

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ГЦН ПРИМЕНительно К ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМ И РЕАКТОРНЫМ КОНТУРАМ СО СВИНЦОВЫМ И СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Бокова Т.А., Маров А.Р, Волков Н.С., Мелузов А.Г., Зырянова Т.К.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия)

Введение

Представлен анализ опыта работы с подшипниками скольжения насосов в условиях щелочных металлов и тяжелого жидкометаллического теплоносителя (свинец, свинец-висмут) на РУ атомных подводных лодок, энергетических реакторов с натриевым теплоносителем, на экспериментальных стендах НГТУ. Данный опыт применим как к энергетическим реакторам с высокими температурами ТЖМТ (400–550 °С), так и отчасти к ускорительно-управляемым системам и исследовательским реакторам с температурой ТЖМТ порядка 200–350 °С.

Поставлена проблема технологии теплоносителя для реакторных установок с температурой ТЖМТ 200–350 °С. Нынешние технологии не могут обеспечить достаточную чистоту теплоносителя при таких температурах, в связи, с чем может нарушаться работа различных механизмов, в том числе подшипников скольжения насосов.

Обоснован выбор типа подшипника скольжения для дальнейших исследований его работоспособности в условиях низких температур ТЖМТ. Частично получена гидравлическая характеристика подшипника скольжения на предварительных этапах экспериментальных исследований.

1. Технология тяжелого жидкометаллического теплоносителя

В настоящее время прорабатываются ускорительно-управляемые системы и исследовательские реакторы с температурой ТЖМТ порядка 200–350 °С, такие как GUINEVERE, MYRRHA, CLEAR-I. Так же существует перспективный проект энергетического реактора СВБР-100 с температурой теплоносителя на входе в активную зону 320 °С.

В настоящее время существует технология свинцово-висмутового и свинцового теплоносителей РУ, разработанная, в том числе, с участием НГТУ [1]. Эта технология ТЖМТ обеспечивает работоспособность энергетических контуров критических реакторов деления тяжелых ядер при рабочих температурах теплоносителей 400–550 °С. Основными положениями этой технологии являются следующие:

- 1) Очистка от оксидов теплоносителя (одной из основных эксплуатационных примесей) путем обработки теплоносителя и контура восстановительными газопаровыми смесями.
- 2) Обеспечение стойкости конструкционных материалов контура за счет формирования и доформирования на их поверхностях оксидных защитных покрытий.
- 3) Регулирование (тем или иным способом) содержания кислорода в теплоносителе для обеспечения формирования и доформирования защитных оксидных покрытий.

Однако такая технология теплоносителя не подходит для условий ускорительно-управляемых систем и исследовательских реакторов, работающих при температурах 200–350 °С из-за следующих факторов:

- 1) Очистка каналов гидростатических подшипников и их работа в расчетных режимах невозможны, т.к. эффективное восстановление оксидов ТЖМТ восстановительными газовыми смесями происходит в условиях “новой технологии” ($T=200-350^{\circ}\text{C}$) не будет;
- 2) Маловероятно формирование оксидных защитных и антифрикционных покрытий на поверхностях сталей при $T=200-350^{\circ}\text{C}$;
- 3) Невозможно эффективное регулирование содержания кислорода в ТЖМТ технически осуществимое в условиях “новой технологии” для целей очистки каналов и формирования на их поверхностях необходимых покрытий.

2. Анализ опыта работы с подшипниками скольжения в условиях ТЖМТ и выбор оптимального для условий ТЖМТ подшипника скольжения

Насосное оборудование составляет важную и существенную долю в составе контуров энергетических установок. Наша страна имеет уникальный опыт создания и эксплуатации главных циркуляционных насосов (ГЦН) атомных подводных лодок (АПЛ) с реакторами, охлаждаемыми свинец- висмутовым теплоносителем проектов 645, 705 и 705К. ГЦН реакторных установок (РУ) проектов 645 и 705К имели нижние гидростатические подшипники, работа которых обеспечивалась в том числе за счет работы вспомогательных насосов (насосов возврата протечек) реакторного контура. ГЦН атомных подводных лодок проекта 705 был выполнен с консольным расположением вала и нижнего подшипника скольжения не имел. Так же существует большой опыт работы с гидростатическими подшипниками в ГЦН реакторных установок БОР-60, БН-600, БН-800, где они хорошо себя зарекомендовали.

В открытых публикациях информация о гидростатических подшипниках, работающих в жидкометаллических теплоносителях незначительна и относится либо к щелочным металлам (натрий и др.), либо к свинцовому теплоносителю.

В советской литературе наиболее подробно гидростатические подшипники, включая натриевые, описываются в работе В.М. Будова [2].

Гидростатические радиальные подшипники, используемые все чаще как в герметичных насосах, так и в ГЦН с уплотнением вала, имеют определенные преимущества перед гидродинамическими: использование в качестве смазки перекачиваемой жидкости при рабочей температуре позволяет встраивать ГСП непосредственно за рабочим колесом, что дает возможность уменьшить консоль вала; высокую несущую способность; небольшие потери на трение; практически неограниченный ресурс из-за отсутствия контакта между рабочими поверхностями подшипника; отсутствие необходимости теплоотвода от подшипникового узла. Отличие ГСП от гидродинамических подшипников заключается в том, что давление жидкости в несущем слое ГСП создается внешним источником, которым может служить рабочее колесо ГЦН, если теплоноситель подается с его нагнетания, или специальная система с подпиточным насосом. Если жидкость подводится от постороннего источника, то несущая способность ГСП не зависит от частоты вращения вала, т. е. от развиваемого рабочим колесом напора. С эксплуатационной точки зрения предпочтительным является первый вариант питания ГСП, хотя при пусках и остановках ГЦН происходит касание рабочих поверхностей.

В НГТУ имеется большой опыт работы, как с подшипниками контактного (“сухого”) трения, так и с гидростатическими подшипниками в условиях свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей [1, 3, 4]. На основе этого опыта, и исходя из специфических свойств ТЖМТ, коллектив авторов выбрал для дальнейшего экспериментального исследования гидростатический подшипник с двойным взаимнообратным щелевым дросселированием как наиболее перспективный.

3. Предварительные результаты экспериментального исследования ГСП

В настоящее время в НГТУ проводятся исследования, направленные на создание работоспособных подшипников для условий реакторов с ускорительно-управляемыми системами и исследовательских реакторов, работающих с температурой ТЖМТ 200–350 °С. На основе этих исследований так же корректируется методика расчета ГСП, так как имеющаяся методика применима только для водяного и натриевого теплоносителей [5].

Подшипник (Рис. 1) представляет собой стальную втулку длиной примерно 2-3 диаметра вала, на который насаживается подшипник. На внутренней стенке выточены регулировочные и рабочие камеры с дросселем в каждой из них. Число таких камер может варьироваться от 4 до 12 каждого вида соответственно. Каждая регулировочная камера через дроссель соединена канавкой с каждой рабочей камерой. Эти канавки выточены на внешней стенке подшипника. Они могут завариваться стальными полосами или закрываться внешней втулкой по верх всего подшипника. На внутренней стенке подшипника так же выточены сверху, снизу и между камерами коллектора паразитных протечек и коллектор высокого давления. Гидростатический подшипник изготавливается из Стали 40Х13 ГОСТ 5632-72.

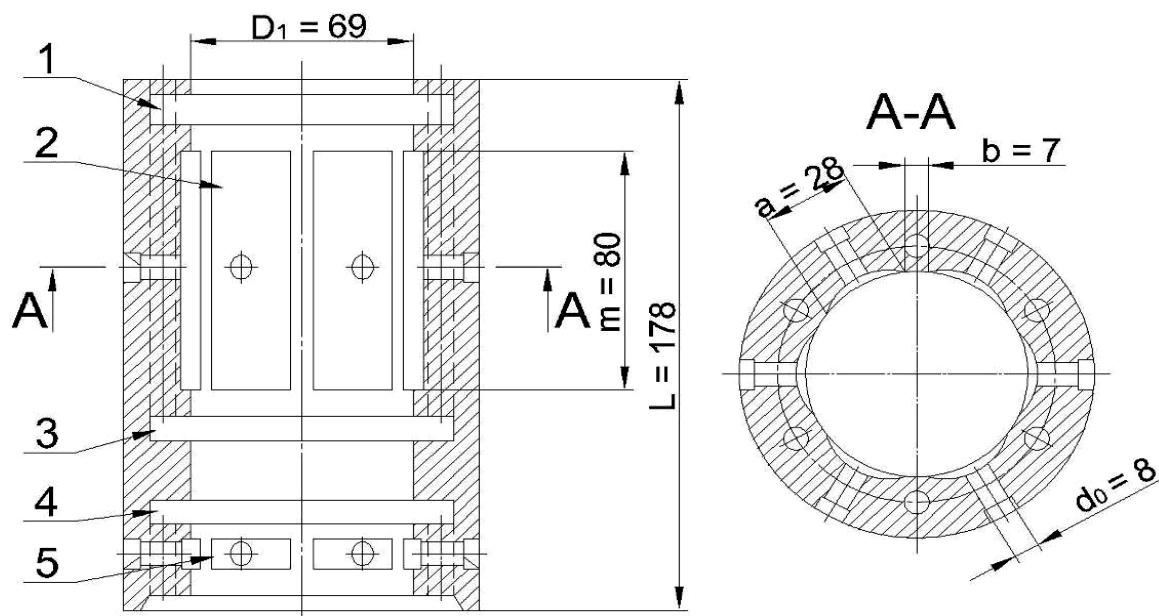


Рис. 1. Модель ГСП с двойным взаимобратным целевым дросселированием:
1, 3 – коллектора паразитных протечек; 2 – рабочие камеры (6 шт.);
4 – коллектор высокого давления; 5 – регулировочные камеры (6шт)

Работоспособность зависит от частоты вращения вала, так как самыми опасными режимами работы ГСП являются пуск, остановка и работа насоса на пониженных частотах вращения вала, если подшипник питается от рабочего колеса того же насоса. Это связано с трением вала о стенки подшипника из-за недостаточного перепада давления на ГСП в указанных режимах. В связи с этим будет наблюдаться износ подшипника.

Экспериментальный участок представляет собой классическую компоновку погружного насоса со свободным уровнем теплоносителя, но без рабочего колеса, и имеет нагружающее устройство на валу, датчик крутящего момента, эксцентрик на опорном фланце подшипника, подвод ТЖМТ от стороннего насоса стенда (Рис. 2). В стенке подшипника заделаны микротермопары для оценки тепловыделений при трении вала о подшипник.

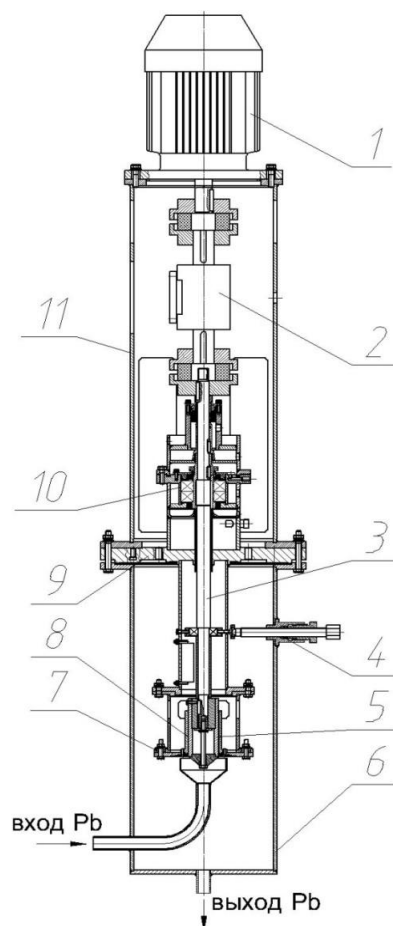


Рис. 2. Экспериментальный участок:

1 – электродвигатель; 2 – датчик крутящего момента; 3 – вал; 4 – устройство нагружения; 5 – вал подшипника; 6 – бак; 7 – узел для варьирования величины эксцентриситета; 8 – корпус подшипника; 9 – корпус выемной части; 10 – верхний подшипниковый узел; 11 – стакан

Испытания гидростатического подшипника в составе экспериментального участка на исследовательском экспериментальном стенде со свинцово-висмутовым теплоносителем ФТ-1 НГТУ (Рис. 3) при различных режимах работы в среде свинцово-висмутового теплоносителя при температуре 200–450 °С позволят отработать подшипник в различных условиях.

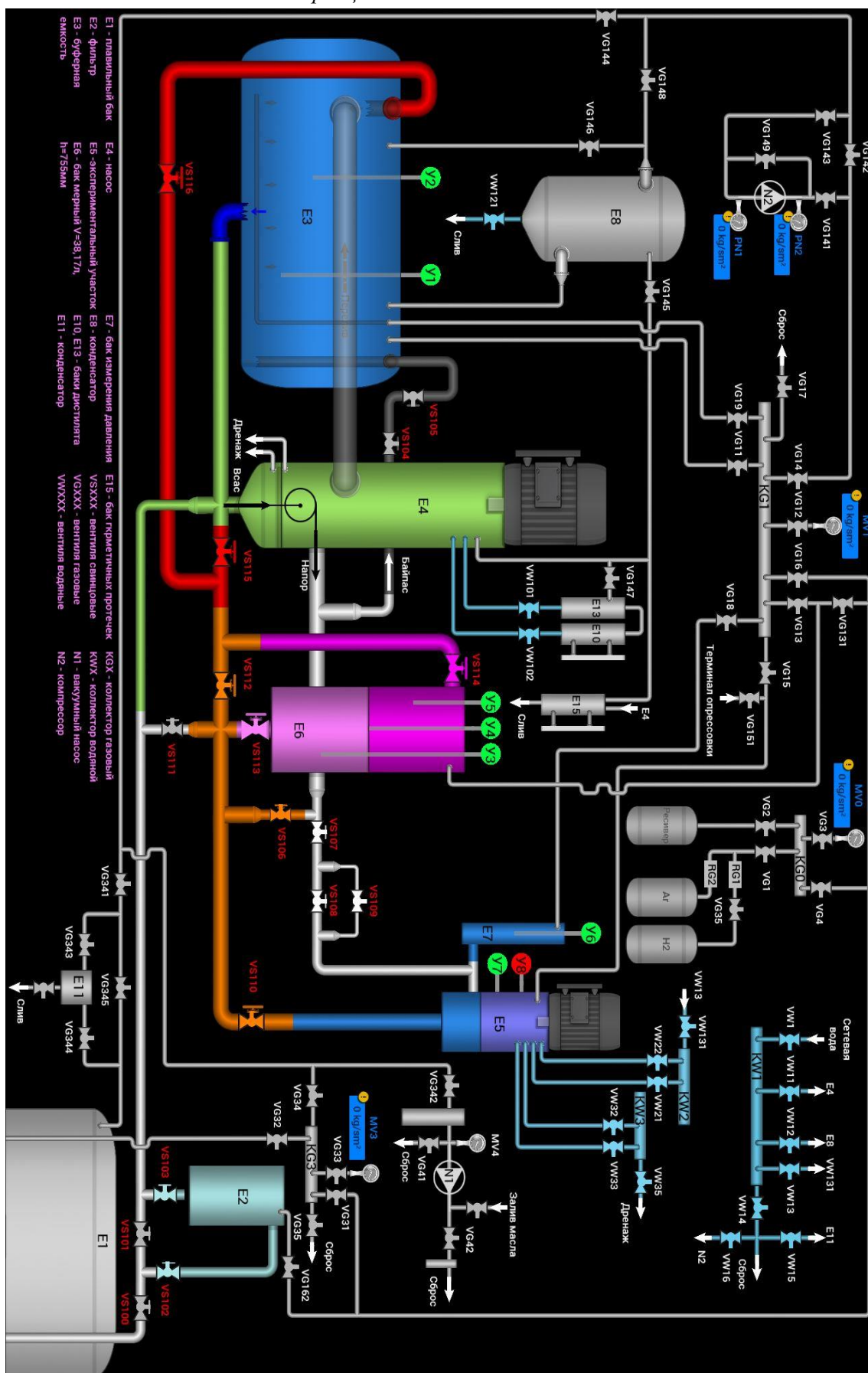
На данный момент отрабатываются методики работы с экспериментальным участком по измерению перепада давления на подшипнике, расхода, измерения грузоподъемности, момента, развиваемого на валу. Уже получены частичные данные гидравлической характеристики ГСП, но с не вращающимся валом, без измерения грузоподъемности и не во всем диапазоне расходов, возможных на данном стенде. Данные указаны в таблице.

Данные гидравлической характеристики ГСП

№	Число оборотов вала, об/мин	Расход ТЖМТ, м ³ /ч	Перепад давления на ГСП ΔР _{ГСП} , кПа	Температура стенки ГСП Т _{ГСП} , °С	Температура ТЖМТ Т _{ТЖМТ} , °С	Активность кислорода в ТЖМТ
1	0	1,8	133	393	392	$1,55 \cdot 10^{-3}$
2	0	2	252,4	390	390	$4,7 \cdot 10^{-5}$

В дальнейшем будут получены полная гидравлическая характеристика ГСП при различных частотах оборота вала и расходах, данные по грузоподъемности ГСП в зависимости от расхода, данные по износу ГСП в условиях низких температур ТЖМТ.

Рис. 3. Схема принципиальная стенда ФТ-1 НГТУ



Заключение

На основе экспериментальных данных будет скорректирована методика расчета и рекомендации по конструированию и режимам эксплуатации. Так же будет выработана методика поддержания технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя для нормальной работы ГСП.

Список литературы

1. Безносков, А.В. Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями: учеб. пособие / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков ; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, Литера, 2016. – 488 с.
2. Будов, В.М. Насосы АЭС / В.М. Будов. – М.: Энергоатомиздат. 1986 – 408 с. : ил.
3. Экспериментальное исследование подшипников скольжения насосов применительно к исследовательским и реакторным контурам с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / А. В. Безносков, Т. А. Бокова, П. А. Боков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 1. – С. 113–124.
4. Антоненков, М.А. Обоснование проектных решений гидростатических подшипников главных циркуляционных насосов реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями : дис. на соис. уч. ст. канд. техн. н. : 05.04.11 / Антоненков Максим Александрович; [Место защиты: ОАО ОКБ "Гидропресс"].– Нижний Новгород, 2013.– 260 с.
5. Синев, Н.М. Бессальниковые водяные насосы / Н.М. Синев, П.М. Удовиченко. – М. : Атомиздат, 1972 – 494 с. : ил.