

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 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А), сварные швы (сталь Св-09ХГНМТА). Исследование механических свойств ОС проводится в специализированных лабораториях, например в НИЦ «Курчатовский институт». В

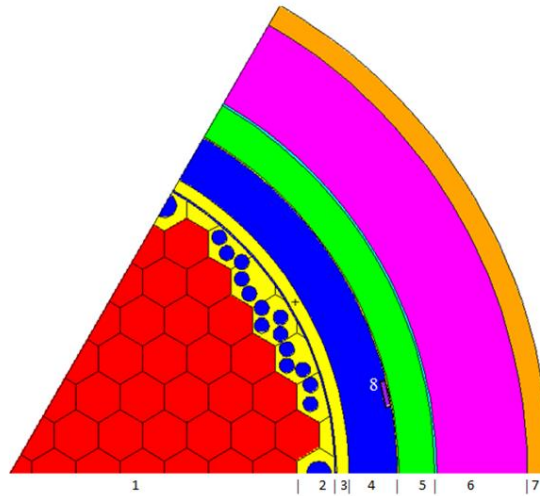
соответствии с нормативными требованиями [3] при транспортировке радиоактивных материалов между организациями необходимо провести паспортизацию – указать общую активность и активность основных радионуклидов. Определение активности радионуклидов является трудоемкой задачей, как с точки зрения применяемого 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 γ -излучения, α - и β -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 γ - и β -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 получен 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.

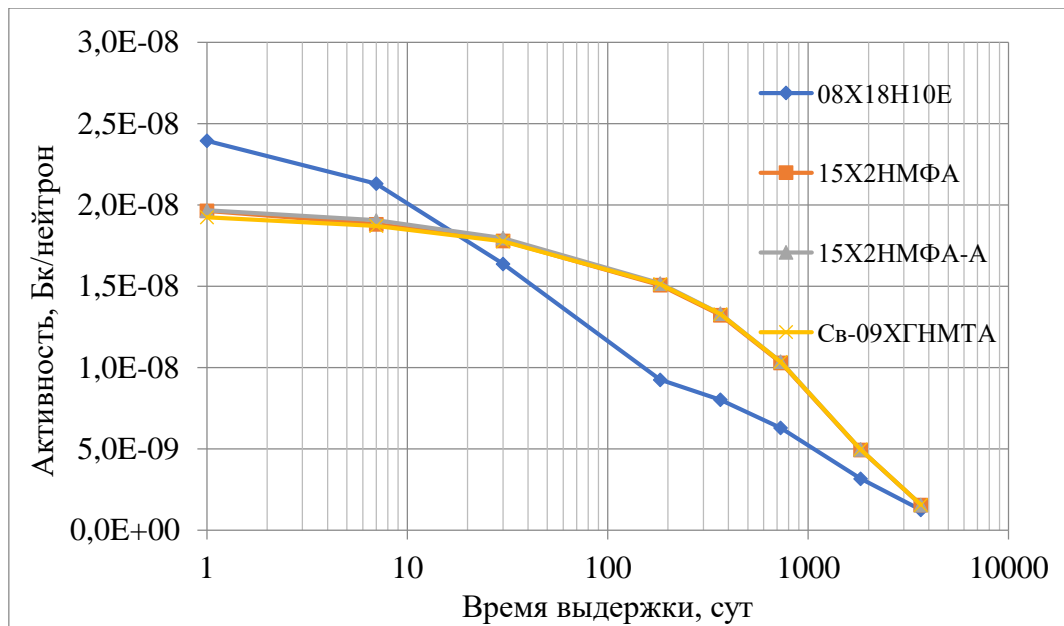


Рисунок 2 – Изменение активности сталей после облучения

Для основных гамма-излучающих радионуклидов выполнен расчет мощности амбиентного эквивалента 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)

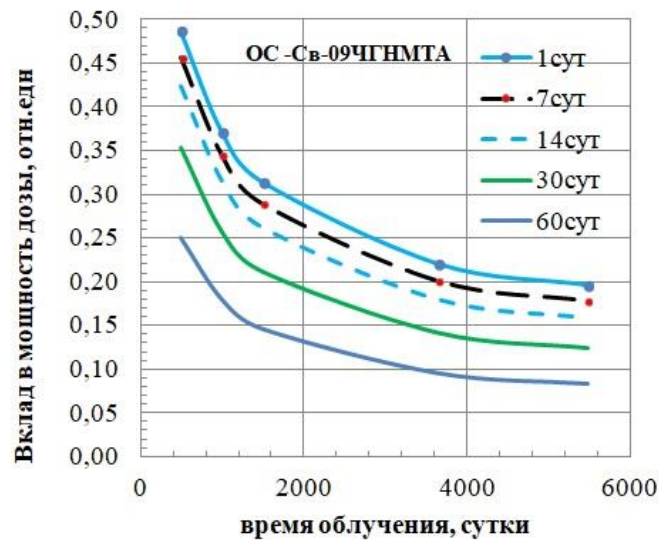


Рисунок 3 – Вклад в мощность дозы от контейнера с ОС (Св-09ХГНМТА) в зависимости от времени облучения.

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

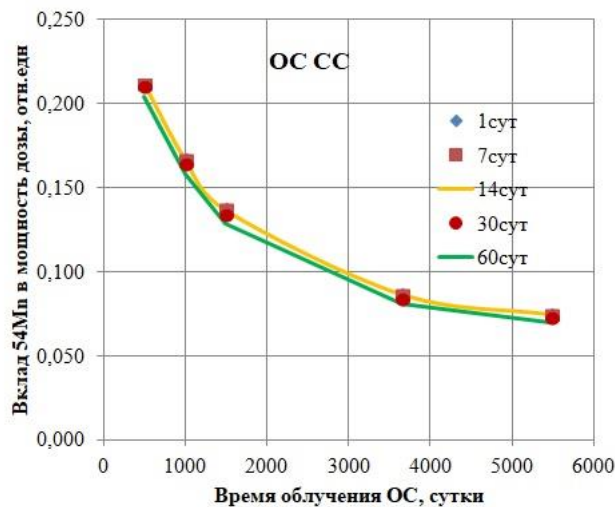


Рисунок 4 – Относительный вклад ^{54}Mn в мощность дозы от ОС ($R_{\text{Mn ОС}}$) из Св-09ХГНМТА от времени облучения и времени выдержки после останова реакторной установки

ассчитывается активность реперного радионуклида ^{54}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}Mn для КС и ОС соответственно. Зависимость $a_{\text{КС}}$ от времени облучения и выдержки показана на рисунке 5.

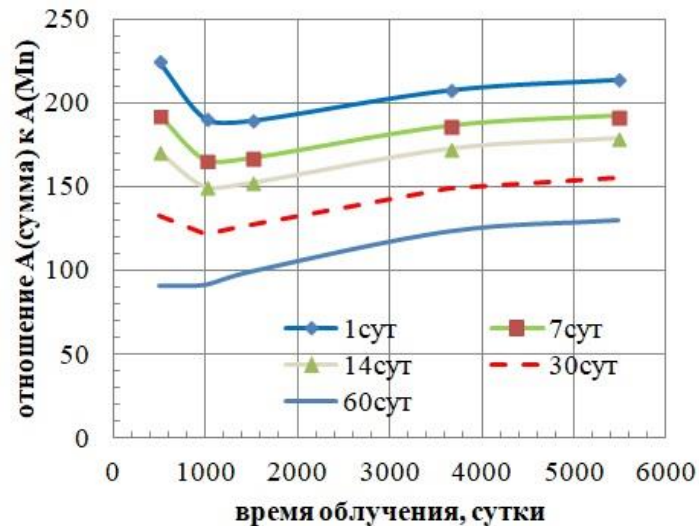


Рисунок 5 – Отношения суммарной активности к активности ^{54}Mn в КС от времени облучения и времени выдержки после останова РУ

асчет активности основных радионуклидов проводится методом радионуклидный векторов.

$$A_i = A_{KCi} + A_{OCi}$$

$$A_{KCi} = A_{KCMn} \cdot K_{KCi}$$

$$A_{OCi} = A_{OCMn} \cdot K_{OCi}$$

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.