

# РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА РУ РБМК-1000

С. С. Селькин, Д. А. Шаров, Р. В. Плеханов, Д. Л. Зинаков

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Москва

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2024 г.

*С целью прогнозирования радиационных характеристик реакторного графита при выводе из эксплуатации энергоблоков с реакторной установкой (РУ) РБМК проведено расчетное исследование радиационных характеристик графитовой кладки блока № 2 Ленинградской АЭС. Вычисления осуществлялись методом Монте-Карло с применением программного комплекса (ПК) MCSU-RBMK и верифицировались по массиву экспериментальных данных об удельной активности радионуклидов в реакторном графите. Представлена оценка распределения объемов радиоактивных отходов (РАО) в виде реакторного графита по классам с учетом изменений системы их классификации с 01.01.2024.*

**Ключевые слова:** реакторная установка, РБМК-1000, графитовая кладка, радионуклиды, активация, удельная активность, метод Монте-Карло, вывод из эксплуатации, радиоактивные отходы.

## Введение

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируется 7 реакторов РБМК на трех АЭС: Курской, Ленинградской и Смоленской. Строительство новых энергоблоков с данным типом РУ не планируется и не входит в концепцию дальнейшего развития атомной отрасли [1], а часть из них (1-й и 2-й энергоблоки Ленинградской и Курской АЭС) уже остановлены для вывода из эксплуатации.

В реакторе РБМК в качестве замедлителя и отражателя нейтронов используется графит, который в ходе эксплуатации подвергается воздействию интенсивных полей нейтронов, что приводит к образованию радионуклидов в результате реакции радиационного захвата. Отличительной особенностью облученного

реакторного графита является то, что его активность в основном определяется долгоживущим радиоактивным изотопом углерода  $^{14}\text{C}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 5,703 \cdot 10^3$  лет. В связи с большим объемом (более 1700 тонн на каждом энергоблоке) расходы на обращение с РАО в виде облученного графита могут составлять значительную долю от совокупных затрат на вывод из эксплуатации энергоблоков с РБМК [2]. Как отмечалось в [3], значительная часть активированного реакторного графита по уровню удельной активности соответствует РАО класса 2, которые подлежат захоронению в пунктах глубинного захоронения (ПГЗРО) [4]. В связи с вводом в действие с 01.01.2024 изменений в систему классификации РАО [5], [6], снижающих

консерватизм при их отнесении к классам по содержанию долгоживущих радионуклидов, представляется целесообразным проведение оценок распределения реакторного графита в соответствии с новой классификацией с учетом влияющих факторов.

В данной статье представлены результаты расчетных исследований активности радионуклидов в реакторном графите остановленного для подготовки к выводу из эксплуатации блока №2 Ленинградской АЭС, выполненных на основе полномасштабной модели реактора РБМК-1000, реализованной в программе для ЭВМ MCU-RBMK [7], [8], а также оценка распределения РАО в виде графита по классам для захоронения в соответствии с новой классификацией. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимся в настоящее время массивом экспериментальных данных. Результаты определения радиационных характеристик металлических конструкций РУ РБМК-1000 и оценка их принадлежности к классам РАО в соответствии с новой классификацией, представлены в статье [10].

### Расчетная модель РУ РБМК-1000

Для определения радиационных характеристик активированного реакторного графита разработана модель РУ РБМК-1000 и проведены расчеты переноса нейтронов, распределения плотности их потока и удельной активности активируемых радионуклидов по элементам установки с применением ПК MCU-RBMK [7], [8]. Данный программный комплекс сформирован из модулей и абсолютно идентичен коду MCU-6, который верифицирован на бенчмарк-экспериментах при расчете функционалов широкого класса размножающих нейтроны систем, в том числе по функции выгорания [11].

Для решения системы уравнений нуклидной кинетики в программе MCU-RBMK применяется модуль выгорания BURNUP [12], [13]. В расчетах использовалось приближение, при котором плотности потоков нейтронов на временном шаге постоянны.

Программа MCU-RBMK позволяет детально моделировать: изменение энергии частицы при столкновениях, опираясь на непрерывную зависимость сечений от энергии, спектры мгновенных и запаздывающих нейтронов, изменение энергии нейтрона в процессе замедления с учетом резонансного характера поглощения.

При расчете изменения изотопного состава весь период облучения материалов

разбивается на последовательные отрезки времени, на которых мощность рассматриваемой системы постоянна. Расчетная система разбивается на зоны, в пределах которых регистрируются скорости реакций, необходимые для расчета изменения изотопного состава топлива на заданном временном промежутке. В каждой зоне рассчитывается усредненный изотопный состав на конец временного отрезка. Таким образом, задача распадается на две части:

- расчет методом Монте-Карло средних по зонам скоростей реакций нуклидов на начало временного промежутка;
- расчет изменения нуклидного состава зоны при зарегистрированных скоростях реакций на различных нуклидах.

Константное обеспечение ПК MCU-RBMK представляет собой библиотеку констант MDB650, состоящую из набора разделов, которые могут использоваться в расчетах с разными частицами и разными подмодулями составного физического модуля.

Библиотека MDB650 состоит из следующих разделов:

ACE — библиотека сечений взаимодействия нейтронов с ядрами различных нуклидов в эпитепловой области энергий в поточечном представлении, полученная из файлов ENDF/B-VI и других источников;

LIPAR — резонансные параметры нуклидов в области разрешенных резонансов;

KORT — библиотека представленных нейтронно-физических констант в области низких энергий (поточечное представление, верхняя граница — 5 эВ);

VESTAM — библиотека для моделирования столкновений нейтронов с ядрами замедлителей в области термализации; представлена в форме вероятностных таблиц, полученных из законов рассеяния  $S(\alpha, \beta)$ ;

BOFS6 — библиотека обобщенных фононных спектров замедлителей;

DOSIM — библиотека активационных сечений в поточечном представлении;

BURN6 — содержит информацию необходимую для решения задач выгорания нуклидов: периоды полураспада ядер, выходы осколков деления, цепочки радиоактивных превращений и т. д.

В ПК были сформированы полномасштабные расчетные модели РУ РБМК-1000 (рис. 1), учитывающие переход на топливо большего обогащения и режим работы, полностью соответствующий графику тепловой мощности энергоблока №2 Ленинградской АЭС.

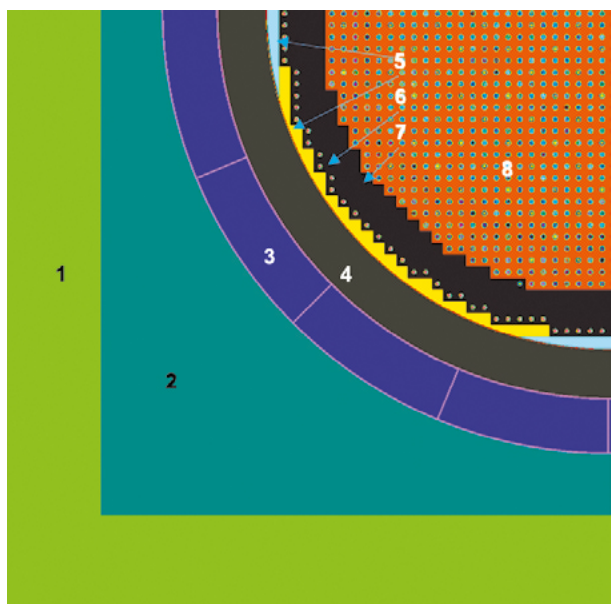


Рис. 1. Фрагмент сечения активной зоны (а.з.) и моделируемой конструкции (МК): 1 – бетонная шахта, 2 – песок, 3 – бак водяной биологической защиты, 4 – газовая полость, 5 – газовая полость внутри кожуха реактора («КЖ»), 6 – каналы охлаждаемого отражателя, 7 – колонны отражателя, 8 – каналы а.з.

### Характеристика исходного химического состава графита

Одним из основных параметров расчетной модели является химический состав элементов систем, подверженных воздействию потоком нейтронов [14]–[18]. С целью его определения выполнен анализ информации, представленной в научной литературе [19]–[29]. Сформированный на основе данных источников состав реакторного графита уточнен путем решения обратной задачи по наилучшему описанию экспериментальных показателей.

Основной вклад в удельную активность графита дает радионуклид  $^{14}\text{C}$  ([25]), который может образоваться как в реакции радиационного захвата нейтронов на стабильном углероде  $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ , так и в реакциях на азоте, присутствующем в составе графита как примесь. При этом, ввиду большого сечения захвата нейтронов, реакция на азоте  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  может быть доминирующим механизмом образования  $^{14}\text{C}$  в графите. Помимо базового содержания примесей азота ( $4 \cdot 10^{-4}$  мас. % [16], [20]) в графитовой кладке, влияние оказывает адсорбция в графитовых порах охлаждающей смеси гелий-азотных газов, которая заполняет герметичную область РУ при избыточном давлении 1,5 кПа на входе в реакторное пространство. Кроме того, возможно использование чисто азотной продувки в процессе эксплуатации реактора на

энергетической мощности до 800 МВт [37]. Расход при этом должен составлять 300–400 м<sup>3</sup>/ч. При сушке кладки допускается продувка азотом с расходом до 1000 м<sup>3</sup>/ч и давлением до 6,0 кПа. Согласно оценкам [21], в случае графита марки ГР-280 с пористостью 23 % для давления 1,5 кПа дополнительная составляющая азота в порах графитовой кладки будет равна  $5,96 \cdot 10^{-3}$  мас. %, а для давления 6,0 кПа –  $2,38 \cdot 10^{-2}$  мас. %. Так как эта компонента может иметь решающее значение в образовании  $^{14}\text{C}$ , то в ходе проведения расчетов использован наиболее консервативный из представленных в литературе показателей [19]–[29] –  $1 \cdot 10^{-2}$  мас. %, [24].

Заложенный в расчетную модель состав графита приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав графита марки ГР-280, заложенный в расчетную модель

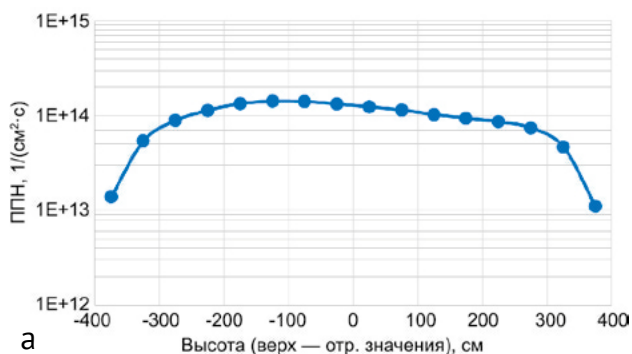
Элемент	Li	B	N	O	Na	Mg
% мас. хим. состава	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Элемент	Al	Si	Cl	K	Ca	Sc
% мас. хим. состава	$3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Элемент	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co
% мас. хим. состава	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-7}$
Элемент	Ni	Cu	Zn	As	Zr	Nb
% мас. хим. состава	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Элемент	Mo	Ag	Cd	Sb	Cs	Eu
% мас. хим. состава	$6 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Элемент	Hf	Ta	W	Th	U	C
% мас. хим. состава	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	9,99·10

Для плотности графита в модели принята величина 1,71 г/см<sup>3</sup>, которая близка к среднему значению за время эксплуатации энергоблока №2 [36] и является оптимальной по опыту нейтронно-физических расчетов, проводившихся при верификации программы MCU [11].

### Результаты расчетов наведенной активности графитовой кладки

По результатам расчетов на основе информации об эксплуатации 2-го энергоблока Ленинградской АЭС через год выдержки суммарная удельная активность бета-излучающих радионуклидов графитовых блоков варьируется в пределах от  $1,19 \cdot 10^4$  (в боковом отражателе)

до  $2,79 \cdot 10^6$  Бк/г (в центральной части а. з.), что определяется пространственной анизотропией плотности потока нейтронов (на рис. 2 представлено ее распределение в графитовых блоках по высоте (а) и радиусу (б) а. з.). В течение выдержки до 1000 лет графит блоков по уровню суммарной удельной активности бета-излучающих радионуклидов соответствует и остается на горизонте тысяч лет в категории среднеактивные РАО (САО) по критериям ОСПОРБ-99/2010 [30].



а

б

Рис. 2. Распределение интегральной плотности потока нейтронов (ППН) в графитовых блоках по высоте (а) и радиусу (б) активной зоны

На рис. 3 приведена зависимость средней по объему удельной активности радионуклидов в графитовых блоках от времени выдержки.

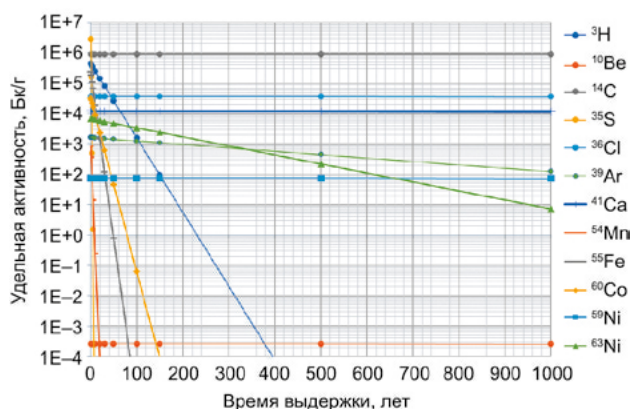


Рис. 3. Зависимость средних удельных активностей радионуклидов графитовых блоков от времени выдержки

Основной вклад в активность графита вносит радионуклид  $^{14}\text{C}$  со средней удельной активностью  $8,01 \cdot 10^5$  Бк/г при выдержке 1000 лет. Получено, что значимую долю в течение 10–20 лет составляет изотоп  $^3\text{H}$  (до 25%) с удельной активностью  $2,52 \cdot 10^5$  Бк/г, образование которого обусловлено реакцией  $(n, \alpha)$  на примеси  $^6\text{Li}$ . Однако, как отмечается в [31], приведенные оценки его содержания в графитовой кладке могут быть завышены, поскольку тритий обладает высокой подвижностью.

По старой системе классификации, действовавшей до 01.01.2024, большая часть графита (99%) по уровню удельной активности соответствует РАО класса 2. Как показали расчеты в рамках новой системы классификации РАО графитовая кладка энергоблока РБМК может быть разделена на классы следующим образом: 36% относится к 2-му; 63% — к 3-му; 1% — к 4-му. Графическое изображение такого распределения представлено на рис. 4 (вертикальное сечение по центральной части графитовой кладки).

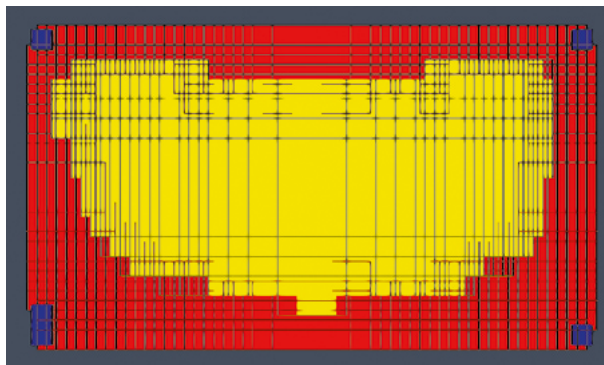


Рис. 4. Графическое изображение распределения по классам РАО (желтый цвет — 2 класс, красный — 3, синий — 4)

РАО класса 2 подлежат захоронению в ПГЗРО, в то время как отходы класса 3 — в пунктах приповерхностного захоронения [4], [32]. Тариф для РАО 2-го класса на 2024 год составляет 858 198,59 рублей, что в 4,6 раз превышает этот показатель для РАО 3-го класса [33]. Таким образом, новая система классификации [5] позволяет в целом существенно сократить затраты на захоронение РАО в виде отработавшего реакторного графита. При этом вопрос определения технологий переработки и кондиционирования графитовых РАО остается открытым.

### Верификация

Для верификации полученных результатов расчетов использовались экспериментальные данные по удельной активности проб графита:

- 31 пробы по  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  [34];
- 15 проб по  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  [35];
- 15 проб по  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  [9].

По имеющемуся массиву данных о содержании в пробах графита вышеуказанных радионуклидов проведено сопоставление с результатами расчетов. В целом получена их удовлетворительная сходимость. Расхождение по отдельным пробам обусловлено неравномерностью содержания примесных элементов как от одной партии графита к другой, так и по объему отдельных элементов кладки, что также отмечается в [18].

Радионуклидом, определяющим радиоактивность графитовой кладки (от 51% на первом году выдержки и до 95% через 1000 лет), является  $^{14}\text{C}$ . Вклад в удельную активность графита остальных изотопов значительно меньше, при этом образуются они, как правило, при активации примесных элементов, содержание которых варьируется по кладке в широких пределах. В связи с этим, а также с учетом того, что класс графитовых РАО в основном определяется содержанием  $^{14}\text{C}$ , для верификации результатов расчетов для графитовой кладки в первую очередь целесообразно использовать информацию по содержанию радиоуглерода.

При верификации проведенных расчетов получено, что относительное отклонение результатов измерений активности  $^{14}\text{C}$  от результатов расчетов составляет в среднем около 24% при величине среднеквадратичного отклонения 36%.

Результат расчетов активности  $^{14}\text{C}$  в большой степени (70–90%) [18] определяется заложенным в расчетной модели количеством активируемого азота, находящегося в качестве примеси графита и накапливаемого в порах и на поверхности блоков и графитовых колец в процессе эксплуатации. Систематическое превышение результатов расчетов над экспериментальными данными на 24% может быть обусловлено в первую очередь несколько завышенной исходной концентрацией активируемого азота в графитовых порах, а также ее вариацией как по объему графитовых блоков, так и между отдельными блоками [25].

Определение содержания активируемого азота в графитовых порах является сложной многофакторной задачей, результат решения которой зависит от:

- истории продувки графита;
- температурного режима эксплуатации графита;
- исходной структуры графита и ее деформации в процессе эксплуатации.

С учетом высокой степени неопределенности количества азота в графите в исходном

состоянии и его изменения в процессе эксплуатации, расхождение между результатами расчетов и измерений на 24% при величине среднеквадратичного отклонения 36% является вполне удовлетворительным и подтверждает адекватность используемых алгоритмов и расчетной модели.

Кроме того, для снижения расхождения между результатами расчетов и измерений целесообразно повышать представительность выборки экспериментальных данных. В настоящее время в АО «Концерн Росэнергоатом» реализуется НИОКР по определению остаточного радиоактивного загрязнения облученного графита реакторов РБМК. Итогом этих исследований будет расширенный массив детальных экспериментальных данных по удельной активности радионуклидов в графите, с применением которого результаты верификации расчетных величин могут быть уточнены.

## Заключение

Проведены расчеты по полномасштабной модели реактора в программном комплексе на основе метода Монте-Карло MCU-RBMK с целью определения наведенной активности графитовой кладки. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными по радионуклиду  $^{14}\text{C}$ , определяющему ее радиоактивность на горизонте тысяч лет.

Получено, что в рамках новой системы классификации РАО существенная часть графита (до 64%) может быть отнесена к 3-му или даже 4-му классу, что значительно упрощает задачу его захоронения и позволяет перейти к практическим работам по передаче отходов в виде графита на захоронение НО РАО после определения способов их кондиционирования.

В тоже время полученные результаты демонстрируют существенную долю неопределенности в расчетных оценках, обусловленную неточностью информации об активируемых примесях в графите.

Для повышения достоверности полученных радиационных характеристик реакторного графита выводимых из эксплуатации блоков РБМК представляется целесообразным проведение комплекса экспериментальных исследований, включающего:

- исследование химического состава реакторного графита с целью определения границ диапазонов наличия примесных элементов;
- изучение распределения удельной активности основных радионуклидов по объему графитовой кладки энергоблоков с различной

- историей эксплуатации для формирования матрицы верификации;
- исследование влияния азотной продувки на наведенную активность графитовой кладки.

### Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2017 г. № 1209-р «Об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2035 г.».
2. Волков В. Г., Сафронова Н. Н., Морозов Ф. Т., Комаров Е. А., Зимин В. К., Былкин Б. К., Зверков Ю. А., Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И. О проблеме заключительного этапа обращения с облученным графитом блоков АЭС с водографитовыми реакторами // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 10–20. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-10-20.
3. Дорофеев А. Н., Комаров Е. А., Захарова Е. В., Волкова А. Г., Линге И. И., Иванов А. Ю., Уткин С. С., Павлюк А. О., Котляревский С. Г. К вопросу захоронения реакторного графита // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 18–30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.
4. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов : постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069.
5. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 : постановление Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929.
6. Иванов Е. А., Коротков А. С., Шаров Д. А., Курьиндин 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.
7. Дружинин В. Е., Бычков А. С., Плеханов Р. В., Иванов И. Е. Верификация ПС MCU-RBMK со вторым каналом подготовки исходных данных КДМК : Верификационный отчет АО «ВНИИАЭС», инв. № От-2056-011/2016. — Москва, 2016.
8. Аттестационный паспорт программного средства MCU-RBMK с банком данных MDB650 (с каналом подготовки исходных данных КДМК), рег. № 430 от 27.02.2018.
9. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И., Волкова А. Г., Захарова Е. В., Комаров Е. А. Подходы

- к характеризации по гамма-излучающим радионуклидам графитовых блоков и их контейнеризации при демонтаже кладок УТР // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 30–43. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-30-43.
10. Селькин С. С., Шаров Д. А., Плеханов Р. В., Зинаков Д. Л. Определение радиационных характеристик металлических конструкций РУ RBMK-1000, остановленных для подготовки к выводу из эксплуатации // Вестник Московского энергетического института. 2024. № 5. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-5-149-158.
  11. Верификация программы MCU-6 на основе международного банка данных критических экспериментов и критических состояний реактора ВВЭР-1000 : Отчёт НИЦ КИ. № 241-07/22-14 от 22.10.2014.
  12. Описание применения и инструкция пользователя компьютерного кода MCU-6. НИЦ «Курчатовский институт». Изм. 22.10.14. — Москва, 2020.
  13. Юдкевич М. С. Пакет прикладных программ BURNUP для расчёта изотопного состава материалов работающего реактора // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2011. № 4. С. 24–28.
  14. Remeikis V., Plukis A., Plukienė R., Garbaras A., Barisevičiūtė R., Gudelis A., Gvozdaitė R., Duškesas G., Juodis L. Method based on isotope ratio mass spectrometry for evaluation of carbon activation in the reactor graphite // Nucl. Eng. Des. 2010. Vol. 240. Iss. 10. Pp. 2697–2703. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.06.020.
  15. Plukiene R., Plukis A., Puzas A., Remeikis V., Duškesas G., Germanas D. Modelling of impurity activation in the RBMK reactor graphite using MCNPX // Journal of Nuclear Science and Technology. 2011. Vol. 2. Pp. 421–426. DOI: 10.15669/pnst.2.421.
  16. Былкин Б. К., Давыдова Г. Б., Краюшкин А. В., Шапошиников В. А. Расчетные оценки радиационных характеристик облученного графита после окончательного останова АЭС с RBMK // Атомная энергия. 2004. Т. 96. № 6. С. 451–456.
  17. Narkunas E., Poskas P., Šmaižys A., Norris S. Estimation of the inventory of <sup>14</sup>C and other key radionuclides in irradiated RBMK-1500 graphite based on limited measurements and full 3D core modeling // Radiocarbon. 2018. Vol. 60. No. 6. Pp. 1849–1859. DOI: 10.1017/RDC.2018.122.
  18. Кан Р. И., Котляревская А. С. Особенности пространственного распределения ключевых радионуклидов активационного происхождения в облученном графите уран-графитовых реакторов. Науч. рук. А. О. Павлюк // Изотопы: технологии, материалы и применение : сборник тезисов докладов VII Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов,

- г. Томск, 25—28 октября 2021 г. — Томск : ТПУ, 2021. С. 149.
19. База данных по реакторному графиту АЭС АО «Росэнергоатом». ТФ, 2019.
20. Обоснование безопасности при проведении локального ремонта по ВРХ реакторной установки энергоблока № 1 Ленинградской АЭС в 2018 году : Отчет 323.122, АО «НИКИЭТ», НИЦ «Курчатовский институт». — Москва, 2018.
21. *Narkunas E., Smaizys A., Poskas P.* Analysis of Nitrogen Impurity Impact on  $^{14}\text{C}$  Generation in Rbmk-1500 Reactor Graphite / EPRI International Decommissioning and Radioactive Waste Management Workshop, 6—7 October 2009, Hamburg, Germany.
22. *Виргильев Ю. С.* Примеси в реакторном графите и его работоспособность // Атомная энергия. 1998. Т. 84. Вып. 1. С. 7—15 (в части данных по блоку № 1 Ленинградской АЭС).
23. *Виргильев Ю. С.* Примеси в реакторном графите и его работоспособность // Атомная энергия. 1998. Т. 84. Вып. 1. С. 7—15 (в части данных по блоку № 2 Ленинградской АЭС).
24. *Буланенко В. И., Фролов В. В., Николаев А. Г.* Радиационные характеристики графита снятых с эксплуатации уран-графитовых реакторов // Атомная энергия. 1996. Т. 81. № 4. С. 304—306.
25. *Бушуев А. В., Кожин А. Ф., Петрова Е. В., Зубарев В. Н., Алеева Т. Б., Гирке Н. А.* Радиоактивный реакторный графит. — М. : НИЯУ МИФИ, 2015. 148 с.
26. *Plukiene R. et al.* Modelling of Impurity Activation in the RBMK Reactor Graphite Using MCNPX // Progress in Nuclear Science and Technology. 2011. Vol. 2. Pp. 421—426. DOI: 10.15669/pnst.2.421.
27. *Ancius D. et al.* Evaluation of the activity of irradiated graphite in the Ignalina Nuclear Power Plant RBMK-1500 reactor // Nukleonika. 2005. Vol. 50. No. 3. Pp. 113—120.
28. *Plukiene R. et al.* Investigation of impurities of RBMK graphite by different methods // Radiocarbon. 2018. Vol. 60. No. 6. Pp. 1861—1870. DOI: 10.1017/RDC.2018.93.
29. *Narkunas E. et al.* Estimation of the inventory of  $^{14}\text{C}$  and other key radionuclides in irradiated RBMK-1500 graphite based on limited measurements and full 3D core modeling // Radiocarbon. 2018. Vol. 60. No. 6. Pp. 1849—1859. DOI: 10.1017/RDC.2018.122.
30. СП 2.6.1.2612-10. Санитарные правила и нормы. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).
31. Обоснование безопасности эксплуатации энергоблока № 2 Ленинградской АЭС на мощности после выполнения локального ремонта по ВРХ реакторной установки в 2016 году : Отчет 321.073. Утв. первым заместителем директора — Генерального конструктора АО «НИКИЭТ». — Москва, 2016.
32. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
33. Тарифы на захоронение радиоактивных отходов на период с 2023 по 2027 годы. НО РАО, Росатом. — URL: <https://www.norao.ru/about/tarify/> (дата обращения: 15.07.2024).
34. *Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И., Волкова А. Г., Захарова Е. В., Илюхина М. А., Горшков В. Б., Дорофеев А. Н., Зиннуров Б. С., Комаров Е. А.* Подходы к характеристике графитовых блоков УГР по бета-излучающим радионуклидам  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$ . Апробация на реакторах типа РБМК-1000 // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 21—32. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-21-32.
35. Послеректорные исследования в горячих камерах образцов (кернах) графита, взятых из кладки энергоблока № 2 Ленинградской АЭС в 2018 году : Отчет. Инв. № 110.9-15вн-19. 78 с.
36. НГР-01-90. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов.
37. *Доллежалъ Н. А., Емельянов И. Я.* Канальный ядерный энергетический реактор. — М. : Атомиздат, 1980. 208 с.

## Информация об авторах

*Селькин Сергей Сергеевич*, главный специалист, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25, корп. 1), e-mail: SSSelkin@vniiaes.ru.

*Шаров Дмитрий Александрович*, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, директор отделения РБ, РАО и ОЯТ, вывода из эксплуатации, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25, корп. 1), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

Плеханов Руслан Владимирович, начальник отдела, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25, корп. 1), e-mail: RVPlehanov@vniiaes.ru.

Зинаков Дмитрий Леонидович, главный специалист, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25, корп. 1), e-mail: DLZinakov@vniiaes.ru.

### Библиографическое описание статьи

Селькин С. С., Шаров Д. А., Плеханов Р. В., Зинаков Д. Л. Расчетное определение радиационных характеристик реакторного графита РУ РБМК-1000 // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 31–41. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-31-41.

---

## COMPUTATIONAL STUDY OF RADIATION CHARACTERISTICS INHERENT IN THE REACTOR GRAPHITE FROM RBMK-1000 UNITS

Selkin S. S., Sharov D. A., Plekhanov R. V., Zinakov D. L.

JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation”, Moscow, Russia

Article received on September 28, 2024

*The paper focuses on a computational study seeking to estimate the radiation characteristics of reactor graphite from RBMK power units at their decommissioning stage based on the case study of Leningrad NPP and its unit №2. The calculations performed in the MCU-RBMK software via the Monte Carlo method were verified based on a data array with experimental specific activities of radionuclides found in the reactor graphite. The paper presents the estimated distribution of radioactive waste volumes represented by reactor graphite according to relevant waste categories with due account of amendments introduced into the radioactive waste classification system since January 1, 2024.*

**Keywords:** reactor plant, RBMK-1000, graphite stack, radionuclides, activation, specific activity, Monte Carlo method, decommissioning, radioactive waste.

### References

1. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 9 iyunya 2017 g. No. 1209-r “Ob utverzhdenii General'noj skhemy razmeshcheniya ob'ektov ehlektrohnergetiki do 2035 g.”* [Order of the Government of the Russian Federation No. 1209-r of June 9, 2017 On the Approved General Siting Layout for Electric Power Facilities Valid Until 2035].

2. Volkov V. G., Safronova N. N., Morozov F. T., Komarov E. A., Zimin V. K., Bylkin B. K., Zverkov Yu. A., Pavliuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I. O probleme

zaklyuchitel'nogo etapa obrashcheniya s obluchennym grafitom blokov AES s vodografitovymi reaktorami [On the Challenge Associated with the Final Stage of Irradiated Graphite Management from Water-Graphite NPP Reactor Units]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 2 (15), pp. 10–20. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-10-20.

3. Dorofeev A. N., Komarov E. A., Zakharova E. V., Volkova A. G., Linge I. I., Utkin S. S., Ivanov A. Yu., Pavliuk A. O., Kotlyarevskij S. G. K voprosu zakhoroneniya reaktornogo grafita [On Reactor Graphite Disposal]. *Radioaktivnye*



*otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 18–30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.

4. *O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov* [On criteria used to categorize solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for radioactive waste categorization as non-removable radioactive waste or removable radioactive waste, and classification criteria for removable radioactive waste] : Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069.

5. *O vnesenii izmeneniy v postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 oktyabrya 2012 g.* [On amendments to the Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012] No.1069 : Government Decree of the Russian Federation of October 29, 2022 No. 1929.

6. Ivanov E. A., Korotkov A. S., Sharov D. A., Kurynin A. V., Sharafutdinov R. B. Aktual'nye voprosy vnedreniya novoy sistemy klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov [Actual problems of implementation of a new classification system for radioactive waste to be removed]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2023, no. 4 (110), pp. 47–56. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.110.4.004.

7. Druzhinin V. E., Bychkov A. S., Plekhanov R. V., Ivanov I. E. *Verifikatsiya PS MCU-RBMK so vtorym kanalom podgotovki iskhodnykh dannykh KDMK* [Verification of the MCU-RBMK software with the second channel for KDMK initial data preparation]. Verification report of JSC VNIIAES, inv. No. Ot-2056-011/2016. Moscow, 2016.

8. *Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva MCU-RBMK s bankom dannykh MDB650 (s kanalom podgotovki iskhodnykh dannykh KDMK)* [Certification passport for the MCU-RBMK software with the MDB650 data bank (with the channel for KDMK initial data preparation)], reg. No. 430 of February 27, 2018.

9. Pavliuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I., Volkova A. G., Zakcharova E. V., Komarov E. A. Podhody k kharakterizatsii po gamma-izluchayushchim radionuklidam grafitovykh blokov i ikh kontejnerizatsii pri demontazhe kladok UGR [Approaches to graphite block characterization by gamma radionuclides and their packaging during UGR stack dismantlement]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. 30–43. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-30-43.

10. Sel'kin S. S., Sharov D. A., Plekhanov R. V., Zinakov D. L. Opredeleniye radiatsionnykh kharakteristik metallicheskikh konstruksiy RU RBMK-1000,

ostanovlennykh dlya podgotovki k vyvodu iz ekspluatatsii [Radiation characterization of metal structures in RBMK-1000 reactor plants shut down for pre-decommissioning activities]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta — Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, no. 5 (2024), DOI: 10.24160/1993-6982-2024-5-149-158.

11. *Verifikatsiya programmy MCU-6 na osnove mezhdunarodnogo banka dannykh kriticheskikh eksperimentov i kriticheskikh sostoyaniy reaktora VVER-1000* [Verification of the MCU-6 software based on an international data bank for critical experiments at WWER-1000 reactor unit and its critical states]. Report by SRC KI. No. 241-07/22-14 of October 22, 2014.

12. *Opisaniye primeneniya i instruksiya pol'zovatelya komp'yuternogo koda MCU-6* [Description of the application and user manual for the MCU-6 computer code]. NRC Kurchatov Institute. Amended as of October 22, 14. Moscow, 2020.

13. Yudkevich M. S. Paket prikladnykh programm BURNUP dlya raschota izotopnogo sostava materialov rabotayushchego reaktora [Package of Applied Programs for Calculating the Isotopic Composition of the Materials of Operating Reactor]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov — Physics of Atomic Nuclei*, 2011, no. 4, pp. 24–28.

14. Remeikis V., Plukis A., Plukienė R., Garbaras A., Barisevičiūtė R., Gudelis A., Gvozdaite R., Duškesas G., Juodis L. Method based on isotope ratio mass spectrometry for evaluation of carbon activation in the reactor graphite. *Nucl. Eng. Des.*, 2010, vol. 240, iss. 10, pp. 2697–2703. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.06.020.

15. Plukiene R., Plukis A., Puzas A., Remeikis V., Duškesas G., Germanas D. Modelling of impurity activation in the RBMK reactor graphite using MCNPX. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 2, pp. 421–426. DOI: 10.15669/pnst.2.421.

16. Bylkin B. K., Davydova G. B., Krayushkin A. V., Shaposhnikov V. A. Raschetnyye otsenki radiatsionnykh kharakteristik obluchennogo grafito posle okonchatel'nogo ostanova AES s RBMK [Calculated radiation characteristics of irradiated graphite after the final shutdown of a NPP with a RBMK power unit]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2004, vol. 96, no. 6, pp. 451–456.

17. Narkunas E., Poskas P., Šmaižys A., Norris S. Estimation of the inventory of <sup>14</sup>C and other key radionuclides in irradiated RBMK-1500 graphite based on limited measurements and full 3D core modeling. *Radiocarbon*, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 1849–1859. DOI: 10.1017/RDC.2018.122.

18. Kan R. I., Kotlyarevskaya A. S. *Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya klyuchevykh*

- radionuklidov aktivatsionnogo proiskhozhdeniya v obluchennom grafitе uran-grafitovykh reaktorov* [Features specific for the key radionuclides of activation origin and their spatial distribution in the irradiated graphite of uranium-graphite reactors]. Scientific director A. O. Pavliuk / *Izotopy: tekhnologii, materialy i primeneniye : sbornik tezisov dokladov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Isotopes: technologies, materials and applications: book of abstracts from the VII International scientific conference of young scientists, graduate students and students], Tomsk, October 25–28, 2021. Tomsk, TPU Publ., 2021. P. 149.
19. *Baza dannykh po reaktornomu grafиту AES AO "Rosenergoatom"* [Database on reactor graphite of NPP operated by Rosenergoatom. TF, 2019.
20. *Obosnovaniye bezopasnosti pri provedenii lokal'nogo remonta po VRKH reaktornoy ustanovki energobloka No. 1 Leningradskoy AES v 2018 godu* [Safety assessment for local repairs proposed to restore the resource characteristics of the reactor power unit No. 1 of the Leningrad NPP in 2018]. Report 323.122. From JSC NIKIET, NRC Kurchatov Institute. Moscow, 2018.
21. Narkunas E., Smaizys A., Poskas P. Analysis of Nitrogen Impurity Impact on  $^{14}\text{C}$  Generation in RbmK-1500 Reactor Graphite / EPRI International Decommissioning and Radioactive Waste Management Workshop, 6–7 October 2009, Hamburg, Germany.
22. Virgil'ev Yu. S. Primesi v reaktornom grafitе i yego rabotosposobnost' [Impurities in the Reactor Graphite and its Serviceability]. *Atomnaya energiya – Atomic energy*, 1998, vol. 84, iss. 1, pp. 7–15 (regarding data on unit No. 1 of the Leningrad NPP).
23. Virgil'ev Yu. S. Primesi v reaktornom grafitе i yego rabotosposobnost' [Impurities in the Reactor Graphite and its Serviceability]. *Atomnaya energiya – Atomic energy*, 1998, vol. 84, iss. 1, pp. 7–15 (regarding data on unit No. 2 of the Leningrad NPP).
24. Bulanenko V. I., Frolov V. V., Nikolaev A. G. Radiatsionnyye kharakteristiki grafita snyatykh s ekspluatatsii uran-grafitovykh reaktorov [Radiation characteristics of graphite from decommissioned uranium-graphite reactors]. *Atomnaya energiya – Atomic energy*, 1996, vol. 81, no. 4, pp. 304–306.
25. Bushuev A. V., Kozhin A. F., Petrova E. V., Zubarev V. N., Aleeva T. B., Girke N. A. *Radioaktivnyy reaktorny grafit* [Radioactive reactor graphite]. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2015. 148 p.
26. Plukiene R. et al. Modelling of Impurity Activation in the RBMK Reactor Graphite Using MCNPX. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 2, pp. 421–426. DOI: 10.15669/pnst.2.421.
27. Ancius D. et al. Evaluation of the activity of irradiated graphite in the Ignalina Nuclear Power Plant RBMK-1500 reactor. *Nukleonika*, 2005, vol. 50, no. 3, pp. 113–120.
28. Plukiene R. et al. Investigation of impurities of RBMK graphite by different methods. *Radiocarbon*, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 1861–1870. DOI: 10.1017/RDC.2018.93.
29. Narkunas E. et al. Estimation of the inventory of  $^{14}\text{C}$  and other key radionuclides in irradiated RBMK-1500 graphite based on limited measurements and full 3D core modeling. *Radiocarbon*, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 1849–1859. DOI: 10.1017/RDC.2018.122.
30. *SP 2.6.1.2612-10. Sanitarnyye pravila i normativy. Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti* [SP 2.6.1.2612-10. Sanitary rules and regulations Basic sanitary rules for radiation safety] (OSPORB-99/2010).
31. *Obosnovaniye bezopasnosti ekspluatatsii energobloka No. 2 Leningradskoy AES na moshchnosti posle vypolneniya lokal'nogo remonta po VRKH reaktornoy ustanovki v 2016 godu* [Report on the safety assessment supporting power operation of power unit No. 2 at Leningrad NPP upon completing its local repairs to restore the recourse characteristics of the reactor installation in 2016]. Report 321.073. Approved by the First Deputy Director – General Designer of JSC NIKIET. Moscow, 2016.
32. *Federal'nyy zakon ot 11 iyulya 2011 goda No. 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otdel'nymi i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii"* [Federal Law of July 11, 2011 No. 190-FZ "On the Management of Radioactive Waste and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation"].
33. *Tarify na zakhroneniye radioaktivnykh otkhodov na period s 2023 po 2027 gody* [Radioactive waste disposal tariffs valid from 2023 to 2027]. NO RAO Rosatom – URL: <https://www.norao.ru/about/tarify/> (accessed on: 15.07.2024).
34. Pavliuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I., Volkova A. G., Zakcharova E. V., Ilyukhina M. A., Gorshkov V. B., Dorofeev A. N., Zinnurov B. S., Komarov E. A. Podhody k kharakterizacii grafitovykh blokov UGR po beta-izluchayushchim radionuklidam  $^{14}\text{C}$  i  $^{36}\text{Cl}$ . Aprobaciya na reaktorakh tipa RBMK-1000 [Approaches to the Characterization of Graphite UGR Blocks Based on Beta-emitting  $^{14}\text{C}$  and  $^{36}\text{Cl}$  Radionuclides. Testing at RBMK-1000-type Reactors]. *Radioaktivnyye otkhody – Radioactive Waste*, 2021, no. 2 (15), pp. 21–32. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-21-32.
35. *Poslereaktornyye issledovaniya v goryachikh kamerakh obraztsov (kernov) grafita, vzyatykh iz*

kladki energobloka No. 2 Leningradskoy AES v 2018 godu [Post-reactor hot cell studies of graphite samples (cores) taken from the stack of power unit No. 2 at Leningrad NPP in 2018]. Report, inventory No. 110.9-15vn-19. 78 p.

36. NGR-01-90. Normy rascheta na prochnost' tipovykh uzlov i detaley iz grafita uran-grafitovykh

kanal'nykh reaktorov [Strength calculation standards for typical graphite-based units and components from uranium-graphite pressure-tube reactors].

37. Dollezhal N. A., Emelyanov I. Ya. Kanal'nyy yadernyy energeticheskiy reaktor [Pressure-tube nuclear power reactor]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 208 p.

---

### Information about the authors

*Selkin Sergey Sergeevich*, leading specialist, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, building 1, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: SSSelkin@vniiaes.ru.

*Sharov Dmitriy Alexandrovich*, PhD in Physical-Mathematical Sciences, Deputy head of JSC VNIIAES (NTP), head of the department of radiation safety, radioactive waste and spent nuclear fuel, decommissioning, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, building 1, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

*Plekhanov Ruslan Vladimirovich*, department head, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, building 1, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: RVPléhanov@vniiaes.ru.

*Zinakov Dmitry Leonidovich*, leading specialist, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, building 1, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: DLZinakov@vniiaes.ru.

### Bibliographic description

Selkin S. S., Sharov D. A., Plekhanov R. V., Zinakov D. L. Computational study of radiation characteristics inherent in the reactor graphite from RBMK-1000 units. *Radioactive Waste*, 2024, no. 4 (29), pp. 31–41. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-31-41. (In Russian).