

УДК 621.039.534

А.В. Безносков<sup>1</sup>, М.А. Антоненков<sup>1</sup>, Т.А. Бокова<sup>1</sup>, В.В. Лемехов<sup>2</sup>, А.В. Львов<sup>1</sup>**ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МОДЕЛИ ОСЕВОГО НАСОСА НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники, г. Москва<sup>2</sup>

Представлены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических работ, направленных на создание обоснованных конструкций проточной части и гидростатических опор скольжения для главных циркуляционных насосов инновационных реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым теплоносителем. Эксперименты проводились при следующих условиях: высокотемпературный свинцовый теплоноситель (теплоноситель реакторного контура); температура  $450 \div 550^\circ\text{C}$ ; средний расход через рабочее колесо и выпрямляющий аппарат –  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $100 \text{ т/ч}$ ); через подшипник до  $0,1 \div 0,5\%$  подачи насоса; источник давления рабочей жидкости на входе в подшипник – напор осевого насоса (ок.  $1,0 \text{ м.ст.свинца}$ ); содержание термодинамически активного кислорода в свинцовом теплоносителе во время испытаний: в интервале от  $10^{-5}$  до насыщения и с наличием твердой фазы оксидов теплоносителя в потоке.

*Ключевые слова:* свинцовый теплоноситель, экспериментальные исследования, гидростатический подшипник, осевые насосы.

**Введение**

В России ведутся работы, направленные на создание реакторной установки на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300. В качестве циркулятора теплоносителя реакторного контура предусматривается использовать насосные агрегаты осевого типа. В настоящее время отсутствует опыт проектирования и эксплуатации осевых насосов реакторных установок со свинцовым теплоносителем. Одними из проблемных узлов этих насосов являются проточная часть и нижний подшипниковый узел, работающий в перекачиваемой среде.

В НГТУ был разработан и создан стенд ФТ-4А-НГТУ для проведения исследовательских испытаний моделей проточной части и подшипникового узла ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 и проведены их исследовательские испытания.

Применение традиционных смазок в подшипниках главных циркуляционных насосов реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями невозможно вследствие высоких температур и недопустимости контакта теплоносителя с органическими соединениями. Единственной средой, в которой возможна работа такого подшипника, является перекачиваемый теплоноситель. Отличительной особенностью свинцового теплоносителя является несмачивание рабочих поверхностей подшипников скольжения, работа адгезии имеет малую величину, теплоноситель не способен удерживаться в зазорах между контактными поверхностями при наличии тангенциальных сил, имеет малую вязкость, поэтому гидродинамические подшипники в ТЖМТ неработоспособны. Свинцовый теплоноситель имеет малое значение вязкости, не смачивает контактные поверхности, поэтому рассматриваться в качестве смазки в традиционном понимании не может, однако эффективно отводит тепло, выделяющееся при трении контактных пар. Формируемые на поверхностях реакторного контура, в том числе и на контактных поверхностях ГЦН оксидные защитные покрытия имеют антифрикционные свойства, которые улучшают работу контактных пар.

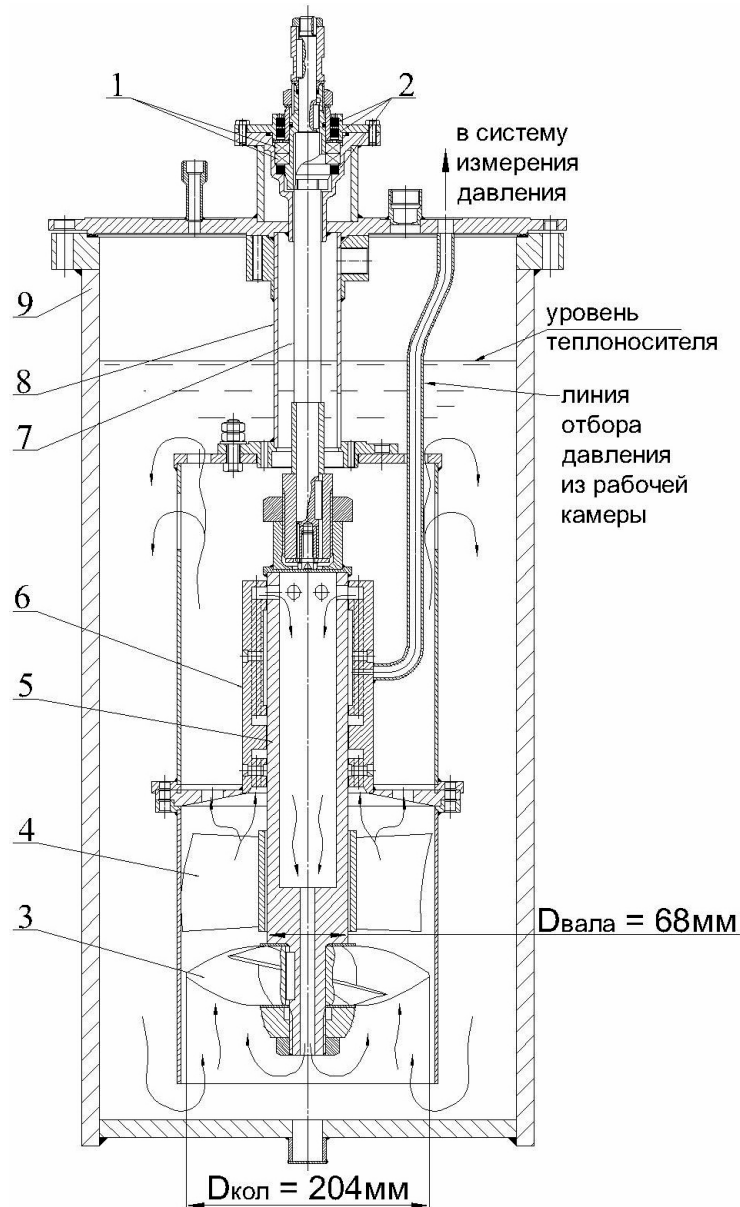
Целью работ, отраженных в настоящей статье, являлось экспериментальное и расчетно-теоретическое обоснование работоспособности, а также методики расчета и рекомендаций по созданию оптимальных конструкций проточной части и подшипников скольжения ГЦН, перекачивающих высокотемпературный расплав свинцового теплоносителя для условий реакторного контура.

Испытания проводились с конструкцией гидростатического подшипника, обоснованной исследованиями, проведенными авторами ранее [3, 4].

### Описание экспериментального стенда

В корпусе устанавливалась выемная часть и уплотнялась крышкой с прокладкой (рис. 1). На валу, соединенном через муфту с асинхронным двигателем, устанавливались следующие основные элементы:

- узел уплотнения по газу;
- верхний подшипниковый узел с шарикоподшипником;
- корпус гидростатического подшипника;
- имитатор вала ГЦН;
- выпрямляющий аппарат;
- осевое рабочее колесо;
- гайка крепления рабочего колеса (рис. 2).



**Рис. 1. Конструктивная схема камерного ГСП с взаимобратным щелевым дросселированием:**

- 1 – узел уплотнения по газу; 2 – верхний подшипниковый узел; 3 – осевое колесо;  
 4 – выпрямляющий аппарат; 5 – имитатор вала ГЦН; 6 – корпус подшипника  
 с взаимобратным щелевым дросселированием; 7 – вал; 8 – кронштейн;  
 9 – корпус выемной части



Рис. 2. Выемная часть (вид снизу)

К крышке приваривался кронштейн с напорной камерой насос, имеющей верхние отверстия, боковые окна и перфорированное днище, отверстия в котором сообщали напорную камеру и выход осевого насоса. Имитатор вала ГЦН и вал рабочего колеса и выпрямляющего аппарата имели центральное отверстие для прохода свинцового теплоносителя. Наружный диаметр рабочего колеса – 204,0 мм с четырьмя лопатками. Материал – сталь ст. 3 – был выбран для провоцирующих испытаний как материал с неоптимальными характеристиками для работы в условиях высокотемпературного свинцового теплоносителя. Выпрямляющий аппарат с внешним диаметром 204,0 мм выполнялся из стали 12Х18Н10Т с шестью лопатками.

Гидростатический подшипник с взаимобратным щелевым дросселированием был разработан на основании экспериментальных исследований, выполненных авторами ранее [3, 4]. Рабочее колесо и выпрямляющий аппарат моделировали проточную часть проекта ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 в масштабе 1:3. В корпусе устанавливался датчик термодинамической активности кислорода в свинце конструкции ГНЦ РФ ФЭИ.

К установке (рис. 1) подключалась газовая система с подсистемой регулирования содержания кислорода в свинце, система измерения давления в камере гидростатического подшипника, дренажный бак свинцового теплоносителя.

В состав стенда входили: контур свинцового теплоносителя; система газа; система электроэнергоснабжения; система управления и регулирования параметров стенда; система сбора, обработки и представления информации. Все элементы контура свинцового теплоносителя имели электрообогрев и теплоизоляцию.

### Методика экспериментов

Циркуляция теплоносителя в контуре свинцового теплоносителя осуществлялась следующим образом. После рабочего и выпрямляющего аппарата основной поток теплоносителя через дросселирующие отверстия поступал в напорную камеру. Через боковые окна напорной камеры поток теплоносителя направлялся в опускной участок и далее на вход в рабочее колесо насоса. Около 0,1 – 0,5 % расхода (расчетная оценка) расхода свинцового теплоносителя после выпрямляющего аппарата поступала в гидростатический подшипник, после чего направлялась в центральную полость имитатора вала ГЦН и далее через отверстие в валу рабочего колеса – на вход в рабочее колесо, где основной поток и поток через гидростатический подшипник смешивались.

## Условия испытаний

Теплоноситель:  $450 \div 550$  °С; скорость вращения вала насоса –  $300 \div 1200$  об/мин; расход свинцового теплоносителя максимальный – до  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  (до  $100 \text{ т}/\text{ч}$ ) (расчетная оценка); напор насоса – до ок.  $1,0$  м.ст.свинца; термодинамическая активность кислорода в свинце от  $10^{-5}$  до насыщения и с наличием твердой фазы оксидов теплоносителя в потоке. Из-за отсутствия средств отвода тепла, адиабатически вводимого насосом в контур, испытания проводились в циклическом режиме (рис. 3 и рис. 4). Цикл адиабатического разогрева от  $450$  до  $550$  °С при  $n = 1200$  об/мин составлял  $0,75$  ч, цикл естественного охлаждения теплоносителя от  $550$  до  $450$  °С составлял  $1,67$  ч. Число циклов с активностью кислорода в свинце  $10^{-1} - 10^0$  плюс твердая фаза оксидов теплоносителя составляло  $30$ , с активностью кислорода в свинце  $10^{-5} \div 10^{-4}$  составляло  $30$ , общее количество циклов  $60$  и продолжительность испытаний  $80$  ч.

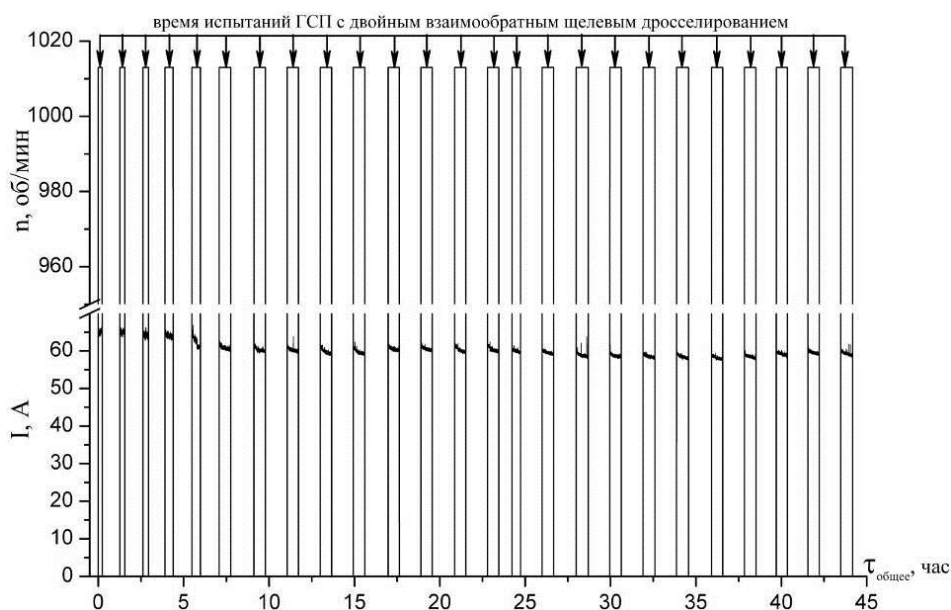


Рис. 3. Графическая зависимость  $n = f(\tau_{\text{общее}})$  и  $I = f(\tau_{\text{общее}})$ : общее время работы стенда  $44$  ч, время циклических испытаний ГСП –  $15$  ч.

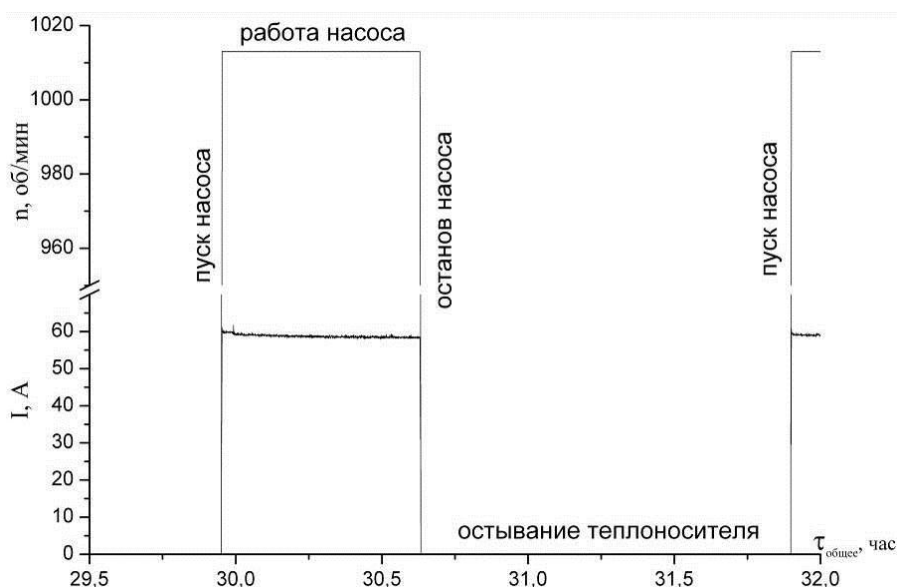


Рис. 4. Графическая зависимость  $n = f(\tau_{\text{общее}})$  и  $I = f(\tau_{\text{общее}})$  одного цикла работы (пуск – останов)

### Обсуждение результатов

В процессе проведения испытаний фиксировались значительные динамические нагрузки и вибрация установки вследствие специфичной гидродинамики контура циркуляции.

При ревизии установки был обнаружен заброс свинца в зазор между валом и штуцером крышки. На рабочем колесе (рис. 5) и выпрямляющем аппарате (рис. 6) следы эрозионных повреждений отсутствовали. Поверхность лопаток была темного цвета, характерного для сформированных оксидных покрытий, со следами свинцового теплоносителя, легко удаляемыми механическим путем.

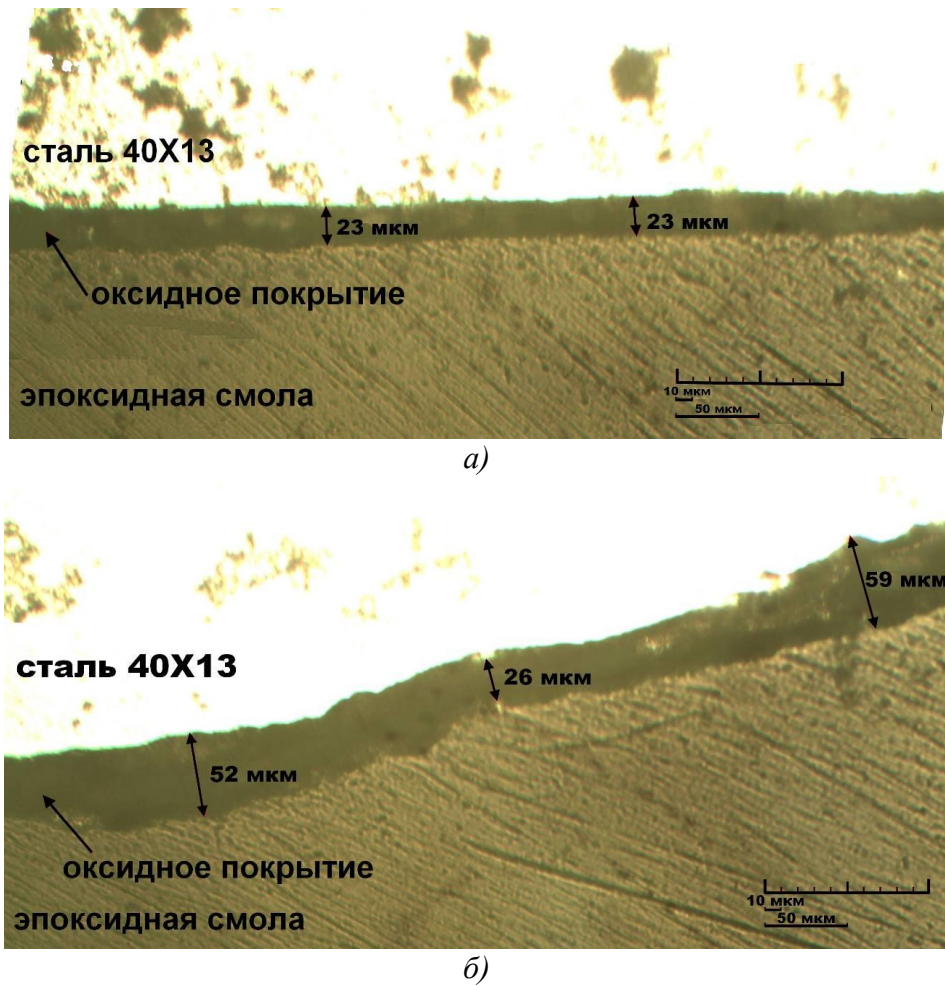


Рис. 5. Осевое колесо



Рис. 6. Выпрямляющий аппарат (без чехловой трубы) после этапа испытаний при активности кислорода в свинце  $10^{-5} \div 10^{-4}$

На контактных поверхностях гидростатического подшипника следы эрозионного или какого-либо другого износа отсутствовали. Поверхности контактной пары были темного цвета, характерного для сформированных оксидных защитных покрытий. Был произведен поперечный разрез и материаловедческий анализ шлифов (рис. 7). На последних видны оксидные покрытия толщиной  $20 \div 50$  мкм на контактных поверхностях из стали 40X13.



**Рис. 7. Фотографии шлифов корпуса подшипника после этапа испытаний при активности кислорода в свинце  $10^{-5} \div 10^{-4}$ :**

*а* – фотография шлифа межкамерной перемычки; *б* – фотография шлифа рабочей камеры

Основные результаты испытаний характеристик гидростатического подшипника показали следующее.

В условиях рассматриваемого экспериментального исследования подшипника скольжения при одинаковых скоростях вращения осевого колеса гидравлическое сопротивление свинцового потока в кольцевом зазоре между имитатором вала ГЦН и корпусом подшипника измеренное на разных этапах эксперимента значительно различается при различной термодинамической активности кислорода в свинце ( $a = 10^0$  и  $a = 10^{-3}$ ) (рис. 8). Различие в числах Рейнольдса достигает полупорядка. При испытаниях на свинце при различной термодинамической активности кислорода результаты испытаний располагаются практически на одной кривой.

Результаты исследований триботехнических характеристик контактных поверхностей исследуемого варианта конструкции гидростатического подшипника в циклических режимах пуска и останова в среде высокотемпературного ТЖМТ показали отсутствие следов износа поверхностей. Возможной причиной отсутствия износа элементов подшипника является антифрикционные свойства защитных оксидных покрытий и пристенного слоя.

При испытаниях конструкции ГСП в среде ТЖМТ с содержанием термодинамически активного кислорода в свинце  $a = 10^0$  и  $a = 10^{-3}$  фиксируется различие величины грузоподъемности подшипника  $G$  на одну камеру (рис. 9).

Одним из недостатков подшипника с взаимобратным щелевым дросселированием является возможность забивания твердой фазой оксидов теплоносителя винтовой канавки,

соединяющей регулировочную и рабочую камеры, при аварийных режимах эксплуатации (например, микротечь парогенератора).

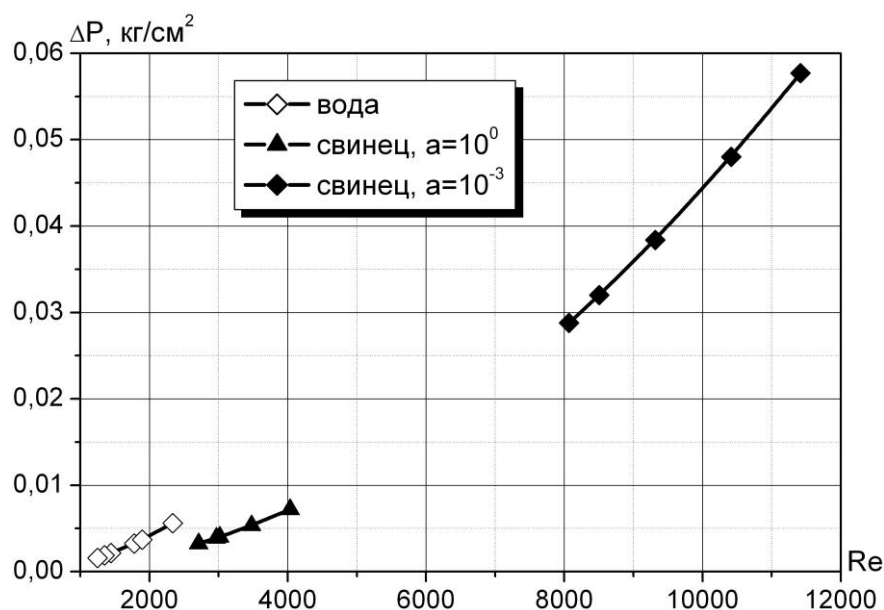


Рис. 8. Графическая зависимость  $\Delta P = f(Re)$

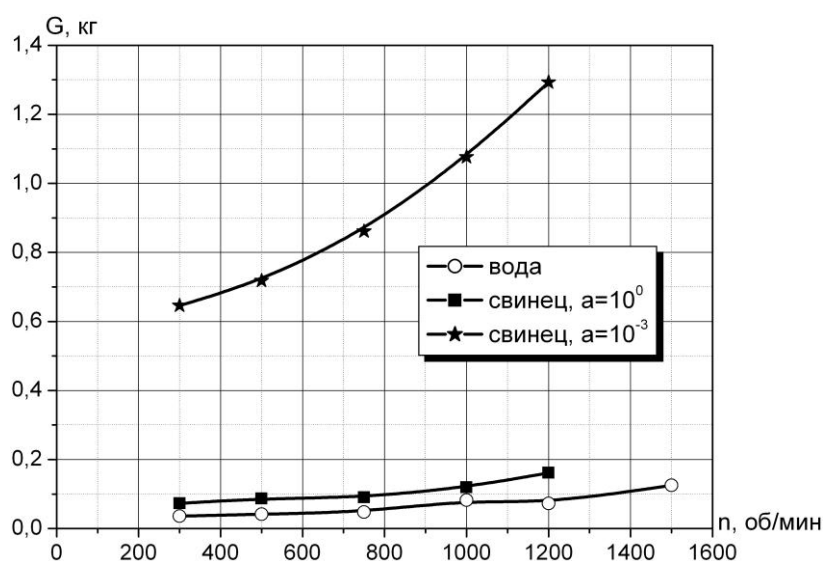


Рис. 9. Графическая зависимость грузоподъемности ГСП на одну камеру от скорости вращения его вала (диаметр вала 68 мм)

### Выводы

Подтверждена работоспособность модели осевого ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300, отсутствие кавитационного эрозионного износа лопаток в циклическом режиме (число циклов – 60) в течение 45 ч в свинцовом теплоносителе при температуре  $450 \div 550$  °С при окружной скорости 12,8 м/с, давлении на всасе колеса  $0,5 \div 0,8$  кгс/см<sup>2</sup> (ата) и активности кислорода в свинце  $10^{-5} \div 10^{-3}$ .

Подтверждена работоспособность гидростатического подшипника с взаимобратным щелевым дросселированием в свинцовом теплоносителе при температуре  $450 \div 550$  °С, скорости вращения вала  $300 \div 1200$  об/мин при многочисленных (60 циклов) пусках и остановках

модели ГЦН, в условиях значительных вибрациях и динамических нагрузок вала с гидростатическим подшипником и рабочим осевым колесом.

*Работа проводилась в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года», а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0472*

#### Библиографический список

1. **Синев, Н.М.** Бессальниковые водяные насосы / Н.М. Синев, П.М. Удовиченко. – М.: Атомиздат, 1972. – 494 с.
2. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт. 2006. – 370 с.
3. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование гидродинамики дросселей в потоке свинцового теплоносителя и воды / А.В. Безносков [и др.] // Известия вузов Ядерная энергетика. 2011. №2. С. 3.
4. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование гидродинамики течения свинцового теплоносителя и воды через экспериментальный участок «дроссель-кольцевой зазор» / А.В. Безносков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2012. №2.

*Дата поступления  
в редакцию 18.10.2013*

**A.V. Beznosov<sup>1</sup>, MA.. Antonenkov<sup>1</sup>, T.A. Bokova<sup>1</sup>, V.V. Lemehov<sup>2</sup>, A.V. Lvov<sup>1</sup>**

#### **PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF FLOW MODEL AXIAL FLOW PUMP IN THE HIGH-LEAD COOLANT**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev <sup>1</sup>,  
Research and development institute of power engineering, Moscow<sup>2</sup>

**Purpose:** The results of experimental and computational and theoretical work aimed at creating designs based hydraulic and hydrostatic slide bearings for the main circulation pumps innovative fast reactor cooled by lead-cooled .

**Design/methodology/approach:** The experiments were carried out under the following conditions: high- lead coolant (coolant circuit of the reactor) , the temperature of 450÷550°C , the average flow rate through the impeller and straightening machine - 100 m<sup>3</sup>/h (100 m/h) through the bearing to 0,1÷0,5% of the pump , the source of fluid pressure at the inlet to the bearing - axial pressure pump thermodynamically active oxygen content in lead coolant during testing: in the range of 10<sup>-5</sup> to saturation and solid oxides having coolant flow.

**Findings:** In the conditions of this experimental study of a plain bearing with the same axial wheel speeds lead hydraulic flow resistance in the annular gap between the MCP and the simulator shaft bearing body measured at different stages of the experiment varies significantly under different thermodynamic oxygen activity in the lead. The results of the tribological characteristics of the contact surface of the embodiment of the hydrostatic bearing in cycle start and stop in an environment of high temperature liquid heavy metal showed no signs of wear surfaces. When testing the design of SHG in a medium with liquid heavy metal content of thermodynamically active oxygen in the lead, a=10<sup>0</sup> and a = 10<sup>-3</sup> fixed difference of the load bearing G per cell. One of the drawbacks with reciprocal bearing slotted throttling is the possibility of clogging of the solid phase oxide carrier helix connecting and adjusting the working chamber, the emergency mode of operation (microleakage steam generator).

**Research limitations/implications:** Confirmed model efficiency axial MCP BREST -OD -300, the absence of cavitation erosion wear of the blades in cycle (number of cycles - 60) for 45 hours in the lead coolant at 450 ÷ 550°C at a peripheral speed of 12,8 m/s, the pressure suction wheels 0,5 ÷ 0,8 kgf/cm<sup>2</sup> (ata) and the oxygen activity in lead 10<sup>-5</sup> ÷ 10<sup>-3</sup>.

Confirmed operation of the hydrostatic bearing with reciprocal slotted throttling in the lead coolant at 450÷550°C, the speed of rotation of the shaft 300 ÷ 1200 rev/min with numerous (60 cycles) start and stop the model MCPs under heavy vibrations and dynamic loads of the shaft with a hydrostatic bearing and axial displacement wheel.

**Originality/value.** The experimental results can be used to design the main circulation pumps for reactor plants for fast breeder cooled by heavy liquid metal coolants.

*Key words:* MCP, lead cooled, Experimental Study, hydrostatic bearings, axial flow pump.