

# Расчетное определение радиационных характеристик активируемых средне- и высокоактивных радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации АЭС с ВВЭР

В статье представлена методика расчетного определения удельной активности радионуклидов в РАО в виде отработавших каналов нейтронных измерительных (КНИ) ТВС-2М реактора ВВЭР-1000. Приводятся результаты исследования зависимости удельной активности радионуклидов от наработки КНИ, количества твэгов, содержания гадолиния, обогащения и исходного выгорания ТВС. Расчеты выполнены методом Монте-Карло с применением программы для ЭВМ «MCU-6». Для верификации результатов расчетов предложен метод, основывающийся на измерениях мощности дозы гамма-излучения от активированных РАО.

## **Ключевые слова:**

*ВВЭР, радионуклиды, удельная активность, активация, методика, радиационный контроль, расчет, ПС «MCU-6», верификация.*

**С.С.Селькин, Д.А.Шаров,  
Р.В.Плеханов, А.С.Коротков**

(Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», г. Москва)

При эксплуатации атомных электростанций (АЭС) в результате воздействия нейтронного излучения происходит активация элементов реакторной установки, которые при их извлечении и отсутствии намерений последующего использования относятся к средне- и высокоактивным радиоактивным отходам (далее – САО и ВАО). Из-за высокой радиоактивности прямое инструментальное определение радиационных характеристик активируемых САО и ВАО является затруднительным. В соответствии с ГОСТ [1] для характеризации активируемых САО и ВАО применяется рекомендуемый МАГАТЭ [2] расчетный метод. Расчетные методы предполагают определение активности радионуклидов на основе математического моделирования процессов образования и распространения радионуклидов в цепочках

технологических процессов до образования конкретных РАО. Для расчета наведенной активности активированных материалов применяются специализированные программные средства моделирования переноса нейтронов в веществе и их взаимодействия с материалами элементов реакторной установки [1].

Использование расчетного метода включает в себя: сбор исходных данных (конструкция реакторной установки, условия и история эксплуатации, химический состав материалов), создание расчетной модели с соответствующими граничными условиями, проведение расчетов с применением программного обеспечения для моделирования процессов переноса нейтронов и изменения изотопного состава (нуклидной кинетики). При расчетах учитываются такие параметры, как тепловая мощность реактора, обогащение топлива, загрузка активной зоны и т. д. На основе расчетных исследований определяются значения удельных активностей радионуклидов и соотношения между ними.

В статье представлена методика определения удельной активности радионуклидов в РАО в виде КНИ ТВС-2М реактора ВВЭР-1000 на основе расчетных методов, а также результаты исследования зависимости удельной активности радионуклидов от наработки КНИ, количества твэгов, содержания гадолиния, обогащения и исходного выгорания тепловыделяющей сборки (ТВС).

### Общие характеристики исследуемого объекта

КНИ бывают различных видов и предназначены для контроля следующих параметров активной зоны реакторов типа ВВЭР атомных электростанций [11,12]:

- плотности потока нейтронов и энерговыделения;
- температуры теплоносителя;
- температуры реактора (активной зоны) в аварийном состоянии;

- уровня теплоносителя в корпусе реактора.

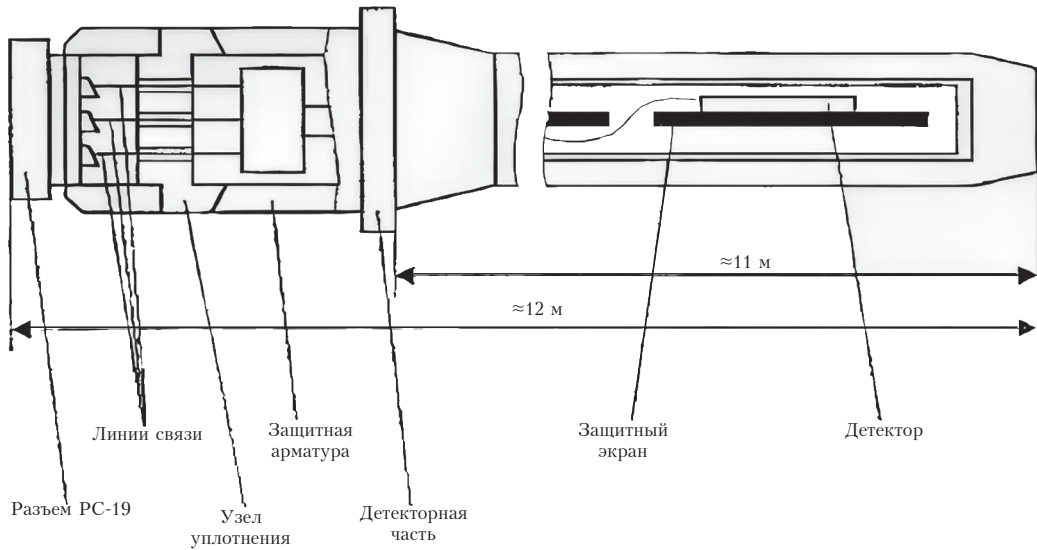
КНИ устанавливаются в центральную трубку ТВС и включают в себя:

- первичные измерительные преобразователи (детекторы прямого заряда (ДПЗ), термопары, термостаты), которые в зависимости от конфигурации позволяют контролировать плотность потока нейтронов, температуру теплоносителя, уровень теплоносителя в активной зоне;
- чехол, обеспечивающий герметизацию корпуса реактора и предохраняющий первичные измерительные преобразователи от воздействия среды активной зоны;
- узел герметизации КНИ, обеспечивающий герметизацию корпуса реактора в случае разрушения погружаемой части чехла;
- электрический соединитель, обеспечивающий передачу сигналов от КНИ к шлейфу.

Основной токообразующий процесс в ДПЗ определяется реакцией радиационного захвата, протекающей в материале эмиттера ( $^{103}\text{Rh}$ ) с образованием и последующим распадом наведенного бета-активного радионуклида  $^{104}\text{Rh}$ . ДПЗ представляет собой источник тока, в котором измеряемый ток возникает за счет использования кинетической энергии заряженных частиц [10].

В КНИ используются кабельные термоэлектрические преобразователи с минеральной изоляцией в герметичном исполнении. Материал термоэлектродных жил – сплав хромель и сплав алюмель или их аналоги. Материал изоляции – MgO. Материал чехла – сталь 08X18H10T [3]. На рис.1 представлена конструкция КНИ [11]. Элементный состав стали 08X18H10T приведен в табл.1 [3].

В табл.1 отсутствует информация о содержании в стали кобальта. Однако известно, что одним из основных активируемых в сталях радионуклидов является  $^{60}\text{Co}$ . Данный радионуклид образуется в основном в реакции захвата нейтронов стабильным изотопом  $^{59}\text{Co}$ .



**Рис.1.** Конструкция КНИ [11].

Согласно [4] в образцах стали марки 08X18H10T наблюдаются большие колебания содержания примеси кобальта (0,02–0,35 масс.%) при наиболее вероятном значении 0,074 масс.%, которое и использовалось в расчетах. Близкое к указанному значению примеси кобальта в стали 08X18H10T (0,076 масс.%) было обосновано в [13] на основе комплекса экспериментальных и расчетных исследований.

Назначенный срок службы КНИ от ввода в эксплуатацию составляет для КНИ, применяемых на ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, 4 года [10].

### Расчетная модель

Для моделирования изменения изотопного состава КНИ проведены нейтронно-физические расчеты с применением программного комплекса «MCU-6» [5,6], реализующего метод Монте-Карло. В программном комплексе «MCU-6» [7] для решения системы уравнений изотопной кинетики применяется модуль выгорания BURNUP, использующий приближение, которое на каждом временном шаге плотности нейтронного потока предполагается постоянным.

Для кросс-валидации результатов расчетов дополнительно были также выполнены расче-

ты с использованием аналогичной модели в программном комплексе «Serpent» [8].

Расчетная модель представляла собой ТВС-2М с граничными условиями отражения. В модели приняты следующие допущения:

- расчеты активации КНИ проведены для четырех различных видов сборок ТВС-2М. Описание рассматриваемых ТВС представлено в табл.2. Выбор ТВС с различными значениями по обогащению твэлов, количеству твэлов и твэггов позволяет охватить диапазоны значений обогащения и количества твэгов, использовавшихся при эксплуатации номенклатуры ТВС;
- первичные измерительные преобразователи представлялись в виде гомогенной смеси внутри чехла;
- тепловая мощность ТВС равна 19,141 МВт, что соответствует номинальной тепловой мощности реактора, деленной на количество ТВС в активной зоне.

Изображения расчетных моделей представлены на рис.2.

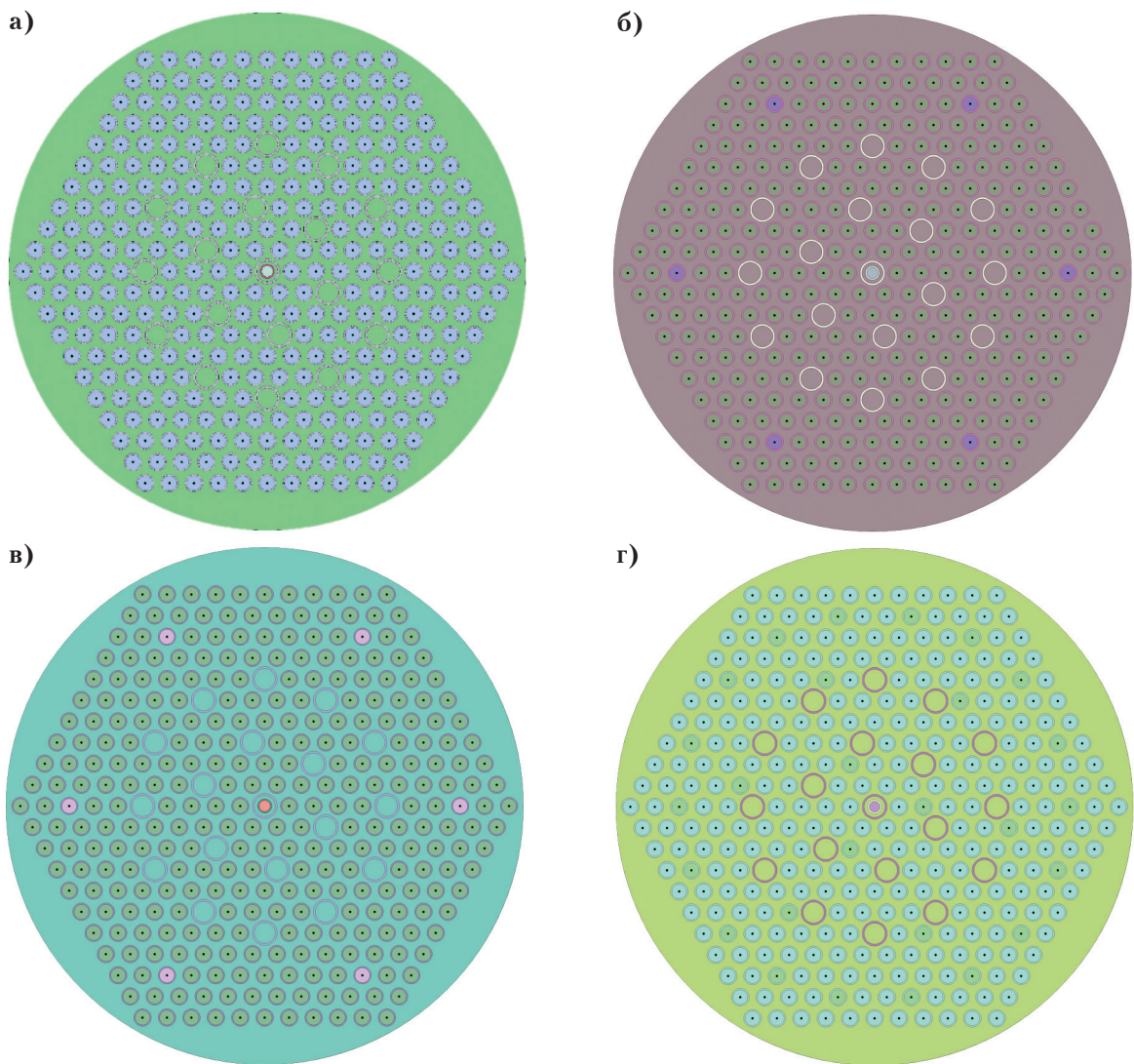
Наведенная активность КНИ определялась путем моделирования облучения КНИ в процессе выгорания указанных в табл.2 топливных кассет в нейтронном потоке.

**Табл.1.** Элементный состав стали 08X18H10T в процентах [3].

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Co	Cu
0,03–0,06	< 0,8	1,0–2,0	17,0–19,0	10,0–11,0	3,0	-	0,035	0,02	-	-

**Табл.2.** Описание рассматриваемых ТВС-2М.

Обозначение ТВС-2М	Сборка 1	Сборка 2	Сборка 3	Сборка 4
Количество твэлов, шт.	312	306	306	285
Обогащение твэлов, %	2,2%	4,3%	4,95%	4,95%
Количество твэгов, шт.	0	6	6	27
Обогащение твэгов, %	-	3,6%	3,6%	3,6%



**Рис.2.** Изображения расчетных моделей ТВС-2М: а) сборка 1, б) сборка 2, в) сборка 3, г) сборка 4.

**Табл.3.** Относительные вклады радионуклидов в суммарную удельную активность активированного КНИ и их изменение с течением времени после прекращения облучения.

Радионуклид	Относительная доля радионуклида, %						
	0 лет	1 год	5 лет	10 лет	100 лет	1000 лет	10000 лет
C-14						0,88	0,37
Cr-51	54,80	0,02					
Fe-55	18,66	61,74	57,71	40,67			
Co-58	12,07	1,35					
Co-60	6,31	23,55	35,81	46,37			
Mn-54	5,87	11,20	1,13	0,05			
Ni-59		0,02	0,04	0,1	1,42	86,57	99,48
Fe-59	1,42						
Ni-63	0,50	2,12	5,31	12,81	98,58	12,09	
Mo-93						0,23	0,06
Nb-93m						0,2	0,05
Mo-99	0,20						
Tc-99						0,03	0,04
Tc-99m	0,17						

Процесс выгорания кассет проходил в течение нескольких топливных кампаний с выдержкой 1 месяц между кампаниями, соответствующей плановому ремонту.

Для всех типов кассет выполнялось моделирование выгорания до величины 53 МВт·сут/кг. Хотя не все типы кассет из рассматриваемой номенклатуры реально достигают такого выгорания, при выполнении расчетных исследований это обеспечивало единообразие и полноту данных для определения вида зависимости соотношений между удельными активностями радионуклидов от наработки КНИ (или выгорания ТВС).

В компоненты радионуклидного вектора (набор относительных вкладов радионуклидов в суммарную удельную активность радиоактивных отходов) [1] активированного КНИ отбирались радионуклиды, формирующие после выдержки вклад в сумму нормированных на ПЗУА значений удельной активности более 99%. Итоговый список радионуклидов-компонентов радионуклидного вектора включал радионуклиды  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

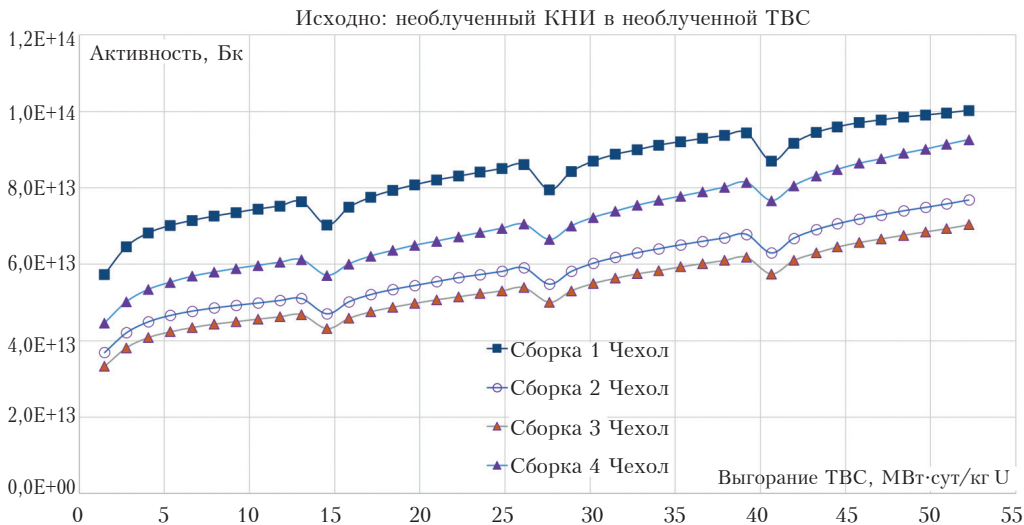
### Результаты моделирования выгорания КНИ

Результаты расчетов в виде относительных вкладов различных радионуклидов в суммарную удельную активность активированных КНИ, а также динамика их изменения в процессе выдержки – через 1, 5, 10, 100, 1000 и 10000 лет – представлены в табл.3. В результате активации в КНИ, помимо указанных в табл.3, образуются другие радионуклиды, например,  $^{104}\text{Rh}$ ,  $^{104\text{m}}\text{Rh}$ ,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{65}\text{Ni}$ ,  $^{101}\text{Mo}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{100}\text{Th}$ ,  $^{101}\text{Th}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{55}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ , однако из-за малого периода полураспада из дальнейшего рассмотрения они исключаются.

Указанные радионуклиды преимущественно накапливаются в чехле КНИ. Изменение наведенной активности чехла КНИ в течение выгорания ТВС различных типов представлено на рис.3.

Наблюдаемые на рис.3 локальные минимумы активности соответствуют моментам ремонтов с последующим выводом реактора на номинальную мощность.

По уровню суммарной удельной активности бета-излучающих радионуклидов при выдержке



**Рис.3.** Активность чехла КНИ в зависимости от наработки (выгорания ТВС).

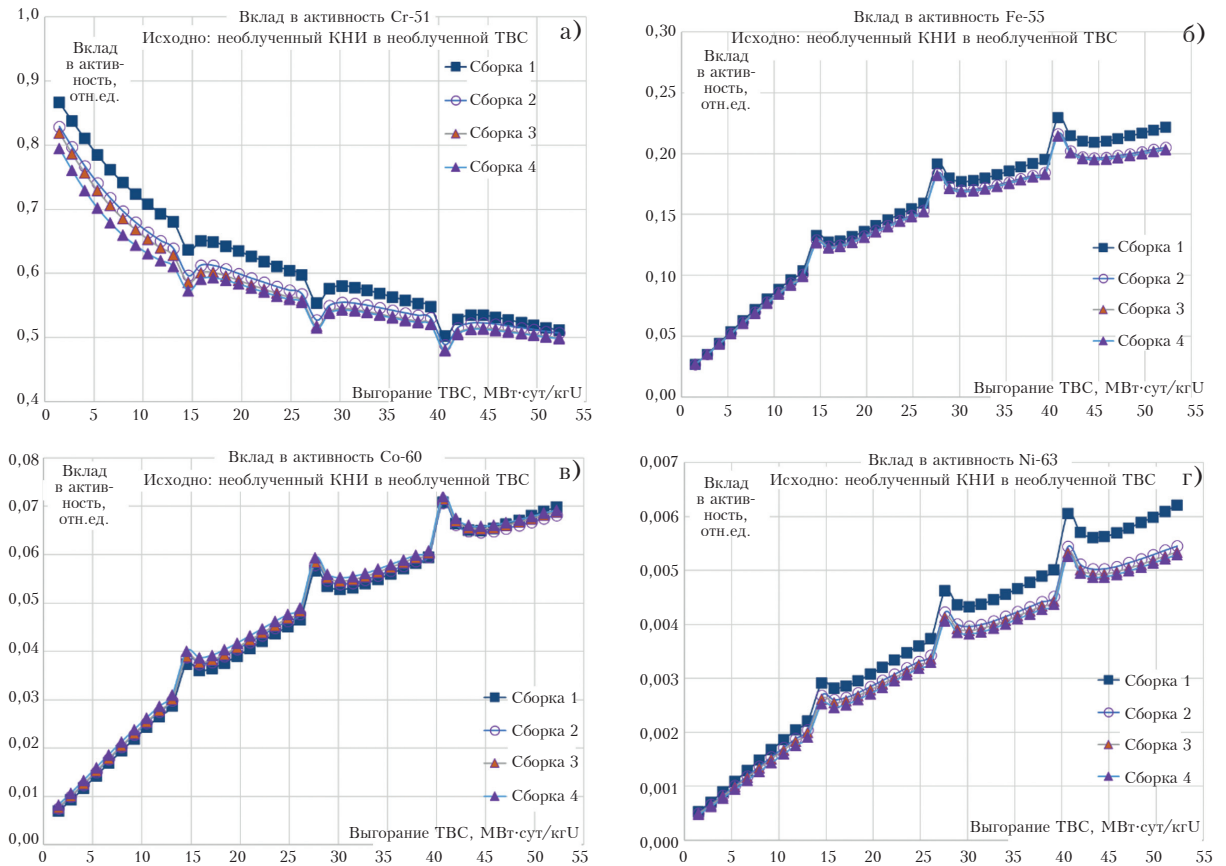
до 520 лет чехол сборки соответствует категории ВАО, а после 520 лет – категории САО [9]. При выдержке до 10 лет определяющий вклад в удельную активность формируется короткоживущим радионуклидом  $^{55}\text{Fe}$  (до 66%) с удельной активностью  $9,44 \cdot 10^9$  Бк/г после 1 года выдержки. Значимый вклад в течение первых 30 лет выдержки дает радионуклид  $^{60}\text{Co}$  (до 49%) с удельной активностью  $3,26 \cdot 10^9$  Бк/г после 1 года выдержки. После 20 лет выдержки и до 650 лет основной вклад формируется чистым бета-излучателем  $^{63}\text{Ni}$  с удельной активностью  $2,72 \cdot 10^8$  Бк/г (при выдержке 20 лет). После 700 лет выдержки радиоактивность чехла сборки определяется  $^{59}\text{Ni}$  с удельной активностью около  $2,86 \cdot 10^6$  Бк/г.

Поскольку удельная активность долгоживущих радионуклидов (с периодом полураспада более 31 года) превышает  $10^6$  Бк/г, отработавшие чехлы сборки соответствуют РАО класса 2 как по старой системе классификации, действовавшей до 01.01.2024, так и по новой в соответствии с постановлением Правительства РФ от 29.10.2022 №1929 «О внесении изменений в постановление Правительства РФ от 19.10.2012 №1069» [14]. Обзор основных положений новой системы классификации РАО и вопросов ее внедрения приведен в [15].

Следует отметить, что наведенная активность КНИ в целом (чехол и ДПЗ) в момент завершения облучения на три–четыре порядка выше представленной на рис.3. Однако активность ДПЗ определяется активностью родиевого эмиттера, сформированной короткоживущими радионуклидами  $^{104}\text{Rh}$  и  $^{104m}\text{Rh}$  (период полураспада  $^{104}\text{Rh}$  – 42 с,  $^{104m}\text{Rh}$  – 4,3 мин) и снижается после выдержки в течение 1 часа в  $6,35 \cdot 10^{25}$  и  $1,59 \cdot 10^4$  раза соответственно. Кроме того, во время нахождения в активной зоне радионуклиды родиевого эмиттера выгорают, что также влияет на активность ДПЗ.

В зависимости от типа кассеты и наработки КНИ (выгорания ТВС) вклады радионуклидов в суммарную удельную активность КНИ варьируются. Изменение относительного вклада радионуклидов в суммарную активность КНИ в течение выгорания ТВС различных типов представлено на рис.4 для  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{63}\text{Ni}$ , формирующих наибольший вклад в определенные промежутки времени после прекращения облучения.

Срок службы КНИ ограничен четырьмя годами. После исчерпания срока службы КНИ заменяется на новый. При этом новый КНИ может быть установлен в выгоревшую ТВС второй (третьей и т. д.) кампании.



**Рис.4.** Динамика относительного вклада радионуклидов  $^{51}\text{Cr}$  (а),  $^{55}\text{Fe}$  (б),  $^{60}\text{Co}$  (в) и  $^{63}\text{Ni}$  (г) в суммарную активность КНИ в течение выгорания ТВС различных типов.

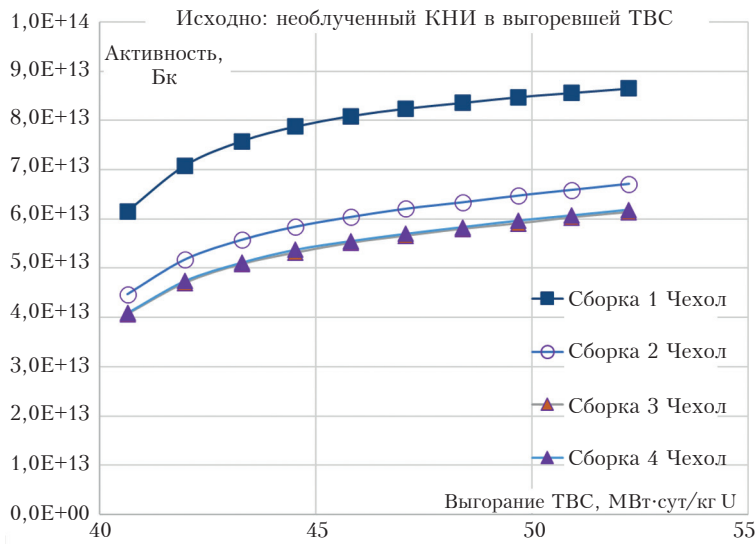
Для оценки влияния начального выгорания ТВС на радионуклидный вектор выполнено моделирование выгорания четвертой кампании ТВС с установленным необлученным КНИ.

Изменение наведенной активности чехла КНИ (изначально необлученного) в течение выгорания ТВС различных типов в четвертой кампании представлено на рис.5.

Результаты проведенных расчетов демонстрируют слабую зависимость относительного вклада радионуклидов в суммарную активность от исходного выгорания кассеты (от того, в выгоревшую или «свежую» ТВС был установлен КНИ). Также слабая зависимость наблюдается от количества твэгов в кассете и содержания гадолия (см. данные для сборок 3 и 4). Более сильная зависимость наблюдается от типа ТВС (ее обогащения) и

от наработки КНИ, выраженной в единицах выгорания ТВС.

Поскольку отработавшие КНИ для последующего обращения в качестве РАО извлекаются из активной зоны в периоды ремонтов реакторов между кампаниями, то при формировании радионуклидного вектора особое значение (с наибольшим весом) имеют результаты расчетов активностей в моменты времени на конец кампаний. Обобщение результатов расчетов целесообразно выполнить в виде аппроксимации с использованием данных в точках на конечные моменты кампаний. Наблюдаемая в области малой наработки КНИ (для первой кампании) нелинейность относительного вклада в активность на графиках радионуклидов  $^{59}\text{Fe}$  и  $^{58}\text{Co}$ , представленная на рис.6, не внесет существенной погрешности,



**Рис. 5.** Изменение наведенной активности чехла КНИ (изначально необлученного) в течение выгорания ТВС различных типов в четвертой кампании.

поскольку извлечение КНИ с малой наработкой, менее 10–15 МВт·сут/кгU, маловероятно.

Удовлетворительное описание относительных нуклидных вкладов, полученных при моделировании выгорания, обеспечивает аппроксимация функцией вида:

$$f_i = A_0 + A_1 \cdot B + A_2 \cdot B^2 + A_3 \cdot U, \quad (1)$$

где:  $f_i$  – относительный вклад радионуклида в активность;  $A_0, A_1, A_2, A_3$  – коэффициенты для аппроксимирующей функции;  $B$  – наработка КНИ в единицах выгорания ТВС (МВт·сут/кг);  $U$  – обогащение кассеты, %.

При использовании такой функции в «рабочем» диапазоне наработки КНИ (от 10 до 45 МВт·сут/кг в единицах выгорания ТВС) среднее квадратическое отклонение результата аппроксимации от расчетных значений не превышает 2%.

### Метод верификации расчетных значений активности радионуклидов в упаковке РАО

В соответствии с требованиями федеральных норм и правил [16,17], характеристики РАО могут определяться расчетными методами при условии, что они основаны на резуль-

татах предварительных прямых и (или) косвенных измерений. Для подтверждения достоверности расчетных значений при паспортизации РАО может применяться метод верификации на основе измерения МАЭД гамма-излучения от упаковки с РАО, содержащей отработавшие КНИ. При этом расчетные значения удельной активности радионуклидов в КНИ сопоставляются со значениями, определенными с учетом относительных вкладов радионуклидов (радионуклидный

вектор) в суммарную удельную активность, исходя из результата измерения МАЭД.

Суммарная активность радионуклидов в РАО  $A$ , Бк, по результатам измерения МАЭД гамма-излучения  $P_{нф}$ , мЗв/ч, определяется по формуле:

$$A = \frac{P_{нф}}{\sum_{i=1}^n p_i \cdot f_i}, \quad (2)$$

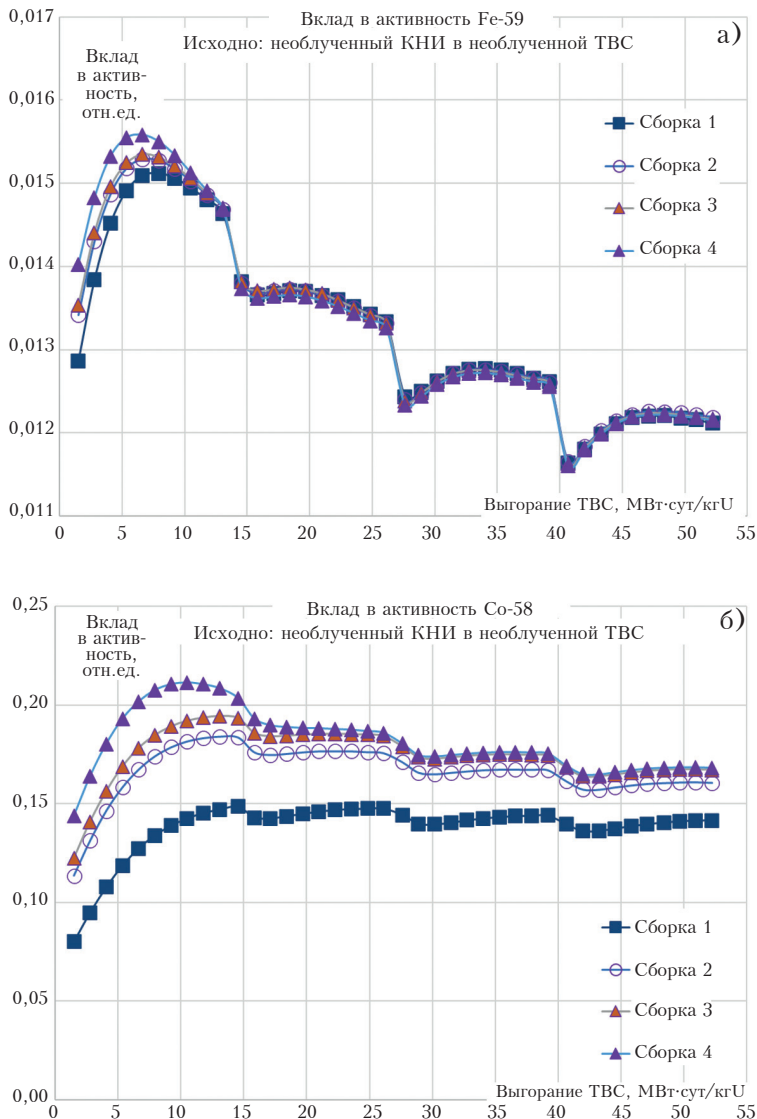
где  $p_i$  – коэффициенты перехода от активности радионуклидов к формируемой им МАЭД, мЗв/(ч·Бк), определяемые расчетно на основе моделирования распространения излучения при заданных характеристиках упаковки с РАО.

Активности радионуклидов, содержащихся в упаковке РАО, определяются в соответствии с относительными долями в суммарной активности  $f_i$ , используя выражение:

$$A_i = A \cdot f_i. \quad (3)$$

Удельная активность радионуклидов в упаковке с РАО определяется путем деления активности на массу отходов. Определенные таким образом значения удельной активности радионуклидов сопоставляются с учетом соответствующих значений неопределенности





**Рис. 6.** Вклад в активность  $^{59}\text{Fe}$  (а) и  $^{58}\text{Co}$  (б) соответственно для сборок 1–4.

с ранее полученными расчетными значениями и в случае сходимости подтверждают возможность их использования для паспортизации РАО.

Представленный метод верификации применим при выдержке отработавших КНИ до 35 лет, пока гамма-излучающие радионуклиды формируют значимый вклад в активность.

### Выводы

В статье представлена методика определения удельной активности радионуклидов в РАО в виде отработавших каналов нейтрон-

ных измерительных (КНИ) ТВС-2М реактора ВВЭР-1000 на основе расчетных методов, а также метод верификации расчетных значений по результатам измерения МАЭД гамма-излучения от упаковки РАО с применением радионуклидного вектора.

При разработке методики выполнены расчетные исследования, направленные на определение факторов, влияющих на состав, и активности основных радионуклидов, образующихся в КНИ в процессе эксплуатации на АЭС. В процессе проведения расчетных исследований получены зависимости вкладов отдельных радионуклидов в суммарную активность от наработки КНИ в единицах выгорания ТВС и обогащения кассет.

Анализ результатов моделирования выгорания кассет и наработки КНИ выявил слабую зависимость относительного вклада радионуклидов в суммарную активность

от исходного состояния кассеты, количества твэгов и содержания гадолиния. Более сильная зависимость наблюдается от типа топливной сборки и наработки КНИ.

Проведенные расчетные исследования показали, что основными радионуклидами, определяющими радиоактивность активированных КНИ, являются  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

По уровню суммарной удельной активности бета-излучающих радионуклидов при выдержке до 520 лет отработавший чехол

сборки соответствует категории ВАО, а после 520 лет – категории САО в соответствии с критериями ОСПОРБ-99/2010 [9]. В течение первых 10 лет выдержки определяющий вклад в удельную активность формируется короткоживущим радионуклидом  $^{55}\text{Fe}$  (до 66%) с удельной активностью  $9,44 \cdot 10^9$  Бк/г после 1 года выдержки. Значимый вклад в течение первых 30 лет выдержки дает радионуклид  $^{60}\text{Co}$  (до 49%) с удельной активностью  $3,26 \cdot 10^9$  Бк/г после 1 года выдержки. После 20 лет выдержки и до 650 лет основной вклад формируется чистым бета-излучателем  $^{63}\text{Ni}$

с удельной активностью  $2,72 \cdot 10^8$  Бк/г (при выдержке 20 лет). После 700 лет выдержки радиоактивность чехла сборки определяется  $^{59}\text{Ni}$  с удельной активностью около  $2,86 \cdot 10^6$  Бк/г.

Удельная активность долгоживущих радионуклидов  $^{63}\text{Ni}$  и  $^{59}\text{Ni}$  в чехлах сборки на момент извлечения из активной зоны превышает  $10^6$  Бк/г. В связи с этим отработавшие КНИ соответствуют удаляемым РАО класса 2 как по старой системе классификации, действовавшей до 01.01.2024, так и по новой в соответствии с [14].

### Литература

1. ГОСТ Р 59968-2021. Радиоактивные отходы атомных станций. Определение радиационных характеристик для передачи на захоронение.
2. International Atomic Energy Agency, 2019. Methodologies for Assessing the Induced Activation Source Term for Use in Decommissioning Applications, Safety Reports Series no. 95, Vienna.
3. Абрамович М.Д., Вотинов С.Н., Иолтуховский А.Г. Радиационное материаловедение на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. A.S. Zhilkin, O. Starkov, E.V. Shestopalov, «Cobalt and other impurities in reactor steels», *Soviet Atomic Energy*, no. 5, pp. 264-266.
5. Верификация программы MCU-6 на основе международного банка данных критических экспериментов и критических состояний реактора ВВЭР-1000. Отчет НИЦ КИ. № 241-07/22-14 от 22.10.2014.
6. Описание применения и инструкция пользователя компьютерного кода MCU-6. Изм. 22.10.14, М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2020.
7. Юдкевич М.С. Пакет прикладных программ BURNUP для расчета изотопного состава материалов работающего реактора. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, № 4, с. 24-28.
8. J. Leppunen и др. «The Serpent Monte Carlo code: Status, development, and applications in 2013», *Annals of Nuclear Energy*, 2015.
9. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).
10. Белозеров В.И., Жук М.М., Кузина Ю.А., Терновых М.Ю. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000. Монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2014, 288 с.
11. Выговский С.Б., Семенов А.А., Рябов Н.О., Чернов Е.В. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР. Учебное пособие для вузов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011, 376 с.
12. Мительман М.Г., Троценко В.М., Титов О.В., Кушманов С.А. «Опыт эксплуатации каналов измерения нейтронного потока и температуры (КНИТ) на АЭС Тяньвань». МНТК-2009, Подольск.

13. Селькин С.С., Шаров Д.А., Плеханов Р.В., Ерак Д.Ю., Казенов К.Б., Кочкин В.Н., Познырев Е.Н., Решетников А.А., Тимофеев А.М., Маматов А.П. Исследование радиационных характеристик корпуса реактора и ВКУ, остановленного для подготовки к выводу из эксплуатации блока № 3 Нововоронежской АЭС с РУ ВВЭР-440 // Радиоактивные отходы. 2024. № 1(26). С. 16-25.
14. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069».
15. Иванов Е.А., Коротков А.С., Шаров Д.А., Курындин А.В., Шарафутдинов Р.Б. Актуальные вопросы внедрения новой системы классификации удаляемых радиоактивных отходов // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 4(110). С. 47-56. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.110.4.004.
16. НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения».
17. НП-067-16 «Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации».

## Computational Determination of Radiation Characteristics of Activated Medium- and High-Level Radioactive Waste Produced During Operation of NPPs with VVER

Selkin Sergey, Sharov Dmitrii, Plekhanov Ruslan, Korotkov Alexey (JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation», Moscow, Russia)

**Abstract.** The article describes the methodology of computational determination of specific activity of radionuclides in the radioactive waste in the form of spent neutron measurement channels (NMCs) TVS-2M of VVER-1000 reactor. The results of research on the dependence of the specific activity of radionuclides on the NMC lifetime, number of fuel elements, gadolinium amount, enrichment and initial burn-up of fuel assemblies are given. The calculations have been carried out by the Monte Carlo method using the MCU-6 computer program. To verify the results of calculations, a method based on measurements of the gamma radiation dose rate from activated radioactive waste is proposed.

**Keywords:** VVER, radionuclides, specific activity, activation, methodology, radiation monitoring, calculation, MCU-6, verification.

С.С.Селькин (гл. спец.), Д.А.Шаров (к.ф.-м.н., зам.директора), Р.В.Плеханов (нач.отд.),  
А.С.Коротков (зам.рук.департамента, нач.лаб.)

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», г. Москва

Контакты: тел. +7 (499) 796-94-62, SSSelkin@vniiaes.ru