

## Контроль выгорания отработавшего ядерного топлива ядерных реакторов при широком диапазоне значений выгорания и выдержки

Показана ограниченность области применимости существующих методик контроля глубины выгорания, которые основаны на пассивной нейтронной радиометрии и учитывают в качестве источника нейтронов в отработавших тепловыделяющих сборках (ОТВС) только  $^{244}\text{Cm}$ . При значениях глубины выгорания менее 15 МВт-сут/кг U и времени выдержки, которое выходит за рамки диапазона от 3 до 30 лет (как, например, для ОТВС Чернобыльской АЭС), такие методики неприменимы. Представлены концептуальные основы новой разработанной методики и ее алгоритм, которые при реализации в хранилище ядерного топлива Чернобыльской АЭС показали достаточно высокие результаты и могут применяться при любых значениях времени выдержки и значениях глубин выгорания.

Ключевые слова: ОТВС, выгорание, методика.

О. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. І. Одинокін

### Контроль выгорания отработавшего ядерного топлива ядерных реакторов у широкому діапазоні значень вигорання та витримки

Показано обмеженість області застосовності наявних методик контролю глибини вигорання, які засновані на пасивній нейтронній радіометрії та враховують як джерело нейтронів у відпрацьованих тепловидільних збірках (ВТВЗ) тільки  $^{244}\text{Cm}$ . Якщо значення глибини вигорання менші за 15 МВт-добу/кг U і час витримки виходить за рамки діапазону від 3 до 30 років (як, наприклад, для ВТВЗ Чернобыльської АЕС), такі методики непридатні. Наведено концептуальні основи нової розробленої методики та її алгоритм, які реалізовано у сховищі ядерного палива Чернобыльської АЕС, показали досить високі результати та можуть застосовуватися практично за будь-яких значень часу витримки та значень глибини вигорання.

Ключові слова: ВТВЗ, вигорання, методика.

© А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокин, 2014

Необходимость контроля глубины выгорания при загрузке отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в хранилище отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ) определена в [1], а целесообразность использования при этом нейтронной радиометрии рассмотрена и обоснована в ряде научно-технических работ (см., например, [2, 3, 4]).

В существующих методиках контроля глубины выгорания (далее — контроль выгорания), основанных на методе пассивной нейтронной радиометрии, предполагается, что подавляющий вклад в общий выход нейтронов ОТВС дает один нуклид —  $^{244}\text{Cm}$ . При этом все временные эволюции характеристик отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) — суммарный выход нейтронов, плотность потока нейтронов в месте положения детектора нейтронов измерительного канала (ИК), а также измеряемая техническими средствами установки скорость счета нейтронов (ССН), как информационная характеристика метода пассивной нейтронной радиометрии, — определяются только по закону радиоактивного распада  $^{244}\text{Cm}$ . Подобные методики дают хорошие результаты только при условии выдержки ОЯТ в диапазоне от 3 до 30 лет и значениях выгорания не менее 15 МВт-сут/кг [2]. При таких диапазонах значений выгорания и выдержки подавляющий вклад в суммарный выход нейтронов от ОТВС (более 95 %) дает только один нуклид —  $^{244}\text{Cm}$ . Вклад же остальных нуклидов — источников нейтронов — либо не учитывается вовсе, либо учитывается через поправки, определяемые, как правило, эмпирическими методами. Такая методика реализована, в частности, при загрузке ОТВС в СХОЯТ Запорожской АЭС [3] и на Кольской АЭС [5].

В общем случае значения выдержки и глубины выгорания топлива могут выходить за рамки указанных диапазонов. Поэтому необходима методика контроля выгорания ОЯТ, учитывающая вклад и других нуклидов — источников нейтронов. Подробный анализ вкладов в суммарный выход нейтронов от отдельных нуклидов и обоснование целесообразности ограничения их состава приведены в [6]. Там же определен оптимальный перечень рекомендованных для рассмотрения при контроле выгорания нуклидов:  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{241}\text{Am}$  (при больших выдержках нужна информация о массовой доле  $^{241}\text{Pu}$ , являющегося материнским нуклидом в процессе накопления  $^{241}\text{Am}$ ).

Необходимость учета нейтронной активности нескольких нуклидов усложняет задачу контроля выгорания (в рамках данной статьи под термином «контроль» понимается процесс установления соответствия между измеренными значениями параметра наблюдаемого объекта, в нашем случае — ССН, и заранее заданной допустимой областью его значений). Дело в том, что измеренная при контроле выгорания ССН соответствует суммарному выходу всех источников нейтронов контролируемой ОТВС в момент ее измерения. Априори принимается неизвестность для измеряемой ОТВС массовых долей нейтронно-излучающих нуклидов, поэтому и корректировка (пересчет) ССН на другие моменты времени при данном предположении для контролируемой ОТВС не представляется возможной (в указанных выше методиках задача корректировки ССН решается просто — измеренная ССН пересчитывается на заданный момент времени по закону  $\alpha$ -распада  $^{244}\text{Cm}$ ).

Таким образом, при значениях выгорания и выдержки, выходящих за рамки указанных диапазонов, для решения задачи контроля выгорания требуется, как минимум, значительная корректировка существующих методик,

основанных на принципе пассивной нейтронной радиометрии, что приводит к необходимости разработки практически новых алгоритмов, их реализующих. Решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

Основой методики контроля выгорания является определение соответствия ССН выгоранию ядерного топлива контролируемой ОТВС и подтверждение либо опровержение (по определенному критерию) расчетной величины выгорания, полученной путем моделирования топливной кампании реактора. Критерием соответствия является попадание измеренного значения ССН контролируемой ОТВС в доверительный интервал калибровочной кривой, представляющей собой рассчитанную функциональную зависимость ССН от выгорания. Границы указанного доверительного интервала определяются как границы доверительной области калибровочной кривой в точке, соответствующей расчетному значению выгорания контролируемой ОТВС. Калибровочная кривая и ее доверительная область строятся на основании массивов данных как по рассчитанным значениям выгорания ранее прошедших контроль ОТВС, так и по результатам их измерений (ССН). При построении калибровочной кривой должны быть использованы данные по ОТВС с одинаковым начальным обогащением, а все значения ССН — приведены к одному и тому же времени выдержки. Как указывалось выше, пересчет ССН контролируемой ОТВС на другое (не ее) время выдержки при неизвестности массовых долей нейтронно-излучающих нуклидов не представляется возможным. Поэтому все значения ССН от используемых для построения калибровочной кривой ОТВС приводятся, в предлагаемой методике, ко времени выдержки контролируемой ОТВС на момент ее измерения. Однако непосредственный пересчет ССН на другое время также невозможен, так как ССН не может быть выражена как функция времени даже при известной информации о массовых долях нейтронно-излучающих нуклидов соответствующей ОТВС. Тем не менее, ССН может быть приведена к требуемому моменту времени опосредованно как функция суммарного выхода нейтронов в единицу времени.

Таким образом, калибровочная кривая и ее доверительная область строятся индивидуально для каждой контролируемой ОТВС. Отметим, что в существующих методиках, в частности, реализованной на ЗАЭС, калибровочная кривая и ее доверительная область носят универсальный характер для всех однотипных ОТВС (в том числе и для контролируемой) с одним и тем же начальным обогащением, а ССН от каждой ОТВС пересчитывается на одно и то же время выдержки по закону распада только одного изотопа  $^{244}\text{Cm}$ . Именно необходимость пересчета всех ранее измеренных ССН на время выдержки контролируемой ОТВС к моменту ее измерения в рассматриваемой методике влечет за собой необходимость построения калибровочной кривой индивидуально для каждой контролируемой ОТВС.

В реальных условиях измеряемая техническими средствами ССН зависит от многих факторов: плотности потока нейтронов (ППН) в области расположения блока детектирования ИК, их спектральной плотности, чувствительности ИК (в том числе и спектральной) и т. д. Кроме того, на число зарегистрированных ИК нейтронов, поступивших непосредственно от контролируемого источника, может накладываться и регистрация фоновых нейтронов, обусловленная как диффузионным характером движения нейтронов (в том числе и от посторонних источников), так

и их отражением от различных конструкций, стен, окружающих область детектирования. Учесть все эти факторы при аналитическом определении функциональной зависимости ССН от суммарного выхода нейтронов в единицу времени практически невозможно. Решение подобной задачи в общем случае возможно только моделированием конкретных условий с использованием разработанных специально для этих целей программ. Однако при контроле выгорания можно предположить функциональную зависимость зарегистрированных детектором нейтронов от суммарного выхода нейтронов ОТВС при одних и тех же условиях измерения (геометрии измерений, включая взаимное положение блока детектирования и источника, наличие утеплителя, его конфигурацию и пр.). Аналитический вид этой функциональной зависимости определяется путем статистической обработки массива данных о ССН и суммарных выходах нейтронов прошедших испытания ОТВС. Суммарные выходы нейтронов определяются в предположении известного массового состава нуклидов в соответствующей ОТВС с использованием данных об удельном выходе нейтронов как при спонтанном делении нуклида, так и при  $(\alpha, n)$ -реакциях на кислороде оксидного топлива за счет его  $\alpha$ -распада.

Данные об удельном выходе нейтронов от отдельных нуклидов широко представлены в справочной научно-технической литературе. В табл. 1 приведены такие данные, взятые из [7] (в скобках даны соответствующие периоды полураспадов).

Таблица 1. Выход нейтронов наиболее активных нейтронно-излучающих нуклидов

Нуклид	Выход нейтронов		Суммарный выход нейтронов, $\text{с}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$
	спонтанное деление, $\text{с}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$ ( $T_{1/2(\text{сп})}$ , лет)	$(\alpha-n)$ -реакции, $\text{с}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$ ( $T_{1/2(\alpha)}$ , лет)	
$^{234}\text{U}$	5,02 ( $2,1\cdot 10^{16}$ )	$3\cdot 10^3$ ( $2,45\cdot 10^5$ )	$3\cdot 10^3$
$^{238}\text{U}$	13,6 ( $8,2\cdot 10^{15}$ )	$8,3\cdot 10^{-2}$ ( $4,47\cdot 10^9$ )	13,7
$^{238}\text{Pu}$	$2,59\cdot 10^6$ ( $4,77\cdot 10^{10}$ )	$1,34\cdot 10^7$ (87,74)	$1,6\cdot 10^7$
$^{239}\text{Pu}$	21,8 ( $5,48\cdot 10^{15}$ )	$3,81\cdot 10^4$ ( $2,41\cdot 10^4$ )	$3,81\cdot 10^4$
$^{240}\text{Pu}$	$1,02\cdot 10^6$ ( $1,16\cdot 10^{11}$ )	$1,41\cdot 10^5$ ( $6,56\cdot 10^3$ )	$1,17\cdot 10^6$
$^{241}\text{Pu}$	50 ( $2,5\cdot 10^{15}$ )	$1,3\cdot 10^3$ ( $5,9\cdot 10^5$ )	$1,35\cdot 10^3$
$^{242}\text{Pu}$	$1,72\cdot 10^6$ ( $6,84\cdot 10^{10}$ )	$2,0\cdot 10^3$ ( $3,76\cdot 10^5$ )	$1,72\cdot 10^6$
$^{241}\text{Am}$	$1,18\cdot 10^3$ ( $1,05\cdot 10^{14}$ )	$2,69\cdot 10^6$ ( $4,336\cdot 10^2$ )	$2,69\cdot 10^6$
$^{242}\text{Cm}$	$2,1\cdot 10^{10}$ ( $6,56\cdot 10^6$ )	$3,76\cdot 10^9$ (163 дня)	$2,38\cdot 10^{10}$
$^{244}\text{Cm}$	$1,08\cdot 10^{10}$ ( $1,35\cdot 10^7$ )	$7,73\cdot 10^7$ (18,1)	$1,09\cdot 10^{10}$

В [2] и [8] приведены формулы, определяющие изменения количества радиоактивных ядер со временем. Однако, во-первых, в этих формулах определяются значения числа ядер, в то время как нас интересуют массовые содержания нуклидов в ОТВС, во-вторых, в этих формулах учитывается только вид распада материнского нуклида, который непосредственно приводит к рождению дочернего нуклида, т. е. молчаливо подразумевается наличие только одного вида распада материнского нуклида, что не совсем корректно, поскольку, как правило, имеют место несколько видов распадов ( $\alpha$ - и  $\beta$ -распады, спонтанное деление) и, в-третьих, за исходный момент принимается

$t = 0$  (в нашем случае за исходные моменты принимаются значения  $t_i$  — время выдержки  $i$ -й ОТВС. Кроме того, в [2] приводится формула чистого накопления дочернего нуклида, т. е. не учитывается его исходное наличие.

Поэтому далее покажем полный вывод формулы для определения  $E_i$  — суммарного выхода нейтронов от всех учитываемых нуклидов в  $i$ -й ОТВС на произвольный момент времени  $t$  при известном ее нуклидном составе на конкретный момент времени ( $t_i$ ) с учетом всех предварительно сделанных замечаний.

Как известно, число распавшихся ядер за бесконечно малый промежуток времени  $dt$  определяется только количеством радиоактивных ядер  $N(t)$  в данный момент времени  $t$ :

$$dN = -\lambda N(t) dt,$$

где  $\lambda$  — вероятность распада (постоянная распада); знак «минус» указывает на убывание ядер в процессе распада.

Изменение числа ядер в  $i$ -й ОТВС дочернего  $j$ -го нуклида  $dN_{ij}$  за время  $dt$  происходит в результате его распада  $-\lambda_j N_{ij}(t)dt$  и накопления за счет распада материнского нуклида  $\lambda_{(j)} N_{i(j)}(t)dt$  (индекс  $j$  соответствует материнскому нуклиду, порождающему  $j$ -й нуклид, при этом  $\lambda_j$  является суммой постоянных всех видов распада дочернего нуклида, а постоянная распада  $\lambda_{(j)}$  соответствует только тому виду распада материнского нуклида, в результате которого образуется рассматриваемый дочерний нуклид):

$$dN_{ij} = (\lambda_{(j)} N_{i(j)}(t) - \lambda_j N_{ij}(t)) dt,$$

откуда

$$\frac{dN_{ij}}{dt} + \lambda_j N_{ij}(t) = \lambda_{(j)} N_{i(j)}(t).$$

Общее решение полученного (неоднородного) дифференциального уравнения первого порядка находим с помощью интегрирующего множителя  $\exp\{\lambda_j t\}$ :

$$\begin{aligned} \left( \frac{dN_{ij}}{dt} + \lambda_j N_{ij}(t) \right) \exp\{\lambda_j t\} &= \frac{d(N_{ij}(t) \exp\{\lambda_j t\})}{dt} = \\ &= \lambda_{(j)} N_{i(j)}(t) \exp\{\lambda_j t\}, \end{aligned}$$

откуда

$$d(N_{ij}(t) \exp\{\lambda_j t\}) = \lambda_{(j)} N_{i(j)}(t) \exp\{\lambda_j t\} dt.$$

После интегрирования этого уравнения имеем

$$N_{ij}(t) \exp\{\lambda_j t\} = \lambda_{(j)} \int N_{i(j)}(t) \exp\{\lambda_j t\} dt + C,$$

где  $C$  — постоянная интегрирования.

Учитывая закон распада материнского нуклида

$$N_{i(j)}(t) = N_{i(j)}(t_i) \exp\{\lambda_{\text{сум}(j)}(t_i - t)\},$$

где  $\lambda_{\text{сум}(j)}$  (в отличие от  $\lambda_{(j)}$ ) — сумма постоянных всех видов распада материнского нуклида, получим

$$\begin{aligned} N_{ij}(t) &= \left( \lambda_{(j)} N_{i(j)}(t_i) \exp\{\lambda_{\text{сум}(j)} t_i\} \int \exp\{(\lambda_j - \lambda_{\text{сум}(j)})t\} dt + C \right) \times \\ &\times \exp\{-\lambda_j t\} = \frac{\lambda_{(j)} N_{i(j)}(t_i) \exp\{\lambda_{\text{сум}(j)}(t_i - t)\}}{\lambda_j - \lambda_{\text{сум}(j)}} + C \cdot \exp\{-\lambda_j t\}. \end{aligned}$$

При  $t = t_i$  имеем  $N_{ij}(t) = N_{ij}(t_i)$ , тогда

$$C = \left( N_{ij}(t_i) - \frac{\lambda_{(j)} N_{i(j)}(t_i)}{\lambda_j - \lambda_{\text{сум}(j)}} \right) \exp\{\lambda_j t_i\},$$

и для искомого числа ядер на произвольный момент  $t$

$$\begin{aligned} N_{ij}(t) &= N_{ij}(t_i) \exp\{\lambda_j(t_i - t)\} + \\ &+ \lambda_{(j)} N_{i(j)}(t_i) \frac{\exp\{\lambda_{\text{сум}(j)}(t_i - t)\} - \exp\{\lambda_j(t_i - t)\}}{\lambda_j - \lambda_{\text{сум}(j)}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Чтобы перейти от числа ядер  $N_{ij}$  к выходу нейтронов  $j$ -го нуклида в  $i$ -й ОТВС  $E_{ij}$ , воспользуемся очевидным соотношением

$$E_{ij} = \nu_j m_{ij} = \nu_j N_{ij} M_j \mu,$$

где  $\nu_j$  — удельный суммарный выход нейтронов  $j$ -го нуклида;  $m_{ij}$  — массовое содержание  $j$ -го нуклида в  $i$ -й ОТВС;  $M_j$  — атомный вес  $j$ -го нуклида в атомных единицах массы;  $\mu = 1,66 \cdot 10^{-24}$  г — атомная единица массы.

С учетом этого соотношения и формулы (1), суммарный выход нейтронов  $i$ -й ОТВС на момент  $t$

$$\begin{aligned} E_i(t) &= \sum_j \left[ E_{ij}(t_i) \exp\{\lambda_j(t_i - t)\} + \right. \\ &+ \left. \nu_j \lambda_{(j)} m_{i(j)}(t_i) \frac{M_j}{M_{(j)}} \frac{\exp\{\lambda_{\text{сум}(j)}(t_i - t)\} - \exp\{\lambda_j(t_i - t)\}}{\lambda_j - \lambda_{\text{сум}(j)}} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где суммирование ведется по всем нуклидам, используемым при контроле выгорания  $i$ -й ОТВС, а при отсутствии накопления  $j$ -го нуклида за счет распада других нуклидов соответствующее  $m_{i(j)}$  — массовое содержание материнского нуклида, порождающего  $j$ -й нуклид, приравнивается нулю.

Таким образом, вычисленному на момент измерения ОТВС по формуле (2) суммарному выходу нейтронов ( $E_i$ ) ставится в соответствие измеренное значение ССН ( $R_i$ ), и по массиву точек ( $E_i, R_i$ ) на плоскости  $E_i - R_i$  с помощью известных методов, например по методу наименьших квадратов, строится аппроксимирующая кривая зависимости ССН от выхода нейтронов  $R = R(E)$ . Вид аппроксимирующей функции  $R(E)$  выбирается в каждом конкретном случае в зависимости от характера распределения точек ( $E_i, R_i$ ). Полученная функциональная зависимость  $R(E)$  при одинаковых условиях измерений (поглощающих свойствах окружающей среды, геометрии измерений, использовании одной и той же измерительной аппаратуры и т. д.) справедлива при любых параметрах ядерного топлива ОТВС (обогащении по  $^{235}\text{U}$ , выгорании, выдержке).

Зависимость ССН от выгорания ядерного топлива (калорийная зависимость) определяется аналогичным рассмотренному выше статистическим подходом для каждой

контролируемой ОТВС. Однако при этом накладываются дополнительные условия: обогащение ядерного топлива и корректировка суммарных скоростей эмиссий всех ОТВС, используемых для построения калибровочной кривой, должны соответствовать обогащению и времени выдержки контролируемой ОТВС.

В конечном итоге, алгоритм контроля глубины выгорания можно представить следующим образом:

1. По результатам измерений прошедших испытания ОТВС формируется массив данных  $(E_i, R_i)$ , где  $E_i$  — суммарный выход нейтронов  $i$ -й ОТВС, рассчитанный на момент ее измерения по формуле (2);  $R_i$  — соответствующее значение измеренной ССН.

2. По методу наименьших квадратов строится функциональная зависимость  $R = R(E)$  как аппроксимация статистического ансамбля  $(E_i, R_i)$ . Как указывалось выше, вид аппроксимирующей функции выбирается в зависимости от распределения точек  $(E_i, R_i)$ , однако номинально это должна быть линейная функция, так как в идеале чувствительность измерительной системы (коэффициент преобразования выхода нейтронов источника в ССН) не должна зависеть от измеряемой величины, т. е. коэффициент преобразования должен быть постоянной величиной при всех значениях выхода нейтронов.

3. При поступлении на контроль выгорания новой ОТВС формируется группа из прошедших испытания ОТВС, соответствующих контролируемой ОТВС по обогащению. Из данных этой группы (исключая контролируемую), формируется массив данных  $E_{i \text{ расч}}$  — суммарных выходов нейтронов этих ОТВС, пересчитанных по формуле (2) на момент измерения контролируемой ОТВС. Используя эти данные, определяется массив соответствующих им  $R_{i \text{ расч}}$ , значения которых определяются на основании полученной в п. 2 зависимости  $R = R(E)$ .

4. В предположении достоверности рассчитанных путем моделирования топливной кампании реактора выгораний ( $W$ ) используемых для контроля выгорания ОТВС, по массиву значений  $(W_i, R_{i \text{ расч}})$  строится зависимость ССН от выгорания (калибровочная кривая)  $R_{\text{расч}} = R_{\text{расч}}(W)$  (аналогично предыдущим приемам).

5. Для построенной калибровочной зависимости ССН от выгорания определяется область допустимых отклонений значений ССН от калибровочной кривой (доверительная область). В случае «попадания» в эту область экспериментального значения ССН от контролируемой ОТВС считается, что данная ОТВС прошла контроль и подтверждается заявленное для нее значение глубины выгорания. При отрицательном результате контроля проводятся мероприятия, специально предусмотренные для таких случаев в соответствующих документах.

Доверительные области для калибровочных кривых определяются по разработанным и представленным в научно-технической литературе методам (см., например, [9]). Исходными данными для определения граничных значений доверительной области являются, с одной стороны, параметры статистического распределения экспериментальных значений ССН относительно калибровочной зависимости, с другой — выполнение требований нормативных документов, регламентирующих максимальные погрешности определения глубины выгорания и доверительную вероятность получаемых оценок. Область допустимых отклонений экспериментальных значений ССН может уточняться по итогам опытно-промышленной эксплуатации измерительной системы контроля выгорания.

Данные от успешно прошедшей контроль ОТВС включаются в общий ансамбль данных, улучшая, тем самым, достоверность контроля выгорания последующих ОТВС.

В заключение следует отметить, что калибровочная кривая позволяет проводить оценку значения выгорания по измеренному значению ССН (т. е. решать задачу, практически обратную задаче контроля выгорания). Рассмотренная в статье методика подтверждена патентом на полезную модель [10], а ее техническая реализация и апробация осуществлены в ХОЯТ Чернобыльской АЭС [11]. Проведенные при этом оценки выгорания для 110 ОТВС показали высокие результаты (относительные погрешности оценок, практически, не превышают 10 %), что косвенно подтверждает высокую эффективность представленной методики контроля выгорания.

### Список использованной литературы

1. ПНАЭ Г-14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики. — М.: ЦНИИ атоминформ, 1992. — С. 23.
2. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ / В. В. Фролов — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 85 с.
3. Результаты опытно-промышленной эксплуатации метода учета глубины выгорания отработавшего ядерного топлива при эксплуатации СХОЯТ ЗАЭС.00.ОБ.УУ.ОТ.01.1: Отчет ЗАЭС. — 2004. — 63 с.
4. Учет глубины выгорания отработавшего ядерного топлива при эксплуатации сухого хранилища на Запорожской АЭС / А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокин, В. Н. Павлович, А. В. Поднебесный, С. В. Барсук, О. В. Горбаченко, А. И. Игнатченко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2008. — Вып. 10. — С. 20—31.
5. Разработка и внедрение прибора для измерения глубины выгорания отработавших рабочих кассет реакторов ВВЭР-440 ФАМОС-III / С. А. Андрущечко, Б. Ю. Васильев, В. Ф. Украинцев, С. Н. Голощапов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2004. — № 2. — С. 63—80.
6. Кучмагра А. А. Обоснование выбора нуклидов при контроле глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок РБМК-1000 / А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокин // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2011. — Вып. 15. — С. 103—109.
7. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов: Пер. с англ. ВНИИА / Д. Райлли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайнер. — М.: «Бином», 2000. — 703 с.
8. Мухин К. Н. Введение в ядерную физику / К. Н. Мухин. — М.: Атомиздат, 1965. — 720 с.
9. Климов А. Н. Обработка результатов реакторного эксперимента: Учеб. пособие / А. Н. Климов. — М.: Изд-во МИФИ, 1988. — 59 с.
10. Кучмагра О. А. Патент України на корисну модель № 72892, МПК G21C 17/06. Спосіб контролю глибини вигорання, заснований на пасивній нейтронній радіометрії / О. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. І. Одинокін; власник — Ін-т проблем безпеки атомних електростанцій Нац. академії наук України. — Дата подання заявки 30.03.2012, номер заявки u2012 03889, дата публікації 27.08.2012.

### References

1. PNAE G-14-029-91. Safety rules for the storage and transport of nuclear fuel at nuclear power facilities. — Moscow: CNEE atominform, 1992. — 23 p. (Rus)
2. Frolov V. Nuclear Methods of control of fissile materials. — Moscow: Energoatomizdat, 1989. — 185 p. (Rus)
3. Results of pilot operation method of accounting burnup spent nuclear fuel in the operation of DSSNF at ZAES.00.OB.UU.OT.01.1: Report ZNPP. — 2004. — 63 p. (Rus)

4. *Kuchmagra O. A., Molchanov O. S., Odinokin G. I., Pavlovich V. M., Podnebesnyy A. V., Borsuk S. V., Gorbachenko O. V., Ignatchenko O. I.* Accounting burnup spent nuclear fuel in the operation of dry storage at Zaporizhzhya NPP // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyliya (Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl)*. — 2008. — Iss. 10. — P. 20—31. (Rus)
5. *Andrushechko S. A., Vasilyev B. Y., Goloshapov S. N.* Development and implementation of an instrument for measuring burnup spent working cassettes WWR-440 FAMOS-III // *Izvestiya vuzov. Yadernaya enerhetyka*. — № 2. — 2004. — P. 103—109. (Rus)
6. *Kuchmagra O. A., Molchanov O. S., Odinokin G. I.* Justification and choice nuclide at the control burnup spent fuel assemblies RBMK-1000 // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobyliya (Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl)*. — 2011. — Iss. 15. — P. 103. — 109. (Rus)
7. *Reilly D., Ensslin N., Smith H.* Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. Office of Nuclear Regulatory Research U.S., Nuclear Regulatory Commission. — Washington, DC 20555. NRC FIN A72241. — 1991. — 703 p. (Eng)
8. *Mukhin K. N.* Introduction to nuclear physics. — Moscow : Energoatomizdat, 1965. — 720 p. (Rus)
9. *Klimov A. N.* Processing of the results of the reactor experiment. Textbook. — Moscow : Izdatelstvo MIFI, 1988. — 59 p. (Rus)
10. *Kuchmagra O. A., Molchanov O. S., Odinokin G. I.* Patent Ukraini na korisnu model № 72892, IPC G21C 17/06. Sposib controly glibiny vigoranya, zasnovany na pasivniy neytronniy radiometrii. (Patent of Ukraine for useful model № 72892, IPC G21C 17/06. Method to control burnup based on passive neutron radiometry. — Owner — Institute for safety of nuclear power NAS of Ukraine. (Ukr)

*Получено 20.05.2014.*