

## К ВОПРОСУ О МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫГОРАНИЯ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕГРУЗКИ

**С.Г. Олейник\*, О.В. Маслов\*\*, Л.Л. Кальнев \*\***

*\*ФГУП ЭНИЦ, г. Электрогорск*

*\*\* Одесский национальный политехнический университет, г.Одесса*



Рассматриваются вопросы метрологического обеспечения методики контроля выгорания отработавшего ядерного топлива в реальном времени при проведении перегрузки. Особенность методики состоит в том, что для расчета выгорания не требуется предварительного знания начального обогащения и времени выдержки. Определены источники погрешности, этапы обработки информации, которые могут приводить к появлению дополнительной погрешности. Проведенный анализ позволил оценить погрешности определения выгорания и предложить способы снижения погрешности.

В соответствии с правилами безопасности консервативный подход по обоснованию ядерной безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на АЭС может быть снят при наличии контроля выгорания облученного ядерного топлива (ОЯТ) [1].

Использование системы контроля выгорания облученного ядерного топлива позволяет реально контролировать состояние ядерной безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива, и снижать финансовые затраты при обращении с ОЯТ. При этом снижение финансовых затрат обусловлено увеличением загрузки облученного ядерного топлива в действующее оборудование (контейнера сухого хранилища ОЯТ, транспортные контейнеры) или проектированием нового оборудования для ОЯТ без учета консервативного подхода при обосновании ядерной безопасности.

Совмещение контроля выгорания ОЯТ в реальном времени с транспортно-технологическими операциями (ТТО) позволит дополнительно увеличить эффективность эксплуатации АЭС за счет увеличения коэффициента использования установленной мощности. В настоящее время такие системы контроля выгорания ОЯТ в реальном времени при ТТО на АЭС отсутствуют. С учетом изложенного выше, можно сделать вывод о необходимости создания системы для контроля выгорания ОЯТ, позволяющей сократить время измерений, повысить безопасность и эффективность эксплуатации АЭС.

Для решения поставленной задачи нами предложено использовать измерения собственного гамма-излучения ТВС. Обоснование радиационных методов контроля

состояния ядерного топлива в реальном времени при проведении перегрузки приведено в [2]. Описание системы, реализующей измерения при проведении перегрузки, и ее основных элементов приведено в [3], а результаты измерений, проведенных на ЗАЭС при помощи прототипа системы, в [4]. Система содержит несколько измерительных каналов, включающих детектор и многоканальный амплитудный анализатор с сопутствующей электроникой.

На основании полученных результатов предложена методика контроля выгорания ОЯТ в реальном времени при проведении ТПО [5]. Особенность методики состоит в том, что для расчета выгорания не требуется предварительного знания начального обогащения и времени выдержки. Однако в изложении методики и в других публикациях, посвященных решению задачи контроля выгорания ОЯТ в реальном времени, в стороне остались вопросы метрологического обеспечения и анализа полученных результатов. Цель настоящей статьи – устранить указанный пробел.

Для дальнейшего рассмотрения коротко изложим суть методики. Методика состоит в следующей последовательности операций по измерениям и обработке полученных результатов:

- определение времени выдержки с использованием отношения измеренной интенсивности гамма-излучения в  $^{137}\text{Cs}$  к интегральной интенсивности гамма-излучения;
- оценочный расчет выгорания (BU) контролируемой облученной ТВС (ОТВС) по  $^{137}\text{Cs}$ , определение погрешности  $\Delta\text{BU}$  полученной величины выгорания;
- определение отношения интенсивностей гамма-излучения изотопов  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  к моменту останова реактора на основании полученного значения времени выдержки;
- оценка начального обогащения ТВС, на основании данных оценочного расчета выгорания контролируемой ОТВС и значения отношения интенсивности гамма-излучения изотопов  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ( $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$ ) на момент останова реактора;
- определение выгорания контролируемой ОТВС с использованием отношения интенсивности гамма-излучения изотопов  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и значения начального обогащения;
- определение погрешности DBU полученной величины выгорания контролируемой ОТВС.

Анализ методики позволяет определить источники погрешности, этапы обработки информации, которые могут приводить к появлению дополнительной погрешности. Такой анализ позволяет оценить погрешности определения выгорания и предпринять шаги к их снижению.

На практике во всех известных методиках (в том числе и описываемой для определения выгорания) используются эмпирические зависимости, полученные на основании результатов измерений на АЭС, при этом часть ТВС принимается в качестве образцовых. А для построения градуировочной зависимости используются расчетные данные о глубине выгорания. Расчет выгорания может проводиться с применением более сложных программных средств, которые в практике эксплуатации АЭС не используются. Процедура проведения измерений для построения градуировочных зависимостей соответствует стандартной процедуре измерения ТВС.

Таким образом были получены следующие основные зависимости, используемые при контроле выгорания ОЯТ в реальном времени:

- зависимость отношения измеренной интенсивности гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  к интегральной интенсивности гамма-излучения и времени выдержки ТВС;
- набор однотипных зависимостей отношения интенсивности гамма-излучения изотопов  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ( $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$ ) на момент останова реактора от выгорания для каждого значения начального обогащения ТВС;

• зависимость интенсивности гамма-излучения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  на момент останова реактора от выгорания для всех значений обогащения.

При таком подходе погрешность определения выгорания ОЯТ оценивается как корень квадратный из суммы квадратов результирующей систематической погрешности  $\Theta_w$  и случайной погрешности  $\Theta_{\text{случ}}$ :

$$\Theta_{\text{сум}} = \sqrt{\Theta_w^2 + \Theta_{\text{случ}}^2}. \quad (1)$$

Результирующая систематическая погрешность  $\Theta_w$  складывается из

- систематической погрешности расчетных данных глубины выгорания  $\Theta_w^{\text{расч}}$ ;
- систематической погрешности метода измерения  $\Theta_w^{\text{мет}}$ .

При этом  $\Theta_w^{\text{расч}} = 10\%$  согласно [6];  $\Theta_w^{\text{мет}} = 4\%$  (погрешность определения коэффициентов в эмпирических зависимостях, полученных экспериментально); тогда результирующая систематическая погрешность  $\Theta_w = 10,7\%$ .

Случайная погрешность измерения  $\Theta_{\text{случ}}$  обусловлена погрешностью измерения интенсивности гамма-излучения спектрометром.

Случайная погрешность измерения  $\Theta_{\text{случ}}$  складывается из

- случайной погрешности определения площади пиков  $\Theta_{\text{случ}}^{\text{пик}}$ ;
- случайной погрешности определения физических констант  $\Theta_{\text{случ}}^{\text{ф.к}}$ ;
- случайной погрешности градуировки  $\Theta_{\text{случ}}^{\text{град}}$ .

При этом  $\Theta_{\text{случ}}^{\text{пик}} = 6\%$  (согласно [7]) сильно зависит от времени выдержки ОТВС и различна для разных линий даже одного изотопа;  $\Theta_{\text{случ}}^{\text{ф.к}} = 2\%$  (согласно [8]);  $\Theta_{\text{случ}}^{\text{град}} = 8,7\%$  (согласно [7, 9]), тогда случайная погрешность  $\Theta_{\text{случ}} = 10,8\%$ .

Следовательно, погрешность определения выгорания ОЯТ  $\Theta_{\text{сум}} = 15,5\%$  при доверительной вероятности 0,95 и времени выдержки ОТВС более 2 лет.

Случайная погрешность измерения на АЭС составила:

- для линии 661 кэВ  $^{137}\text{Cs}$  в лучшем случае 8,8%, в большинстве случаев погрешность равна 9,2%;
- для линии 604 кэВ  $^{134}\text{Cs}$  в лучшем случае 10,6%, обычно она равна 11,8%;
- для суммы линий 796 и 802 кэВ  $^{134}\text{Cs}$  в лучшем случае 9,2%, обычно она равна 10,6 %.

Полученные результаты с нашей точки зрения не отвечают потребностям использования системы на АЭС. Простые отклонения очень малы и это создает ложное впечатление достаточно точных результатов. Однако если, в свою очередь, провести статистический анализ полученных отклонений, то можно получить полезную информацию об основных источниках ошибок.

Например, такой анализ показывает, что среднее значение отклонения определения времени выдержки после облучения очень незначительно. Но при этом можно рассмотреть в качестве случайной независимой переменной значение отклонения (ошибку) для каждого конкретного значения оценки времени выдержки от средней величины. Дисперсия распределения такой случайной величины достаточно велика. Это приводит к тому, что имеет место увеличение погрешности определения выгорания на основании отношений, т.к. при типичном времени выдержки (несколько лет) погрешность несколько процентов в определении выдержки приводит к большой погрешности для  $^{134}\text{Cs}$  с небольшим периодом полураспада, но при этом это в меньшей степени отражается на  $^{137}\text{Cs}$ . Анализ полученных эмпирических калибровочных зависимостей для отношений  $(I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs}))$  показал, что они практически совпадают с расчетными значениями, которые рассматриваются в [5, 8].

Необходимо учитывать, что указанные зависимости являются базовыми для расчета выгорания. Это позволяет сделать предположение о другом варианте анализа и

интерпретации результатов. Был предложен подход, который базируется на применении теории информации, например, для численной оценки результатов химико-аналитических исследований, оценки результатов моделирования в ходе анализа сложных систем [11].

На основании результатов, изложенных в [11] для статистической оценки гипотезы, что совокупность экспериментальных данных незначительно отличается от той, которая возможна при некотором теоретическом законе, может быть проведено испытание на соответствие при помощи параметра  $\chi^2$ . В методе  $\chi^2$  в качестве меры отклонения экспериментальных точек от ожидаемых значений принимается сумма квадратов отклонений от предполагаемой зависимости. При предлагаемом методе число степеней свободы определяется как  $(n-2)$ , где  $n$  – число измерений [12].

Процедура использования  $\chi^2$  такова:

1) выдвигается предположение о зависимости, связывающей выгорание и отношение активностей для каждого обогащения;

2) определяется значение  $\chi^2$  для каждой выборки (обогащение, статистическая погрешность, количество экспериментальных точек); при этом при расчете  $\chi^2$  используется разность между ожидаемым расчетным значением выгорания и экспериментальным;

3) сравнивается полученное значение  $\chi^2$  с нормируемым табличным значением для заданной доверительной вероятности (обычно берут 0,95); если полученное значение  $\chi^2$  меньше нормируемого, то можно говорить, что при данном уровне доверительной вероятности принятая к качеству гипотезы зависимость описывает экспериментальные данные;

4) процедура может быть проведена повторно после удаления «промахов» (явных ошибок); в качестве методики удаления явных ошибок используется критерий Стьюдента.

Такая трактовка анализа результатов измерений выгорания близка к предлагаемой в [13].

### **Литература**

1. ПНАЭ Г-14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики. – М.: ЦНИИатоминформ, 1992. – 33 с.
2. Маслов О.В., Максимов М.В., Олейник С.Г., Кальнев Л.Л. Система радиационно-технологического контроля отработавшего топлива реактора ВВЭР/В сб.: «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». II Междунар. науч.-технич. конф. (Москва, 22-23 марта 2001 г.). – С. 308.
3. Олейник С.Г., Маслов О.В., Максимов М.В. Анализ возможностей применения однотипных технических средств и методического обеспечения для контроля состояния ядерного топлива и ядерных материалов в реальном времени//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – № 1. – С. 87-97.
4. Маслов О.В., Олейник С.Г., Кальнев Л.Л., Савельев С.А. Определение глубины выгорания ядерного топлива в реальном времени при проведении перегрузки//Автоматика. Автоматизация. Электротехн. комплексы и системы. – 2000. – № 1(6). – С. 141-148.
5. Олейник С.Г., Максимов М.В., Маслов О.В. Методика определения выгорания отработавшего ядерного топлива в процессе перегрузки//Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – Вып. 4 – С. 268-272.
6. Пыткин Ю.Н., Андрушечко С.А., Васильев Б.Ю., Голощапов С.Н. Внедрение на Кольской АЭС прибора для измерения глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок/Тр. Рос. междунар. конф. по учету, контролю и физ. защите ядерн. материалов (Обнинск, 9-14 марта 1997 г.). – С. 637-645.
7. ГОСТ 26874-86 (СТ СЭВ 5053-85). Спектрометры энергией ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров.

8. Немытов С.А., Беспалов В.Н., Сомов И.Е. и др. Анализ безопасности при хранении ядерного топлива на АЭС/ В сб.: «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». II -ая межд. науч.-технич. конф. (Москва, 22-23 марта 2001г.). – С. 156-171.

9. Методические указания. Гамма-спектрометры с ППД. Методика поверки МИ 1916-88. – М., 1988.

10. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.

11. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука (пер. с англ.). – М.: Мир, 1978. – 418 с.

12. Жуковский А.Н., Пшеничный Г.А., Мейер А.В. Высокочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 220 с.

13. Райлли Дуглас, Энслин Норбрет, Смит Хэйстингс мл., Крайне Сара. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов: Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission. – Washington, DC, 1991 – NUREG/CR-5550 (пер. с англ.). – М.: ЗАО «Издательство Бином», 2000. – 720 с.

Поступила в редакцию 29.07.2005

in waste store. According to the accepted concept of the First NPP decommissioning waste store will localize for a long time - term conservation under monitoring.

#### **УДК 621.039.564**

*To a Question of Metrological Ensuring of Determination of Burnup of the Irradiated Nuclear Fuel an Overload* \S.G. Oleynik O. V. Maslov, L.L. Kalnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 5 pages. – References, 13 titles.

Questions of metrological ensuring of a procedure of the determination of burnup of the irradiated nuclear fuel in real time an overload are considered. Feature of a procedure consists in that, that for account of burnup is not required preliminary knowledge of initial enrichment and cooling time. Determined sources of inaccuracy, stages of information handling, which can bring about the appearance of additional inaccuracy. The carried out analysis has allowed to estimate inaccuracy value of determination of burnup and to offer ways of decrease of a inaccuracy.

#### **УДК 621.039.52**

*Closed and Insulated (on site) Fuel Cycle of Nonconventional Fast Reactor* \G.B. Usynin, A.A. Kravchenko, S.G. Usynina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages, 4 illustrations, 2 tables. – References, 7 titles.

The analysis of fuel cycle closed on site for pebbly bed fast reactor is carried out. The opportunities of deep burnout of slag-heap uranium are discussed. Two variants are considered: with the mixed U-Pu fuel composition and with separate accommodation of plutonium and uranium nitrides in different fuel elements. Conditions of achievement in the closed fuel cycle of zero balance of plutonium are shown.

#### **УДК 621.039.5**

*Experimental Investigations in the Substantiation of Application of Eutectic Li (17) Pb (83) in Blanket of Tokamak* \A.V. Beznosov, A.V. Semyonov, V.L. Constantinov, O.V. Baranova, S.A. Cuzminich; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 8 illustrations, 2 tables. – Reference, 2 titles.

The experimental data received at a substantiation of application of eutectic Li (17) Pb (83) in power contour of system of transformation by thermal energy blanket tokamak presented. Dependences of the electrophysical characteristic –  $\rho\delta$  electroinsulating coating from regime and other parameters are determined. Probes carried out on samples from an austenitic steel, over the range temperatures up to 500°C, the contents of an impurity of oxygen in coolant on a saturation line etc.

#### **УДК 621.039.52:615.849.1**

*Heavy Water Reactor Abilities in Neutron Therapy of Malignant Tumors* \Yu.A. Kurachenko, Yu.A. Kazansky, V.A. Levchenko, Eu.S. Matusevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 10 pages, 4 illustrations, 3 tables. – References, 13 titles.

Utilization possibility of the HWR neutron beams in neutron therapy was analyzed. Calculation series were performed in order to provide optimal beam channel arrangement and filter materials for desired beam output quality. It was stated that the HWR capacity of 50 MW is enough to ensure thermal neutron beam, suitable for neutron therapy.