

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК:53.082.79

### ОЦЕНКА РАДИОАКТИВНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ СБОРОК С ОБРАЗЦАМИ СВИДЕТЕЛЯМ

*Алексеев Александр Григорьевич*  
старший научный сотрудник,  
«НИЦ Курчатовский институт»-ИФВЭ, г.Протвино  
*Алексеев Павел Александрович*  
старший научный сотрудник, к.т.н  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г.Обнинск  
*Мокшанов Никита Андреевич*  
Инженер-исследователь 2-ой категории  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г.Обнинск

### RADIOACTIVITY OF CONTAINER ASSEMBLY WITH REFERENCE SPECIMENS

*Alexeev A.G.*  
NRC «Kurchatov Institute» – IHER  
*Alexeev P.A.*  
*Mokshanov N.A.*  
JSC "SSC RF – IPPE"

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.98.1654

#### АННОТАЦИЯ

Приведена методика оценки радиоактивности контейнерной сборки с образцами свидетелями для реактора ВВЭР-1000 на примере Ростовской АЭС. Оценка основана на измерении мощности амбиентного эквивалента дозы гамма излучения на расстоянии 1 м от контейнерной сборки и расчета накопленной активности основных радионуклидов в зависимости от типа стали, из которых изготовлены образцы свидетели.

#### ABSTRACT

A method for assessing the radioactivity of a container assembly with reference specimens for the VVER-1000 reactor is given using the Rostov NPP as an example. The assessment is based on measuring the ambient dose equivalent rate of gamma radiation at a distance of 1 m from the container assembly and calculating the accumulated activity of the main radionuclides depending on the type of steel from which the witness samples are made.

**Ключевые слова:** радионуклиды, образцы свидетели, удельная радиоактивность, АЭС

**Keywords:** Capsule assemblies specimens capsules, standard specimens, radionuclides, specific radioactivity

#### Введение

Важным условием для безопасности и ресурса атомных электростанций (АЭС) с реакторами ВВЭР-1000 является сохранение целостности корпуса реактора в аварийных ситуациях и на протяжении всего времени эксплуатации.

Влияние таких факторов как нейтронное облучение и высокие температуры приводят к изменению механических свойств материала корпуса реактора. Для получения информации об изменении свойств материала корпуса реактора применяют т.н. образцы-свидетели (ОС). Основой для использования программ образцов-свидетелей, реализуемых в России, служат нормативные документы [1, 2]. ОС располагаются в непосредственной близости к корпусу реактора в области с максимальной плотностью нейтронного потока и изготовлены из тех же материалов, что и корпус реактора (стали 15X2НМФА, 15X2НМФА-А), сварные швы (сталь Св-09ХГНМТА). Исследование механических свойств ОС проводится в специализированных лабораториях, например в НИЦ «Курчатовский институт». В

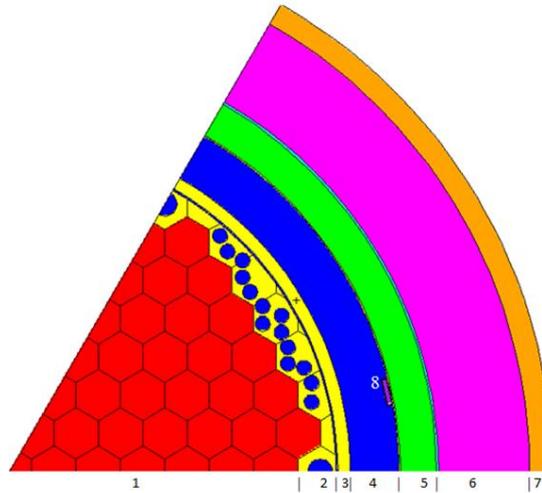
соответствии с нормативными требованиями [3] при транспортировке радиоактивных материалов между организациями необходимо провести паспортизацию – указать общую активность и активность основных радионуклидов. Определение активности радионуклидов является трудоемкой задачей, как с точки зрения применяемого оборудования, так и с точки зрения методического обеспечения такой работы.

Общую активность ОС, находящихся в контейнерных сборках (КС) измеряют при выгрузке из реактора во время ППР. Основываясь на данной информации, а также на расчетной оценке активности и изотопного состава облученных ОС разработана методика оперативного определения активности основных радионуклидов в облученных ОС с зависимостью от времени облучения и времени выдержки (времени прошедшего между остановом реактора и передачей ОС).

**Расчетная оценка активности и изотопного состава ОС**

Для расчета активности радионуклидов накопленных в ОС и КС первоначально определялся спектр нейтронов в месте расположения КС в реакторе ВВЭР-1000. Для этого в программе моделирования переноса излучения

методом Монте-Карло – MCNP [4], построена расчетная модель, учитывающая геометрию и материальный состав реактора. Расчетная модель представлена на рисунке 1.



1 – активная зона; 2 – выгорodka; 3 – внутрикорпусная шахта; 4 – вода;  
5 – корпус ядерного реактора 6 – воздух 7 – теплоизоляция; 8 – контейнер с ОС

Рисунок 1 – Расчетная модель реактора

При расчете спектра нейтронов использовались библиотеки оцененных ядерных данных ENDF-B7 [5].

Используя программный комплекс расчёта активации конструкционных материалов, получены активности радионуклидов в КС и ОС. В состав программного комплекса входят программы подготовки групповых констант из файлов оцененных данных; библиотека ядерно-физических данных; алгоритмы расчёта радиационных характеристик продуктов деления и наведенной активности.

Библиотека ядерно-физических данных включает в себя: библиотеки свойств радионуклидов; групповые сечения активации; независимый выход продуктов деления групповые характеристики  $\gamma$ -излучения,  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения.

В общем случае алгоритм расчёта радиационных характеристик состоит в следующем: до момента останова реактора накапливаются осколки деления и нарабатываются продукты активации, происходят радиоактивный распад и выгорание продуктов радиоактивного распада; после останова реактора – только распад радионуклидов.

В основу алгоритма расчёта, который позволяет получить зависящие от времени активности образца по каждому изотопу (Бк), массы активных и стабильных изотопов (кг), групповые спектры  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения всего образца, заложены аналитические решения балансных дифференциальных уравнений.

В программном комплексе расчет наведенной активности выполняется для среднего спектра нейтронов в заданном объёме.

Расчет проводился для ОС из трех типов сталей Св-09ХГНМТА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А и для КС из стали 08Х18Н10Т.

В результате проведенных расчетов были получены изотопный состав облученных ОС и КС состоящий из более чем 100 изотопов (см. таблицу 1). Далее изотопы, имеющие наибольшую активность, отобраны для дальнейшего анализа и учета в разрабатываемой методике.

На рисунке 2 показана зависимость активности сталей ОС и КС от времени.

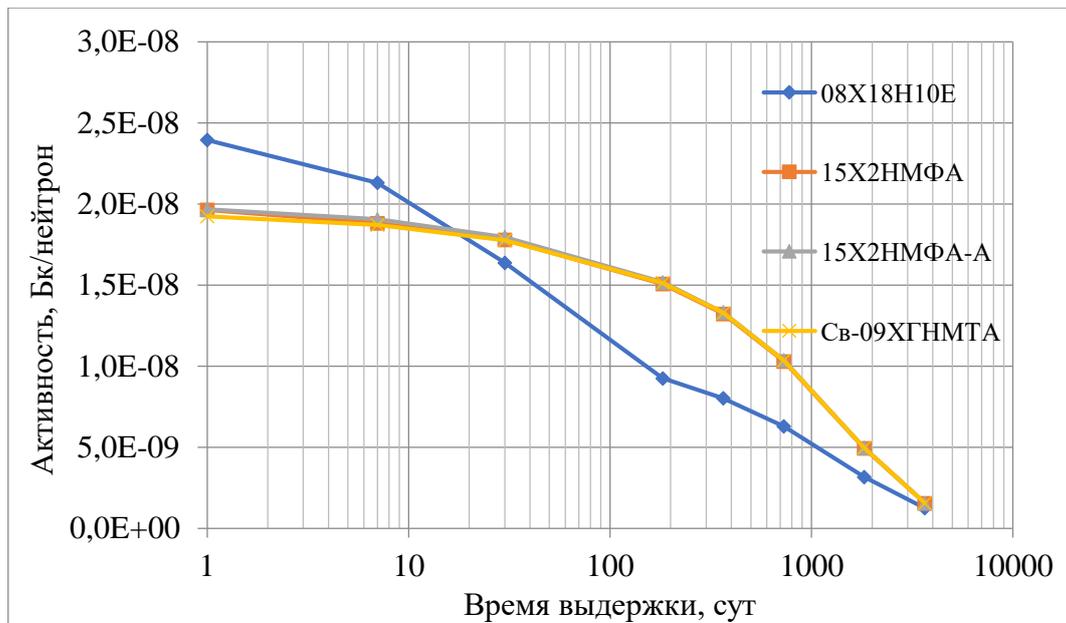


Рисунок 2 – Изменение активности сталей после облучения

Для основных радионуклидов амбиентного эквивалента выполнен расчет дозы (МАЭД) на расстоянии 1 м от КС при условии равномерного распределения радионуклидов по объему КС с ОС и с учетом реальной конструкции КС с ОС.

Таблица 1

**Перечень изотопов, учитываемых при расчете**

| Изотоп   |          |          |          |          |          |           |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 1-H-3    | 13-Al-30 | 22-Ti-51 | 26-Fe-53 | 28-Ni-63 | 40-Zr-90 | 41-Nb-98  |
| 3-Li-8   | 14-Si-31 | 23-V-48  | 26-Fe-55 | 28-Ni-65 | 40-Zr-93 | 41-Nb-100 |
| 4-Be-8   | 14-Si-32 | 23-V-49  | 26-Fe-59 | 29-Cu-62 | 40-Zr-95 | 42-Mo-91  |
| 4-Be-10  | 14-Si-33 | 23-V-50  | 26-Fe-60 | 29-Cu-64 | 40-Zr-96 | 42-Mo-93  |
| 4-Be-11  | 15-P-30  | 23-V-52  | 26-Fe-61 | 29-Cu-66 | 40-Zr-97 | 42-Mo-99  |
| 5-B-12   | 15-P-32  | 23-V-53  | 27-Co-56 | 31-Ga-72 | 40-Zr-98 | 42-Mo-101 |
| 5-B-13   | 15-P-33  | 23-V-54  | 27-Co-57 | 31-Ga-73 | 41-Nb-90 | 43-Tc-99  |
| 6-C-11   | 15-P-34  | 24-Cr-49 | 27-Co-58 | 32-Ge-73 | 41-Nb-90 | 43-Tc-101 |
| 6-C-14   | 15-P-35  | 24-Cr-51 | 27-Co-60 | 32-Ge-75 | 41-Nb-91 | -         |
| 6-C-15   | 15-P-36  | 24-Cr-55 | 27-Co-61 | 33-As-74 | 41-Nb-92 | -         |
| 12-Mg-27 | 16-S-35  | 25-Mn-53 | 27-Co-62 | 33-As-76 | 41-Nb-93 | -         |
| 13-Al-26 | 16-S-37  | 25-Mn-54 | 27-Co-63 | 39-Y-88  | 41-Nb-94 | -         |
| 13-Al-28 | 21-Sc-47 | 25-Mn-56 | 27-Co-64 | 39-Y-89  | 41-Nb-95 | -         |
| 13-Al-29 | 21-Sc-48 | 25-Mn-57 | 28-Ni-57 | 40-Zr-88 | 41-Nb-96 | -         |
| 13-Al-30 | 21-Sc-49 | 25-Mn-58 | 28-Ni-59 | 40-Zr-89 | 41-Nb-97 | -         |

**Методика определения активности**

Непосредственный расчет активности радионуклидов накопленных в ОС при облучении проводится по следующей схеме:

**пределяется МАЭД от КС и от ОС в КС:**

$$H_{КС}^*(10) = H^*(10) \cdot (2 \cdot M_{КС} / M_{КС+ОС}) \cdot D_{КС}$$

$$H_{ОС}^*(10) = H^*(10) - H_{КС}^*(10)$$

где  $D_{КС}$  – относительный вклад в МАЭД КС при одинаковой массе КС и ОС (см. рисунок 3)

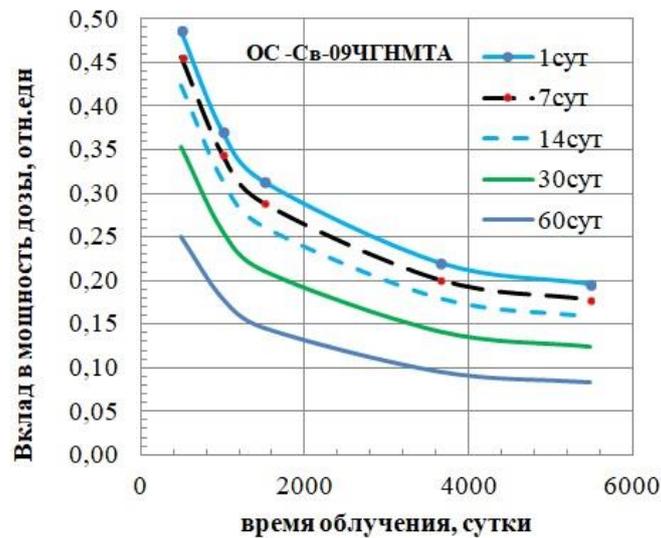


Рисунок 3 – Вклад в мощность дозы от контейнера с ОС (Св-09ХГНМТА) в зависимости от времени облучения.

ассчитывается МАЭД от реперного радионуклида  $^{54}\text{Mn}$ , содержащегося в КС и ОС.

$$H_{\text{КС Mn}}^*(10) = H_{\text{КС}}^*(10) \cdot R_{\text{Mn КС}}$$

$$H_{\text{ОС Mn}}^*(10) = H_{\text{ОС}}^*(10) \cdot R_{\text{Mn ОС}}$$

где  $R_{\text{Mn КС}}$  и  $R_{\text{Mn ОС}}$  – относительные вклады в МАЭД реперного радионуклида  $^{54}\text{Mn}$ , содержащегося в КС и ОС соответственно.  $R_{\text{Mn ОС}}$  для ОС из Св-09ХГНМТА показан на рисунке 4.

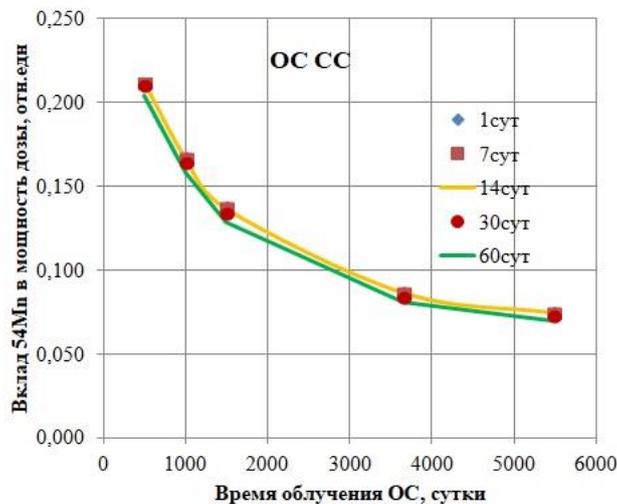


Рисунок 4 – Относительный вклад  $^{54}\text{Mn}$  в мощность дозы от ОС ( $R_{\text{Mn ОС}}$ ) из Св-09ХГНМТА от времени облучения и времени выдержки после останова реакторной установки

ассчитывается активность реперного радионуклида  $^{54}\text{Mn}$ , содержащегося в КС и ОС.

$$A_{\text{КС Mn}} = H_{\text{КС Mn}}^*(10) [\text{мкЗв/ч}] / (8,78 \cdot 10^{-8} [(\text{мкЗв/ч})/\text{Бк}])$$

$$A_{\text{ОС Mn}} = H_{\text{ОС Mn}}^*(10) [\text{мкЗв/ч}] / (8,78 \cdot 10^{-8} [(\text{мкЗв/ч})/\text{Бк}])$$

пределяется суммарная активность радионуклидов в КС

$$A_{\text{КС}} = A_{\text{КС Mn}} \cdot a_{\text{КС}}$$

$$A_{\text{ОС}} = A_{\text{ОС Mn}} \cdot a_{\text{ОС}}$$

где  $a_{\text{КС}}$ ,  $a_{\text{ОС}}$  – отношение суммарной активности к активности  $^{54}\text{Mn}$  для КС и ОС соответственно. Зависимость  $a_{\text{КС}}$  от времени облучения и выдержки показана на рисунке 5.

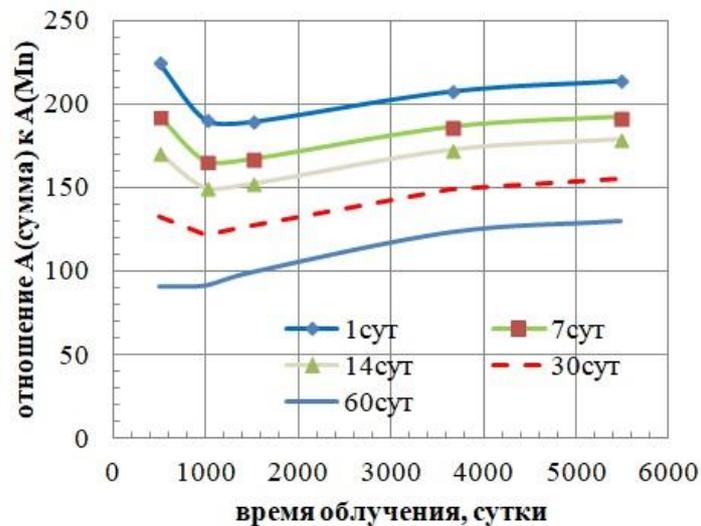


Рисунок 5 – Отношения суммарной активности к активности  $^{54}\text{Mn}$  в КС от времени облучения и времени выдержки после останова РУ

асчет активности основных радионуклидов проводится методом радионуклидный векторов.

$$A_i = A_{Kci} + A_{Oci}$$

$$A_{Kci} = A_{Kc Mn} \cdot K_{Kci}$$

$$A_{Oci} = A_{Oc Mn} \cdot K_{Oci}$$

где  $A_i$  – активность радионуклида;  $K_{Kci}$  и  $K_{Oci}$  радионуклидные вектора.

Методология радионуклидного вектора используется для оценки активности трудноизмеряемых радионуклидов [6]. Под трудноизмеряемыми понимаются радионуклиды имеющие бета излучение и трудноизмеряемое гамма излучение. Специальными исследованиями

устанавливается соотношение между удельной активностью хорошо регистрируемыми гамма активными радионуклидами (реперами) и удельной активностью трудноизмеряемых радионуклидов. Затем по результатам измерения удельной активности «реперных» радионуклидов оценивается удельная активность трудноизмеряемых радионуклидов.

#### Результаты

В таблице 2 приведены результаты расчета для ОС из 15X2НМФА-А облучаемых в течение 10 лет и выдерживаемых в течении 14 дней до измерения. Измеренная мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) от КС с ОС составила 550 мкЗв/ч. В таблице 3 представлены активности основных радионуклидов в облучённых КС и ОС

Таблица 2

#### Результаты расчетов активности КС с ОС

| Параметр  |          | Результат |
|---|----------|-----------|
| МАЭД от КС и от ОС в КС                                   | [мкЗв/ч] | 0,450E+02 |
| МАЭД от реперного радионуклида Mn-54 в КС                 | [мкЗв/ч] | 0,113E+02 |
| Активность от реперного радионуклида Mn-54 в КС           | [Бк]     | 0,137E+09 |
| Суммарная активность радионуклидов в КС                   | [Бк]     | 0,237E+11 |
| МАЭД от ОС в КС   | [мкЗв/ч] | 0,505E+03 |
| МАЭД от реперного радионуклида Mn-54 в ОС                 | [мкЗв/ч] | 0,454E+02 |
| Активность от реперного радионуклида Mn-54 в ОС           | [Бк]     | 0,554E+09 |
| Суммарная активность радионуклидов в ОС                   | [Бк]     | 0,380E+11 |
| Суммарная активности радионуклидов, накопленных в КС с ОС | [Бк]     | 0,617E+11 |

Таблица 3

**Активность основных радионуклидов**

| Изотоп   | Активность радионуклидов [Бк] |           |           |
|----------|-------------------------------|-----------|-----------|
|          | КС                            | ОС        | Сумма     |
| 15-P-32  | 0,671E+07                     | 0,855E+07 | 0,153E+08 |
| 21-Sc-46 | 0,421E+06                     | 0,000E+00 | 0,421E+06 |
| 24-Cr-51 | 0,113E+11                     | 0,260E+10 | 0,139E+11 |
| 26-Fe-55 | 0,113E+11                     | 0,319E+11 | 0,431E+11 |
| 26-Fe-59 | 0,262E+09                     | 0,750E+09 | 0,101E+10 |
| 27-Co-58 | 0,264E+09                     | 0,000E+00 | 0,264E+09 |
| 27-Co-60 | 0,241E+07                     | 0,198E+10 | 0,198E+10 |
| 28-Ni-63 | 0,365E+09                     | 0,828E+08 | 0,448E+09 |
| 42-Mo-99 | 0,632E+06                     | 0,335E+07 | 0,398E+07 |
| 43-Tc-99 | 0,611E+06                     | 0,322E+07 | 0,384E+07 |
| 74-W-185 | 0,467E+08                     | 0,000E+00 | 0,467E+08 |
| 74-W-187 | 0,703E+05                     | 0,000E+00 | 0,703E+05 |

Как видно из таблиц 2 и 3 90% активности КС и ОС составляют трудноизмеряемые изотопы 24-Cr-51 и 26-Fe-55.

**Заключение**

Разработана методика оперативного определения активности основных радионуклидов в облученных образцах-свидетелях с зависимостью от времени облучения и времени выдержки. Входными данными для методики являются значения времени облучения, времен выдержки, масса контейнера (масса образцов свидетелей и тип стали ОС) и измеренная мощность дозы от контейнера с образцами-свидетелями. Оценка активности радионуклидов, накопленных в облученных образцах-свидетелях, проводится методом радионуклидного вектора. По результатам работы оформлен нормативный документ [7]. Работы выполнялась в рамках договоров между Ростовской АЭС и ООО «АтомПромИнжиниринг» при личном участии Генерального директора А.Ю.Соколова.

**ССЫЛКИ**

ПНАЭ Г-7-008-89 Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. 2-е издание, исправленное и дополненное /Госатомэнергонадзор СССР. Москва. Энергоатомиздат, 1990 г.

ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и

трубопроводов атомных энергетических установок /Госатомэнергонадзор СССР. Москва. Энергоатомиздат, 1989 г.

НП 053-04 Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов./ <https://meganorm.ru/Index2/1/4293850/4293850683.htm> (от 12.09.2022)

MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport code. LA-12625-M, Vers. 4B, 1997.

M.B. Chadwick, et al., "ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", Nuclear Data Sheets, Vol. 107, Number 12, Dec 2006, UCRL-JRNL-225066 (2006).

ISO 21238: 2007, The Scaling Factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants

Контроль активности радионуклидов, накопленных в контейнерной сборке с образцами – свидетелями. Энергоблоки 1-4 Ростовской АЭС/ МПК №-81632696-0027-2022 Свидетельство об аттестации методики измерений № 027-01.00281-2013-2022 от 27.07.2022г/ Регистрационный код методики измерений по Федеральному реестру № ФР.1.38.2022.43906.