

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ СТРАХОВОЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТУРБОМАШИНЫ

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

*Открытое акционерное общество «Опытное конструкторское бюро  
машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород*



Рассматриваются программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию страховочных подшипников турбомашин РУ ГТ-МГР и некоторые итоги выполненных работ. Накапливаемый опыт в результате реализации данной программы исследований может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием вертикальных динамических машин.

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

**Key words:** reactor plant, electromagnetic bearing, catcher bearing, power conversion unit, turbomachine, friction pair materials, segment, damping unit.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание страховочных подшипников для турбомашин РУ ГТ-МГР, удерживающих в геометрической оси гибкий вертикальный ротор с большими массой и диаметральными размерами в случае потери питания электромагнитных подшипников, является сложной инженерной задачей. Актуальность и новизна задачи определяются особенностью компоновки турбомашин, высокими требованиями по надежности подшипниковых опор, отсутствием мирового опыта в создании подобных подшипников. Для верификации расчетных методик необходимо проведение всесторонних поэтапных экспериментов – от малоразмерных моделей до полномасштабных образцов страховочных подшипников. С этой целью в рамках проекта РУ ГТ-МГР запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Принцип проекта высокотемпературной газоохлаждаемой реакторной установки (РУ ВТГР) основывается на модульном гелийохлаждаемом реакторе, турбомашине (ТМ) на электромагнитных подшипниках (ЭМП), компактных высокоэффективных теплообменниках и высокопрочных корпусах из теплоустойчивых сталей. Реакторы данного типа способны обеспечить температуру теплоносителя до 1000°C. Им присущи высокая безопасность и высокоэффективное производство электроэнергии при минимальном влиянии на окружающую среду. В созданных

экспериментальных и опытно-промышленных ВТГР, использовался паротурбинный цикл, обеспечивающий надежную работу и снижающий технический риск создания АЭС. В паротурбинном цикле к.п.д. процесса не превышал 40 – 43% при температуре газа до 800°C на выходе из реактора. Возможности РУ ВТГР для производства электроэнергии существенно повышаются при использовании блока преобразования энергии (БПЭ) с прямым замкнутым газотурбинным циклом в первом контуре. В этом случае при температуре газа 850 – 950°C к.п.д. АЭС с РУ ВТГР может достигать порядка 48% и выше. Кроме того, прямой газотурбинный цикл преобразования энергии, по сравнению с паровым, значительно упрощает конструктивно-компоновочную схему энергоблока и сокращает число необходимого оборудования и обслуживающих систем. В связи с достижениями в области газовых турбин, высокоэффективных рекуператоров и ЭМП появилась реальная возможность разработки реакторной установки, содержащей безопасный модульный газоохлаждаемый реактор и БПЭ, реализующий высокоэффективный газотурбинный цикл Брайтона. Проект РУ ГТ-МГР, реализующий данную концепцию, приведен на рис. 1

Основным компонентом в БПЭ РУ ГТ-МГР является турбомашина, обеспечивающая циркуляцию гелия в первом контуре и преобразующая тепловую энергию теплоносителя в электроэнергию в прямом газотурбинном цикле [1].

Работоспособность ТМ реакторной установки ГТ-МГР (рис. 2) во многом определяется надежностью системы электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора общей массой порядка 68-ми тонн, длиной ~25-ти метров. 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

или 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; динамических нагрузках, превышающих грузоподъемность ЭМП.

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

В настоящее время нет опыта по созданию страховочных подшипников для вертикальной ТМ, в которых вращается гибкий вертикальный ротор с большой массой и диаметрными размерами.

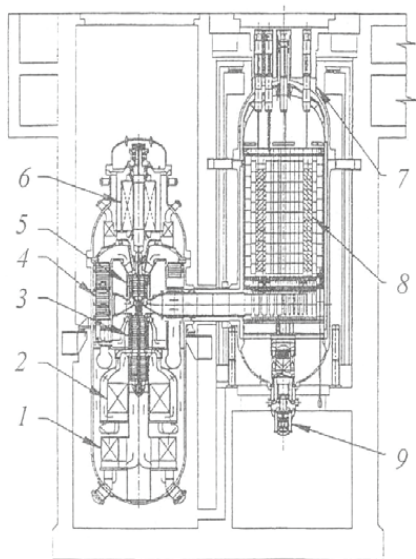


Рис. 1. Компоновка РУ ГТ-МГР: 1, 2 — концевой и промежуточный холодильники; 3 — компрессор; 4 — рекуператор; 5 — турбина; 6 — генератор; 7 — помещение для стержней СУЗ; 8 — активная зона; 9 — система охлаждения остановленного реактора

Чтобы обеспечить их надежную работоспособность, требуемые ресурс и срок службы необходимо проведение всесторонних поэтапных экспериментов – от малоразмерных моделей до полномасштабных образцов страховочных подшипников [3, 4]. С этой целью в рамках проекта РУ 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 блока макета радиального страховочного подшипника, испытания макетов страховочных подшипников, опытных образцов страховочных подшипников, страховочных подшипников в рамках испытаний полномасштабного турбокомпрессора. Последовательность и этапы разработки страховочных подшипников ТМ РУ ГТ-МГР представлена на рис. 3.

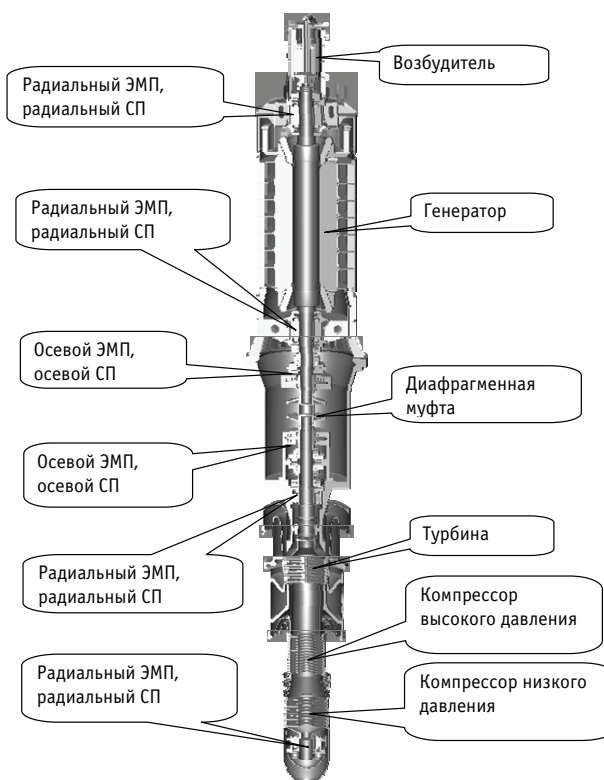


Рис. 2. Турбомашина ГТ-МГР

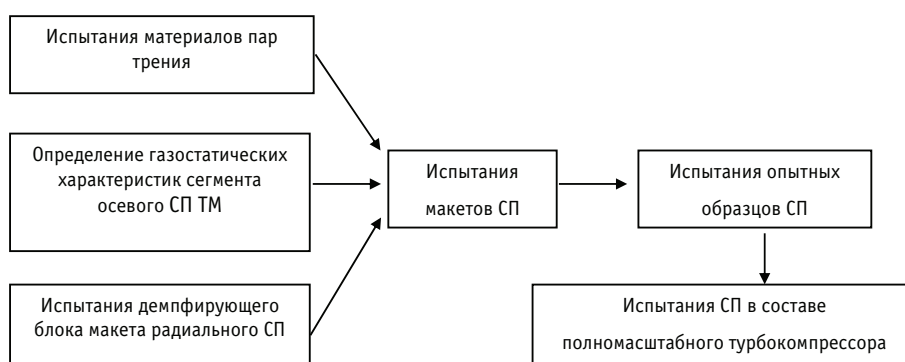


Рис. 3. Последовательность и этапы разработки СП

## НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ПРОВЕДЕННЫХ НИОКР

### Предварительные испытания материалов пар трения

Предварительные испытания материалов пар трения проводились на специальных стендах предприятия (рис. 4), которые предназначены для проведения сравнительных испытаний на износостойкость различных сочетаний материалов пар трения скольжения в среде гелия [5, 6].

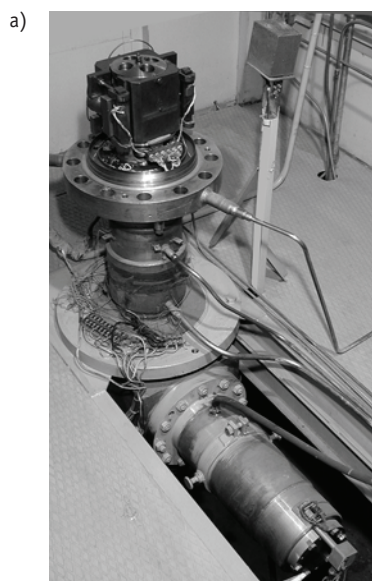


Рис. 4. Стенды для испытаний материалов пар трения в среде гелия: а) – стенд Л-1129; б) – трибометр TR 20 М 40

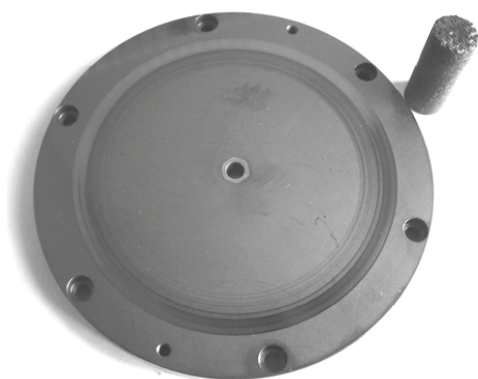


Рис. 5. Внешний вид образцов после испытаний

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

Испытания материалов пар трения (рис. 5) проводились при следующих параметрах:

- окружающая среда – гелий;
- скорость скольжения – от 0,14 (стенд Л-1129) до 10 м/с (трибометр TR 20 М 40);

- удельная нагрузка на образцы – до 1,4 МПа;
- путь трения – 600 м.

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

По результатам испытаний более 100 различных сочетаний материалов пар трения было установлено, что наилучшие результаты показали сочетания антифрикционных покрытий с композиционными и металлокерамическими материалами. Коэффициент трения при этом не превышал 0,05. Интенсивность изнашивания не превышала значения  $10^{-9}$ .

### **Определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника**

Осевой страховочный подшипник турбомашин РУ 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 методик были проведены испытания по опре-

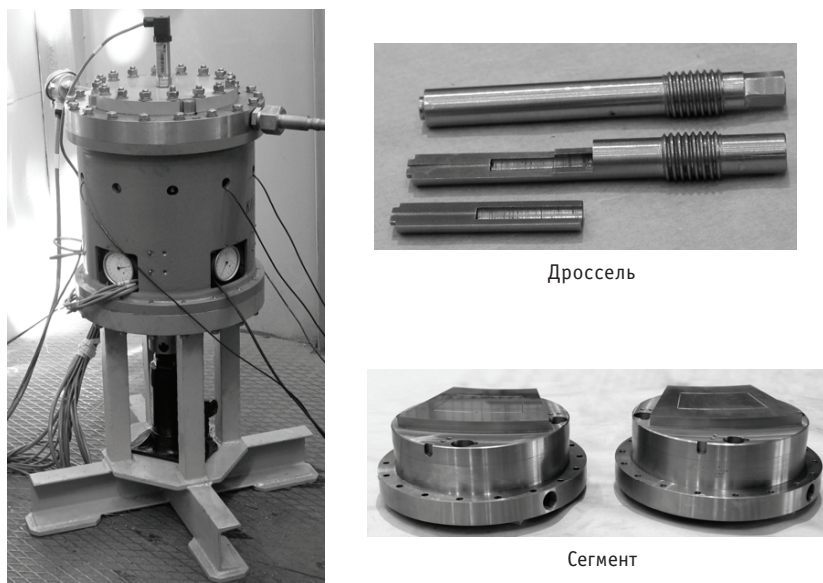


Рис. 6. Стенд для определения газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника

делению газостатических характеристик одного сегмента осевого СП на специальном стенде (рис. 6) [2].

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

- определена несущая способность сегмента при различных рабочих зазорах в паре трения и перепадах давления азота и гелия;
- определены оптимальные диаметры дросселей в сегменте, величины зазора в паре трения и рабочего давления;
- определены влияние качества поверхности рабочих торцов 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 колодкой 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.

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. По результатам испы-



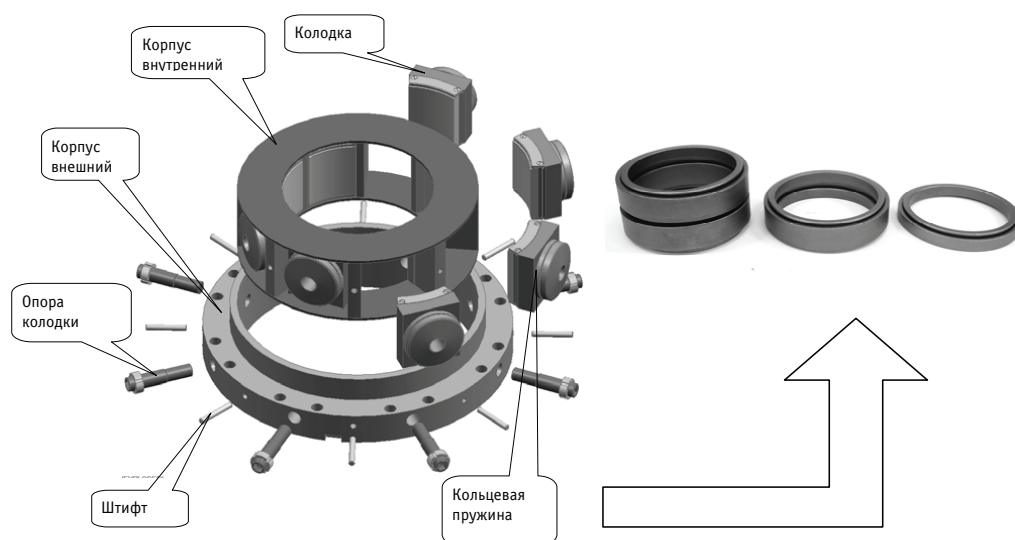


Рис. 7. Радиальный страховочный подшипник

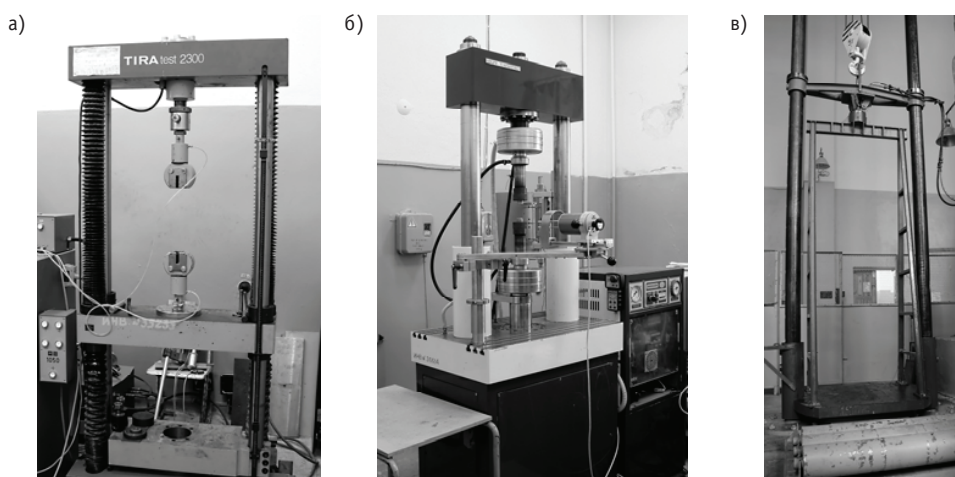


Рис. 8. Оборудование для испытаний демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника

таний были определены динамические силы и коэффициент поглощения энергии фрикционной пружиной.

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

### Испытания макетов страховочных подшипников

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

- обосновать работоспособность макетов страховочных подшипников и системы подачи газостатического давления гелия в макет;
- 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 состоит из следующих основных составных частей:

- ходовой части (рис. 9);
- электрооборудования;
- системы подачи гелия низкого давления;
- системы подачи гелия высокого давления;
- системы охлаждения;
- информационно-измерительной системы;
- пульта управления.

Основные технические характеристики стенда:

- рабочая среда – гелий;
- температура рабочей среды – до 60°C;
- 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.

В конце 2012 г. планируется завершить изготовление стенда, а в 2013 г. провести пусконаладочные работы и получить первые результаты испытаний макетов страховочных подшипников, по итогам которых будут изготовлены опытные образцы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В мировой практике отсутствует опыт создания подшипников, подобных страховочным подшипникам турбомашины, обеспечивающих безаварийный останов вращающегося гибкого вертикального ротора большой массы и диаметрального размера в случае потери питания ЭМП. В ОАО «ОКБМ Африкантов» реализуется комплексная программа исследований по созданию страховочных подшипников для уникальной вертикальной турбомашины, являющейся составной частью блока преобразования энергии РУ ГТ-МГР. Экспериментальные исследования позволят поэтапно, начиная от маломасштабных моделей, отработать конструкцию страховочных подшипников, получить необходимые 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 програм-

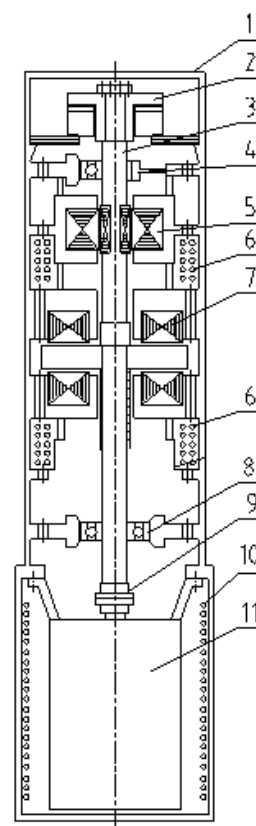


Рис. 9. Ходовая часть: 1 – корпус; 2 – макет осевого страховочного подшипника; 3 – ротор; 4 – макет радиального страховочного подшипника; 5 – радиальный ЭМП; 6 – холодильник; 7 – осевой ЭМП; 8 – шарикоподшипник; 9 – муфта; 10 – холодильник; 11 – электродвигатель

мы исследований, может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием динамических машин.

### **Литература**

1. Костин В.И., Кодочигов Н.Г., Белов С.Е., Васяев А.В., Головкин В.Ф., Шеню А. Развитие проекта блока преобразования энергии ГТ-МГР//Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – Вып. 1. – С. 57-63.
2. Белов С.Е., Боровков М.Н., Мордашов В.В., Юрков Д.Ю. Подходы к проектированию страховочных подшипников для турбомашин газоохлаждаемых реакторов/Сб. докл. V Научно-технической конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – С. 521.
3. Боровков М.Н., Белов С.Е., Новинский Э.Г. Разработка страховочных подшипников вертикальной турбомшины установки ГТ-МГР//Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – №2(81). – С. 134.
4. Kodochigov N.G., Belov S.E., Borovkov M.N., et. al. Development of the GT-MHR vertical turbomachine design/Proc. of the IV International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology – HTR-2008 (September 28 – October 1, 2008, Washington, DC USA).
5. Кодочигов Н.Г., Белов С.Е., Шишкин В.А., Боровков М.Н., Ятманов А.В. Экспериментальные исследования материалов пар трения для резервных подшипников турбомшины модульного гелиевого реактора с газовой турбиной ГТ-МГР//Вопросы материаловедения. – 2006. – №2(46). – С. 199-203.
6. Kodochigov N.G., Belov S.E., Borovkov M.N., Baxi C.B. Tribological tests of friction pair materials for the GT-MHR turbomachine catcher bearings/Proc. of STLE/ASME International Joint Tribology Conference – IJTC-2008 (October, 2008, Miami, Florida, USA).

Поступила в редакцию 16.10.2012



*energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 13 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 22 titles.*

The present paper concentrates on the problem of errors committed by NPP MCR operators during implementation of operating procedures. It is proposed to categorize such errors into four classes as follows: selection of inappropriate procedure, incorrect execution of procedure, navigation errors, and communication errors. These categories of errors have been described and analyzed in detail in the paper. Each type of errors is illustrated by the real examples. The causes of the errors have been also investigated. It was revealed that a weaknesses of procedures is the main contributor to the committed errors. The following two aspects of two-column symptom-oriented procedures that impact on the operator activity were revealed: complicated logic which underlie the transition from the left column of procedure to the right one; and absence of tools for visual emphasis of procedure elements.

#### **УДК 661.879:541.183**

*Adsorption of Molecular Iodine from Gas-aerosol Environments and Water Solutions with a New Type of an Aluminum-Silicate Sorbent \V.A. Shilin, A.B. Gorgienko, A.S. Shilina, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 9 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 13 titles.*

In the article presents the results of studies of sorption of iodine vapor from the gaze-aerosol media on aluminosilicate sorbents in static and dynamic modes. The sorption capacity of vapor of molecular iodine is  $234 \pm 1.0$  mg/g. Factor extraction of iodine from the aerosol media during sorption under dynamic conditions is  $99.5 \pm 0.2\%$ . The sorption capacity of silica-alumina sorbent for iodine, dissolved in water is  $254 \pm 12$  mg/g. Aluminosilicate sorbent, modified  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ , has a high ice-forming activity.

#### **УДК 621.039.53**

*Experimental Investigations of Vertical Turbomachine Catcher Bearings \S.E. Belov, M.N. Borovkov, N.G. Kodochigov, E.G. Novinskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.*

It is a challenging engineering task to develop the GT-MHR reactor plant turbomachine catcher bearings aimed at retaining in geometric axis a flexible vertical rotor having large mass and diametrical dimensions in case of electromagnetic bearings power supply failure. The novelty and relevance of the task is determined by specific feature of turbomachine configuration, high safety requirements for bearing assemblies and absence of experience in developing such bearings worldwide. Verification of analytical procedures requires performance of comprehensive experiments in a stepwise fashion starting from small-scale models to full-scale catcher bearings specimens. For this purpose, it has been planned to perform a set of R&D activities within the GT-MHR Project.

This paper deals with the program of R&D activities aimed at development of catcher bearings for the GT-MHR turbomachine as well as some results of performed activities. The experience which is being gained as a result of this investigation program implementation can also be used in other mechanical engineering industries associated with development of vertical and dynamic machines.

#### **УДК 621.039.564**

*On Electrode Polarization of Electrochemical Oxygen Sensor in Liquid Metal Coolants \Yu.A. Musikhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 28 titles.*

The paper considers the main provisions of thermodynamic oxygen activity control in liquid metal coolants by the EMF method by means of a two-electrode electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte which is in contact with the coolant and at the same time is a working electrode of the sensor. The sensor EMF is proportional to the oxygen activity logarithm. It has been noted that absorption of metallic impurities and oxides on the electrolyte causes polarization of the working electrode, thus reducing the EMF value and deteriorating the oxygen control accuracy. The polarization process was shown to be multifactorial and localized within the limits of double electric layer that results from the difference in the work functions of the contacting phases. The double layer characteristics are presented. The analytical dependence values were calculated for the electron work function from the solid electrolytes and metal oxides.