

удк 621.039.548

## СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОБЛУЧЕННЫХ ТВЭЛОВ ДЛЯ СТЕНДА ИНСПЕКЦИИ И РЕМОНТА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВВЭР

**С.В. Павлов, С.С. Сагалов, С.В. Амосов**

*ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград*



Приведено описание системы неразрушающей диагностики состояния облученных твэлов, входящей в состав стенда инспекции и ремонта тепловыделяющих сборок ВВЭР-1000. Рассмотрены принципы работы, а также техническая и программная реализация каналов ультразвукового контроля герметичности оболочек и импульсной вихретоковой дефектоскопии твэлов.

**Ключевые слова:** АЭС, ВВЭР, ТВС, облученный твэл, стенд инспекции и ремонта, бассейн выдержки, ультразвуковой контроль герметичности, вихретоковая дефектоскопия.

**Key words:** NPP, WWER, FA, irradiated fuel element, inspection and reconstitution stand, spent fuel pool, ultrasound leakage test, eddy-current defectoscopy.

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения безопасности и экономичности АЭС необходимы непрерывное совершенствование конструкции и технологии изготовления тепловыделяющих сборок (ТВС) и твэлов, оптимизация режимов их эксплуатации. При этом эффективность внедрения новых решений во многом определяется возможностью получения статистически значимой информации о состоянии облученного топлива в короткие сроки. Типовые послереакторные исследования ТВС в специальных защитных камерах материаловедческих центров не в полной мере удовлетворяют этому условию. Необходимость длительного расхолаживания и транспортировки сборок, низкая пропускная способность защитных камер, затраты на обращение с облученным топливом – основные ограничения традиционного подхода. Одной из современных тенденций в области послереакторного контроля ТВС и твэлов является перенос значительного объема неразрушающих исследований из материаловедческих лабораторий НИИ на стенды инспекции, размещаемые в бассейнах выдержки АЭС [1].

Возможности стендов инспекции и ремонта позволяют выявлять в составе ТВС негерметичные твэлы, исследовать их для установления причин разгерметизации и заменять имитаторами или целыми твэлами, что с экономической точки зрения

выгоднее замены всей сборки [2]. Первый в России подобный стенд создан для инспекции и ремонта сборок типа ТВСА ВВЭР-1000 на Калининской АЭС. Выявление негерметичных твэлов осуществляется с помощью ультразвукового контроля герметичности оболочек (КГО). После извлечения поврежденного твэла из ТВС применяется вихретоковая (ВТ) дефектоскопия для определения места расположения и типа имеющихся дефектов. На основании этих данных проводится визуальный осмотр дефектных участков и дается заключение о характере повреждений твэла.

### СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ СИСТЕМЫ

**Канал ультразвукового КГО.** Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных твэлов в составе ТВС основан на регистрации воды внутри твэла, попадающей туда после его разгерметизации [3]. Со стороны верхней заглушки твэла с помощью пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) возбуждаются ультразвуковые волны, которые распространяются по оболочке до нижней заглушки, отражаются и после прохождения в обратном направлении регистрируются этим же датчиком (рис. 1а). Если твэл герметичен, то на А-сканограмме наблюдается принятый полезный сигнал (рис. 1б). При наличии воды под оболочкой происходит дополнительное в сравнении с герметичным твэлом рассеяние энергии волн, и амплитуда полезного сигнала уменьшается практически до уровня фона (рис. 1в).

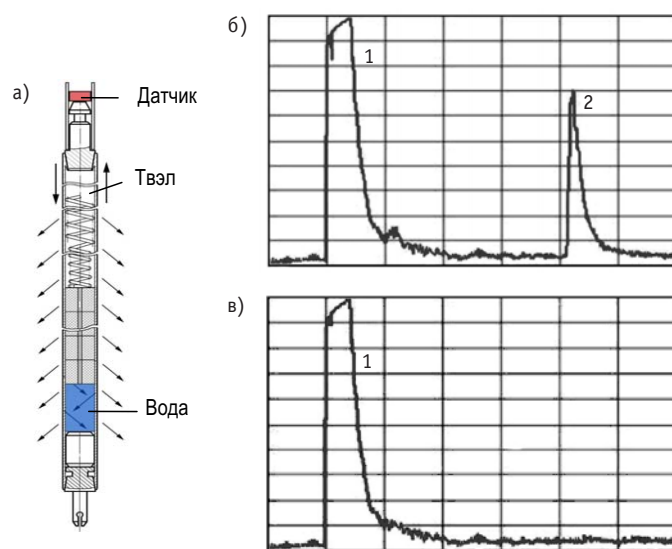


Рис. 1. Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных твэлов в ТВС: а) – схематичное изображение датчика и инспектируемого твэла; б) – А-сканограмма герметичного твэла; в) – А-сканограмма негерметичного твэла; 1 – сигнал возбуждения датчика, 2 – полезный отклик

Обнаружение негерметичных твэлов в ТВСА ВВЭР-1000 осуществляется с помощью специально разработанного манипулятора КГО, содержащего 52 пьезоэлектрических датчика (рис. 2). Манипулятор устанавливается на верхнюю часть ТВСА после демонтажа ее головки. Переустанавливая манипулятор шесть раз с поворотом относительно вертикальной оси на угол в  $60^\circ$ , производят контроль всех 312 твэлов сборки. Датчики в манипуляторе подпружинены в вертикальном направлении, что позволяет компенсировать разное по высоте положение твэлов.

На рисунке 3 показана структурная схема канала ультразвукового КГО. Для генерации возбуждающих импульсов и регистрации выходного сигнала ПЭП ис-

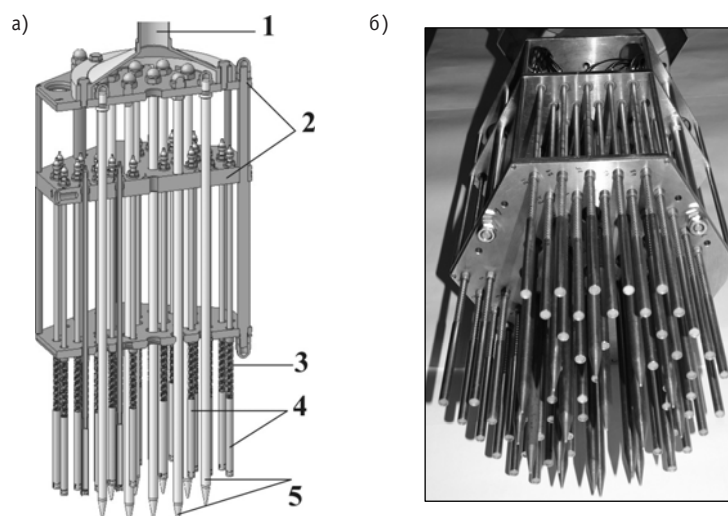


Рис. 2. Схематическое изображение (а) и внешний вид нижней части (б) манипулятора КГО: 1 – штанга; 2 – корпус; 3 – пружина; 4 – ультразвуковые датчики; 5 – направляющие штоки

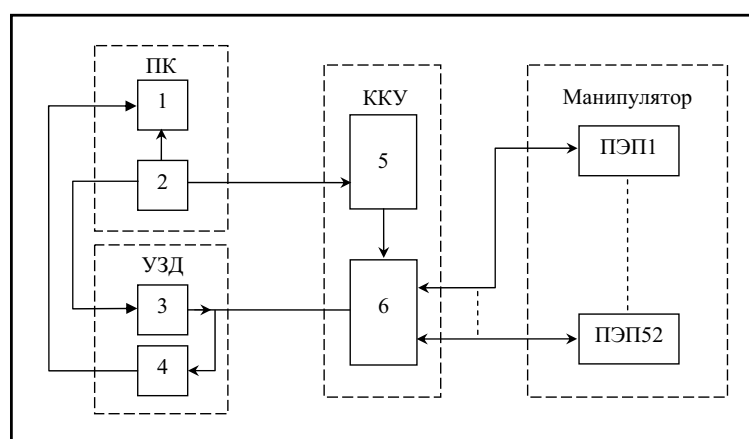


Рис. 3. Структурная схема канала КГО

пользуется ультразвуковой дефектоскоп (УЗД) УД2-12, работающий в ждущем режиме. С приходом синхросигнала от платы контроллера 2, установленной в промышленном компьютере (ПК), запускается генератор импульсов 3, который вырабатывает колоколообразный радиоимпульс и возбуждает ПЭП. Выходной сигнал датчика поступает на усилитель 4 и далее оцифровывается с помощью 12-разрядного АЦП 1.

Крейт коммутации и управления (ККУ) предназначен для поочередного подключения датчиков к дефектоскопу. В соответствии с программой измерений плата контроллера 2 формирует для блока управления 5 последовательность счетных импульсов, определяющих порядок подключения датчиков. Блок управления 5 вырабатывает сигналы, управляющие работой реле в блоке коммутации 6 и задающие последовательность соединения ПЭП с УЗД. Функционально блок управления состоит из схем формирования счетных импульсов, индикации номера подключенного датчика, формирования управляющих сигналов.

Программное обеспечение позволяет автоматически опрашивать все датчики, выявлять твэлы, для которых амплитуда сигналов меньше заданной величины, от-

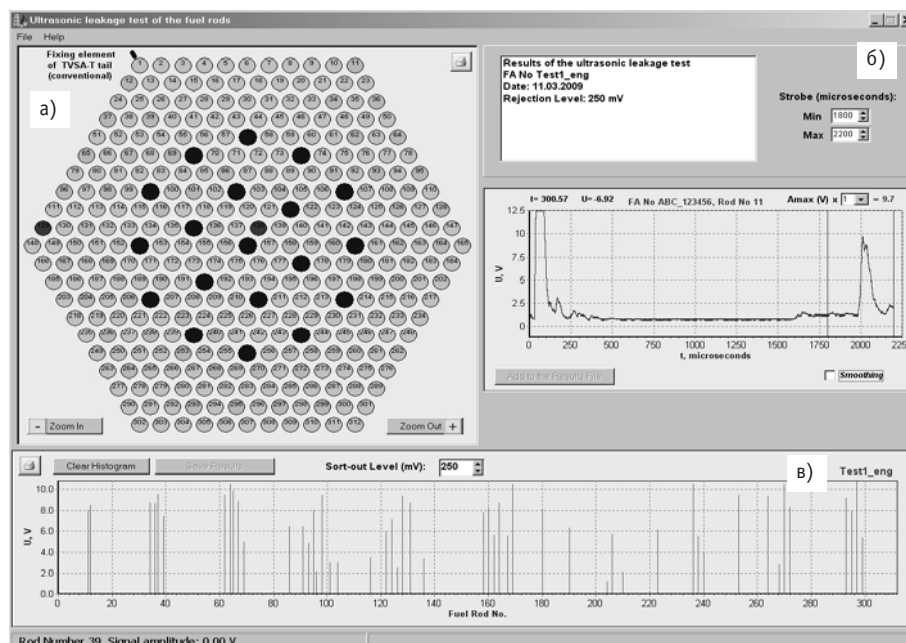


Рис. 4. Главное окно программы анализа результатов КГО: а) – картограмма ТВСА; б) – А-сканограмма твэла; в) – результаты измерения амплитуды полезного отклика для массива исследованных твэлов

мечать их на картограмме ТВСА и протоколировать результаты контроля (рис. 4).

Проверка разработанного метода ультразвукового КГО проводилась в ОАО «ГНЦ НИИАР» на восьми негерметичных ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с выгоранием от 14 до 37.5 МВт-сут/кгU [3]. Результаты испытаний показали его высокую надежность для указанного диапазона, все негерметичные твэлы были правильно идентифицированы. В настоящее время ультразвуковой КГО является составной частью стандартных программ послереакторных исследований отработавших ТВС ВВЭР.

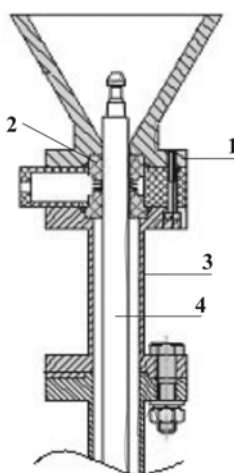


Рис. 5. Взаимное расположение вихретокового датчика и твэла:  
1 – корпус датчика;  
2 – измерительный элемент;  
3 – пенал для твэла; 4 – твэл

**Канал вихретоковой дефектоскопии.** Твэл, выбранный по результатам КГО как негерметичный, извлекается из ТВС с помощью специального инструмента, устанавливается в пенал, а затем протягивается через вихретоковый преобразователь (ВТП) (рис. 5). При этом производится дефектоскопия оболочки твэла.

Для обнаружения аномалий в оболочках на стенде инспекции и ремонта ТВСА применяется импульсный метод вихретокового контроля [4]. Выбор этого метода обусловлен такими его преимуществами перед гармоническим, как простота схемной реализации аппаратуры, большая информативность за счет одновременной генерации широкого спектра частот, более высокая чувствительность к дефектам при той же рассеиваемой мощности ВТП. Первичным преобразователем является датчик проходного типа с тремя катушками индуктивности: двумя измерительными, включенными по дифференциальной схеме, и одной возбуждающей. Измерительные обмотки регистрируют изменения электромагнитного поля вихре-

вых токов, наводимых в оболочке твэла возбуждающей обмоткой, на которую подается импульс тока.

Импульсный вихретоковый дефектоскоп спроектирован на основе ПК с установленными в нем платой 12-разрядного АЦП и платой формирователя возбуждающих импульсов. Платы выполнены в конструктиве РСІ и могут быть интегрированы в другую измерительную систему, имеющую в своем составе ПК с подходящими характеристиками.

Рисунок 6 иллюстрирует взаимодействие отдельных узлов дефектоскопа. Плата формирователя импульсов (ФИ) обеспечивает питание возбуждающей обмотки ВТП импульсами тока. Сигнал ВТП, снимаемый с измерительных обмоток, усиливается и поступает через фильтры нижних и верхних частот (ФНЧ и ФВЧ) на плату АЦП, где преобразуется в последовательность 12-разрядных кодов путем оцифровки через равные промежутки времени. АЦП работает в режиме аппаратного (независимо от центрального процессора ПК) набора массива данных и запускается по переднему фронту импульса тактового генератора платы ФИ одновременно с генерацией импульса тока в возбуждающей обмотке ВТП. Для промежуточного хранения кодов используется память типа FIFO. Синхронизация работы плат ФИ и АЦП осуществляется с помощью импульсов, поступающих на тактовый генератор платы ФИ с узла управления АЦП.

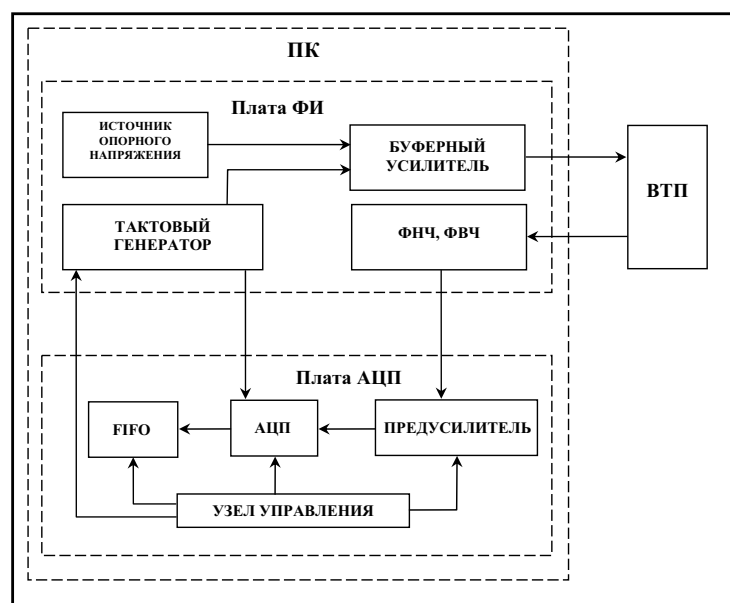


Рис. 6. Структурная схема канала вихретоковой дефектоскопии

Анализ результатов контроля осуществляется путем сравнения параметров откликов от искусственных дефектов контрольного образца и аномалий, обнаруженных при ВТ-сканировании исследуемого твэла. Для первичной оценки состояния твэла используется D-скан (рис. 7а), позволяющий экспрессно выявить участки оболочки с дефектами. Характеристики выявленной аномалии оцениваются с помощью А-сканограммы (рис. 7б) и огибающих, полученных для разных моментов стробирования выходного сигнала ВТП (рис. 7в). Эти огибающие используются также для построения годографов дефектов и представления результатов контроля в более традиционном виде, характерном для гармонического метода (рис. 7г). По параметрам годографа (форма, амплитуда, угол наклона) оценивают состоя-

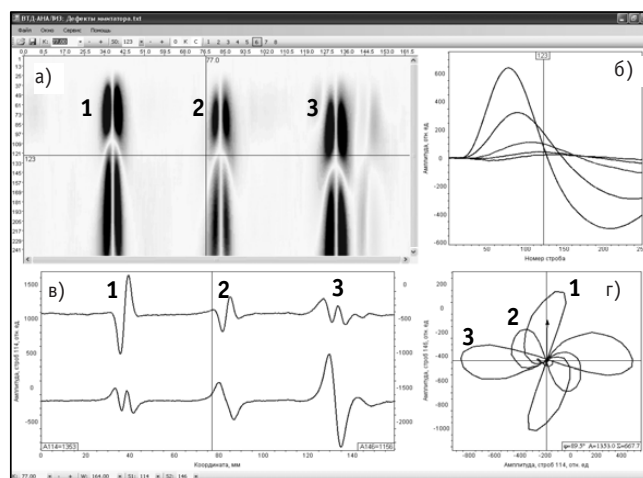


Рис. 7. Главное окно программы с результатами ВТ-контроля фрагмента имитатора с наружным (1), сквозным (2) и внутренним (3) дефектами: а) – D-скан; б) – А-сканограммы в окрестности сквозного дефекта; в) – огибающие сигнала ВТП; г) – годографы

ние оболочки на аномальном участке [5]. По фазе и амплитуде годографы импульсного сигнала для различных дефектов оболочки качественно соотносятся между собой аналогично годографам гармонического сигнала.

Импульсная вихретоковая дефектоскопия уже длительное время используется в НИИАР как экспрессный метод контроля состояния оболочек твэлов при после-реакторных исследованиях ОТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. В общей сложности с ее помощью исследовано более 40 ОТВС ВВЭР, из них 16 негерметичных.

На рисунке 8а приведен пример ВТ-диаграммы (одной из огибающих) негерметичного твэла ВВЭР-1000, в нижней части которого был обнаружен сквозной дефект с площадью повреждения наружной поверхности  $\sim 0,5 \text{ мм}^2$  (рис.8б). Наряду с первичными сквозными дефектами импульсный метод позволяет идентифицировать разнообразными вторичные аномалии в виде повышенного окисления, гидридных образований и вздутий оболочки, возникающих вследствие попадания воды внутрь твэла через первичный дефект [6]. Вид массивного гидроксида, выявленного в оболочке на координате одного из аномальных ВТ-сигналов, представлен на рис. 8в.

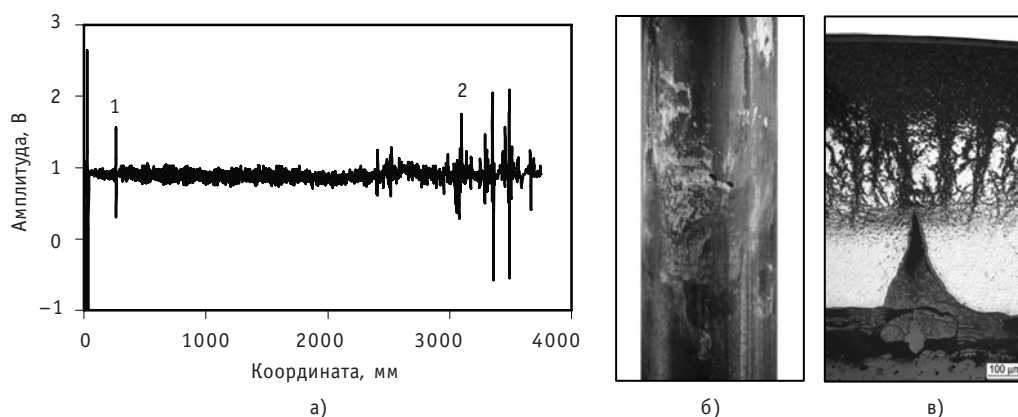


Рис. 8. Результаты вихретоковой дефектоскопии негерметичного твэла: а) – огибающая сигнала ВТП; б) – внешний вид сквозного дефекта; в) – микроструктура оболочки в месте расположения вторичного дефекта; 1 – сигнал от сквозного дефекта; 2 – сигнал от вторичного дефекта



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для стенда инспекции и ремонта ТВСА ВВЭР-1000 Калининской АЭС спроектированы и изготовлены ключевые составляющие системы неразрушающего контроля, позволяющие проводить ультразвуковой КГО ТВС и вихретоковую дефектоскопию оболочек твэлов. При построении системы были использованы технические и методические средства, разработанные в ОАО «ГНЦ НИИАР» для послереакторных исследований отработавших ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Апробация принятых решений в условиях бассейна выдержки АЭС показала высокую надежность оборудования и информативность получаемых результатов. Возможности созданной системы не ограничиваются контролем состояния облученных твэлов ТВСА ВВЭР-1000 и могут быть расширены за счет подключения других первичных преобразователей. В результате такой модификации система может быть использована для диагностики состояния органов СУЗ ВВЭР-1000 и других элементов ТВС. Кроме того, она легко адаптируется под задачи исследования твэлов других типов реакторов (ВВЭР-440, РБМК-1000).

## Литература

1. Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements. IAEA TECDOC-1050, Vienna, 1998.
2. Павлов С.В. Стенды инспекции, ремонта и реконструкции ТВС: Обзор. Димитровград: НИИАР, 1996.
3. Павлов С.В. Метод обнаружения негерметичных твэлов в ТВС ВВЭР и РБМК и результаты его апробации // Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 2. – С. 84-88.
4. Сагалов С.С., Костюченко А.Н. Система вихретокового контроля облученных твэлов для стендов инспекции и ремонта ТВС ВВЭР-1000/Сб. трудов ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». – 2008. – Вып. 2. – С. 8-15.
5. Пат. 2377554 РФ, МПК<sup>8</sup> G01N27/90. Способ импульсного вихретокового контроля/Сагалов С.С., Сухих А.В. // Бюллетень изобретений. – 2009. – № 36.
6. Сухих А.В., Сагалов С.С., Павлов С.В. и др. Использование импульсного метода вихретокового контроля для дефектоскопии облученных твэлов ВВЭР // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – Вып. 2. – С. 115-118.

Поступила в редакцию 1.06.2010

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.548

*The System of Irradiated Fuel Elements Nondestructive Examination for Inspection and Reconstitution Stand of WWER Assemblies* \S.V. Pavlov, S.S. Sagalov, S.V. Amosov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 8 illustrations. – References, 6 titles.

The description of the nondestructive diagnostic system of irradiated fuel elements, enclosed to inspection and reconstitution stand of WWER-1000 assemblies, is presented. Principles, as well as technique and programmable realization of ultrasound leakage test and pulsed eddy current defectoscopy of fuel elements are considered.

### УДК 621.039.58

*Probability Estimation of Hydrogen Ignition and Detonation in the Containment Vessel* \Yu.S. Yur'ev, N.M. Vitushkina, A.A. Zaitsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The Shapiro diagram is used for finding of ignition and detonation areas of hydrogen mixtures. The area boundaries and process trajectory are presented as the bands instead of the lines. This approach enables to determine the probability of these processes during the hydrogen filling of the containment vessel.

### УДК 621.039.51

*The Use of Supercritical Water Reactors in a Close Fuel Cycle* \Yu.D. Baranaev, A.P. Glebov, A.V. Klushin, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 7 titles.

Specifics of neutronics, thermal hydraulics and construction of the supercritical water reactors with thermal and fast neutron spectrum were investigated.

It is proved that reactors with thermal spectrum have conversion ratio about  $CR \approx 0,7$  and that natural Uranium consumption in such a reactors could be decreased about 2 times (compared convention WWER-1000).

In the reactor with a fast spectrum this ratio is rather higher and will be reach to  $CR=0,9-0,95$ . So, supercritical water reactor can operate by fuel self supply and future nuclear electricity power become more effective. The Thorium can be used in a supercritical water reactors with thermal and fast spectrumas in a Plutonium-Thorium or Uranium-Thorium fuel cycles without any fuel element construction changes. The problems of nuclear safety and fuel efficiency can be also solved in these fuel cycles.

### УДК 621.039.534

*Thermal Hydraulic Calculation of Medical Reactor MARS* \A.A. Kazantsev, V.R. Anisovyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 12 titles.

The specialized medical reactor MARS is under design for neutron-capture therapy. Results of calculations of total hydraulic resistance of a reactor MARS between inlet and outlet pipes by CFD- code are presented for range of flow rates. Calculation of the accident with removing of one control rod from reactor is presented. Accident transient was calculated up to new safe steady state condition.

### УДК 621.039.51

*Principal Physical Advantages from Applying Radiogenic Lead as a Coolant of Nuclear Reactors* \G.G. Kulikov, A.N. Shmelev, V.A. Apse, V.V. Artisyuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 16 titles.

The paper presents preliminary analysis of some advantages, which could be attained from the use of radiogenic lead, i.e. lead extracted from uranium and thorium ores, as a coolant of power nuclear reactors. The paper highlights that radiogenic lead can be used to improve operation safety and intensify breeding fuel. In addition, nuclear reactors cooled by radiogenic lead could be successfully used for hydrogen (or some other artificial fuel types) production, for generation of high-temperature technological heat and for neutron transmutation of radioactive wastes with low neutron capture cross-sections.