

УДК 621.039

М.Н. Боровков, С.Е. Белов, Э.Г. Новинский

РАЗРАБОТКА СТРАХОВОЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТУРБОМАШИНЫ УСТАНОВКИ ГТ-МГР

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Представлена программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию страховочных подшипников турбомашин ГТ-МГР, а также некоторые итоги выполненных работ. Опыт, полученный в результате реализации данной программы исследований, может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием динамических машин.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, страховочный подшипник, блок преобразования энергии, турбомашин, материалы пар трения, сегмент, демпфирующий блок.

Введение

В настоящее время в мире нет опыта создания страховочных подшипников, подобных подшипникам турбомашин ГТ-МГР, удерживающих гибкий вертикальный ротор с большими массой и диаметральными размерами. Сложность и новизна задачи создания страховочных подшипников, которая определяется уникальностью турбомашин, высокими требованиями по надежности, необходимостью верификации расчетных методик, требуют проведения всесторонних экспериментов на поэтапной основе, начиная от малоразмерных моделей до полномасштабных образцов

страховочных подшипников. С этой целью, в рамках проекта ГТ-МГР, запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Высокотемпературные газоохладимые реакторы (ВТГР) – единственная ядерная технология, способная обеспечить температуру теплоносителя до 1000 °С. ВТГР присущи высокая безопасность и эффективность производства электроэнергии при меньшем влиянии на окружающую среду. В экспериментальных и опытно-промышленных ВТГР, созданных для производства электроэнергии, использовался паротурбинный цикл, обеспечивающий надежную работу и снижающий технический риск создания АЭС. Однако паротурбинный цикл не мог дать значительного преимущества в КПД, который не превышал 40–43% при температуре газа до 800 °С на выходе

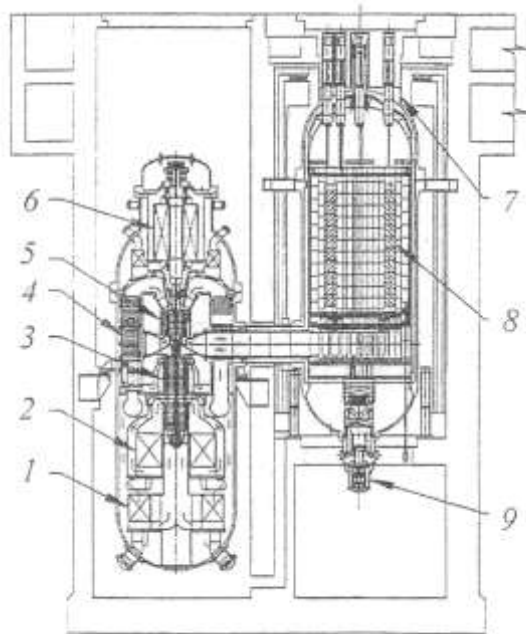


Рис. 1. Компонентная компоновка реакторной установки ГТ-МГР:

- 1, 2 – концевой и промежуточный холодильники;
- 3 – компрессор; 4 – рекуператор; 5 – турбина;
- 6 – генератор; 7 – помещение для стержней СУЗ;
- 8 – активная зона; 9 – система охлаждения остановленного реактора

из реактора. Возможности ВТГР для производства электроэнергии в большей степени раскрываются при использовании блока преобразования энергии (БПЭ) с прямым замкнутым

газотурбинным циклом в первом контуре. В этом случае при температуре газа 850–950°С КПД АЭС с ВТГР может достигать 48% и выше. Кроме того, прямой газотурбинный цикл преобразования энергии, по сравнению с паровым, значительно упрощает схему энергоблока и сокращает число необходимого оборудования и систем. Благодаря достижениям в области газовых турбин, высокоэффективных рекуператоров и электромагнитных подшипников (ЭМП), появилась реальная возможность разработки реакторной установки, которая сочетает безопасный модульный газоохлаждаемый реактор и БПЭ, реализующий высокоэффективный газотурбинный цикл Брайтона. Одним из проектов реакторной установки, реализующим данную концепцию, является проект реакторной установки ГТ-МГР, компоновка которой приведена на рис. 1.

Основным компонентом БПЭ ГТ-МГР является турбомашина (ТМ), предназначенная для преобразования тепловой энергии теплоносителя в электроэнергию при работе по прямому газотурбинному циклу и обеспечения циркуляции гелия в первом контуре [1].

Работоспособность турбомшины для реакторной установки ГТ-МГР (рис. 2) во многом определяется надежностью системы электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора общей массой порядка 68 т, длиной порядка 25 м. Система электромагнитного подвеса ротора ТМ состоит из осевых и радиальных ЭМП, системы управления ЭМП и страховочных подшипников (СП).

Современные достижения в области разработки ЭМП позволили достаточно обоснованно подойти к выбору их в качестве опор для ротора ТМ. Несмотря на высокую надежность, нельзя полностью исключить вероятность выхода из строя ЭМП и их системы управления, например, при потере источника питания. В таких случаях в качестве резервных опор ротора используются страховочные подшипники, которые обеспечивают безаварийный «выбег» ротора до останова. Кроме того, страховочные подшипники используются:

- при плановом отключении ЭМП остановленного ротора ТМ;
- при динамических нагрузках, превышающих грузоподъемность ЭМП.

В процессе проектирования страховочных подшипников ТМ ГТ-МГР рассматривается конструктивная схема на подшипниках скольжения, в связи с ее большей надежностью по сравнению с конструктивной схемой, основанной на подшипниках качения [2].

В настоящее время в мире нет опыта создания подшипников, подобных страховочным подшипникам ТМ ГТ-МГР, в которых вращается гибкий вертикальный ротор с большой массой и диаметральными размерами. Сложность и новизна задачи создания страховочных подшипников, которая определяется уникальностью ТМ, высокими требованиями по надежности, необходимостью верификации расчетных методов, требуют проведения всесторонних экспериментов на поэтапной основе, начиная от мало-размерных моделей до полномасштабных образцов страховочных подшипников [3]. С этой целью, в рамках проекта ГТ-МГР, запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Комплекс работ включает в себя испытания материалов пар трения страховочных подшипников ТМ, определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника ТМ, испытания демпфирующего

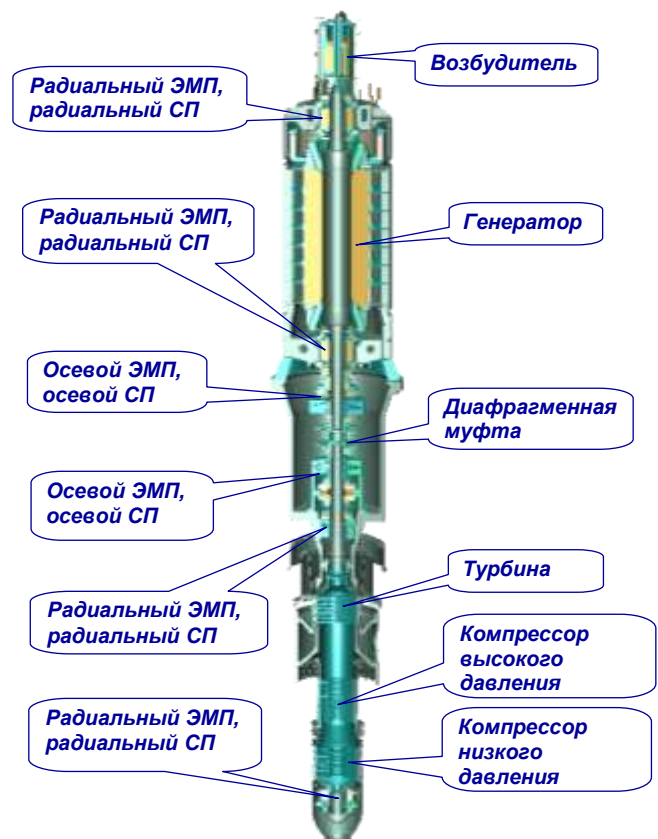


Рис. 2. Турбомашина ГТ-МГР

блока макета радиального страховочного подшипника, испытания макетов страховочных подшипников, испытания опытных образцов страховочных подшипников, испытания страховочных подшипников в рамках испытаний полномасштабного турбокомпрессора. Логическая диаграмма разработки страховочных ТМ ГТ-МГР представлена на рис. 3.

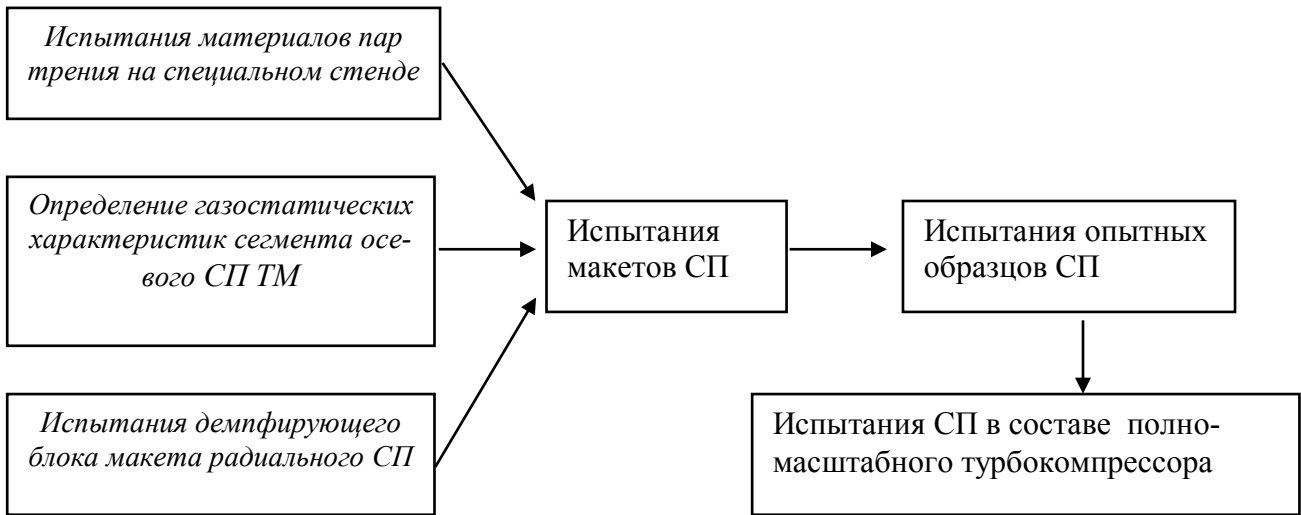


Рис. 3. Логическая диаграмма разработки страховочных подшипников

Некоторые итоги проведенных НИОКР

Предварительные испытания материалов пар трения

Предварительные испытания материалов пар трения проводились на специальном стенде предприятия (рис. 4), который предназначен для проведения сравнительных испытаний на износостойкость различных сочетаний материалов пар трения скольжения в среде гелия [3, 4].

Технические характеристики стенда (рис. 4):



Рис. 4. Стенд для испытаний материалов пар трения в среде гелия

- рабочая среда – гелий;
- температура – до 400 °С;
- давление – до 4.9 МПа;
- максимальная частота вращения рабочего вала – 3,16 с⁻¹;
- максимальная осевая нагрузка на образцы – до 3 кН;
- максимальная радиальная нагрузка на образцы – до 5 кН;
- максимальная линейная скорость скольжения:
 - в узле торцевого трения – 0,33 м/с;
 - в узле радиального трения – 0,14 м/с.

Исходя из условий эксплуатации и требований к материалам пар трения страховочных подшипников турбомашин ГТ-МГР, испытаниям подвергались различные антифрикционные покрытия и следующие классы материалов: металлы, керамические материалы, композиционные материалы.

В процессе испытаний определялись триботехнические характеристики: коэффициент трения, линейный износ, интенсивность изнашивания.

Схема взаимодействия образцов при испытаниях приведена на рис. 5.

Узел торцевого трения (рис. 5, а) состоит из вращающегося образца, выполненного в виде кольцевого диска толщиной 10 мм с рабочей поверхностью, ограниченной наружным

диаметром 118 мм, внутренним 65 мм, и трех неподвижных образцов, выполненных в виде цилиндров высотой 24 мм с торцевой поверхностью трения диаметром 10 мм. Вращающиеся и неподвижные образцы устанавливаются в обоймы.

Узел радиального трения (рис. 5, б) состоит из трех вращающихся и трех неподвижных образцов в виде втулок. Вращающиеся образцы установлены на вертикальный вал. Контакт осуществляется по диаметру 45 мм. Средние втулки имеют высоту в два раза большую, чем крайние. Высота крайних неподвижных втулок составляет 20 мм, средней неподвижной втулки 40 мм, вращающихся втулок – 24 и 44 мм соответственно.

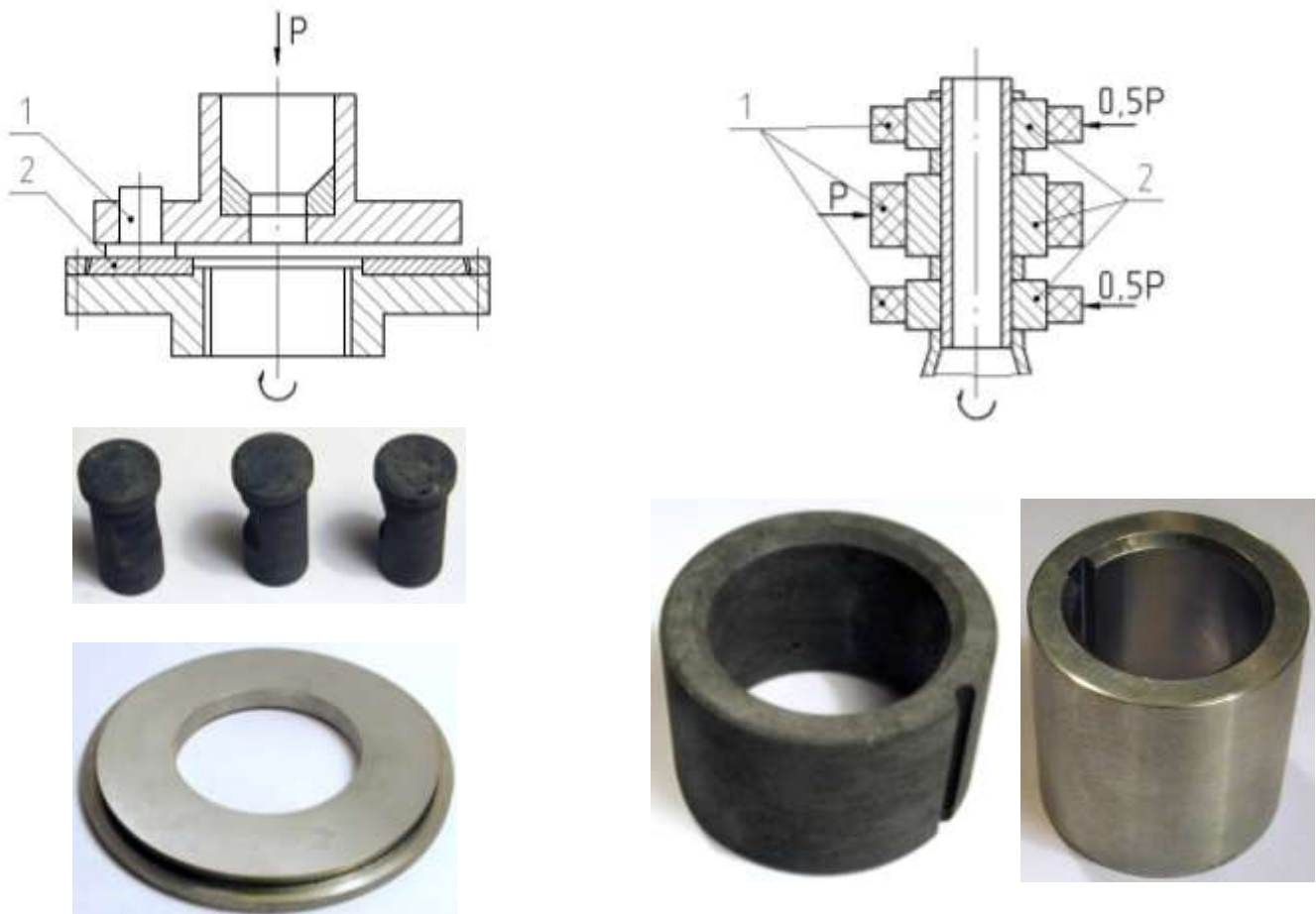


Рис. 5. Схема взаимодействия образцов при испытаниях и испытанные образцы:

a – узел торцевого трения; *б* – узел радиального трения;

P – нагрузка на образцы; *1* – вращающиеся образцы; *2* – неподвижные образцы

Результаты испытаний, завершившихся к 2009 году, показали, что наилучшие трибо-технические характеристики имеет следующее сочетание материалов пар трения: металл (в том числе с антифрикционным покрытием) – композиционный материал.

По результатам предварительных испытаний были отобраны материалы и покрытия, показавшие наилучшие результаты, для продолжения исследований в рамках испытаний макетов страховочных подшипников.

Определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника

Осевой страховочный подшипник турбомашин ГТ-МГР представляет собой осевой подшипник скольжения сухого трения с газостатической разгрузкой, физический контакт в котором имеет место в течение одной - двух секунд, до подачи газа в подшипник. Для подтверждения возможности создания газостатического подвеса и верификации расчетных ме-

тодик были проведены испытания по определению газостатических характеристик одного сегмента осевого СП на специальном стенде (рис. 6) [4].



а)



б)

в) **Рис. 6. Стенд для определения газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника: а – дроссель; б – сегмент; в – общий вид стенда**

На стенде были проведены исследования (без относительного скольжения торцев пары трения) газостатических характеристик одного сегмента осевого страховочного подшипника ТМ ГТ-МГР, по результатам которых:

- определена несущая способность сегмента при различных рабочих зазорах в паре трения и при различных перепадах давления азота и гелия;
- определены оптимальные диаметр дросселей в сегменте, величины зазора в паре трения и рабочего давления;
- определено влияние качества поверхности рабочих торцев в паре трения на несущую способность сегмента и величины расходов азота и гелия в зазоре;
- подтверждена возможность создания системы газостатического подвеса осевого страховочного подшипника ТМ ГТ-МГР;
- выработаны рекомендации для оптимизации конструкции макета осевого страховочного подшипника.

Испытания демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника

Демпфирующий блок устанавливается в радиальном направлении между каждой из восьми колодок радиального страховочного подшипника скольжения и его внешним корпусом (рис. 7). Основным элементом демпфирующего блока является кольцевая фрикционная пружина, которая предназначена для снижения динамических радиальных сил и ограничения радиальных смещений ротора, вращающегося в радиальном страховочном подшипнике. Снижение сил, действующих на колодку в радиальном страховочном подшипнике, существенно зависит от демпфирующих характеристик пружин.

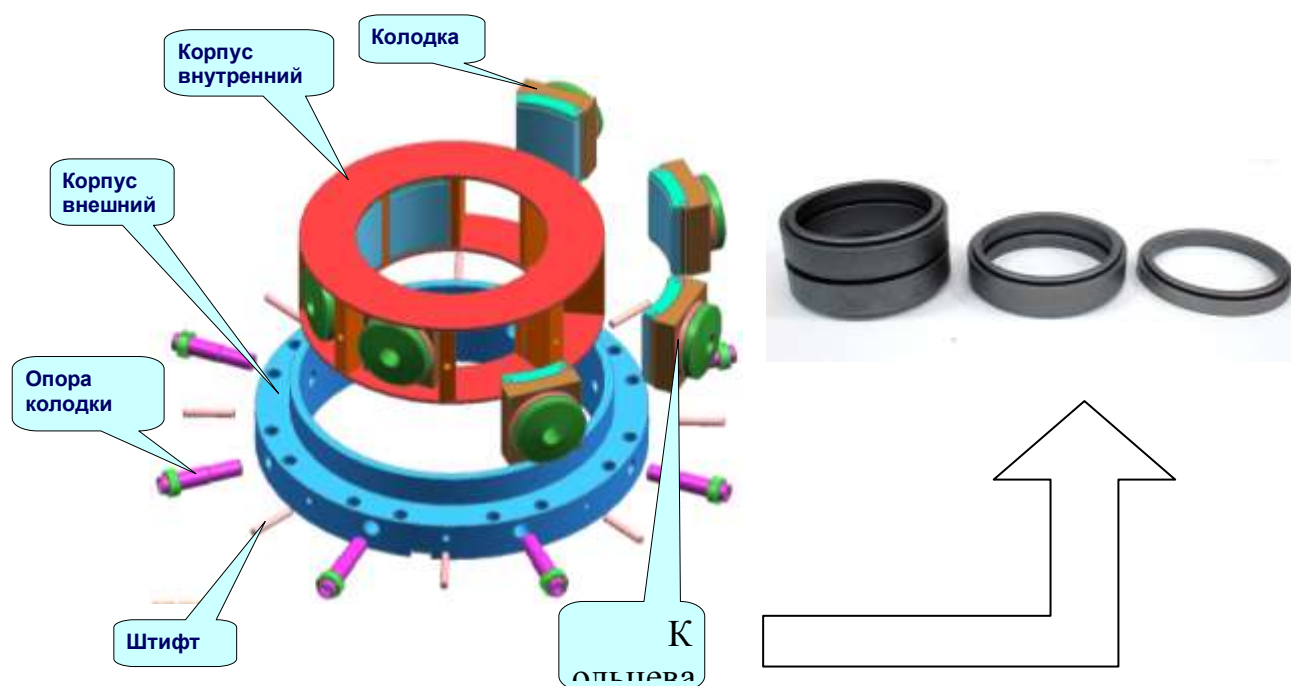


Рис. 7. Радиальный страховочный подшипник

На экспериментальных стендах (рис. 8) проводятся испытания, целью которых являются исследования упругих и демпфирующих характеристик пружин при осевом сжатии и последующем снижении нагрузки (*а*), подтверждения работоспособности пружин при циклических (*б*) и ударных (*в*) нагрузках. Также, по результатам испытаний будут определены динамические силы и коэффициент поглощения энергии фрикционной пружиной.

По результатам испытаний демпфирующих блоков выбирается оптимальный блок для установки в макет радиального страховочного подшипника.



а) *б)* *в)*
Рис. 8. Оборудование для испытаний демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника

Испытания макетов страховочных подшипников

Испытания макетов страховочных подшипников при натуральных скоростях скольжения и удельных нагрузках позволят экспериментально:

- обосновать работоспособность макетов страховочных подшипников;

- обосновать работоспособность системы подачи газостатического давления гелия в макет осевого страховочного подшипника;
- определить коэффициент трения материалов рабочих пар, его зависимость от удельных нагрузок и скорости скольжения;
- определить износостойкость материалов пар трения, ее зависимость от скорости скольжения и удельных нагрузок;
- определить расчетные температуры и их распределение в материале роторных и статорных элементов макетов страховочных подшипников;
- определить статическую и динамическую жесткости и коэффициент демпфирования макетов страховочных подшипников.

Стенд для испытаний макетов страховочных подшипников (рис. 9) состоит из следующих основных составных частей:

- ходовой части (см. рис. 10);
- электрооборудования;
- системы подачи гелия низкого давления;
- системы подачи гелия высокого давления;
- системы охлаждения;
- информационно измерительной системы;
- пульта управления.

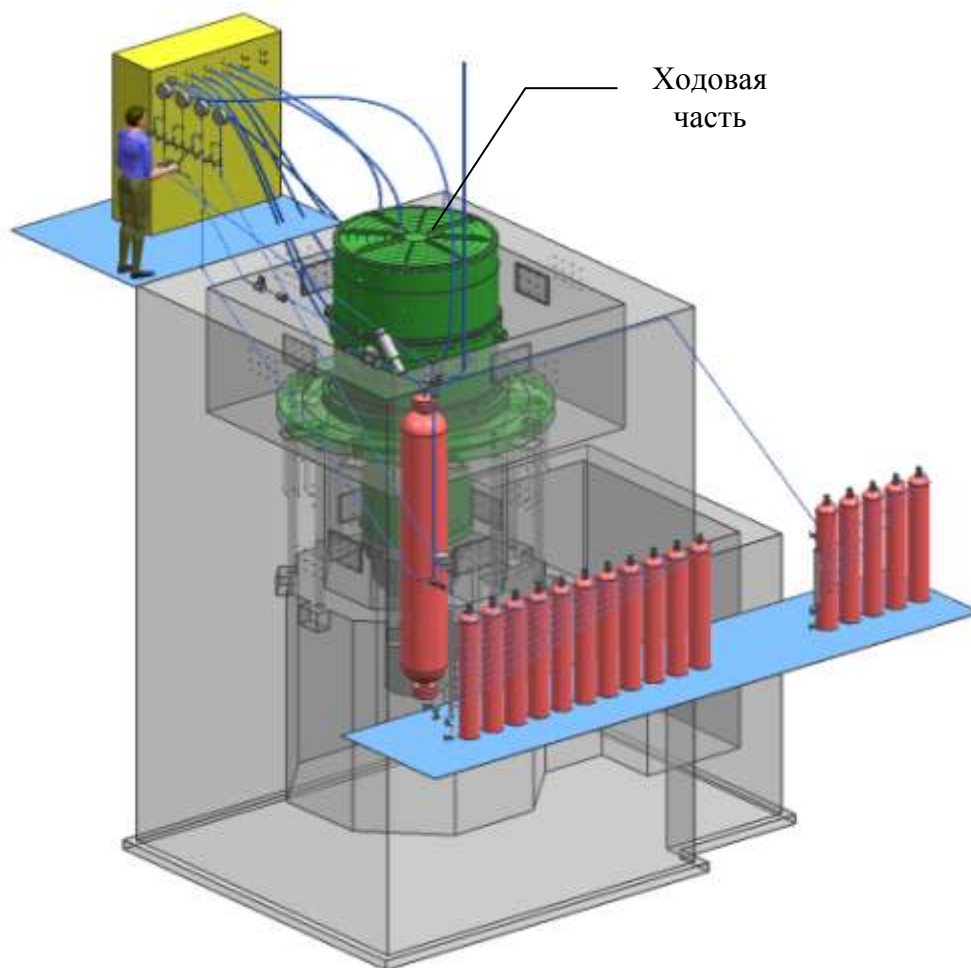


Рис. 9. Стенд для испытаний макетов страховочных подшипников

Основные технические характеристики стенда:

- рабочая среда – гелий;
- температура рабочей среды – до 60 °С;
- давление рабочей среды – до 0.11 МПа;
- частота вращения ротора – до 5400 об/мин;
- масса ротора – 9000 кг;
- максимальная линейная скорость скольжения на наружном/внутреннем диаметре макета осевого страховочного подшипника – 280/165 м/с;
- максимальная линейная скорость скольжения на наружном диаметре макета радиального страховочного подшипника - 140 м/с;
- расчетная удельная нагрузка на осевой страховочный подшипник – до 1,3 МПа;
- расчетная удельная нагрузка на радиальный страховочный подшипник – до 1,5 МПа.

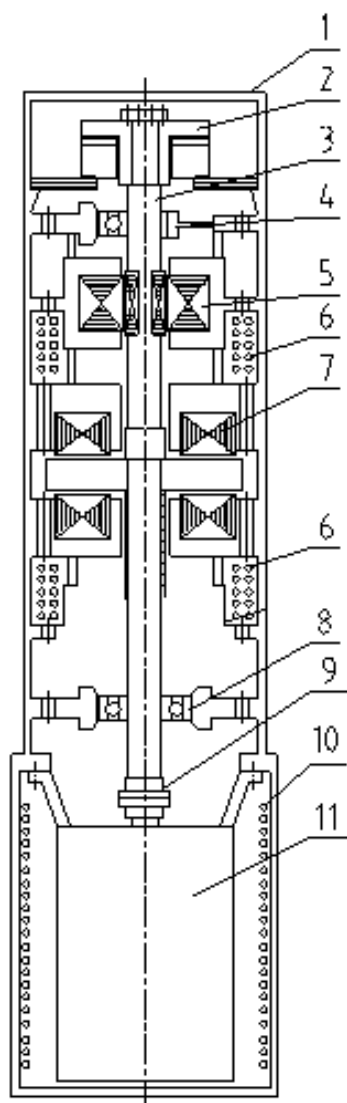


Рис. 10. Ходовая часть:

1 – корпус; 2 – макет осевого страховочного подшипника; 3 – ротор; 4 – макет радиального страховочного подшипника; 5 – радиальный ЭМП; 6 – холодильник; 7 – осевой ЭМП; 8 – шарикоподшипник; 9 – муфта; 10 – холодильник; 11 – электродвигатель

В конце 2010 года планируется завершить изготовление стенда, а в начале 2011 года получить первые результаты испытаний макетов страховочных подшипников, по итогам которых будут изготовлены опытные образцы.

Вывод

В настоящее время в мире нет опыта создания подшипников, подобных страховочным подшипникам турбомшины ГТ-МГР, в которых вращается гибкий вертикальный ротор с большой массой и диаметральными размерами. В ОКБМ проводится уникальная программа исследований по созданию страховочных подшипников. Данные исследования позволят поэтапно, начиная от маломасштабных моделей, отработать конструкцию страховочных подшипников, получить экспериментальные данные для ведения проектных работ и приобрести опыт эксплуатации страховочных подшипников, который будет использован при испытаниях полномасштабного турбокомпрессора и эксплуатации штатной ТМ. Опыт, полученный в результате реализации данной программы исследований, может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием динамических машин.

Библиографический список

1. **Костин, В.И.** Развитие проекта блока преобразования энергии ГТ-МГР / В.И. Костин [и др.] // Атомная энергия. 2007. Т. 102. Вып. 1. С. 57-63.
2. **Белов, С.Е.** Подходы к проектированию страховочных подшипников для турбомашин газоохлаждаемых реакторов / С.Е. Белов [и др.] // Молодежь в науке: сб. докл. V научно-технической конференции / РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2007. С. 521.
3. **Kodochigov, N.G.** Development of the GT-MHR vertical turbomachine design / N.G. Kodochigov [et. al.] // Proceedings of the 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, HTR2008, September. October 1. 2008. Washington, DC USA. P. 18-21.
4. **Кодочигов, Н.Г.** Экспериментальные исследования материалов пар трения для резервных подшипников турбомшины модульного гелиевого реактора с газовой турбиной ГТ-МГР / Н.Г. Кодочигов [и др.] // Вопросы материаловедения. 2006. №2(46). С. 199-203.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2010*

M.N. Borovkov, S.E. Belov, E.G. Novinskiy

DEVELOPMENT OF THE GT-MHR VERTICAL TURBOMACHINE CATCHER BEARINGS

The authors would like to present the R&D Program on development of catcher bearings for the GT-MHR turbomachine as well as some results of performed work. The experience that might be obtained as a result of this investigation program implemented might be useful for other engineering branches related to development of dynamic machines.

Key words: electromagnetic bearing, catcher bearing, power conversion unit, turbomachine, friction pair materials, segment, dumper unit.