атомных подводных лодок имели гидростатические подшипники. Такие подшипники обеспечивали режим жидкостной смазки с использованием в качестве рабочей среды жидкометаллического теплоносителя, подаваемого либо за счет напора собственного насоса, либо специальным вспомогательным насосом и насосами возврата протечек теплоносителя. При эксплуатации энергетического контура со свинцово-висмутовым или свинцовым теплоносителем в последний могут попадать различные частицы: оксиды теплоносителя, продукты разрушения сталей, случайные загрязнения при монтаже контура и др. Твердые частицы примесей, попадая в зазор между валом и втулкой, приводят к изнашиванию рабочих поверхностей подшипников. Такой факт фиксировался при сдаточных испытаниях главного циркуляционного насоса реакторной установки с эвтектикой свинец-висмут.

Исследования авторов показали, что для исключения забивания зазоров гидростатического подшипника шлаками целесообразно организовать подачу теплоносителя к его дросселям через приемную камеру, образованную вращающейся и неподвижной стенками. Для исследовательских и испытательных стендов с ТЖМТ характерны периодическое заполнение и дренирование контура с теплоносителем и частые разуплотнения контура. При эксплуатации таких контуров возможно накопление частиц примесей - шлаков. При дренировании, когда уровень жидкого металла в контуре снижается, шлаки попадают в узел подшипника и задерживаются в ще-

лях и узких каналах даже при полном удалении ТЖМТ из насоса. При последующем заполнении контура жидким металлом шлаки могут оставаться в дросселях, каналах и полостях пазов гидростатического подшипника. Работа подшипника переходит в режим сухого трения, когда роль мягкой смазки играют оксиды теплоносителя, находящиеся в пазах подшипника, и заметного изнашивания рабочих поверхностей не происходит. При разборке стендовых насосов неоднократно фиксировалось забивание полостей вертикальных пазов гидростатических подшипников шлаками желтого цвета, вероятно, оксидами свинца и висмута. При введении периодических технологических обработок контура на стенде ФТ-1 НГТУ оксиды из пазов исчезали, что было зафиксировано при последующей разборке, и подшипник переходил в расчетный режим работы (рис. 4). До проведения осмотра насос работал в составе стенда более 40 лет и использовался по прямому назначению один-два месяца в году. Режим работы насоса: подача (эвтектики свинец-висмут) до  $10^5$  кг/ч, температура  $250...450^\circ\text{C}$  (кратковременно до  $500^\circ\text{C}$ ), частота вращения вала насоса -  $1000 \text{ мин}^{-1}$ .

Гидростатические подшипники, несмотря на указанные недостатки, являются, вероятно, оптимальными, практически безыносными конструкциями подшипников скольжения, работающими в среде свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей.

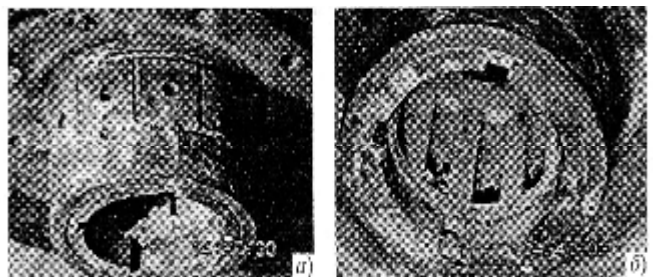


Рис. 4. Фотография гидростатического подшипника насоса стенда ФТ-1:  
а - дросселирующие отверстия; б - рабочая поверхность с напорными камерами

Проекты энергетических контуров с ТЖМТ для энергоблоков АЭС (СВБР-75/100, БРЕСТ) в отличие от контуров атомных подводных лодок имеют существенно меньшее гидравлическое сопротивление [2]. Это обуславливает применение в них насосов осевого, а не центробежного

или диагонального типа. Напор насосов осевого типа существенно меньше, чем центробежных или диагональных, что является проблемой для создания гидродинамических подшипников, надежно работающих при эксплуатационном диапазоне частот вращения вала насосов (при отсутствии в контуре вспомогательных насосов).

#### Гидродинамические подшипники.

Для условий работы гидродинамических подшипников в ТЖМТ расчет по традиционным методикам (для условий смазывания маслами) дает очень малые значения относительных и абсолютных величин зазоров между валом и втулкой. Это определяется весьма малой вязкостью жидких металлов при рабочих температурах. Получающиеся в результате расчетов значения зазоров, равные сотым и менее долям миллиметра, делают невозможной техническую реализацию рассчитанных подшипниковых узлов. Можно утверждать, что теории, обосновывающие работу гидродинамических подшипников и методы их расчета, основанные на предположении смачивания поверхностей вала и втулки смазкой, имеющей значительную вязкость, практически неприемлемы для жидкостей, не смачивающих рабочие поверхности и, в частности, для свинцово-висмутового и свинцового теплоносителей

**Подшипники сухого трения.** Для работы в условиях реакторного контура оправданы затраты на создание гидростатических подшипников с длительным ресурсом. Для экспериментальных и стартовых стендов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями требуется создание насосов с оптимальными технико-экономическими показателями. В металлургическом производстве свинца и его сплавов (баббитов и др.) также требуются дешевые и простые в изготовлении и эксплуатации насосы. Для подшипников таких насосов не обязателен ресурс в несколько десятилетий. При обязательных остановках стендов в соответствии с программами их работ, при циклической работе насосов в производстве свинца допустима достаточно простая и быстрая замена (раз в один-два года) подшипниковых пар в отличие от работы подшипников в условиях реакторного контура.

К особенностям работы подшипников сухого трения в среде расплавов свинца и эвтектики свинец – висмут можно отнести:

- обязательное наличие оксидных покрытий (пленок) на поверхностях деталей конструкций, обеспечивающих их стойкость в высокотемпературных расплавах свинца и эвтектики свинец – висмут;

- интенсивный отвод жидкими металлами теплоты, выделяющейся в зоне трения при высоких рабочих температурах перекачиваемых жидких металлов.

Под режимом сухого трения понимается режим, при котором между трущимися поверхностями отсутствует жидкий или пластичный смазочный материал, смачивающий поверхности трения [1,2]. При этом возможно наличие сухого смазывающего вещества, находящегося в твердой фазе, например оксидных пленок на поверхностях металлов, а также периодическое или постоянное омывание контактных поверхностей маловязкой жидкостью, не смачивающей поверхности и не являющейся смазкой.

Примером работы подшипников сухого трения является работа подшипников насоса НЦС-01 (рис. 5, а) и НЦС-04 (рис. 5, б) разработки НГТУ.

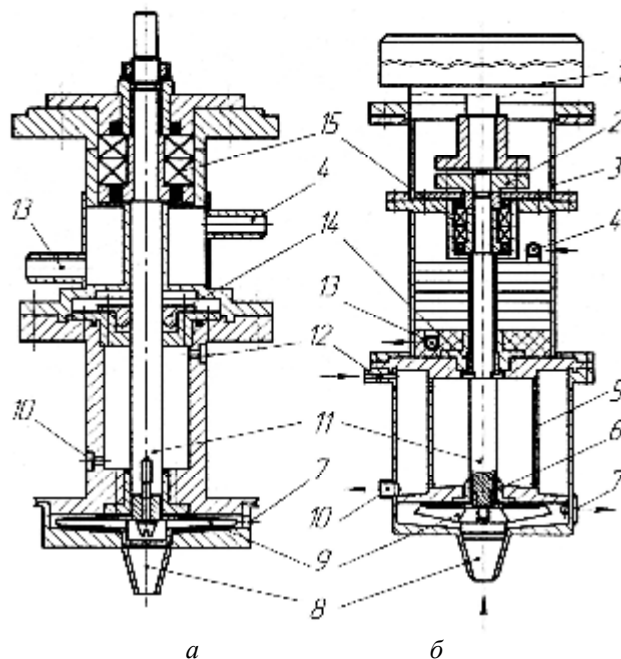


Рис. 5. Конструктивные схемы электронасосов НЦС-01 (а) и НЦС-04 (б):

- 1 — электродвигатель;
- 2 — муфта;
- 3 — стакан;
- 4 — подвод охлаждающей воды;
- 5 — кронштейн;
- 6 — втулка подшипника скольжения (съемная);
- 7 — штуцер напорный;
- 8 — патрубок всасывающий;
- 9 — колесо рабочее;
- 10 — отвод организованных протечек;
- 11 — вал;
- 12 — штуцер газовый;
- 13 — отвод охлаждающей воды;
- 14 — узел уплотнения вала;
- 15 — верхний подшипниковый узел

Фотографии подшипникового узла сухого трения до начала работы представлены на рис.6, а, после 950 ч работы в среде

свинца при температуре 480...510°C - на рис. 6, б.

Через указанное время втулка вала имела неравномерный износ как в радиальном, так и в осевом направлениях. Максимальное изменение диаметра составило 0,6 мм. Втулка подшипника имела визуально фиксируемые повреждения внутренней поверхности; максимальное изменение диаметра составило 0,3 мм. На поверхностях втулки вала и втулки подшипника в рабочей области зафиксированы кольцевые царапины и борозды глубиной до 1 мм и шириной до 2 мм. Поверхности, несмотря на ярко выраженный процесс изнашивания, покрыты плотной оксидной пленкой черного цвета, смачивание поверхности свинцом отсутствует, что свидетельствует об отсутствии коррозии стали в среде свинца.

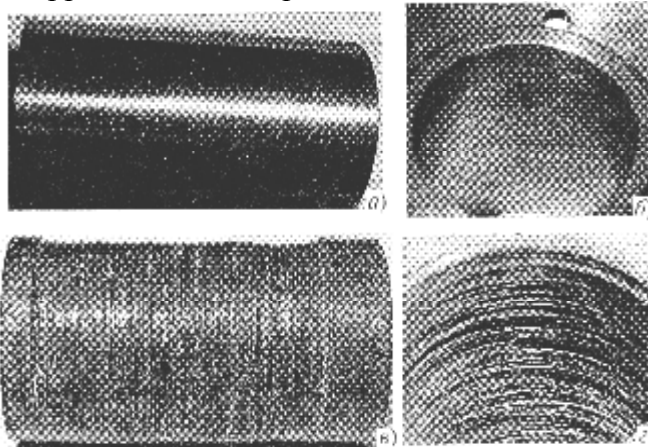


Рис. 6. Фотографии втулок вала (а) и подшипника (б) до испытаний и наружной поверхности втулки вала (в) и внутренней поверхности втулки подшипника (z) после 950 ч работы

Возможной причиной интенсивного изнашивания поверхностей подшипника явилось отсутствие (невыполнение) режимов обкатки и целенаправленного формирования оксидных покрытий. Кроме начального момента (нескольких десятков часов), замечаний к работе насоса не имелось. Операции по замене подшипникового узла, которые не являлись необходимыми с точки зрения эксплуатации насоса, были совмещены с остановкой стенда для контроля согласно программе его работ и осуществлены легко, без каких-либо задержек и затруднений.

Основные характеристики насоса НЦС-01 (в составе стенда ФТ-216 НГТУ): подача – 1...2 м<sup>3</sup>/ч; напор - 2 м. ст. ж.; рабочая среда:

свинцовый теплоноситель с температурой 450...500°C - 1710 ч, эвтектика свинец—литий с температурой 480...500°C - 100 ч; частота вращения вала 800...1500 мин<sup>-1</sup>. Фотографии поверхностей втулки вала и втулки подшипника насоса НЦС-01 после испытаний представлены на рис. 7. Втулка вала имела примерно равномерный износ с максимальной величиной 0,4 мм. На ее поверхности обнаружен единичный дефект в виде замкнутой борозды глубиной 0,2...0,4 мм, шириной около 0,2 мм. Состояние поверхности втулки подшипника аналогично состоянию поверхности втулки вала.

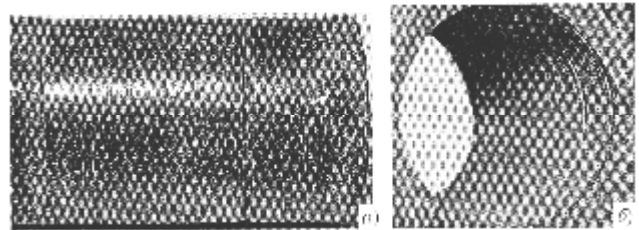


Рис. 7. Фотографии поверхностей втулок вала (а) и подшипника (б) насоса НЦС-01 после испытаний

Большой износ поверхностей подшипника насоса НЦС-04 по сравнению с аналогичным износом подшипника насоса НЦС-01 объясняется значительными статическими и динамическими нагрузками. При близких значениях параметров контакта подшипников и окружных скоростей подача насоса НЦС-04 в 3 раза и более превышала подачу насоса НЦС-01, а значения напоров отличались в 2 раза и более. Насос НЦС-04 на начальном этапе работы не прошел режима обкатки, и не были сформированы оксидные покрытия на поверхностях, работающих в среде свинца.

Результаты работы указанных и других насосов, разработанных в НГТУ, подтверждают возможность применения подшипников сухого трения в насосах для перекачки свинцового, свинцово-висмутового и свинцово-литиевого теплоносителей с температурой до 510°C в экспериментальных и стандартных стендах и установках свинцовой металлургии с временем работы до замены подшипниковых узлов не менее 1500...2000 ч.

**Гидростатодинамические (лабиринтно-винтовые) подшипники.** Жидкостное трение может быть обеспечено при работе в среде ТЖМТ использованием не только традиционных гидростатических подшипников, но и гидростатодинамических, т. е. тур-

булентного режима – так называемого турбулентного трения, которое характеризуется приблизительно квадратичной зависимостью напряжений от скорости и может заменить в рассматриваемом случае вязкое трение при применении маловязких жидкостей.

Принцип работы гидростатодинамического подшипника заключается в следующем. Для интенсификации турбулентного трения жидкости в зазоре между скользящими относительно друг друга поверхностями на них выполняются периодически повторяющиеся выступы (рис. 8).

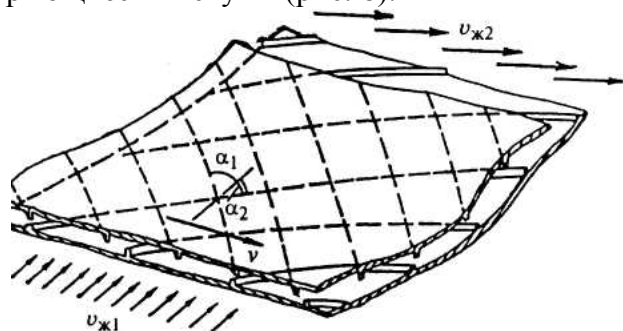


Рис. 8. Схема взаимодействия поверхностей с выступами, при относительном скольжении которых используется турбулентное трение для перемещения жидкости

Направление выступов составляет острые углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (с различными знаками) с направлением, перпендикулярным к скорости  $v$  относительного скольжения. При взаимодействии выступов с движущейся жидкостью для создания режима турбулентного трения не имеет принципиального значения, на каких поверхностях, в каком количестве и какой формы они выполнены. Для подшипника скольжения практический интерес представляет конструкция, в которой выступы выполнены на цилиндрических поверхностях, входящих одна в другую, одна из которых вращается. Выступы выполняются в виде многозаходных противоположно направленных нарезок (канавок) специального профиля (например, если на валу правая нарезка, то на втулке – левая, и наоборот).

Специалистами НГТУ [4] было предложено использовать рассматриваемую конструкцию в качестве подшипника скольжения с жидкостной смазкой в виде перекачиваемого насосом высокотемпературного жидкометаллического теплоносителя. Принципы работы гидростатодинамического и гидростатического подшипников подобны. При смещении оси вала относительно оси втулки подшипника одновре-

менно с противоположных сторон происходит уменьшение и увеличение зазора между валом и втулкой с противоположно направленными нарезками. Увеличение зазора вызывает уменьшение гидравлического сопротивления в нем и более интенсивное вытекание жидкости, прокачиваемой благодаря нарезкам на поверхности вала и втулки, через этот зазор. В результате давление на вал со стороны жидкости в увеличенном зазоре снижается. При уменьшении зазора происходит противоположный процесс, приводящий к повышению давления в нем. Результатом этого будет возникновение силы, возвращающей вал в исходное положение, при котором оси вала и подшипника совпадают. Гидростатодинамические (лабиринтно-винтовые) подшипники лопастных насосов могут давать дополнительный эффект "запирания" протечек перекачиваемой среды по валу со стороны высокого давления (при соответствующем оформлении конструкции). Лабиринтно-винтовые подшипники скольжения требуют затраты мощности привода, пропорциональной величине протечек через подшипник.

На рис. 9 представлены фотографии втулки вала и втулки гидростатодинамического подшипника насоса НЦС-04 после 720 ч работы в среде свинца при температуре 480...510°C. Износы вершин выступов втулки вала и втулки подшипника неравномерны в радиальном и осевом направлениях. Максимальное изменение диаметра втулки вала и втулки подшипника составило 0,4 мм. Поверхности вершин выступов втулок вала и подшипника покрыты незамкнутыми кольцевыми бороздами, царапинами глубиной и шириной 0,2 мм, угол охвата поверхностей бороздами от 180° до 270°, максимальные значения соответствуют сечениям, ближним к колесу насоса. Поверхности покрыты оксидной пленкой, черные, не смочены теплоносителем. Подшипник не проходил обкатку. В начальный период работы насоса (около суток) были зафиксированы большие величины напора и расхода, чем при дальнейшей его работе, вероятно, из-за наличия лабиринтно-винтового подшипника. Далее расход насоса уменьшился примерно на 15% и на этом уровне стабилизировался. Каких-либо замечаний относительно работы насоса не было.

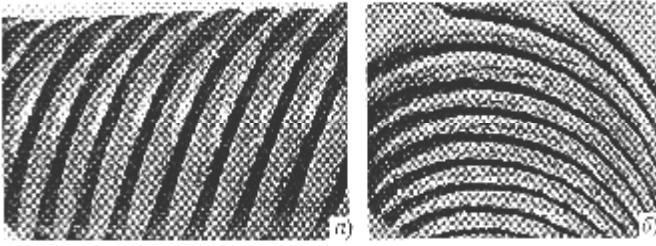


Рис. 9. Фотографии изношенных зон поверхностей втулки вала (а) и втулки гидростатодинамического подшипника (б) после 720 ч работы

Таким образом, разработана установка для испытания материалов узла сопряжения твэл-дистанционирующая решетка парогенератора в условиях фреттинга в среде свинца при температуре 440°С. Для исследования влияния характеристик свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей (температуры, содержания примеси кислорода), состава защитного газа, условий работы зубчатого зацепления (частоты вращения, условий нагружения), материала и конструктивного выполнения зацепления на его работоспособность разработана экспериментальная установка. Исследуются условия, обеспечивающие работу подшипниковых опор скольжения.

Разработаны экспериментальные образцы циркуляционных насосов реакторных установок, предназначенные для исследования характеристик процессов изнашивания стальных и чугунных подшипниковых опор скольжения, работающих в среде свинца, эвтектических сплавов свинец – висмут и свинец – литий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-00079-а

#### Библиографический список

1. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: справочник, Сер. Ос-

новы проектирования машин // Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков.- М.: Машиностроение, 1986. - 223 с.

2. Безносков, А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. - М: Изд АТ, 2007. – 434 с.

3. Субботин, В.И. Жидкометаллические теплоносители в ядерной энергетике / В.И. Субботин // Рос. Междотр. Конф.: «Тепломассообмен и свойства жидких металлов», Материалы конф. - Обнинск, 29-31 октября 2002. - Т.1. - С. 15-16.

4. Назаров, А.В. Исследования характеристик контактного взаимодействия элементов механизмов в среде высокотемпературного свинцового и свинец-висмутового теплоносителей / А.В. Назаров. - Дис. канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2007.

#### References

1. Drozdov, Yu.N., Pavlov, V.G., Puchkov, V.N. Friction and Wear in Extreme conditions/ Textbook. Ser. Basis of machine design. Moscow.: Machine Building, 1986, 223 p.

2. A.V. Beznosov, Yu.G. Dragunov, V.I. Rachkov. Heavy Liquid Metal Heat Transfer Medium in Nuclear Power – Moscow.: Publishing House AT, 2007, 434 p.

3. V.I. Subbotin. Liquid Metal Heat Transfer Medium in Nuclear Power. Inter Branch Conference “Heat and Mass Transfer and Properties of Liquid Metals” Proceeding of Conference, Pt.1, p. 15-16. Obninsk, October, 29-31, 2002.

4. Nasarov, A.V. The Investigation of contact interaction of mechanical elements in environment of High temperature Lead and Lead-Bismuth Heat Transfer Medium. Thesis of technical Science. Nisnii Novgorod, 2007.

## INVESTIGATION OF FRICTION JOINTS WORKING IN NUCLEAR PLANT WITH HEAT TRANSFER MEDIUM CONSIST OF HEAVY HIGH TEMPERATURE LIQUID METAL

© 2009 Yu. N. Drozdov<sup>1</sup>, A. V. Beznosov<sup>2</sup>, V. V. Makarov<sup>3</sup>, V. N. Puchkov<sup>1</sup>, M. A. Antonenkov<sup>2</sup>, D. V. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute, Moscow

<sup>2</sup>Nizsegorodskii State Technical University by Name of R.E.Alekseev

<sup>3</sup>FSUE OKB “Gidropress”, Podolsk, Russia



The experimental equipment developed for the decision of tribological problems, arising at use of friction joints in the environment of heavy liquid metals is submitted as heat-transfer medium for contours of nuclear power installations. For researches of fretting-corrosion of heat release pipes in contact with spacer grid cell the installation modelling a fretting process in the contacts with the purpose of a substantiation of vibration strength of a steam generator of a reactor on fast neutrons with the lead heat transfer medium is created. Experimental installation for research and resource tests of cylindrical involute gearings and the sliding bearings working in reactors on fast neutrons in the environment of the lead heat transfer is described. Experimental samples of circulating pumps for reactor installations, intended for research of wear process characteristics of steel and cast iron sliding support working in the environment of lead, eutectic alloys lead - bismuth and lead - lithium are developed.

*Friction joints, experimental equipment, nuclear plant, heavy liquid metal heat transfer medium, wear*

### **Информация об авторах**

**Дроздов Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Института машиноведения им. А.А.Благонравова Российской Академии наук. Область научных интересов: трибология, контактная гидродинамика, теплофизика, диффузионные явления на смазанном контакте, долговечность

**Безносов Александр Викторович**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Нижегородский государственный технический университет. Область научных интересов: трибология, жидкий металл, пары трения, Pb, Pb, Pb-Bi, Pb-Li, реакторный контур, ядерные энергетические установки

**Макаров Виктор Васильевич**, канд. техн. наук, зав.лаб., ФГУП ОКБ «Гидропресс». Область научных интересов: динамика, прочность, колебания, экспериментальная механика, изнашивание, фреттинг-коррозия, атомные установки.

**Пучков Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, зав. лабораторией, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской Академии наук. Область научных интересов: трибология, граничная смазка, твердые смазочные покрытия, экстремальные условия

**Антоненков Михаил Александрович**, инж. Нижегородский государственный технический университет. Область научных интересов: трибология, жидкий металл, пары трения, ядерные энергетические установки

**Кузнецов Дмитрий Васильевич**, инж. Нижегородский государственный технический университет. Область научных интересов: трибология, жидкий металл, пары трения, ядерные энергетические установки

**DrozdoV Yurii Nikolaevich**, Doctor of Technical Science, Head of Tribology Department of Mechanical Engineering Research Institute of Russia Academy of Science, Moscow. Area of Research: tribology, contact hydrodynamic, thermal physic, diffusion phenomena in lubricated contact, life time.

**Beznosov Aleksandr Victorovich**, Doctor of Technical Science, Head of cathedra of Nisze-gorodskii State Technikal University. Nisznii Novgorod. Area of Research: tribology, liquid metals Pb, Pb, Pb-Bi, Pb-Li, friction joints, reactor conour, nuclear plant.

**Makarov Viktor Vasilievich**, Candidate of Technical Science, Head of Laboratory. FSUE ОКВ “Gidropress”. Podolsk. Russia. Area of Research: tribology, dynamics, strength, vibrations, nuclear plant.

**Puchkov Vladimir Nikolaevich**, Candidate of Technical Science, Head of Laboratory “Wear at Boundary Lubrication” of Mechanical Engineering Research Institute of Russia Academy of Science, Moscow. Area of Research: tribology, boundary lubrication, solid lubricant, antifrictional materials, extreme conditions.

**Antononkov Michail Alexandrovich**, Engineer of Nisze-gorodskii State Technikal University. Nisznii Novgorod. Area of Research: tribology, liquid metals Pb, Pb, Pb-Bi, Pb-Li, friction joints, , nuclear plant.

**Kuznetsov Dmitrii Vasilievich**, Engineer of Nisze-gorodskii State Technical University. Nisznii Novgorod. Area of Research: tribology, liquid metals Pb, Pb, Pb-Bi, Pb-Li, friction joints, , nuclear plant.