

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЕВРОПИЕМ В РЕАКТОРЕ БН-600 И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИННОВАЦИОННЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

В.Д. Рисованый*, Е.П. Клочков*, А.В. Захаров*, В.В. Мальцев**,
А.И. Карпенко**, В.И. Оглезнев**, А.М. Тучков**, И.А. Чернов**

*ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград

**Белоярская АЭС, г. Заречный



Накоплен большой опыт по эксплуатации органов регулирования с европием. Материаловедческие исследования показали, что европиевые стержни реактора БН-600 имеют высокие ресурсные характеристики. Проведен комплекс исследований по использованию радионуклидов европия в гамма-источниках. Наиболее перспективное направление – использование двухцелевых конструкций органов регулирования с поглощающим сердечником в виде вкладышей активной части штатных гамма-источников.

Ключевые слова: гамма-источник, европий, поглощающий материал, орган регулирования.

Key words: gamma-emitting source, europium, absorbing material, control rod.

Европий имеет уникальные ядерные свойства, позволяющие использовать его в качестве поглощающего материала в органах регулирования ядерных реакторов самого различного типа, включая реакторы на быстрых нейтронах. Наибольшее применение получили оксид европия и оксид европия в металлических матрицах, которые характеризуются высокой радиационной стойкостью и практически не набухают при реакторном облучении. Наличие цепочки дочерних изотопов с высокими сечениями поглощения нейтронов обеспечивает практически неизменную физическую эффективность в течение 20–25 лет эксплуатации. Оксид европия совместим со сталями до температур 1100–1200°C.

С 1965 г. накоплен большой положительный опыт использования материалов на основе европия в поглощающих элементах исследовательских ядерных реакторов, транспортных установок, реакторов БОР-60 и БН-600.

© В.Д. Рисованый, Е.П. Клочков, А.В. Захаров, В.В. Мальцев, А.И. Карпенко, В.И. Оглезнев, А.М. Тучков, И.А. Чернов, 2011

В период с 1980 по 2005 гг. в реакторе БН-600 прошли эксплуатацию более 100 стержней КП-ТК (современное обозначение КС) и около 50-ти стержней АР (теперь РС) с композицией $\text{Eu}_2\text{O}_3+\text{Mo}$. В таблице 1 представлены основные характеристики стержней реактора БН-600 с европейским поглотителем. Максимальное время нахождения в активной зоне и максимальный флюенс нейтронов составили для КП 390 эфф.сут и $1,59 \cdot 10^{23}$ н·см⁻², для АР 510 эфф.сут и $2,43 \cdot 10^{23}$ н·см⁻² соответственно. Все стержни СУЗ показали высокую работоспособность, не было ни единого случая отказа в их работе. Материаловедческими исследованиями показано, что максимальное увеличение диаметра чехловых труб стержней КП-ТК не превысило 3%, а в местах шарнирных соединений 2,3%. Отмечена эллипсность чехловых труб, что связано с неравномерностью распухания конструкционного материала. Все поглощающие элементы сохранили целостность и форму. Диаметры оболочек пэла увеличились до 1% вследствие высокотемпературного распухания. Проведенные в НИИАР материаловедческие исследования позволили сделать рекомендации по увеличению времени эксплуатации стержней. Основным фактором, ограничивающим ресурс стержней, является низкая радиационная стойкость стали ЭИ-847, из которой сделаны оболочки поглощающих элементов.

Таблица 1

Основные характеристики европейских стержней СУЗ реактора БН-600

Параметр	Стержень СУЗ	
	АР	КП-ТК
Общая длина стержня, мм	2000–2100	2860
Диаметр чехловой трубы, мм	73	89
Толщина стенки, мм	1	1,5
Максимальный диаметр стержня с учетом центрирующих поясков, мм	74	90
Количество поглощающих элементов, шт.	31	48
Диаметр оболочки пэла, мм	9,5	9,5
Толщина стенки, мм	0,5	0,5
Поглощающий материал	$\text{Eu}_2\text{O}_3+\text{Mo}$	$\text{Eu}_2\text{O}_3+\text{Mo}$
Диаметр таблеток поглотителя, мм	8,2	8,2
Тип пэла	Герметичный	Герметичный
Радиационный зазор между стержнями СУЗ и направляющим каналом, мм	2,0	2,0

В конце 1980-х гг. в реакторе БН-600 был осуществлен переход на новые конструкции стержней КП-ТК, а в 2005 г. – стержней АР с карбидом бора с естественным содержанием по изотопам ¹⁰B и ¹¹B. Основная причина перехода заключалась в высокой наведенной активности радионуклидов европия с большим периодом полураспада, что создавало проблемы с обращением с отработавшими изделиями при транспортировке и длительном их хранении в бассейне выдержки. Имелись случаи попадания радионуклидов европия в воду бассейна. Это потребовало решения вопросов по безопасному хранению отработавших стержней с европием.

В 1998–2000 гг. в НИИАР проведены исследования по возможности транспортировки отработавших стержней регулирования энергетических и транспортных реакторов. С участием специалистов Госатомнадзора РФ были сделаны расчеты,

на основании которых подготовлена «Экспертная оценка безопасности предложения по использованию контейнера ТУК-32 для транспортировки европийсодержащих стержней СУЗ транспортных и энергетических реакторов по территории России и стран СНГ».

Экспертная оценка сделана для трех условий – время после останова реактора составляет один год, два года и пять лет соответственно.

В качестве критерия безопасности, согласно Правилам безопасности при транспортировании радиоактивных веществ (ПБТРВ-73), принималась величина допустимой мощности экспозиционной дозы (МЭД) излучения для общего случая перевозки радиационных упаковок на транспортных средствах совместно с другими грузами.

В результате расчетов установлено, что требования ПБТРВ-73 выполняются при условии размещения европийсодержащих стержней в контейнере ТУК-32 в дополнительном защитном стальном пенале или в толстостенных трубах с толстостенными крышками (табл. 2).

Таблица 2

Толщина дополнительной защиты для обеспечения требований ПБТРВ-73 при перевозке стержней КГ в контейнере ТУК-32, мм

Направление	Количество перевозимых стержней			
	1	5	15	30
Радиальное (T_3)	–	25	55	70
Осевое:				
верх (T_1)	–	50	85	105
низ (T_2)	30	80	110	130

Расчеты показали, что на боковой поверхности контейнера максимальная мощность дозы составит 100 мбэр/ч, а на поверхности доньшка 40 мбэр/ч и 2 мбэр/ч – на поверхности крышки контейнера. На расстоянии 1 м от упаковки МЭД уменьшается в 5 раз.

В аварийной ситуации (падение чехла на дно контейнера) максимальное значение МЭД на днище и в нижней части контейнера может иметь значение 600 мбэр/ч, а на расстоянии 1 м от контейнера – 30 мбэр/ч.

Расчеты показали, что как в нормальных, так и в аварийных ситуациях сохраняется герметичность упаковки и исключается выход радиоактивного продукта.

На основании выполненных расчетов и экспериментов ежегодно оформляются необходимые разрешения на транспортировку европиевых стержней. На рисунке 1 представлена схема транспортировки отработавших стержней и готовых европиевых источников.

Работы по вывозу европиевых стержней СУЗ реактора БН-600 Белоярской АЭС в ОАО «ГНЦ НИИАР» проводятся с 2004 г. Вывоз стержней осуществляется в контейнере ТУК-11БН, для чего разработан «Сертификат-разрешение на конструкцию упаковки и перевозку транспортного упаковочного комплекта ТУК-11БН с облученными стержнями СУЗ с европием реактора БН-600» RUS/369/B(M)-96T. В ТУК-11БН разрешается загрузка не более 15-ти облученных стержней СУЗ во внутренний и средний ряды труб чехла 14У. Суммарная активность изотопов европия-152 и европия-154 стержней в ТУК не должна превышать 11,73 ПБк (317 кКи).

В ОАО «ГНЦ НИИАР» осуществляются необходимые мероприятия по безопасному хранению отработавших стержней СУЗ, создаются новые технологии по исполь-

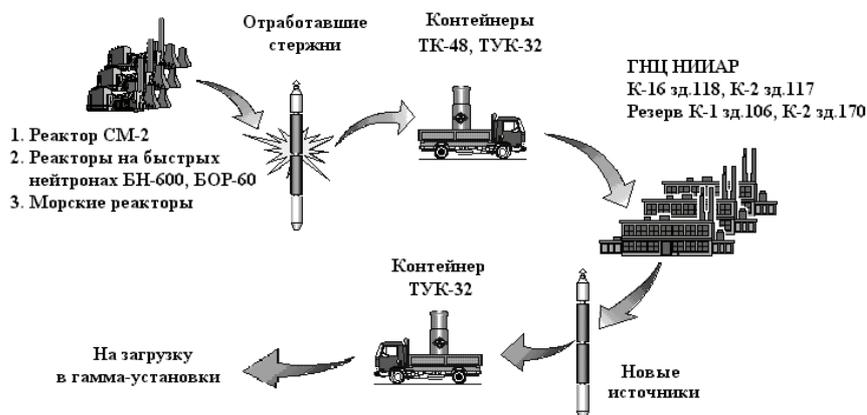


Рис.1. Схема транспортировки отработавших стержней

зованию радионуклидов европия для радиационной обработки различных материалов и изделий. Экспериментально подтверждена эффективность и экономическая целесообразность создания гамма-источников на основе европия как для действующих, так и проектируемых установок. Они отличаются от широко используемых источников на основе ^{60}Co большим временем эксплуатации и меньшей стоимостью, если используются новые технологии по созданию двухцелевых органов регулирования. В них поглощающий сердечник выполнен из набора вкладышей, которые после эксплуатации и разделки изделий являются активной частью гамма-источников. Требуется только разместить их во вторую герметичную оболочку, провести дезактивацию поверхности и замерить мощность экспозиционной дозы с заполнением паспортных данных. При этом решаются две основные задачи – при использовании радиационно стойких конструкционных материалов увеличение ресурса стержней КП-ТК реактора БН-600 вплоть до 1000 эфф.сут и утилизация отработавших изделий. Аналогичный подход может быть реализован и для органов регулирования проектируемых инновационных ядерных реакторов.

Мишени с европием для гамма-источников могут также облучаться и в боковом экране ядерных реакторов на быстрых нейтронах в специальных облучательных устройствах (ОУ). В 1992–2004 гг. в боковом экране реактора БН-600 было облучено девять ОУ по наработке ^{60}Co , где в качестве экрана использовали поглощающие элементы с оксидом европия (рис. 2). Удельная активность радионуклидов европия в них достигала 100 Ки/г. Размещение поглотителей между активной зоной и корпусом ядерного реактора позволяет снизить дозовые нагрузки на него и увеличить срок службы.

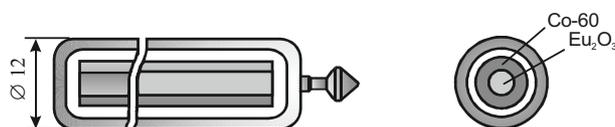


Рис. 2. Схема конструкции ОУ ($\text{Eu}_2\text{O}_3+\text{Co}$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накоплен большой опыт по эксплуатации органов регулирования с европием в различных типах ядерных реакторов. Материаловедческие исследования показали, что европиевые стержни реактора БН-600 имеют высокие ресурсные характеристики.

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

В НИИАР проведены исследования по возможности транспортировки отработавших стержней регулирования энергетических и транспортных реакторов с использованием существующих контейнеров

Проведен комплекс исследований по использованию радионуклидов европия в гамма-источниках. Изготовлены первые гамма-источники из отработавших органов регулирования ядерных реакторов БН-600 и БОР-60.

Наиболее перспективное направление – использование двухцелевых конструкций органов регулирования с поглощающим сердечником в виде вкладышей активной части штатных гамма-источников.

Поступила в редакцию 14.10.2011

УДК 621.039.546.54

Analysis of the Dynamics of Hydrogen Ingress into Secondary Sodium after Replacement of the BN-600 Power Unit Steam Generator Stages \ Yu.V. Nosov, G.N. Tsygankov, A.I. Beltyukov, P.P. Govorov, A.A. Kuznetsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The technique of calculation of hydrogen ingress into the secondary circuit of the BN-600 power unit after replacement of the PGN200M steam generator stages is presented. The hydrogen diffusion from the water-steam circuit from the new evaporator stages of which the heat exchange surfaces have not been subjected to the passivation yet is shown to be the main source of ingress.

УДК 621.039.54

Operating Experience from Europium Absorbers in the BN-600 Reactor and Perspectives of Their Further Utilization in the Innovation Nuclear Reactors \ V.D. Risovany, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov, V.V. Maltsev, A.I. Karpenko, V.I. Ogleznev, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations.

An extensive operating experience from the europium control rods has been accumulated. Research into materials has shown that the BN-600 reactor europium rods have high lifetime characteristics. A set of the studies on utilization of europium radionuclides in the gamma-emitting sources has been conducted. The most promising line is a utilization of double-purpose designs of the control rods with an absorbing kernel in the form of the inserts of the active part of the standard gamma-emitting sources.

УДК 621.039.54

Genetic Algorithm for the Localization of Defective Fuel Assemblies in the BN-600 Reactor Core \ A.O. Skomorokhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

The article considers the problem of determining the location of the fuel assemblies with leaky fuel rods in the reactor BN-600. The problem is solved by the method of neutron flux tilting at the operating reactor. Perturbations of the neutron field in the motion of control rods can be approximated by using a radial-basis neural network. A genetic algorithm for the localization of defective fuel assemblies is proposed.

УДК 621.039.56

Additional Method of Determination of the Predictive Position of the Shim Rods of the Beloyarsk NPP \ V.A. Zhyoltyshev, A.A. Lyzhin, V.A. Shamansky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

BN-600 reactor in the critical condition The additional method of determination of the predictive position of the KS1-18 control rods in the critical condition after refuelling is justified. Together with the existing method the above-mentioned method makes it possible to reliably determine the KS1-18 control rod position in the critical condition and improve safety and effectiveness of the BN-600 reactor operation.

УДК 621.039.56

Experimental and Computational Justification of the Reactivity Balance and Power Distribution in the BN-600 Core \ V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, A. V. Moiseev, M.Yu. Semyonov, Yu.S. Khomyakov, A.A. Belov, E.F. Seleznyov, B.A. Vasilev, M.R. Farakshin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 15 pages, 4 tables, 12 illustrations. – References, 13 titles.

For the 30-year history of the BN-600 reactor operation a set of the computational and experimental measures on the monitoring of the reactor core neutron-physical characteristics has been perfected. In this paper the results achieved by means of the reactivity and spectrum measurements and their computational analysis by all the available domestic software packages are presented.