

И. Л. Зайцевский<sup>1</sup>, А. А. Кучмагра<sup>1</sup>,  
О. С. Молчанов<sup>1</sup>, Г. И. Одинокін<sup>1</sup>,  
Е. А. Лебедев<sup>2</sup>, А. Е. Новиков<sup>2</sup>,  
В. В. Соловьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины,  
г. Чернобыль, Киевская обл., Украина

<sup>2</sup> ГСП «Чернобыльская АЭС», г. Славутич, Киевская обл.,  
Украина

## Установка для контроля глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок РБМК-1000

Описана установка, предназначенная для инструментального контроля глубины выгорания отработавших тепловыделяющих сборок (УКГВ) в реакторе РБМК-1000 — технологической операции, проводимой с отработавшими тепловыделяющими сборками в хранилище отработавшего ядерного топлива № 1 Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) с целью подтверждения наличия отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в тепловыделяющих сборках и определения глубины выгорания ОЯТ. Разработана методика оценки глубины выгорания ОЯТ с пределом основной относительной погрешности измерения не более 10 % при доверительной вероятности 0,95 %. Представлены технические характеристики, структура, устройство и функционирование технических средств УКГВ.

Ключевые слова: установка для контроля глубины выгорания, отработавшее ядерное топливо, РБМК-1000.

І. Л. Зайцевський, О. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. І. Одинокін,  
Є. О. Лебедев, О. Є. Новиков, В. В. Соловйов

### Установка для контролю глибини вигорання відпрацьованих тепловидільних збірок РВПК-1000

Описано установку, призначену для інструментального контролю глибини вигорання відпрацьованих тепловидільних збірок (УКГВ) у реакторі РВПК-1000 — технологічної операції, що проводиться з відпрацьованими тепловидільними збірками в сховищі відпрацьованого ядерного палива № 1 з метою підтвердження наявності відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) у тепловидільних збірках і визначення глибини вигорання ВЯП. Розроблено методику оцінки глибини вигорання ВЯП з межею основної відносної похибки вимірювання не більше за 10 % при довірчій ймовірності 0,95 %. Наведено технічні характеристики, структуру, функціонування технічних засобів УКГВ.

Ключові слова: установка для контролю глибини вигорання, відпрацьоване ядерне паливо, РВПК-1000.

© И. Л. Зайцевский, А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокін,  
Е. А. Лебедев, А. Е. Новиков, В. В. Соловьев, 2015

**Х**ранение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) связано с большими проблемами как в экономическом, так и в экологическом аспекте. Размещение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в хранилище отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ), при котором обеспечивается, с одной стороны, максимальная загрузка ОТВС, а с другой стороны — ядерная безопасность, является одной из важнейших задач эксплуатации хранилищ ОЯТ. Одним из методов решения этой задачи служит учет при загрузке в каждой ОТВС ее глубины выгорания (далее — выгорание).

Известно, что шаг регулярной решетки ОТВС в хранилищах должен выбираться из условия не превышения эффективного коэффициента размножения нейтронов 0,95 [1]. В процессе облучения в реакторе уменьшается масса делящегося материала и образуются нуклиды, поглощающие нейтроны, что приводит к уменьшению эффективного обогащения топлива по сравнению с начальным. Поскольку при выгорании 40 МВт·сут/кг(U) ОЯТ обладает примерно вдвое меньшим эффективным обогащением по сравнению с начальным [2], степень консерватизма при оценке подкритичности ОЯТ при хранении можно уменьшить. В то же время нормативные документы [1, 3] требуют, чтобы при обосновании ядерной безопасности хранения ОЯТ с учетом глубины выгорания проводился инструментальный контроль ее величины. В обеспечение этих требований в Институте проблем безопасности АЭС НАН Украины (ИПБ АЭС) разработаны методика и установка для контроля глубины выгорания (УКГВ) ОТВС, размещаемых в бассейне выдержки хранилища отработавшего ядерного топлива № 1 (ХОЯТ-1) Чернобыльской АЭС.

#### 1. Общая характеристика объекта контроля

Объектом контроля являются ОТВС реакторов РБМК-1000. Тепловыделяющая сборка (рис. 1) состоит из двух пучков (сегментов) твэлов. Количество твэлов в каждом сегменте — 18 [4, 5].

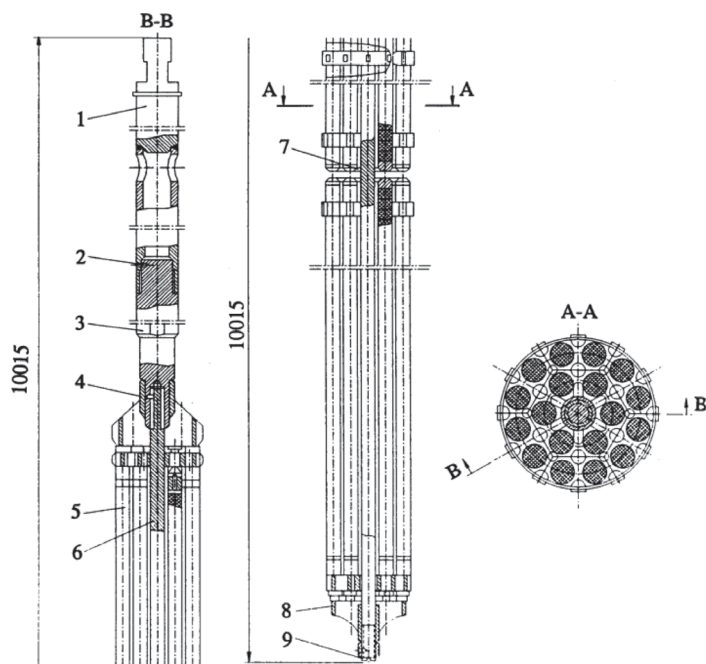


Рис. 1. ТВС РБМК-1000:

1 — подвеска; 2 — верхняя заглушка; 3 — переходник; 4 — соединительный элемент; 5 — топливный элемент; 6 — несущий стержень; 7 — концевик; 8 — нижняя головка; 9 — предохранительная гайка

Ожидаемый диапазон значений выгорания ОТВС, находящихся в ХОЯТ-1 ЧАЭС, — от 100 до 3080 МВт·сут/ТВС с начальным обогащением ядерного топлива 1,8 %, 2,0 % и 2,4 % по  $^{235}\text{U}$ . Минимальное время выдержки ОТВС считается с момента остановки энергоблока № 3 ЧАЭС в 2000 году и составляет не менее 14 лет.

Основные технические характеристики ТВС: длина — 10014 мм; диаметр — 79 мм; масса ТВС — 185 кг; масса урана в ТВС — 114,7 кг; количество твэлов в ТВС — 36.

## 2. Краткая характеристика области и условий применения установки. Технические характеристики

УКГВ предназначена для эксплуатации в ХОЯТ-1 ЧАЭС. ОТВС хранятся в бассейне выдержки (БВ) в одноместных пеналах, залитых водой. Пеналы с ОТВС подвешены на консолях щелевого перекрытия БВ в вертикальном положении. Сверху щелевое перекрытие закрывается крышками. Шаг расположения ОТВС — 110×230 мм.

Технические характеристики пенала для хранения ОТВС [4, 5, 6]:

Длина	10700 мм
Диаметр наружный	102 мм
Диаметр внутренний	98 мм
Масса	55 кг

БВ состоит из пяти отсеков — железобетонных емкостей, стены и днища которых облицованы коррозионностойкой сталью. Отсеки имеют щелевое перекрытие, представляющее собой кронштейны консольного типа для размещения ОТВС в пеналах.

Основные технические характеристики отсеков БВ:

Длина	26400 мм
Ширина	5600 мм
Глубина	11300 мм
Объем воды	1600 м <sup>3</sup>
Номинальный уровень воды	10500 мм
Температура воды	От 20 до 50 °С
Максимальное количество пеналов с ОТВС	4380

Технические характеристики установки:

Диапазон контроля глубины выгорания	100...3080 МВт·сут/ТВС
Предел допускаемой основной относительной погрешности определения глубины выгорания при доверительной вероятности 0,95	≤10 %
Диапазон измерения скорости счета импульсов	0,1...10 <sup>4</sup> с <sup>-1</sup>
Временная разрешающая способность при измерении скорости счета импульсов	≤5 мкс
Время контроля глубины выгорания одной ОТВС	≤30 мин
Время установления рабочего режима	≤15 мин
Характеристики сети переменного тока, обеспечивающей питание установки:	
напряжение	220 ± 22 В
частота	50 ± 3 Гц
потребляемая мощность	≤500 Вт
Средняя наработка на отказ	≥10000 ч

## 3. Теоретические основы метода контроля выгорания

Контроль выгорания ОЯТ с помощью УКГВ основан на методе пассивной нейтронной радиометрии, целесообразность применения которого для решения задачи контроля выгорания в условиях хранилищ ОЯТ, в том числе и на ЧАЭС, обоснована в ряде научно-технических материалов [2, 7, 8, 9].

Все изотопы урана, плутония и кюрия испытывают спонтанное деление. Кроме этого, все изотопы указанных элементов — α-излучатели, вследствие чего образуются нейтроны за счет реакции  $^{18}\text{O}(\alpha, n)$ . Облученное ядерное топливо содержит в себе широкий спектр трансурановых элементов, являющихся интенсивными источниками нейтронов. Их количество зависит от того, каким интегральным потоком нейтронов облучено топливо или каково его выгорание. Таким образом, общее количество трансурановых элементов связано с выгоранием топлива, а суммарный выход нейтронов ОТВС характеризует содержание наработанных нуклидов и, соответственно, выгорание топлива.

При контроле выгорания с помощью УКГВ применена разработанная в ИПБ АЭС НАНУ методика, основанная на учете основных источников нейтронов:  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{241}\text{Am}$  [10, 11, 12] и учете массовой доли  $^{241}\text{Pu}$  — материнского нуклида в процессе накопления  $^{241}\text{Am}$ . Необходимость использования указанной методики объясняется тем, что диапазоны значений выгорания и выдержки топлива ОТВС ЧАЭС выходят за рамки применимости существующих методик, основанных на учете только  $^{244}\text{Cm}$  [9]. Особенностью методики измерения выгорания является определение функциональной зависимости скорости счета нейтронов (ССН) от суммарного выхода нейтронов из ОТВС, приведение суммарного выхода нейтронов от каждой градуировочной ОТВС (ОТВС, которая используется для построения градуировочной зависимости выгорания от ССН, см. далее) на момент измерения контролируемой ОТВС.

Градуировочная зависимость выгорания ( $B$ ) от ССН ( $R$ ) строится для каждой контролируемой ОТВС по массиву точек  $R_i, B_i$  ( $i$  — условный порядковый номер градуировочной ОТВС) с использованием кусочно-линейной аппроксимации.

## 4. Алгоритм расчета при выполнении контроля выгорания ОТВС

### 4.1. Исходные данные

- $X_k$  — начальное обогащение по  $^{235}\text{U}$  ядерного топлива ОТВС ( $X_1=1,8\%$ ;  $X_2=2,0\%$ ;  $X_3=2,4\%$ ).
- $\tau_k$  — время выдержки контролируемой ОТВС на момент ее измерения.
- $\tau_i$  — время выдержки  $i$ -й градуировочной ОТВС на момент ее измерения.
- $m_{ij}(0)$  — массовые доли (г/ТВС) используемых при контроле выгорания нуклидов в  $i$ -й градуировочной ОТВС на момент ее выгрузки в бассейн выдержки ( $i=1, \dots, N$  — условный порядковый номер градуировочных ОТВС,  $N$  — число градуировочных ОТВС,  $j=1, \dots, 7$  — условный порядковый номер используемого при контроле выгорания нуклида (табл. 1).

*Примечание.* Под градуировочными ОТВС понимаются ранее прошедшие измерения ОТВС, используемые при построении градуировочных кривых.

Таблица 1. Справочные данные основных нейтроноизлучающих нуклидов ОТВС [13]

$j$	Нуклид	Удельный выход нейтронов спонтанного деления, $\epsilon^{-1}\tau^{-1}$	Удельный выход нейтронов за счет $(\alpha, n)$ -реакции, $\epsilon^{-1}\tau^{-1}$	Период полураспада ( $T_j$ ), лет	Удельный суммарный выход нейтронов ( $\nu_j$ ), $\epsilon^{-1}\tau^{-1}$
1	$^{238}\text{U}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$8,30 \cdot 10^{-5}$	$4,47 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^{-2}$
2	$^{239}\text{Pu}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$3,81 \cdot 10^1$	$2,41 \cdot 10^4$	$3,81 \cdot 10^1$
3	$^{241}\text{Am}$	1,18	$2,69 \cdot 10^3$	$4,34 \cdot 10^2$	$2,69 \cdot 10^3$
4	$^{240}\text{Pu}$	$1,02 \cdot 10^3$	$1,41 \cdot 10^2$	$6,56 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^3$
5	$^{238}\text{Pu}$	$2,59 \cdot 10^3$	$1,34 \cdot 10^4$	87,7	$1,60 \cdot 10^4$
6	$^{244}\text{Cm}$	$1,08 \cdot 10^7$	$7,73 \cdot 10^4$	18,1	$1,09 \cdot 10^7$
7	$^{241}\text{Pu}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	1,30	14,35	1,35

5.  $\nu_j$  — суммарный удельный выход нейтронов от  $j$ -го нуклида (табл. 1; нуклиды в таблице расположены в порядке возрастания удельного суммарного выхода нейтронов, кроме  $^{241}\text{Pu}$ , не используемого как источник нейтронов, но учитываемого как материнский нуклид, порождающий нуклид  $^{241}\text{Am}$ ).

6.  $T_j$  — период полураспада  $j$ -го нуклида (см. табл. 1).

*Примечание.* Период полураспада  $^{241}\text{Pu}$  определяется, практически, только  $\beta$ -распадом (порождающим дочерний нуклид  $^{241}\text{Am}$ ), периоды полураспадов остальных используемых в расчетах нуклидов определяются  $\alpha$ -распадом.

7.  $R_{kl}$  — показание  $l$ -го измерительного канала (ИК) при измерении контролируемой ОТВС ( $l=1, \dots, 4$  — условный порядковый номер измерительного канала УКГВ).

8.  $R_{\phi l}$  — показание  $l$ -го ИК при измерении фонового потока нейтронов.

9.  $R_{in}$  — нормализованная чистая скорость счета нейтронов (ССН) от  $i$ -й градуировочной ОТВС.

*Примечание.* Нормализованная чистая скорость счета нейтронов ССН — нормализованное с учетом полученных при метрологической аттестации нормализующих коэффициентов измерительного канала показание ИК с вычтенным значением фоновой скорости счета нейтронов.

10.  $\eta_l$  — нормирующие коэффициенты  $l$ -го ИК (определяются при метрологической аттестации установки).

11.  $B_i$  — паспортные значения глубины выгорания ядерного топлива (ЯТ) градуировочных ОТВС.

12.  $B'_k$  — паспортное значение выгорания ЯТ контролируемой ОТВС.

13.  $\delta B'_k$  — стандартная относительная погрешность паспортного значения выгорания ЯТ.

#### 4.2. Порядок расчета

1. Определяется зависимость ССН от суммарного выхода нейтронов (расчетная зависимость принимается линейной без свободного члена).

2. Все градуировочные ОТВС разбиваются на группы с одним и тем же начальным обогащением по  $^{235}\text{U}$  ( $X_1=1,8\%$ ,  $X_2=2,0\%$ ,  $X_3=2,4\%$ ).

*Примечание.* Группы градуировочных ОТВС формируются с учетом их корректировки, т. е. после исключения ОТВС с превышающим критерий значением оценки выгорания (см. раздел 4.4).

3. Суммарные выходы нейтронов градуировочных ОТВС каждой группы приводятся на моменты их измерения по формуле (полный вывод формулы приведен в [10])

$$Y_i(\tau_i) = m_{i7}(0) \cdot \nu_3 \cdot \left( e^{-\frac{\ln 2}{T_7} \tau_i} - e^{-\frac{\ln 2}{T_3} \tau_i} \right) \times \\ \times \frac{T_3}{T_7 - T_3} + \sum_{j=1}^6 m_{ij}(0) \cdot \nu_j \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_j} \tau_i}, \quad (1)$$

где  $Y_i(\tau_i)$  — суммарный выход нейтронов  $i$ -й ОТВС в группе, соответствующей контролируемой ОТВС по обогащению, на момент измерения  $i$ -й ОТВС, остальные обозначения приведены в исходных данных.

4. Определяются нормализованные чистые ССН  $l$ -го ИК при измерении контролируемой ОТВС по формуле

$$R_{k\eta} = \eta_l \cdot (R_{kl} - R_{\phi l}).$$

5. Усредняются нормализованные чистые ССН при измерении контролируемой ОТВС:

$$R_{k\eta} = \frac{\sum_{l=1}^4 R_{k\eta}}{4}.$$

*Примечание.* Операции по пунктам 3, 4 проводятся для градуировочных ОТВС при их измерениях для подготовки по п. 10 раздела 4.1.

6. Определяются коэффициенты пропорциональности аппроксимирующих функций (градуировочные коэффициенты) зависимостей ССН от суммарного выхода нейтронов в каждой группе по формуле (метод наименьших квадратов)

$$K(X_k) = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{i\eta}(X_k) \cdot Y_i(X_k))}{\sum_{i=1}^N Y_i^2(X_k)}.$$

*Примечание.* Здесь и далее  $K(X_k)$ ,  $R(X_k)$ ,  $Y(X_k)$  означает не функциональную зависимость, а принадлежность этих величин к группе по обогащению  $X_k$ .

7. Определяется зависимость ССН от суммарного выхода нейтронов в каждой группе ОТВС, соответствующей контролируемой ОТВС (включая и контролируемую ОТВС), по формуле

$$R(X_k) = K(X_k) \cdot Y(X_k).$$

#### 4.3. Оценка выгорания ОТВС

1. Суммарные выходы нейтронов градуировочных ОТВС группы, соответствующей контролируемой ОТВС по обогащению, приводятся на время выдержки контролируемой ОТВС по формуле (1) с заменой  $\tau_i$  на  $\tau_k$ .

2. Определяются приведенные на время выдержки контролируемой ОТВС значения ССН группы градуировочных ОТВС по формуле

$$R_i = K(X_k) \cdot Y_i(\tau_k).$$

3. Строится градуировочная зависимость глубины выгорания от ССН в виде линейных отрезков, соединяющих точки  $(R_i, B_i)$  и  $(R_{i+1}, B_{i+1})$  (кусочно-линейная аппроксимация).

*Примечание.* Градуировочная зависимость  $B_i$  от  $R_i$  задается таблично.

4. Определяется интервал, для которого выполняется условие  $R_i \leq R_{к\eta} < R_{i+1}$ .

5. Методом линейной интерполяции дается оценка выгорания контролируемой ОТВС:

$$B_k = B_i + \frac{B_{i+1} - B_i}{R_{i+1} - R_i} (R_k - R_i).$$

6. Определяется результат контроля выгорания.

7. Определяется доверительный интервал для оценки значения выгорания ( $B'_k - 3 \cdot \epsilon_{B'_k} \cdot B'_k, B'_k + 3 \cdot \epsilon_{B'_k} \cdot B'_k$ ).

8. Проверяется выполнение соотношения

$$B'_k - 3 \cdot \epsilon_{B'_k} \cdot B'_k \leq B_k \leq B'_k + 3 \cdot \epsilon_{B'_k} \cdot B'_k \quad (2)$$

9. Выполнение соотношения (2) — результат контроля положителен, невыполнение — отрицателен.

#### 4.4. Алгоритм корректировки групп градуировочных ОТВС

1. Каждая ОТВС группы градуировочных ОТВС рассматривается как контролируемая, и для нее определяется оценка глубины по методу, представленному в разделе 4.3. Вычисляется относительное отклонение  $\epsilon_{B'_k}$  расчетно-экспериментального выгорания каждой градуировочной ОТВС от ее паспортного значения  $B'_k$  по формуле

$$\delta_{B_k} = \frac{B_k - B'_k}{B'_k} 100 \%$$

2. Проверяется выполнение соотношения

$$|\delta_{B_k}| \leq 10 \%. \quad (3)$$

3. При выполнении соотношения (3) данная ОТВС остается в группе градуировочных, невыполнении — исключается из группы.

*Примечание.* Процедуру по данному алгоритму повторяют для всех градуировочных ОТВС до тех пор, пока абсолютные значения относительных отклонений оставшихся ОТВС не будут выходить за пределы  $\pm 10 \%$ .

### 5. Структурная схема установки

Исходя из своего назначения, решаемых задач и выбранного метода измерения, УКГВ выполняет следующие основные функции:

обеспечение контроля выгорания путем регистрации нейтронного излучения ядерного топлива ОТВС;

измерение ССН, накопление, статистическая обработка, архивирование и представление полученных данных.

Для решения поставленных задач установка функционально представляет собой нейтронный радиометр и выполнена в виде комплекса программно-технических средств.

Установка состоит из следующих основных устройств: устройства детектирования (УД); устройства накопления и обработки информации (УНО); рабочей станции оператора (РСО); узла обработки информации (УОИ).

В устройстве детектирования (рис. 2) происходят регистрация и преобразование потока нейтронов в электрический сигнал, предварительное усиление сигнала для передачи его по кабельной линии связи на УНО. УД состоит из «сухого» канала, в котором установлена подвеска детекторная с четырьмя идентичными блоками детектирования

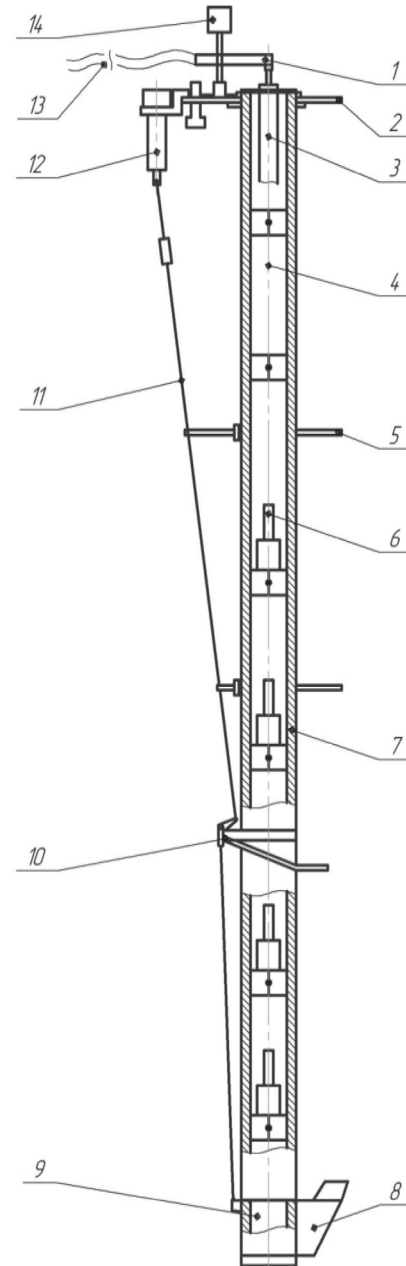


Рис. 2. Устройство детектирования:  
1 — узел подключения кабеля соединительного УД-УНО; 2 — плита опорная; 3 — блок кабельный; 4 — кабельная секция; 5 — ловитель; 6 — блок детектирования нейтронов; 7 — «сухой» канал; 8 — корзина; 9 — груз; 10 — электромеханический датчик положения; 11 — трос; 12 — узел герконовых датчиков; 13 — кабель УД-УНО; 14 — световой указатель положения

нейтронов (БДН), и узла указателя положения. Основой конструкции «сухого» канала является типовая пенал для ОТВС, дополненный конструктивными элементами для решения указанных выше задач. Центрирование пенала с ОТВС в положении измерения на УД осуществляется ловителями, расположенными в средней части «сухого» канала, и корзиной в виде воронки, расположенной в нижней части «сухого» канала. В корзину входит нижний конец пенала с ОТВС в положении измерения. Внутри «сухого» канала на дно для компенсации положительной плавучести пенала установлены грузы.

Указатель положения служит для контроля правильного положения пенала с ОТВС в позиции измерения, световой индикации этого состояния и передачи сигнала на УНО и РСО о готовности к измерению. Он включает в себя электромеханический датчик положения и узел герконовых датчиков, а также световой указатель положения.

Детектором нейтронного и гамма-излучения в БДН служит ионизационная камера деления (КД) типа КНТ-31-1. Регистрация нейтронов происходит в объеме КД, заполненном газом и заключенном в рабочем зазоре между электродами, к которым приложено электрическое напряжение.

В устройстве накопления и обработки информации происходят усиление и формирование полученного с УД сигнала в виде последовательности статистически распределенных во времени импульсов, измерение скорости счета импульсов. Управление процессом измерения, обработка полученных результатов, контроль глубины выгорания по разработанным алгоритмам осуществляются с помощью специального программного обеспечения.

Рабочая станция оператора служит для дистанционного управления работой УНО, получения с УНО данных, обработки, архивирования результатов измерений, распечатки протоколов контроля.

Узел обработки информации представляет собой дополнительное локальное компьютеризованное рабочее место инженера и служит для предварительной подготовки входных данных, используемых при контроле глубины выгорания, постобработки данных, анализа, архивирования в базе данных и документирования результатов контроля.

## Выводы

Представленная в настоящей статье установка УКГВ и методика оценки глубины выгорания ОЯТ могут быть реализованы в промышленном исполнении для целей инструментального контроля выгорания ОТВС в ХОЯТ-1 ЧАЭС. Испытания прототипа установки УКГВ и разработанной методики оценки глубины выгорания ОЯТ показали их высокую эффективность, позволяющую проводить контроль выгорания с высокой точностью. В частности, основные относительные погрешности полученных в процессе испытания оценок выгорания в отобранных для испытаний контролируемых ОТВС (110 ОТВС с различными значениями обогащения по  $^{235}\text{U}$ , выгорания и выдержки) практически не превышают 10 % при доверительной вероятности 0,95 [7].

Для инструментального контроля выгорания ОТВС ВВЭР-1000 потребуются доработка узла детектирования при сохранении основных положений методики и алгоритма расчета оценки глубины 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. — 23 с.
2. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ / В. В. Фролов. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 85 с.
3. НП 306.7.120-2006. Положение о системе измерений ядерных материалов. — К. : Гос. комитет ядерного регулирования Украины, 2006. — 9 с.
4. ТВС РБМК-1000. Техническое описание. — Электросталь : ОАО «Машиностроительный завод», 1980. — 14 с.
5. ТВС РБМК-1000. Технические условия. — Электросталь : ОАО «Машиностроительный завод», 1984. — 23 с.
6. Отчет по оценке безопасности ХОЯТ-1 (версия 3) / ЧАЭС. — 2008. — 126 с. — Инв. № ПТС 16.
7. Разработка и испытания прототипа установки для контроля глубины выгорания ОТВС РБМК-1000 в ХОЯТ-1 : Отчет ИПБ АЭС НАНУ (итоговый). — 2010. — 135 с. — Арх. № 3990-А.
8. 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 безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2008. — Вип. 10. — С. 20—31.
9. Результаты опытно-промышленной эксплуатации метода учета глубины выгорания отработавшего ядерного топлива при эксплуатации СХОЯТ ЗАЭС : 00.ОБ.УУ.ОТ.01.1 / ГП «НАЭК «Энергоатом»; ОП «Запорожская АЭС». — 2004. — 63 с.
10. Кучмагра А. А. Контроль выгорания отработавшего ядерного топлива ядерных реакторов при широком диапазоне значений выгорания и выдержки / А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокин // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — Вип. 3(63). — С. 24—28.
11. 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.
12. 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 безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2011. — Вип. 15. — С. 103—109.
13. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов : Пер. с англ. ВНИИА / Д. Райлли, Н. Энсслин, Х. Смит, С. Крайнер. — М. : «Бином», 2000. — 703 с.

## References

1. PNAE G-14-029-91. Safety Rules for Storage and Transport of Nuclear Fuel at Nuclear Facilities [Pravila bezopasnosti pri khranenni i transportirovke yadernogo topliva na ob'ektakh atomnoi energetiki], Moscow: SNEEAtomInform, 1992, 23 p. (Rus)
2. Frolov, V. (1989), "Nuclear Methods of Fissile Materials Control" [Yaderno-fizicheskiye metody kontrolya deliaschikhhsia veschestv], Moscow: Energoatomizdat, 85 p. (Rus)
3. NP 306.7.120-2006. Provision on Nuclear Materials Measuring System [Polozheniie o sisteme izmerenii yadernykh materialov], State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2006, 9 p. (Rus)
4. DS 862.00.000. Fuel Assemblies of High Power Boiling Reactor RBMK-1000. Datasheet [TVS RBMK-1000. Tekhnicheskoe opisaniie], 1980, 14 p. (Rus)
5. TC 862.00.000. Fuel Assemblies of High Power Boiling Reactor RBMK-1000. Technical conditions. [TVS RBMK-1000. Tekhnicheskiiie usloviia], 1984, 23 p. (Rus)
6. Safety Assessment Report on ISF-1 (Revision 3), Chernobyl NPP [Otchet po otsenke bezopasnosti KhOYaT-1 (versiia 3), ChAES], 2008, Inv. No. PTS 16, 126 p. (Rus)

7. Development and Testing of Prototype Systems for Monitoring RBMK-1000 Spent Fuel Assemblies Burnup in ISF-1, [Razrabotka i ispytaniia prototipa ustanovki dlia kontroliia glubiny vygoraniia OTVS RBMK-1000 v KhOYaT-I], ISP NPP NAS Report (final). — Arch. No. 3990-A, 2010, 135 p. (Rus)

8. *Kuchmagra, O.A., Molchanov, O.S., Odinokin, G.I., Pavlovich, V.M., Podnebesnyy, A.V., Borsuk, S.V., Gorbachenko, O.V., Ignatchenko, O.I.* (2008), “Accounting of Spent Nuclear Fuel Burnup during Operation of Dry Storage Facility at Zaporizhzhya NPP” [Uchet glubiny vygoraniia otrabotavshogo yadernogo topliva pri ekspluatatsii sukhogo khranilischa na Zaporozhskoi AES], NPP and Chornobyl Safety Problems [Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliia], Iss. 10, pp. 20–31. (Rus)

9. Results of Trial Operation of Spent Nuclear Fuel Burnup Accounting Method during Zaporizhzhya ISF Operation [Rezultaty opytno-promyshlennoi ekspluatatsii metoda ucheta glubiny vygoraniia otrabotavshogo yadernogo topliva pri ekspluatatsii SKhOYaT ZAES], 00.OB.YY.OT.01.1: ZNPP Report, 2004, 63 p. (Rus)

10. *Kuchmagra, O.A., Molchanov, O.S., Odinokin, G.I.* (2014), “Monitoring of Spent Fuel Burnup in a Wide Burnup and Cooling Range” [Kontrol vygoraniia otrabotavshogo yadernogo topliva yadernykh reaktorov pri shirokom diapazone znachenii vygoraniia i vyderzhki], Nuclear and Radiation Safety, No. 3 (63), pp. 24–28. (Rus)

11. *Kuchmagra, O.A., Molchanov, O.S., Odinokin, G.I.*, “Patent of Ukraine for Utility Model No. 72892, IPC G21C 17/06. Method for Monitoring Burnup Based on Passive Neutron Radiometry” [Patent Ukrainy na korysnu model' No. 72892, MPK G21C 17/06. Sposib kontroliu hlybyny vyhorannia, zasnovanyi na pasyvni neitronni radiometrii], Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Date of Application 30 March 2012, Application No. u2012 03889, Date of Publication 27 August 2012. (Ukr)

12. *Kuchmagra, O.A., Molchanov, O.S., Odinokin, G.I.* (2011), “Justification of Nuclide Selection during Monitoring RBMK-1000 Spent Fuel Assemblies Burnup” [Obosnovaniie vybora nuklidov pri kontrole glubiny vygoraniia otrabotavshykh teplovydeliaiuschikh sborok RBMK-1000], NPP and Chornobyl Safety Problems [Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliia], Iss. 15, pp. 103–109. (Rus)

13. *Reilly, D., Ensslin, N., Smith, H.* (1991), “Passive Non-Destructive Analysis of Nuclear Materials. Office of Nuclear Regulatory Research U.S., Nuclear Regulatory Commission”. — Washington, DC 20555. NRC FIN A72241. — 1991. — 703 p.

Получено 14.05.2015.