

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ПЛУТОНИЯ В ТВЭЛЕ РЕАКТОРА БН-800

М.И. Стасевич*, Е.В. Скачков, В.В. Кадилин***

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*

***ОАО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации», г. Москва*



Нахождение массы плутония по длине твэла реактора БН-800 производится путем последовательного измерения излучения из фрагментов твэла длиной 10 мм. Смоделирован метод определения массы плутония в фрагменте твэла реактора БН-800, основанный на измерении собственного излучения гранулированного МОКС-топлива. Проведены исследования по влиянию наличия геттера (добавка в виде металлического урана), колебания внутреннего радиуса и толщины оболочки твэла на определение массы плутония.

Ключевые слова: гранулированное МОКС-топливо, геттер, твэл, равномерность, плутоний, контроль.

Key words: granular MOX fuel, getter, fuel pin, uniformity, plutonium, control.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется строительство реакторной установки (РУ) БН-800 на Белоярской атомной электростанции (АЭС). Начальная загрузка РУ БН-800 будет частично состоять из тепловыделяющих сборок с гранулированным МОКС-топливом.

При производстве гранулированного МОКС-топлива должен производиться контроль распределения плотности плутония и геттера по длине твэла. В процессе контроля в каждом фрагменте твэла длиной 10 мм определяются плотность топлива, массы плутония и геттера.

В статье описаны исследования распределения плутония по длине твэла, показано влияние содержания геттера, колебания внутреннего радиуса и толщины оболочки твэла на контроль распределения плутония.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Объектом контроля является твэл реактора БН-800, который изготовлен по технологии виброуплотнения гранулированного топлива. Топливо состоит из гомогенной смеси диоксидов урана и плутония с добавкой металлического урана в качестве геттера.

Твэл имеет следующие основные характеристики [1]:

- общая длина твэла – 2 400 мм;
- диаметр твэльной трубки из нержавеющей стали – 6.90 ± 0.05 мм, толщина – 0.40 ± 0.03 мм;

© М.И. Стасевич, Е.В. Скачков, В.В. Кадилин, 2012

- длина топливного столба – 1 030 мм;

Гранулы топлива (пять фракций) и геттера имеют следующие размеры [2]: фракция Ф1 – от 0.63 до 1.00 мм; фракция Ф2 – от 0.40 до 0.63 мм; фракция Ф3 – от 0.25 до 0.40 мм; фракция Ф4 – от 0.10 до 0.25 мм; фракция Ф5 – до 0.10 мм; геттер – от 0.02 до 0.10 мм.

«Свежее» топливо имеет следующий элементный состав [2]:

- массовая доля изотопов плутония может меняться от 15.6 до 21.6% (в разных твэлах);
- изотопный состав плутония может быть различным;
- пикнометрическая плотность вещества гранул геттера 19.8 г/см³
- пикнометрическая плотность вещества гранул топлива 10.7–10.8 г/см³.

Содержание геттера в виброуплотненном топливе от 3 до 10% [1].

Массовый коэффициент ослабления гамма-излучения для материала МОКС-топлива определяется выражением

$$\mu = \mu_U (\alpha_M (1 - c_{Pu}) (1 - c_{ret}) + c_{ret}) + \mu_{Pu} \alpha_M c_{Pu} (1 - c_{ret}) + \mu_O (1 - \alpha_M) (1 - c_{ret}),$$

где μ_U , μ_{Pu} , μ_O – массовые коэффициенты ослабления для урана, плутония и кислорода соответственно; α_M – содержание металла в диоксиде; c_{ret} – содержание геттера в топливе; c_{Pu} – содержание плутония в топливе.

Изменения массового коэффициента ослабления при указанных вариациях состава топлива для энергий 400 кэВ показывают, что увеличение

- содержания геттера с 3 до 10% приводит к росту массового коэффициента ослабления на 0.52%;
- массовой доли изотопов плутония с 15.6 до 21.6% приводит к увеличению массового коэффициента ослабления на 0.28%.

Состав гамма-излучения топлива приведен на рис. 1, данные рассчитаны для условия равновесия ²⁴¹Pu – ²³⁷U, ²³⁸U – ²³⁴Pa [3].

В спектре собственного излучения топлива (см. рис. 1) в области энергий от 300 до 450 кэВ выделяются две группы линий с энергиями около 330 и 370 кэВ и линия плутония-239 с энергией 413 кэВ. В группах присутствуют линии плутония-239, урана-237 (продукт распада плутония-241) и америция-241; по интенсивности данных групп и линии 413 кэВ возможно определять массу плутония, находящегося в контролируемом фрагменте твэла.

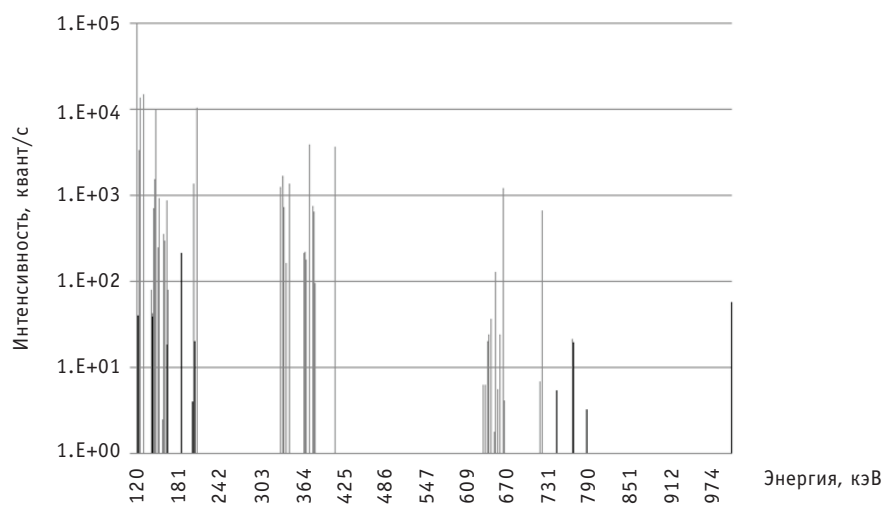


Рис. 1. Выход гамма-излучения плутония, урана и америция: ———— – плутоний и америций; ————— – уран

В случае использования широко применяемого детектора на основе NaI с энергетическим разрешением порядка 10% (данный детектор практически не разрешает вышеупомянутые энергетические группы и линию 413 кэВ) необходимо выделять энергетическое окно от 300 до 450 кэВ и учитывать влияние гамма-излучения урана-237 и америция-241 на определение массы плутония. При использовании детектора на основе LaBr₃(Ce) с энергетическим разрешением около 3% возможно определение массы плутония по линии 413 кэВ, однако в этом случае произойдет уменьшение числа зарегистрированных гамма-квантов, что приведет к увеличению статистической погрешности и дополнительному времени измерения.

В работе [4] рассмотрен метод определения массы плутония в твэлах с таблеточным МОКС-топливом реакторов FBTR и PFBR. Для определения массы плутония выделялось энергетическое окно от 300 до 450 кэВ, по числу зарегистрированных гамма-квантов в выделенном окне определялась масса плутония. В работе представлены зависимости содержания плутония от количества зарегистрированных гамма-квантов. Данные зависимости носят линейный характер. Погрешность определения содержания плутония составляет 0.8% для твэлов реактора FBTR с диапазоном содержания плутония от 43–45% и 0.3% для твэлов реактора PFBR с диапазоном содержания 19.5–23%. Указанные погрешности получены в предположении постоянства плотности топлива, внутреннего радиуса оболочки твэла, толщины оболочки твэла, а также отсутствия добавок (геттер); все эти факторы будут дополнительно влиять на определение массы плутония и увеличивать погрешность ее определения.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА

Собственное гамма-излучение гранулированного топлива рассчитывалось численным интегрированием излучения объемного источника с самопоглощением.

В модели форма входного окна коллиматора детектора – круг радиусом 5 мм. Плоскость входного окна размещена на расстоянии 10 мм от оси твэла. Зона контроля – 10 мм по длине твэла, внешний радиус твэла $6,90 \pm 0,05$ мм, толщина – 0.40 ± 0.04 мм. Вещество стенок – сталь (железо). Содержание плутония (сумма всех изотопов) – 15%. Соотношение в смеси изотопов плутония $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu} = 0.13/91.72/6.55/1.17/0.43$ (%), содержание америция ^{241}Am – 0,3%, ^{235}U – 0,7%. Предполагалось, что ^{241}Pu находится в равновесии с ^{237}U , а ^{238}U с ^{234}Pa .

Основные результаты получены численным интегрированием выхода излучения из объемного источника в виде цилиндра (длительность расчетов для одного набора параметров до 10 мин на компьютере Pentium 4). Предварительно часть данных расчетов была подтверждена результатами моделирования методом Монте-Карло.

Результатом численного интегрирования является число не рассеянных веществом виброуплотненного топлива и оболочкой твэла гамма-квантов, пересекающих плоскость входного окна коллиматора.

Для простоты расчетов энергия гамма-квантов, образующихся в топливе, устанавливалась на уровне 400 кэВ (линия плутония-239 имеет энергию 413 кэВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Число зарегистрированных гамма-квантов в единицу времени M можно представить как произведение полного числа гамма-квантов, выходящих в единицу времени из контролируемого объема M_0 без поглощения, на коэффициент самопоглощения G , зависящий от плотности топлива ρ , содержания геттера c , толщины d и внутреннего радиуса r_T оболочки твэла:

$$M = M_0 \cdot G(\rho, r_T, c, d). \quad (1)$$

Значение M_0 определяется выражением

$$M_0 = m_{Pu} \cdot c_i \cdot n_i, \quad (2)$$

где i – номер нуклида; c_i – доля i -го нуклида в смеси нуклидов плутония; n_i – выход гамма-излучения с энергией E из 1 г i -го нуклида ($\text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$).

Значение m_{Pu} определяется выражением

$$m_{Pu} = \pi \cdot \rho \cdot l \cdot r_T^2 \cdot (1-c) \cdot 0,8815 \cdot c_{Pu}, \quad (3)$$

где l – длина фрагмента твэла; 0,8815 – содержание металла в оксиде.

Численным интегрированием были рассчитаны значения функции самопоглощения $G(\rho, r_T, c, d)$ для энергии гамма-квантов 400 кэВ и при следующих исходных значениях: ρ – 7, 8, 9, 10, 11 и 12 г/см³; r_T – 0.300, 0.305 и 0.310 см; c – 0, 0.05 и 0.10%; d – 0.036, 0.040 и 0.044 см.

Методом наименьших квадратов рассчитанные значения функции $G(\rho, r_T, c, d)$ были аппроксимированы функцией

$$\begin{aligned} G(\rho, r_T, c, d) &= F1(\rho) \cdot F2(\rho, r_T) \cdot F3(\rho, c) \cdot F4(D) = \\ &= (\alpha_1 + \alpha_2 \rho + \alpha_3 \rho^2) \cdot ((\beta_1 + \beta_2 \rho + \beta_3 \rho^2) + (\beta_4 + \beta_5 \rho + \beta_6 \rho^2) r_T) \times \\ &\quad \times (1 - (\gamma_1 + \gamma_2 \rho + \gamma_3 \rho^2) c) \cdot e^{-\mu_0 \rho_0 (d-0,04) \delta}, \end{aligned} \quad (4)$$

где α_i , β_i , γ_i и δ – коэффициенты; μ_0 – массовый коэффициент поглощения материала оболочки твэла; ρ_0 – плотность материала оболочки твэла.

Анализ рассчитанных значений функции $G(\rho, r_T, c, d)$ показывает, что член $F3(\rho, c) = 1 - (\gamma_1 + \gamma_2 \rho + \gamma_3 \rho^2) c$ слабо меняется от содержания геттера и плотности топлива в рассматриваемых интервалах (рис. 2). Данный член функции был усреднен по c и ρ .

В итоге получилась функция

$$\begin{aligned} G(\rho, r_T, c, d) &= F1(\rho) \cdot F2(\rho, r_T) \cdot F3(\rho, c) \cdot F4(D) = \\ &= (\alpha_1 + \alpha_2 \rho + \alpha_3 \rho^2) \cdot ((\beta_1 + \beta_2 \rho + \beta_3 \rho^2) + (\beta_4 + \beta_5 \rho + \beta_6 \rho^2) r_T) \cdot \varepsilon \cdot e^{-\mu_0 \rho_0 (d-0,04) \delta}, \end{aligned}$$

где ε – усредненное значение функции $F3(\rho, c)$ по c и ρ .

Подставляя (5) и (2) в уравнение (1), рассчитали значения массы плутония и погрешность ее определения для различных значений плотности, содержания геттера и внутреннего радиуса оболочки твэла. Максимальная погрешность определения массы плутония по рассматриваемой модели составляет 0.3%.

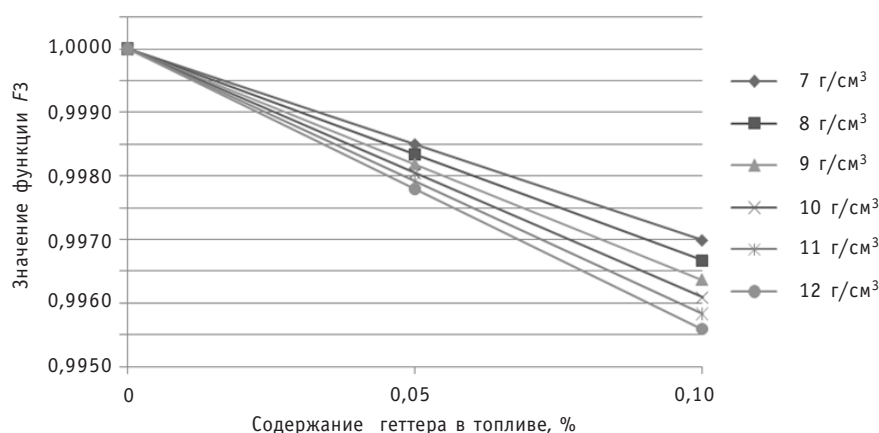


Рис. 2. Зависимость функции $F3(\rho, c)$ от содержания геттера и плотности топлива

Выразив формулы (3) с через m_{Pu} , рассчитали значения содержания геттера и погрешность его определения. Максимальное значение погрешности по рассматриваемой модели составляет 1.9%.

Если не учитывать влияние содержания геттера, колебания внутреннего радиуса и толщины оболочки твэла, погрешности определения массы плутония и содержания геттера составят не менее 3%.

Генератором случайных чисел были разыграны значения количества зарегистрированных гамма-квантов за время t . По полученным значениям вычислялись масса плутония и погрешность (статистическая) ее вычисления. Для определения массы плутония с погрешностью (статистическая) не более 1% время измерения должно составлять не менее 27 с, не более 0.5% – 107 с.

ВЫВОДЫ

Измерение массы плутония по длине твэла реактора БН-800 производится путем последовательного измерения излучения из фрагментов твэла длиной 10 мм; в результате измерений в каждом фрагменте твэла определяется масса плутония. В рамках данной работы математическим моделированием рассмотрен метод определения массы плутония, основанный на измерении собственного излучения гранулированного МОКС-топлива. Проведены исследования по влиянию содержания геттера, изменения внутреннего радиуса и толщины оболочки твэла на определение массы плутония.

Для измерения массы плутония с погрешностью не более 0.5% необходимо учитывать размеры внешнего радиуса и толщины оболочки твэла.

Погрешность измерения массы плутония без учета колебаний толщины и внутреннего радиуса оболочки твэла составит не менее 3%.

Минимально возможное время измерения количества гамма-квантов, выходящих из фрагмента твэла, для определения массы плутония с погрешностью (статистическая) не более 1% составляет 27 с, с погрешностью не более 0.5% – 107 с. Данные рассчитаны для одного детектора с входным окном в виде окружности радиусом 5 мм. При использовании одновременно нескольких датчиков, увеличении входного окна детектора и уменьшении расстояния от оси твэла до плоскости детектора возможно сокращение времени измерения.

Литература

1. Gratchyov A.F., Skiba O.V., Tsykanov V.A. Demonstration Experiment of 3 BN-600 MOX Vibropac FAs Irradiation for the Excess Weapons Plutonium Disposal//Journal of Nuclear Science and Technology. 2007. Vol. 44. № 3. p. 504-510.
2. Mayorshin A.A., Gadzhiev G.I., Kisly V.A. Development of vibropac Mox fuel pins serviceable up tp superhigh burnups. http://www.iaea.org/inis/nkm/nkm/aws/fnss/abstracts/abst_29057154.html
3. Сэмсон Т.Е. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. ВНИИА им. Н.Л. Духова, 1999. – С. 217-262.
4. Vrindadevi K.V., Soreng T., Mukherjee D., Panakkal J.P., Kamath H.S. Nondestructive determination of PuO₂ content in MOX fuel pins for fast reactors using Passive Gamma Scanning //Journal of Nuclear Materials. – 2010. – V. 399. – P. 122-127.

Поступила в редакцию 8.08.2011

УДК 623.454.86

Integrated Approach to Proliferation Risk Assessment Based on Multiple Objective Analysis Framework \A.A. Andrianov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 4 tables, 6 illustrations. – References, 7 titles.

The approach to the assessment of proliferation risk using the methods of multi-criteria decision making and multi-objective optimization are presented. The approach allows taking into account the specific features of the national nuclear infrastructure, and possible proliferator strategies (motivations, intentions, and capabilities). Simple examples of applying the approach are shown.

УДК 621.039.543.4

On the Issues of Uranium Reprocessed from High Burnup Fuels \A.I. Dyachenko, N.A. Balagurov, V.V. Artisyuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 6 illustrations. – References, 13 titles.

The present paper focuses on analysis of nuclide composition in spent fuel of VVER-1000 from the view point of uranium reprocessing. The consideration is given to even uranium isotopes compensation, savings of separate work units, associated saving of uranium resources and economics.

УДК 621.039.84

Control Uniform Distribution of Plutonium by Fuel Pin Length BN-800 \M.I. Stasevich, E.V. Skachkov, V.V. Kadilin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 4 titles.

In this paper, was considered a method of determining the mass of plutonium and getter (additive in the form of uranium metal) in a fragment of a fuel pin reactor BN-800 10 mm by mathematical modeling, the method based on measuring the intrinsic emission of granulated MOX fuel. There were researched the influence of the presence of a getter, the vibrations of the inner radius and thickness of the cladding, the determination of the mass of plutonium.

УДК 621.039.548

Residual Resource Estimation of the Fuel Pins Cover of Austenitic Stainless Steel ChS-68 of the Reactor BN-600 \K.V. Miturev, I.I. Konovalov, V.V. Popov, S.M. Ganina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 14 titles.

It have been done calculation of swelling austenitic stainless steel ЧС-68 and diameter profiles of fuel pins cladding from this steel, passed operation in an active zone of reactor BN-600, having reached the values of a damaging dose exceeding the regular in work. Comparison of calculations with the experimental data [1] received on irradiated fuel pins, has shown that at carrying out of calculations of a residual resource it is necessary to consider the ovality factor.

УДК 621.039.53

Computational Analysis and Estimation of LWR Cladding Radioactivity \A.V. Korzunin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.

Time evolution of specific radioactivity and gamma watts for four types of zirconium based structural materials light elements activation products were estimated. Some chemical elemental analysis was performed. The advantages of zirconium purification after irradiation were shown.

УДК 621.039.37

Training for Faculty Training and Retraining INPE NRNU MEPhI \V.V. Tkachenko, S.P. Saakyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages.

The history of the organization and formation of In-Services Training Department of the INPE NRNU MEPhI. The functioning of the faculty to train specialists for the nuclear industry of additional professional education programs. It is shown that the most popular are retraining programs in «Operation of Nuclear Power Plants», to maintain the skills of managers and specialists of NPP, as well as training in various areas of nuclear energy profile.