

# ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ И ГАЗОТУРБИНЫМ ЦИКЛОМ

**Н.Г. Кодочигов, С.М. Дмитриев, И.В. Друмов**

*ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»,  
г. Н. Новгород*



Анализируются перспективы применения прямого газотурбинного цикла для ядерных энергетических установок с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами. Описаны основные проектные характеристики и требования к конструкции, обеспечивающие высокий уровень к.п.д. такого типа реакторов при использовании прямого газотурбинного цикла и его преимущества по сравнению с аналогичными конструкциями с паротурбинными установками. Приведены данные о развитии технологии в странах, проектирующих и эксплуатирующих высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. В рамках задачи разработки электромагнитных подшипников для турбомашины ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и газотурбинным циклом предусмотрена программа расчетных и экспериментальных исследований и опытно-конструкторских проработок, в том числе создание испытательных стендов.

**Ключевые слова:** ядерная энергетическая установка, электромагнитный подвес, высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, газовая турбина, газотурбинный цикл, электромагнитный подшипник, турбомашина, ротор.

**Key words:** nuclear power plant, electromagnetic suspension, high-temperature gas-cooled reactor, gas turbine, gas-turbine cycle, electromagnetic bearing, turbomachine, rotor.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Модульные высокотемпературные реакторы относятся к четвертому поколению газоохлаждаемых реакторов. Одной из основных конструктивных особенностей таких реакторов является применение в активной зоне только керамических материалов, сохраняющих работоспособность при высоких температурах. Такое решение позволяет реализовать эффективные термодинамические циклы произ-

водства электроэнергии (до 50%) и в перспективе – расширить сферу использования атомной энергетике.

Вопросы использования высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в промышленности являются актуальными. В связи с этим интенсифицируются научно-исследовательские работы, а также решение инженерно-технических вопросов создания соответствующего высокотемпературного оборудования и материалов [1].

Перспективной кажется возможность использования газоохлаждаемых реакторов, как на тепловых, так и на быстрых нейтронах на АЭС с прямым газотурбинным циклом [1]. Преимущества таких АЭС – меньшие капитальные затраты, простота конструкции, компактность установки. При температуре газа перед газовой турбиной 1300 К к.п.д. АЭС может превышать 50%. Высокий к.п.д. газотурбинных АЭС с ВГР позволит облегчить решение многих сложнейших проблем, связанных с развитием энергетики: охраны природы от вредного влияния тепловых и радиоактивных сбросов в окружающую среду, обеспечения безопасности АЭС, экономичного расходования природных ресурсов ядерного топлива и высоких технико-экономических показателей АЭС. Газотурбинная установка (ГТУ) требует в пять раз меньше охлаждающей воды, чем паротурбинная установка равной мощности, перспективным представляется использование сухих градирен в районах с дефицитом воды. Это существенно снижает величину тепловых сбросов в водоемы. Практическое же использование АГТУ потребует решения некоторых сложных проблем: создания материала лопаток высокотемпературных турбин, осаждения продуктов деления в турбине и связанных с этим эксплуатационных вопросов, создания опорной системы ротора с электромагнитными подшипниками.

### **ПРОЕКТЫ И РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ С ГАЗОВОЙ ТУРБИНОЙ**

Национальные программы по развитию и исследованиям высокотемпературных реакторов приняты в США, Южной Корее, Китае, Японии, существует также объединенная европейская программа [2]. Следует отметить новые положения в концепции разработок ВТГР – это ориентация на модульные ВТГР мощностью 200–250 МВт(т) для энерготехнологического использования.

Одним из немногих действующих реакторов описанного типа является китайский экспериментальный реактор HTR-10 [3], выведенный на полную мощность 29 января 2003 г. с температурой гелия на выходе до 750°C электрической мощностью 2,5 МВт. Для этого реактора проводились проектные проработки конструкции с газовой турбиной, в настоящее время выполняются расчетно-экспериментальные исследования по динамике ротора и электромагнитному подвесу. Для этого создается макет ротора в натурную величину. Долгосрочная программа разработок предусматривает участие INET совместно с KAERI (Южная Корея) в разработках установки для получения водорода. В рамках этой программы в INET создана и испытывается лабораторная установка по производству водорода на основе термохимического разложения в серно-йодном процессе.

Реактор HTTR в Японском институте атомной энергии (JEARI) мощностью 30 МВт (т) вышел на номинальный уровень температуры теплоносителя 950°C 19 апреля 2004г. При этой температуре на полной мощности реактор проработал 50 дней, демонстрируя ядерную пассивную безопасность. Япония имеет три главные программы в области ВТГР: разработка технологии производства водорода, разработка реактора на 600 МВт (т), разработка газовой турбины. На реакторе HTTR

проводятся НИОКР по системе преобразования энергии и решения проблем с ее материалами и оборудованием, системе производства водорода. Результаты экспериментов подтвердили высокую безопасность установок с ВТГР.

В ЮАР на базе созданных в университетах экспериментальных установок были выполнены отдельные исследования по технологиям ВТГР, в частности, по материалам, безопасности, эффективности системы охлаждения шахты реактора (СОШР), а также исследования системы преобразования энергии по циклу Брайтона [4] на стенде мощностью 300 кВт.

Комиссариат по атомной энергии Франции реализует национальную программу по быстрому газоохлаждаемому реактору (GFR) для производства электроэнергии и для комбинированного производства электричества и водорода. Промышленная группа AREVA в рамках программы Generation-IV ведет разработку сверхвысокотемпературного реактора (VHTR), проект «ANTARES».

### ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ И ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Проект модульного гелиевого реактора с газовой турбиной (ГТ-МГР) [5–7] разрабатывается при поддержке Росатома России и Департамента энергетики США

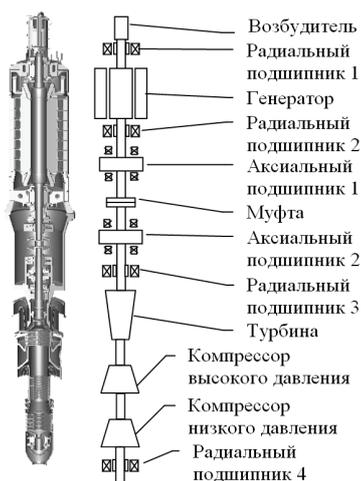


Рис. 1. Турбомашина

рядом российских предприятий: ОКБМ, РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИНМ, НПО «Луч» и др., при поддержке фирмы «Дженерал Атомикс» и ORNL (США). В проекте ГТ-МГР применен прямой газотурбинный цикл преобразования энергии (цикл Брайтона) с высокоэффективной рекуперацией и промежуточным охлаждением теплоносителя. Турбомашина (рис. 1) располагается в центральной части блока преобразования энергии, имеет вертикальную ориентацию и состоит из газовой турбины, генератора, компрессоров низкого и высокого давления.

Роторы генератора и турбокомпрессора соединены между собой диафрагменной муфтой. Масса роторов турбокомпрессора и генератора 32,4 и 35 тонн соответственно. Каждый ротор опирается на один осевой и два радиальных активных электромагнитных подшипника (ЭМП).

Общая длина ротора турбомашины составляет около 25 м. Нагрузки на номинальной частоте вращения ротора ТМ на радиальные электромагнитные подшипники составляют 34 кН, а на осевые – 350 кН. Роторы генератора и турбокомпрессора при выходе на номинальную частоту вращения 4400 об/мин проходят четыре критические частоты, две из которых – изгибные.

В рамках программы опытно-конструкторских работ для изучения динамики ротора на электромагнитном подвесе была разработана программа расчетно-экспериментальных работ. Программа направлена на разработку и верификацию расчетных кодов, отработку конструкции электромагнитных подшипников и системы управления. Для реализации этой программы было создано несколько стендов, наиболее важными из которых являются «Минимакет» и «Масштабная модель ротора турбомашины», на которых последовательно решаются вопросы расчетно-экспериментального обоснования работоспособности электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора.

В 2000 г. был изготовлен и запущен в эксплуатацию стенд «Минимакет» [8], моделирующий электромагнитный подвес вертикального ротора, вращающегося в двух радиальных и одном осевом ЭМП. За время эксплуатации конструкция стенда претерпевала неоднократные доработки для обеспечения возможности различных исследований. Последний вариант конструкции механической части представлен на рис. 2.

В процессе испытаний на стенде «Минимакет» были решены следующие задачи:

- принципиально обоснована работоспособность электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора и определены законы управления положением ротора, обеспечивающие его удержание в заданных границах [9–11];
- отработана технология балансировки ротора в электромагнитных подшипниках [12, 13];
- отработаны алгоритмы управления положением ротора, обеспечивающего его разгон до 6000 об/мин с прохождением двух изгибных частот.

Как описано в [10, 11], для регулирования положения ротора был выбран пропорционально-дифференциальный закон. В соответствии с ним расчет значения тока регулирования  $I_{\text{рег}}$  в текущий момент времени  $t$  производится по формуле

$$I_{\text{рег}}(t) = Kp \cdot S(t) + Kd \cdot (S(t) - S(t - \Delta t)) / \Delta t, \quad (1)$$

где  $Kp$  – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм;  $Kd$  – коэффициент дифференцирования регулятора, А·с/мм;  $S(t)$  и  $S(t - \Delta t)$  – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в моменты времени  $t$  и  $t - \Delta t$  соответственно, мм;  $t$  – время, с;  $\Delta t$  – время цикла работы управляющего контроллера, с.

Если вычисленное значение положительно, то ток подается в обмотку электромагнитного подшипника, которая ближе к датчику положения, если отрицательно – то в противоположную.

При проведении расчетных исследований динамики ротора для пропорционально-дифференциального регулятора рассчитывается область устойчивости в координатах настроечных коэффициентов регулятора. В последствии указанная область подтверждается экспериментально снятой кривой, характеризующей ее границу. На рисунке 3 показаны экспериментально определенные границы области устойчивости пропорционально-дифференциального регулятора радиального электромагнитного подшипника. Если значения пропорционального и дифференциального коэффициентов выбраны из этой области, то ротор ведет себя устойчиво во всем диапазоне частот вращения.

По результатам исследований выбранного закона управления при различных частотах вращения ротора, а также других законов [11] была обоснована работоспособность электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора.

При сборке машины и ее эксплуатации дисбаланс ротора может увеличиваться и, следовательно, появляется необходимость в проведении балансировки в составе машины. Поэтому при исследованиях большое внимание было уделено вопросу проведения балансировки ротора в составе стенда.

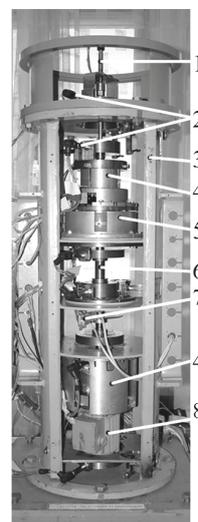


Рис. 2. Механическая часть маломасштабного стенда «Минимакет»: 1 – датчик осевого положения; 2 – датчики радиального положения; 3 – корпус; 4 – РЭМП; 5 – ОЭМП; 6 – ротор; 7 – датчик угла поворота и частоты вращения; 8 – электродвигатель

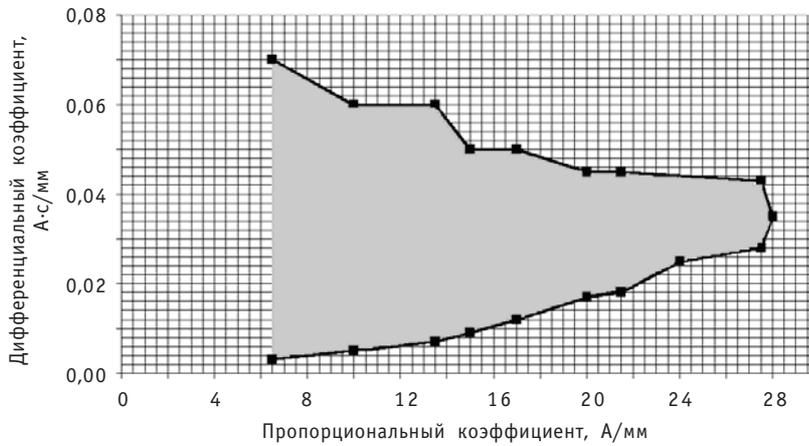


Рис. 3. Экспериментально определенная граница области устойчивости ПД-регулятора положения ротора

В процессе испытаний по отработке методов балансировки ротора на ЭМП были

- определены собственные частоты ротора на невращающемся и вращающемся роторе (рис. 4);

- проведена «физическая» балансировка ротора посредством балансировочных грузов, устанавливаемых на ротор, по результатам расчета на основании полученных экспериментальных данных о положении ротора.

Балансировка ротора проведена на каждой определенной критической частоте.

При проведении балансировки ротора стенда «Минимакет» были вычислены корректирующие грузы для варианта балансировки ротора по четырем формам

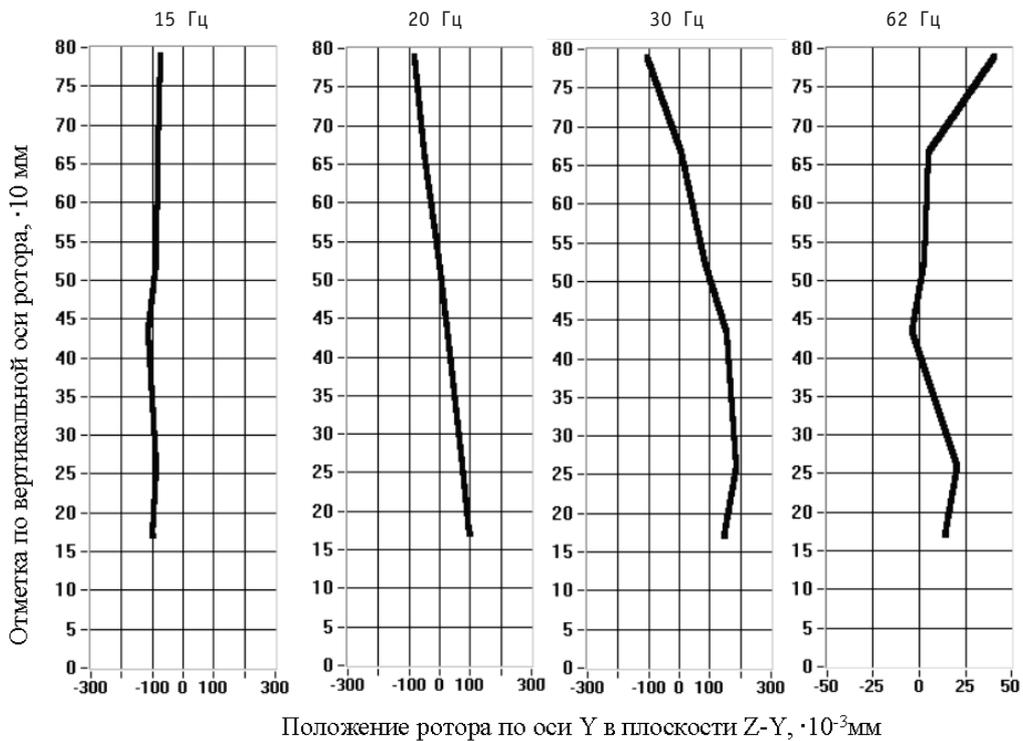


Рис. 4. Частоты и формы собственных колебаний ротора

колебаний. После установки системы балансировочных грузов на ротор и записи осциллограммы выбега был произведен анализ полученных данных, который показал заметное снижение амплитуды колебаний ротора в районе ЭМП в диапазоне частот вращения до 6000 об/мин.

Также была проведена «виртуальная» балансировка ротора посредством подачи в систему управления ЭМП корректирующего сигнала и исследован алгоритм «виртуальной» балансировки.

Целью исследований алгоритма «виртуальной» балансировки являлось определение его эффективности для компенсации дисбаланса, вызванного остаточным дисбалансом ротора, имеющего четыре критические частоты в диапазоне до  $100 \text{ с}^{-1}$  (6000 об/мин).

Для обеспечения автоматического поддержания устойчивого вращения ротора при пуске и остановке на резонансных частотах используется специальный закон управления, формирующий вектор «виртуальной» силы в электромагнитном подшипнике, что обеспечивает величину амплитуды колебаний ротора в заданной области относительно оси подшипников. Как описано в [11], вектор вычисляется как ток коррекции  $I_{\text{корр}}$ , который суммируется с током регулирования  $I_{\text{рег}}(t)$ , по формуле

$$I_{\text{корр}} = I_{\text{амп}} \cdot \sin(\alpha + \varphi),$$

где  $I_{\text{амп}}$  – величина вектора виртуальных сил, А;  $\alpha$  – угловое положение ротора, град.;  $\varphi$  – угловое направление вектора виртуальных сил.

На рисунке 5 представлены результаты исследования действия специального алгоритма компенсации дисбаланса. Включение алгоритма позволяет существенно уменьшить амплитуду колебаний ротора на резонансной частоте 65 Гц.

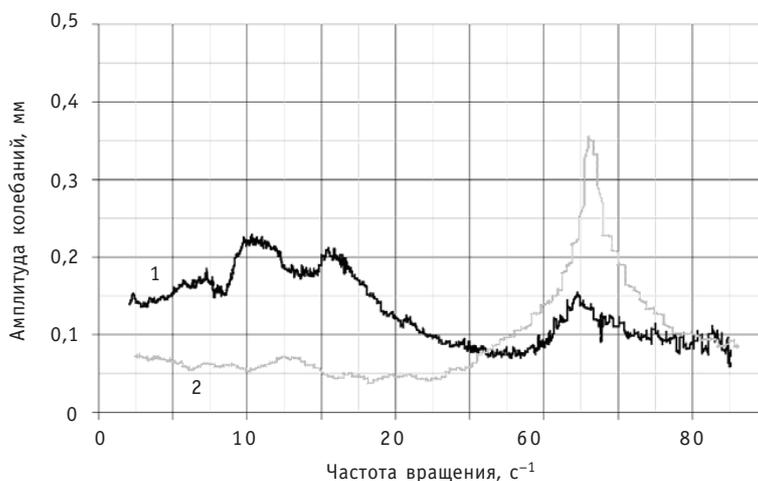


Рис. 5. Исследование действия специального алгоритма компенсации дисбаланса: 1 – алгоритм включен; 2 – алгоритм выключен

Система управления ЭМП стенда «Минимакет» обеспечила автоматическое включение – отключение специального закона управления, обеспечивающего прохождение четырех резонансных частот.

На базе алгоритмов управления положением ротора и конструкции системы управления ЭМП, обеспечившей функционирование стенда «Минимакет», была реализована система управления стендом «Масштабная модель ротора турбомшины».

Конструкция стенда «Минимакет» существенно отличается по своим характеристикам от конструкции турбомшины, поэтому для проведения дальнейших ис-

следований характеристик электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора турбомшины был создан стенд «Масштабная модель ротора турбомшины» (ММР), моделирующий АЧХ натурального ротора турбомшины. При этом результаты исследований динамики гибкого ротора на стенде «Минимакет» будут использованы на стенде ММР.

Ротор стенда ММР [5] спроектирован на основе моделирования жесткости и распределения массы ротора модели и ротора натурной турбомшины с обеспечением равенства количества частот собственных колебаний и подобия форм изгиба роторов.

Таблица

**Основные технические характеристики ММР**

Общая масса ротора, кг	1171
Общая длина ротора, м	10,54
Частота вращения ротора максимальная, об/мин	6000
Несущая способность радиального ЭМП максимальная, не менее, кг	250
Несущая способность осевого ЭМП максимальная, не менее, кг	2000

В состав стенда ММР входят физическая модель ротора, состоящая из корпуса и ротора (рис. 6), шкафы системы управления ЭМП и нагрузочными устройствами, информационно-измерительная система (ИИС), силовое электрооборудование и пульт управления ММР. Вертикальный ротор состоит из двух частей – модели ротора турбокомпрессора и модели ротора генератора, которые соединены посред-

ством упругой муфты. Каждый ротор опирается на два радиальных и один осевой ЭМП.

Стенд ММР укомплектован датчиками положения ротора и угла поворота СУ ЭМП, частоты вращения, измерения вибраций корпуса и датчиками измерения положения ротора в горизонтальной плоскости в различных местах по высоте. В качестве резервных (страховочных) подшипников использованы шарикоподшипники.

Кроме того, в стенде установлены дополнительно три электромагнитных нагрузочных устройства, которые используются для создания дополнительных радиальных усилий, имитирующих воздействие различных сил, действующих на ротор ТМ. Модель ротора генератора включает в себя роторы двух электродвигателей, выбранных с учетом возможности имитации сил магнитного притяжения основного генератора и



Рис. 6. Корпус стенда «Масштабная модель ротора»

генератора возбуждателя натурной ТМ. Один из электродвигателей обеспечивает вращение ротора ММР в диапазоне от 10 до 6000 об/мин с плавным регулированием частоты вращения посредством преобразователя частоты. Корпус физической модели ротора установлен на виброизолирующий фундамент.

Многоканальная система управления ЭМП [10, 14] обеспечивает требуемую грузоподъемность подшипников и создает тяговые усилия, достаточные для стабилизации положения ротора внутри области допустимых перемещений ротора при внутренних возмущениях и силовых воздействиях на всех режимах испытаний.

В 2010 г. начаты исследовательские испытания масштабной модели ротора турбомшины. Целью исследовательских испытаний масштабной модели многоопорного гибкого вертикального ротора турбомшины является исследование динамики ротора на электромагнитном подвесе в обоснование работоспособности турбомшины установки ГТ-МГР, получение экспериментальной информации для использования при проектировании системы электромагнитного подвеса и ротора натурной турбомшины, а также получения данных для верификации расчетных кодов и алгоритмов управления.

В процессе исследований должны быть решены следующие основные задачи:

- исследование поведения модели ротора на электромагнитном подвесе совместно с системой управления в различных режимах работы;
- получение данных для верификации программ расчета динамики ротора;
- отработка законов регулирования, обеспечивающих стабилизацию ЭМП гибкого ротора при воздействии различных внешних сил, при различных жесткостях опор и отклонений от прямолинейности корпусных конструкций;
- отработка законов управления и подтверждение устойчивой работы ротора с ЭМП при прохождении резонансных частот при пуске и останове;
- отработка методики балансировки гибкого ротора в составе машины [12, 13];
- проверка влияния единичных отказов элементов системы управления ЭМП на ее работоспособность.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В мире существует значительный интерес к модульным высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам для производства водородного топлива, выработки тепла, производства электроэнергии. Высокая температура теплоносителя и повышенная безопасность открывают широкие возможности для использования высокотемпературных реакторов в различных отраслях промышленности.

Россия, Китай и Япония в настоящее время разрабатывают перспективные проекты установок с ВТГР и газотурбинным циклом. Разработанные проекты и создаваемые стенды показывают, что электромагнитный подвес гибкого ротора осуществим, однако конкретная реализация подвеса требует расчетного и экспериментального обоснования.

## **Литература**

1. *Дмитриев С.М., Замятин С.А.* Атомные газотурбинные установки: Учеб. пособие / С.М. Дмитриев, С.А. Замятин. – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. - 140 с.
2. Материалы V Международной конференции по технологии высокотемпературных реакторов HTR-2010 (Prague, Czech Republic, 18-20 октября 2010 г.).
3. Technical Design and Principle Test of Active Magnetic Bearings for the Turbine Compressor of HTR-10GT. Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET) Tsinghua University (КНР)/Материалы V Международной конференции по технологии высокотемпературных реакторов HTR-2010 (Prague, Czech Republic, 18-20 октября 2010 г.). Доклад № 285.

4. International Journal for Nuclear Power, atw G01386, Feb. 2003. – № 2. – P. 105.
5. Кодочигов Н.Г., Белов С.Е., Друмов И.В., Знаменский Д.С., Вахи С.В., Telengator A., Razvi J. Исследования системы электромагнитного подвеса модели ротора турбомшины ГТ-МГР/Материалы V Международной конференции по технологии высокотемпературных реакторов HTR-2010 (Prague, Czech Republic, 18-20 октября 2010 г.). Доклад № 041.
6. Arkal Shenoy. US History of Direct Cycle Gas-Turbine HTGRs. Presented at IAEA Technical Committee Meeting on Gas Turbine Power Conversion Systems Meeting. – November 15, 2000.
7. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С., Гребенник В.Н., Кирюшин А.И., Кодочигов Н.Г., Кузавков Н.Г. Возможности использования модульного гелиевого реактора ГТ-МГР для диспозиции оружейного плутония. ISSN 0869-6772. Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia. 1999. №3-4.
8. Mitenkov F.M., Kodochigov N.G., Drumov V.V., Belov S.E., Vostokov V.S., Drumov I.V., Klochkov O.B., Khodykin A.V. Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant/ Proceedings of conference «PHUSCON2003» (Sanct-Peterburg, Russia, 2003 г.). – С. 146-151.
9. Кодочигов Н.Г., Друмов В.В., Белов С.Е., Дельфонцев Н.С., Чистяков В.М. Электромагнитный подвес вертикальной турбомшины для атомной станции ГТ-МГР. (англ.)/Материалы V Международной конференции по технологии электромагнитного подвеса (Циттау, ФРГ, сентябрь 2001 г.).
10. Кодочигов Н.Г., Друмов В.В., Боровиков А.Н., Друмов И.В. Система управления электромагнитным подвесом/Материалы V Международной конференции по технологии электромагнитного подвеса (Циттау, ФРГ, сентябрь 2001 г.). – С. 59-68.
11. Кодочигов Н.Г., Друмов В.В., Белов С.Е., Востоков В.С., Друмов И.В., Ходыкин А.В. Исследование методов стабилизации ротора с полным электромагнитным подвесом/Материалы VI Конференции по системам мехатроники (Кассель, ФРГ сентябрь 2003 г.). – С. 153-160.
12. Митенков Ф.М., Знышев В.В., Кирюшина Е.В., Николаев М.Я., Овчинников В.Ф., Фадеев А.В. Алгоритм определения дисбаланса ротора на электромагнитных опорах//Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – №4. – С. 9-14
13. Митенков Ф.М., Знышев В.В., Кирюшина Е.В., Кодочигов Н.Г., Николаев М.Я., Овчинников В.Ф. Влияние дисбаланса на нелинейную динамику вертикального ротора на электромагнитных подшипниках//Вестник ННГУ. Механика. 2009. – №4. – С. 110-114.
14. Кодочигов Н.Г., Друмов В.В., Победоносцев А.Б., Друмов И.В. Расчет и обоснование структуры и состава микропроцессорных контроллеров в цифровой системе управления многоопорной системой электромагнитного подвеса/Материалы VI Конференции по системам мехатроники (Кассель, ФРГ, сентябрь 2003 г.). – С. 161-169.

Поступила в редакцию 8.08.2011

in the containment model; steam-water mixture pressure of atmospheric pressure 650 кПа; and heat flux density of 322 KW/m<sup>2</sup>. Given are comparative analysis results for obtained experimental and calculated heat transfer values; closing correlations are proposed.

**УДК 532.526.4: 621.039.534**

*Investigation of Supercritical Parameters Water Flow Problem by the ANSYS-CFX and Star-CD Codes \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V. Ukraintsev, A.N. Yarkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table, 13 illustrations. – References, 8 titles.*

Results of analysis of evaluations made by codes ANSYS-CFX and STAR-CD for water flow with supercritical parameters with experimental data of the State Research Center «Institute of Physics and Power Engineering» are presented. Evaluations were carried out with the use of five model of turbulence. It is shown that calculation results are in satisfactory accordance with experimental data. The problem of forming the M-type profile of velocity is considered separately.

**УДК 621.039.54**

*Increase of Burn-up and Proliferation Protection of Light Water Reactors Fuel at Combined Introduction of <sup>231</sup>Pa and <sup>237</sup>Np into its Composition \G.G. Kulikov, E.G. Kulikov, E.F. Kryuchkov, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 12 illustrations. – References, 13 titles.*

It is founded the use of nuclides <sup>231</sup>Pa and <sup>237</sup>Np in fuel composition of light water reactors as burnable absorbers, which allow us to reduce initial reactivity excess, increase essentially fuel lifetime and reach ultra high fuel burn-up as well strengthen proliferation protection of fuel.

Introduce of <sup>237</sup>Np into fuel composition would allow decreasing requirements of <sup>231</sup>Pa content which is difficult of access in considerable amounts. While <sup>237</sup>Np is in spent fuel of nuclear power plants and at present time is not used and is a problem in respect to its storage and processing. So it is expedient to review ways of its involving into nuclear fuel cycle.

**УДК 621.039.543.4**

*Introduction of Reprocessed Uranium into Fuel Composition of Light-Water Reactors as a Protective Measure Against Proliferation \A.Yu. Smirnov, V.A. Apse, V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, A.N. Shmelev, A.A. Dudnikov, E.A. Ivanov, V.A. Nevinitza, N.N. Ponomarev-Stepnoi; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.*

The paper presents a physical principle for development of advanced LWR fuel with inherent resistance to unauthorized usage and proliferation of uranium-based nuclear materials. Key point of the principle consists in the use of reprocessed uranium extracted from spent fuel in fabrication of fresh fuel assemblies for export deliveries. Introduction of reprocessed uranium into fresh uranium fuel compositions can complicate substantially any diversions of nuclear materials from fuel assemblies thanks to the presence of uranium isotope <sup>232</sup>U in reprocessed uranium. Any attempts of uranium re-enrichment up to the weapon-grade level will fail because of rapid increase of <sup>232</sup>U content and its high-energy gamma-radiation. This technical measure, in combination with restricted accessibility of isotope separation technologies concentrated in the International nuclear technology centers and unification of requirements to dose rates of ionizing radiation from fresh fuel assemblies, can reduce significantly the proliferation risk related to export deliveries of low-enriched uranium fuel.

**УДК 621.039.52.034.3**

*Studies of Electromagnetic Suspension of Turbomachine's Rotor for Nuclear Power Plant with High Temperature Reactor and Gas-Turbine Cycle \N.G. Kodochigov, S.M. Dmitriev, I.V. Drumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 14 titles.*

Prospects of applying of a direct gas-turbine cycle for nuclear power plants with high-temperature gas-cooled reactors are analyzed in this paper. Here are described the basic characteristics and requirements of a design, which provide a high level к.п.д of such type of reactors with direct gas-turbine cycle and its advantage in comparison with similar designs with steam-turbine installations. Data about development of the technology in the countries, which design and maintain high-temperature gas-cooled reactors, are cited.