

## УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАБОТАВШИХ ЕВРОПИЕВЫХ СТЕРЖНЕЙ СУЗ РЕАКТОРА БН-600

**А.И. Карпенко, В.И. Оглезнев, А.М. Тучков, И.А. Чернов**  
*Белоярская АЭС, г. Заречный*



На основе опыта расчетов физических характеристик отработавших стержней СУЗ (РО СУЗ) с европиевым поглотителем реактора БН-600 разработана упрощенная методика для быстрой оценки основных характеристик этих стержней. Данную методику можно применять для оценки физических характеристик европиевых РО СУЗ не только реактора БН-600, но и других быстрых реакторов (в том числе проектируемых).

**Ключевые слова:** активность, европий, код, моделирование, накопление, расчет, регулирующий стержень.

**Key words:** activity, europium, code, simulation, buildup, calculation, control rod.

В отличие от борных РО СУЗ европиевые стержни практически не теряют свою эффективность при эксплуатации в активной зоне быстрых реакторов, т.к. при выгорании стабильных изотопов европия образуются изотопы европия и гадолиния, имеющие также большие сечения захвата нейтронов. Ресурс европиевых стержней реактора БН-600 ограничивается радиационной стойкостью конструкционных материалов.

Однако в процессе облучения в европии нарабатываются долгоживущие радионуклиды с большой активностью – Eu-152, Eu-154 и Eu-155. Большая активность отработавших европиевых РО СУЗ требует повышенного внимания к ним при послереакторном обращении (перегрузочных операциях, хранении в бассейнах выдержки, использовании в качестве  $\gamma$ -источников и т.д.) с точки зрения радиационной безопасности и радиационного разогрева. Для определения необходимых технических и организационных мер обеспечения безопасности при послереакторном обращении с европиевыми РО СУЗ необходимо оценивать их основные физические характеристики – активность и мощность остаточного тепловыделения.

Методика расчета этих характеристик европиевых стержней быстрых реакторов на базе численного моделирования процесса накопления активности изотопов [1] достаточно сложная и трудоемкая. Так в коде «ГЕФЕСТ» [2] штатного нейтронно-физического расчета активной зоны реактора БН-600 такие расчеты не выполняются. В общем, физические характеристики европиевых РО СУЗ зависят от множества факторов – конструкции стержня, топливных загрузок, положения в активной зоне, длительности микрокампаний и остановов и т.д.

© А.И. Карпенко, В.И. Оглезнев, А.М. Тучков, И.А. Чернов, 2009

Однако в ряде случаев требуется оценить характеристики европиевых стержней, не имея достаточной информации об условиях их облучения. С другой стороны, РО СУЗ можно разбить на отдельные группы, которые облучаются в схожих условиях. Для этих групп на основе статистического анализа можно подобрать простые аппроксимирующие формулы, позволяющие проводить приближенные расчеты физических характеристик аналогичных стержней. В качестве исходных данных оценки должны использоваться общие сведения о стержне – группа РО СУЗ и длительность облучения.

### ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ ДОЛГОЖИВУЩИХ ИЗОТОПОВ ЕВРОПИЯ В РО СУЗ

Статистическая обработка проводилась на основе результатов расчетов активности всех штатных европиевых РО СУЗ, облучавшихся в активной зоне реактора БН-600 с 1980 по 2005 гг. Численное моделирование накопления радионуклидов европия проводилось по методике, приведенной в [1]. Распределение плотности потока нейтронов по высоте активной зоны в ячейке размещения каждого РО СУЗ определялось как усредненное от шести окружающих стержень ТВС. Депрессия поля нейтронов в стержне учитывалась введением коэффициента 0,85. В качестве исходных данных использовались результаты расчетов в коде «ГЕФЕСТ» для конкретной загрузки топлива.

Полную активность долгоживущих радионуклидов европия на момент окончания облучения в РО СУЗ можно определить по формуле

$$A = m_{\text{Eu}_2\text{O}_3} \sum_i \bar{a}_i, \text{ Гбк} \quad (1)$$

где  $m_{\text{Eu}_2\text{O}_3}$  – загрузка оксида европия в стержне, г;  $\bar{a}_i$  – средняя удельная активность отдельного нуклида, Гбк/гEu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Достаточно хорошая аппроксимация данных получена при использовании линейно-экспоненциальной формулы

$$\bar{a}_i = k1_i \cdot t \cdot \exp(-k2_i \cdot t), \text{ Гбк/гEu}_2\text{O}_3, \quad (2)$$

где  $t$  – время облучения РО СУЗ на мощности, эфф.сут;  $k1_i$ ,  $k2_i$  – эмпирические коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов (МНК) для каждо-

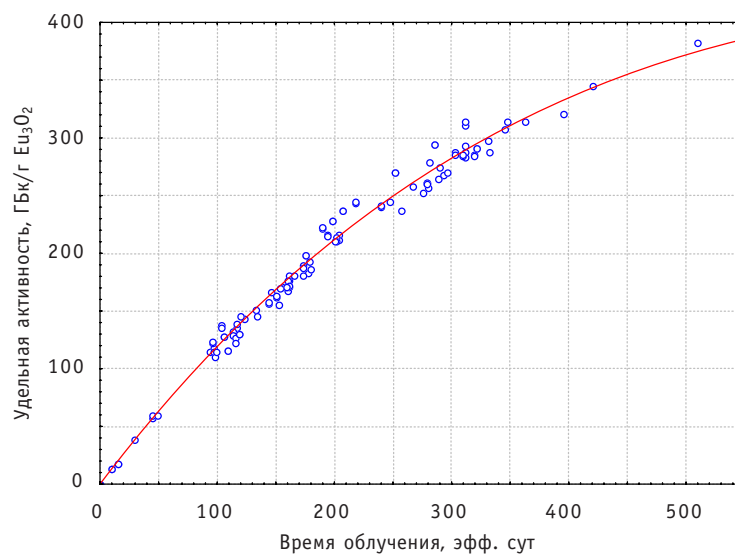


Рис. 1. Аппроксимация накопления Eu-152 в РО РС

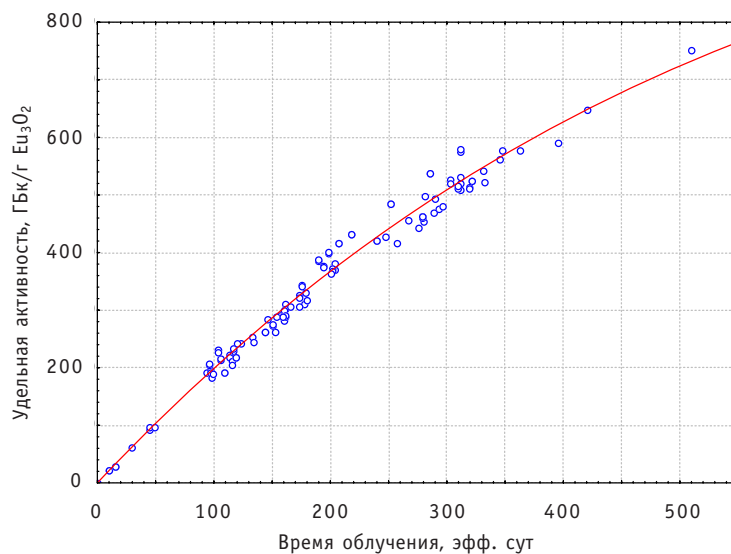


Рис. 2. Аппроксимация накопления Eu-154 в P0 PC

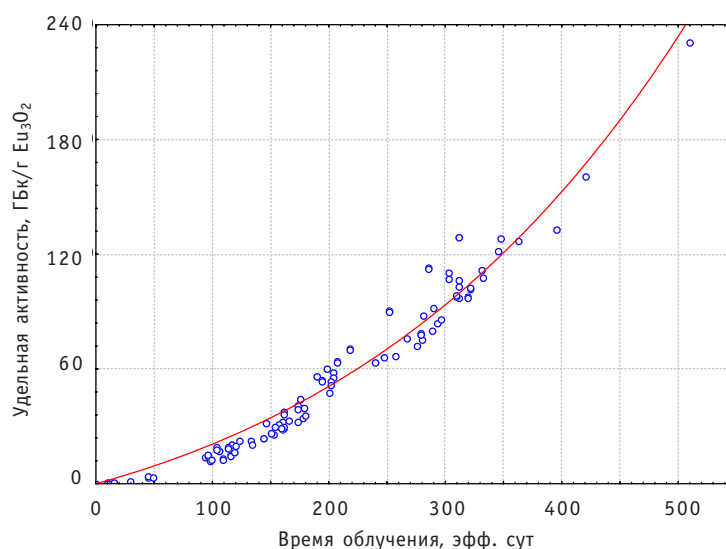


Рис. 3. Аппроксимация накопления Eu-155 в P0 PC

го радионуклида.

На рис. 1–3 изображены аппроксимирующие кривые, наложенные на данные по накоплению радиоизотопов европия в регулирующих стержнях (P0 PC). Необходимо отметить, что формула (2) наиболее точно соответствует данным для P0 PC. Это объясняется тем, что данные стержни облучаются всегда в очень близких условиях – при максимуме плотности потока нейтронов активной зоны (что соответствует максимальной эффективности стержня).

Аппроксимация накопления активности радионуклидов европия во всех регулирующих стержнях (P0 KC) формулой (2) имеет тот недостаток, что P0 KC (в зависимости от необходимости) могут облучаться в разных микрокампаниях в различных режимах:

- неподвижно в верхнем рабочем положении;
- неподвижно в максимуме потока;

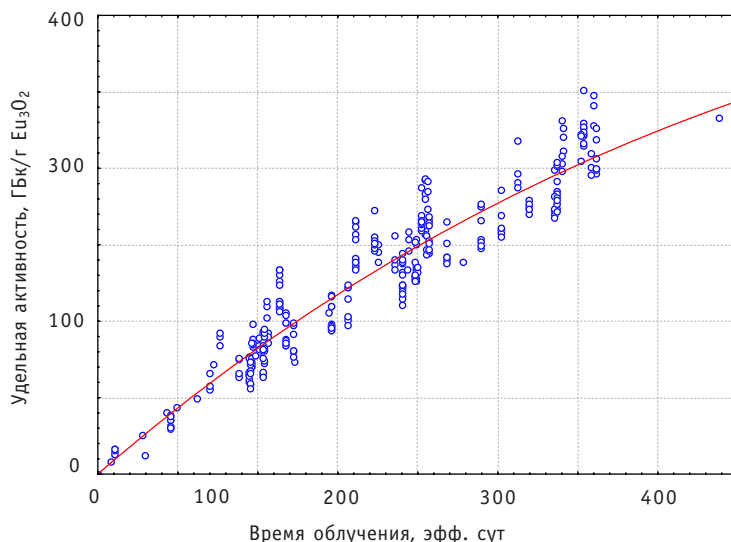


Рис. 4. Аппроксимация накопления Eu-152 в РО КС1–18

- в движении вместе с РО КС1–6.

При работе в режимах 1 и 2 условия облучения КСЦ существенно отличаются от остальных РО РС. При исключении из выборки всех регулирующих стержней, облучавшихся в ячейке 17–17 (КСЦ), были получены удовлетворительные результаты соответствия с формулой (2). Для примера на рис. 4 изображены данные по накоплению Eu-152 в РО РС 1–18 и их аппроксимация формулой (2).

В табл. 1 представлены эмпирические коэффициенты формулы (2) для РО РС и РО КС1–18. Там же приведены коэффициенты корреляции между данными по накоплению изотопов европия и результатами, полученными по формуле (2). Как видно из табл. 1, коэффициенты корреляции близки к единице (разброс 0,94–0,993), т.е. полученная зависимость описывает процесс накопления радионуклидов европия в стержнях СУЗ реактора БН-600 достаточно хорошо.

Таблица 1

**Результаты аппроксимации накопления удельной активности долгоживущих радионуклидов европия формулой (2) для РО РС и РО КС**

Изотоп	Коэффициенты	Группа стержней	
		РО РС	РО КС1–18
Eu-152	$k_1, \text{ГБк} \cdot \text{гEu}_2\text{O}_3^{-1} \cdot \text{эфф.сут}^{-1}$	1,341	0,910
	$k_2, \text{эфф.сут}^{-1}$	0,00118	0,00100
	Коэффициент корреляции	0,993	0,955
Eu-154	$k_1, \text{ГБк} \cdot \text{гEu}_2\text{O}_3^{-1} \cdot \text{эфф.сут}^{-1}$	2,15	1,47
	$k_2, \text{эфф.сут}^{-1}$	0,000793	0,000706
	Коэффициент корреляции	0,991	0,953
Eu-155	$k_1, \text{ГБк} \cdot \text{гEu}_2\text{O}_3^{-1} \cdot \text{эфф.сут}^{-1}$	0,170	0,0624
	$k_2, \text{эфф.сут}^{-1}$	–0,00203	–0,00350
	Коэффициент корреляции	0,977	0,940

### ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ЕВРОПЕЙСКИХ РО СУЗ

Мощность остаточного тепловыделения отработавших европейских РО СУЗ можно определить по формуле

$$N_{\text{ост}} = \sum_i b_i \cdot A_i, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $A_i$  – полная активность отдельного изотопа, ТБк;  $b_i$  – коэффициент перевода для изотопа, Вт/ТБк.

При расчетах полной мощности остаточного тепловыделения, создаваемой отработавшим европейским РО СУЗ в большом объеме (расчет тепловыделения в бассейне выдержки, защитных контейнерах и т.д.), коэффициенты  $b_i$  численно равны полному выходу энергии поглощаемых излучений при распаде ТБк данного изотопа.

При расчетах остаточного тепловыделения в самом стержне во время нахождения его в газовой среде (зависание в газовой среде при транспортных операциях, разделка в «защитной камере» и т.д.)  $b_i$  корректируется на величину средней вероятности для энергии излучения данного нуклида поглотиться в стержне. Эта вероятность (при отсутствии учета переноса энергии по высоте стержня) зависит только от радионуклида и конструкции стержня.

В расчете мощности остаточного энерговыделения использована 10-групповая система констант для  $\gamma$ -квантов [3]. Расчет проводился методом лучевого анализа в плоской цилиндрической геометрии без учета переноса энергии по высоте [3]. Для упрощения учета вклада  $\beta$ -излучения оно выделено в нулевую группу, при этом считается, что вся энергия этой группы поглощается в зоне излучения. В расчетах использованы табличные факторы накопления поглощенной энергии от точечного источника в бесконечной среде [4], т.к. увеличение фактора вследствие протяженности источника компенсируется уменьшением фактора из-за барьерности защиты [3].

Были проведены расчеты для конструкций РО СУЗ и загрузки материалов, взятых из технических условий на стержни. Полученные в результате расчетов коэффициенты  $b_i$  объединены в табл. 2.

Таблица 2

**Коэффициенты зависимости мощности остаточного тепловыделения в одиночном РО СУЗ в газовой среде от активности радионуклидов европия, накопленных в стержне**

Группа стержней	Изотоп	Коэффициенты $b_i$ формулы (3), Вт/ТБк
РО КС (компенсирующие стержни)	Eu-152	0,114
	Eu-154	0,142
	Eu-155	0,018
РО РС (регулирующие стержни)	Eu-152	0,096
	Eu-154	0,122
	Eu-155	0,017

В заключение можно добавить, что приведенные выше формулы можно применять для оценки физических характеристик европиевых РО СУЗ не только реактора БН-600, но и других быстрых реакторов (в том числе проектируемых). Для этого потребуется провести несколько представительных расчетов характеристик европиевых стержней такого реактора и на их основе скорректировать коэффициенты в эмпирических формулах.

### **Литература**

1. Чернов И.А., Широковских И.А. Расчет изменения изотопного состава органов СУЗ реактора БН600. – Сб. «Физика и теплофизика реактора БН-600», УрО РАН, Екатеринбург, 1994.
2. Альперович М.Н., Григорьева Н.М., Сысоева О.В., Селезнев Е.Ф., Яблоков С.Л. Аннотация комплекса программ ГЕФЕСТ//ВАНТ. Сер. «Физика ядерных реакторов». – М.: РНЦКИ. – 1994. – Вып. 4. – С. 36-43.
3. Веселкин А.П., Егоров Ю.А. и др. Инженерный расчет защиты атомных станций. – М.: Атомиздат, 1976.
4. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1982.

Поступила в редакцию 30.03.2009

*(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.*

For nearly 30-year history of the Beloyarsk NPP BN600 reactor operation a complex of the calculational and experimental measures to monitor the neutron characteristics of the reactor core has been worked through. Nevertheless undoubtedly the development of the acceptable methods of the monitoring of neutron characteristics is an important task for ensuring the reliable and safe operation of the BN600 reactor.

This paper presents the rationale of the additional method of the determination of the anticipated position of shimrod KS1-18 under the critical conditions after reload of the core components on the basis of the experimental data for the period from cycle 39 to cycle 56. In combination with the existing method the above-mentioned method allows one to reliably determine the position of shimrod KS1-18 under the critical conditions, improve safety and efficiency of the BN600 reactor operation.

#### **УДК 621.039.56**

*Determination of the worth of the Beloyarsk NPP BN600 reactor control rods taking into account the power reactivity effect/A.A. Ivanov, S.Yu. Mitrofanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 3 titles.*

The article presents both the results of the determination of the worth of the control rods taking into account the power reactivity effect as of the beginning of cycle 56 and the influence of the power reactivity effect on the integral characterization of the bank of the shimrod rods.

#### **УДК 621.039.56**

*Use of the Pulse Circuit of the Reactivity Monitoring during the Beloyarsk NPP BN-600 Reactor Neutron Measurements/A.A. Ivanov, S.Yu. Mitrofanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 3 titles.*

The article presents both the procedure of introducing the dead time correction for fulfilment of the neutron measurements and the results of the determination of the control rod worth using the pulse circuit of the reactivity monitoring.

#### **УДК 621.039.526: 621.039.51**

*Simplified Methodology of the Calculation of the Physical Characteristics of the Irradiated BN-600 Reactor Europium Control Rods/A.I. Karpenko, V.I. Ogleznev, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 4 titles.*

On the basis of the experience of the calculation of the physical characteristics of the spent control rods with the europium absorbers of the BN600 reactor the simplified methodology for the quick evaluation of the main characteristics of these rods has been developed. This methodology can be applied for the evaluation of the physical characteristics of the europium control rods not only of the BN600 reactor but also other fast reactors (including those under design).

#### **УДК 621.039.564**

*The System of the Recording of the Position of the Control Rods without the use of the Selsyns/N.N. Oshkanov, O.A. Potapov, Yu.V. Nosov, M.T. Telichko, A.P. Yuzhakov, I.S. Pomortsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 1 title.*

The design of the system of the recording of the control rod position without use of the selsyns, its technical characteristics as well as the monitoring of the system operation are presented. The accuracy of the measurements is evaluated. The forms and ways of the presentation of the information on the control rod positions are shown. The results of the trial operation for two years show the possibility to use the existing modification of the system.