

БЕЗОПАСНОЕ ОБРАЩЕНИЕ С ЯДЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

УДК 621.039.7621.039.524.2

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ДЕМОНТАЖУ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РЕАКТОРОВ РБМК-1000 НА ОСНОВЕ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ $^{14}\text{C}$

© 2025 г. Н. М. Сидоров<sup>a, b</sup>, Д. О. Касков<sup>c</sup>, О. Л. Ташлыков<sup>c</sup>, Н. В. Щукин<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Акционерное общество “Ордена Ленина Научно-исследовательский

и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея”, Москва, 101000 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

<sup>c</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 620062 Россия

\*E-mail: NikMiSidorov@rosatom.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024 г.

После доработки 02.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

В статье приведены результаты цифровой апробации разработанного алгоритма оптимизации последовательности демонтажа блоков графитовой кладки и оценки сокращения расходов на удаление радиоактивного графита при выводе из эксплуатации реакторных установок РБМК-1000 на примере Ленинградской АЭС за счет сокращения требуемого количества контейнеров для 2 класса удаляемых радиоактивных отходов.

**Ключевые слова:** вывод из эксплуатации АЭС, РБМК-1000, графитовая кладка, облученный графит, углерод-14, демонтаж, оптимизация

**DOI:** 10.56304/S2079562925060314

### ВВЕДЕНИЕ

Образование радиоактивных отходов (РАО) является специфической особенностью функционирования АЭС. Поэтому решение проблемы экологически безопасного обращения с РАО наряду с обеспечением безопасной эксплуатации АЭС, является основным условием приемлемости атомной энергетики, как надежного источника, обеспечивающего устойчивое развитие человечества [1].

С 2013 г. на АЭС России реализуется стратегия, предусматривающая уменьшение образования, переработку и приведение всех РАО в соответствие с критериями приемлемости, которые установлены нормативным документом НП-093-14 [2].

Реализация стратегии обращения с РАО в России позволит сформировать систему, целевое состояние которой будет соответствовать основным положениями Федерального закона № 190-ФЗ “Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации”: все РАО, образующиеся в организации, приводятся в соответствие с критериями приемлемости, после чего передаются Национальному оператору. Захоронение РАО оплачивается организацией, в результате деятельности которой РАО образовались.

В соответствии со ст. 4 Федерального закона “Об использовании атомной энергии” № 170-ФЗ жизненный цикл энергоблока АЭС можно представить в виде последовательности определенных стадий (этапов), во время которых осуществляются следующие виды деятельности: размещение, проектирование, сооружение, эксплуатация и вывод из эксплуатации.

Среди всех типов ядерных реакторов, уран-графитовые реакторы имеют самую продолжительную историю своего развития, начиная с первого в мире (США, 1942) и в СССР (Ф-1, 1946) реакторов. По данным Международного агентства по атомной энергии [3], на сегодняшний день в мире насчитывается 140 сооруженных уран-графитовых реакторов, в том числе 32 в России, включая 11 реакторов типа РБМК-1000, из которых четыре окончательно остановлены, а оставшиеся эксплуатируются и будут последовательно остановлены до 2040 г. Сложности в обращении с радиоактивным графитом определяются огромными объемами графитовых отходов (более 230000 т по всему миру) наличием значительных количеств долгоживущих радионуклидных загрязнителей или примесей, таких как  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$ . Неправильное обращение с радиоактивным графитом может иметь опасные последствия. Поло-

жительной стороной является то, что графитовые отходы сохраняют свои хорошие механические свойства и будут оставаться стабильными в течение значительных периодов времени. Кроме того, выщелачивание изотопов низкое даже из некондиционированных графитовых отходов [4].

Анализ зарубежного и отечественного опыта проведения демонтажных работ реакторов с графитовыми конструкциями (замедлитель, отражатель, элементы защиты), показал достаточно широкий спектр возможных концепций, подходов, технологических приемов и арсенала используемого оборудования и конструкций отдельных приспособлений для проведения демонтажных работ [5]. Несмотря на это, на сегодняшний день отсутствует универсальная стратегия по выводу из эксплуатации уран-графитовых реакторов (УГР), которая являлась бы оптимальной с точки зрения технико-экономических аспектов, вопросов безопасности и дальнейшего обращения с РАО, образующихся в ходе демонтажных работ [6, 7]. В связи с этим, особую роль играет разработка цифровых моделей реализации различных подходов к демонтажу элементов реакторной установки, в том числе графитовой кладки, включая оценку как экономических, так и дозовых затрат. При этом обязательной составляющей обеспечения безопасности является создание стендов и апробация предлагаемых технологий, отработка конструкций оснастки и оборудования.

Для всех действующих АЭС в 2017 г. решением АО «Концерн Росэнергоатом» определен вариант вывода из эксплуатации (ВЭ) — «ликвидация блока атомной станции» и способ его реализации — «немедленный демонтаж» [8].

Вывод из эксплуатации представляет собой потенциально наиболее дозозатратный этап, так как при ликвидации оборудования и строительной части реакторной установки нарушаются защитные барьеры, изолировавшие на этапе эксплуатации основную часть радиоактивных загрязнений и исключавшие или значительно снижавшие воздействие ионизирующих излучений на персонал (работников). В связи с этим требуется особый подход к планированию радиационно-опасных работ при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС. Дозовые затраты при проведении радиационно-опасных работ снижают посредством воздействия на радиационный параметр, факторы времени, расстояния [9].

В 2007 г. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) выпустила рекомендации (Публикация 103), объединяющие и дополняющие предыдущие [10]. Рекомендации вновь указывают и дополнительно усиливают значимость оптимизации радиационной защиты, тем самым распространяя успешный опыт внедрения этого требования в практику (теперь и в ситуаци-

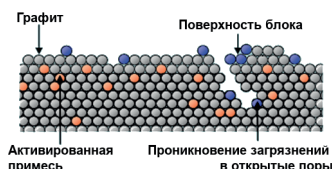
ях планируемого облучения). Система радиологической защиты, формируемая Рекомендациями МКРЗ, направлена на управление источником излучения. В основе системы радиологической защиты лежат три основных принципа — обоснования, нормирования и оптимизации. В целях реализации этих принципов комиссия рассматривает ситуации планируемого, аварийного и существующего облучения. При этом принцип оптимизации может быть реализован несколькими путями [11, 12]. Эффективным способом сокращения дозовых затрат персонала воздействием на фактор времени (в ряде случаев и радиационный параметр), не требующим значительных материальных затрат, является маршрутная оптимизация работ, выполняемых в радиационных полях [13–15].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной особенностью ВЭ реакторов РБМК-1000 является наличие и необходимость последующего демонтажа графитовой кладки, выступающей в качестве замедлителя и отражателя. Кладка представляет объемную конструкцию цилиндрической формы из 14 слоев, в каждом из которых находятся 2488 графитовых блоков сечением  $250 \times 250$  мм. Блоки различаются по высоте (600, 500, 300 и 200 мм). Первый слой набирается из блоков разной высоты с целью смещения стыков соседних колонн по высоте для исключения прострелов нейтронов и обеспечения высотной перевязки для обеспечения устойчивости конструкции. Основным высотным размером для блоков является 600 мм. Последний слой также набирается из блоков разной высоты [16]. Эксплуатация графитовой кладки осуществляется в азотно-гелиевой атмосфере с долей азота на уровне  $(10 \pm 5)\%$  [17].

В процессе эксплуатации под действием нейтронного облучения активируются примеси, изначально присутствующие в графите, а также продукты продувочной газовой смеси. Наибольшую активность в графитовых блоках имеет  $\beta$ -активный углерод-14 ( $^{14}\text{C}$ ) с периодом полураспада 5730 лет. В основном он образуется за счет ( $n, p$ )-реакции при воздействии тепловых нейтронов с ядрами азота-14 ( $^{14}\text{N}$ ), осевшими на поверхности пор графитовых блоков (рис. 1) [18–20].

Кроме этого, облученный графит содержит изотопы  $^{36}\text{Cl}$  ( $T_{1/2} = 3 \cdot 10^5$  лет),  $^{94}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 2.03 \cdot 10^4$  лет) и др., которые также являются долгоживущими изотопами, однако величина их удельной активности не оказывает значительного влияния на класс РАО [21] и, соответственно, на место их окончательной изоляции. Короткоживущие  $\gamma$ -излучающие изотопы  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137m}\text{Ba}$  и др. также не влияют на место окончательной изоляции РАО, однако влияют на дозозатраты при обращении с формируемыми упаковками РАО. Основным нуклидом,



**Рис. 1.** Условное молекулярное сечение облученного графита, показывающее типовое распределение активируемых примесей.

влияющим на выбор места окончательной изоляции (приповерхностное или глубинное захоронение), является  $^{14}\text{C}$ .

В соответствии с принятыми технологическими решениями в рамках вывода из эксплуатации энергетических УГР, технология обращения с облученным графитом (ОГ) не предполагает дезактивацию графита — отсутствует технико-экономическая целесообразность в связи с высокой стоимостью применяемых технологий и оборудования, а также образованием вторичных долгоживущих среднеактивных отходов (САО). С учетом принятых решений, программа обращения с облученным графитом, определенная по совокупности существовавших на момент реализации стратегий по обращению с ОГ международным проектом “GRAPA” [22], представлена на рис. 2.

В связи с тем, что величина тарифов на захоронение РАО 3 класса (приповерхностное захоронение) и 2 класса (глубинное захоронение в геологических формациях) различается примерно в 4 раза [23, 24], требуется разработка мер по минимизации объемов РАО, подлежащих глубинному захоронению [25]. В 2022 г. были внесены изменения в [26], в результате которых значительная часть графитовых РАО, образующихся в процессе ВЭ энергетических УГР, по предварительным оценкам должна перейти в 3 класс РАО (рис. 3).

Для того, чтобы оценить возможность оптимизации затрат на обращение с демонтируемыми графитовыми блоками, был разработан алгоритм оптимального демонтажа на основании одного из определяющих критериев обращения с ОГ — критерия удельной активности по  $^{14}\text{C}$  ( $A_{\text{уд}}(^{14}\text{C})$ ). Основным критерием оптимизации в данном алгоритме является не превышение среднего установленного значения удельной активности по  $^{14}\text{C}$  ( $\bar{A}_{\text{уд}}(^{14}\text{C})$ ) на контейнер 3 класса ( $<10^6$  Бк/г [26]) для минимизации количества контейнеров 2 класса.

По результатам анализа данных активации блоков кладки было выявлено, что первые и последние слои в целом малоактивированы, среднее значение активности по слою растет от периферии к центру активной зоны и достигает максимума у восьмого слоя, в каждом слое существует несколько зон максимума активности, центральной зоны не наблюдается, по краям блоки имеют наи-

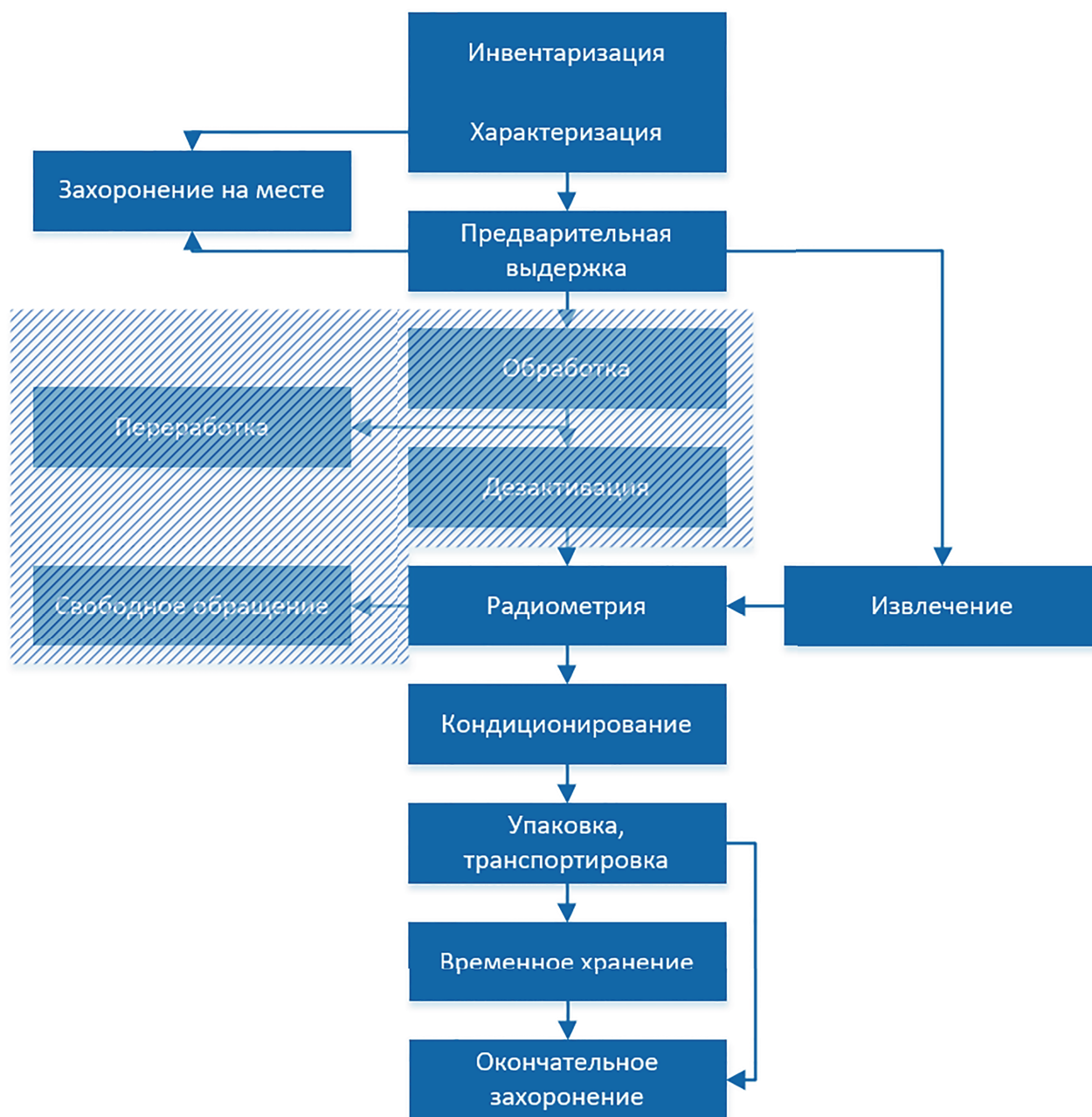
меньшую активность. На рис. 4. в качестве примера представлено распределение активности графита по слою и объему графитовой кладки, полученное с использованием программного продукта Graphite Reactor Analyzer (GRA).

Программа предназначена для визуализации и анализа данных активации графитовой кладки уран-графитовых ядерных реакторов. В качестве исходных данных могут выступать данные комплексного инженерного и радиационного обследования (КИРО), в т. ч. данные расчетных моделей и данные анализов проб графитовых кернов. Программный продукт GRA может использоваться на блоках АЭС с РБМК-1000, выводимых из эксплуатации, а также в организациях, разрабатывающих технологические решения по выводу из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов.

Функциональными возможностями программы является загрузка файлов с исходными данными, которые программа обрабатывает на сервере или на ПК. По результатам анализа данных, GRA предоставляет оптимальный способ послойного демонтажа графитовой кладки реактора, а также визуализацию в виде объемной модели, послойную визуализацию, графики зависимости значений активности по высоте кладки, гистограммы распределения графитовых блоков по степени активности [27].

Варианты демонтажа рассматривались на основании данных КИРО, выполненного АО “ВНИИАЭС”, по величине активности блоков графитовой кладки (по изотопу  $^{14}\text{C}$ ) 1-го и 2-го блоков Ленинградской АЭС (ЛАЭС). В статье в качестве примера представлены результаты применения разработанного алгоритма разборки наиболее активированного слоя графитовой кладки РБМК-1000, однако результирующие данные получены по всем слоям моделей графитовых кладок 1-го и 2-го блоков ЛАЭС. Распределение активности по 2488 графитовым блокам для самого активированного слоя для рассматриваемых блоков приведено на рис. 5.

При оценке эффективности применения разработанного алгоритма сравнивалось два принципиальных подхода к демонтажу:



**Рис. 2.** Программа обращения с облученным графитом, определенная международным проектом “GRAPA” с учетом принятых технологических решений.

1. Последовательное извлечение графитовых блоков без учета их активности с возможными маршрутными вариациями:

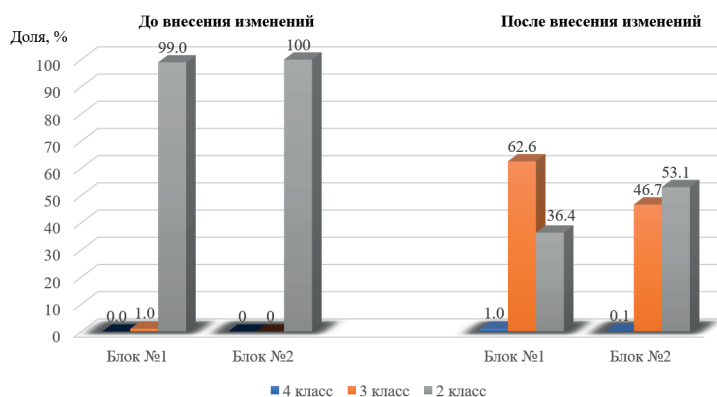
- линейно (рис. 6а);
- “змейкой” (рис. 6б);
- группами по 25 блоков (рис. 6в).

2. Выборочное извлечение графитовых блоков с использованием алгоритма на основании анализа удельной активности по  $^{14}\text{C}$  каждого блока,

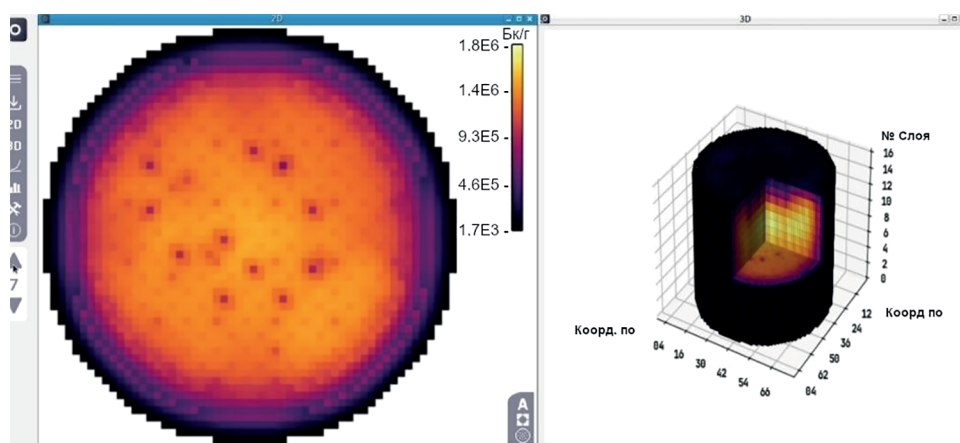
среднего значения активности по слою и в контейнере.

Принципиально алгоритм выборочного извлечения блоков определен двумя условиями:

- $\bar{A}_{\text{уд}}(^{14}\text{C})$  по слою превышает пороговое (удаляемые РАО 2 класса ( $>10^6$  Бк/г)): в данном случае осуществляется сбор графитовых блоков с максимальной активностью в упаковки для РАО 2 класса — операция выполняется до тех пор, пока



**Рис. 3.** Процентное распределение по классам удаляемых РАО облученного графита блоков № 1, 2 Ленинградской АЭС на основании Постановления Правительства 1069 на основании расчетных данных КИРО (до и после внесения изменений на основании Постановления Правительства 1929 от 19.10.2022 г.).



**Рис. 4.** Фрагмент визуализации программы Graphite Reactor Analyzer.

$\bar{A}_{уд}({}^{14}\text{C})$  в данном слое не снизится до порогового значения.

2)  $\bar{A}_{уд}({}^{14}\text{C})$  по слою ниже порогового ( $<10^6$  Бк/г): осуществляется сбор графитовых блоков в упаковки для РАО 3 класса, начиная с блока с максимальной  $A_{уд}({}^{14}\text{C})$  из оставшихся в данном слое — далее  $\bar{A}_{уд}({}^{14}\text{C})$  в контейнере корректируется за счет блоков с меньшим значением  $A_{уд}({}^{14}\text{C})$  в данном слое.

Блок схема работы алгоритма представлена на рис. 7.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Стоимость обращения с упаковкой РАО без учета переработки отходов оценивалось по формулам (1)–(3), указанным в “Единых отраслевых методических рекомендациях по оценке стоимости работ по обращению с радиоактивными отходами организаций Госкорпорации «Росатом».”

Результаты расчетов стоимости обращения с одним контейнером для РАО 2, 3 и 4 классов приведены в табл. 1.

$$C_{\text{обращение}} = C_{\text{контейнера}} + C_{\text{затаривания}} + C_{\text{транспортирования}} + C_{\text{захоронения}}, \quad (1)$$

где

$$C_{\text{захоронения}} = c_{\text{захоронения}} \cdot 1 \text{ м куб} \cdot V_{\text{контейнера}}, \quad (2)$$

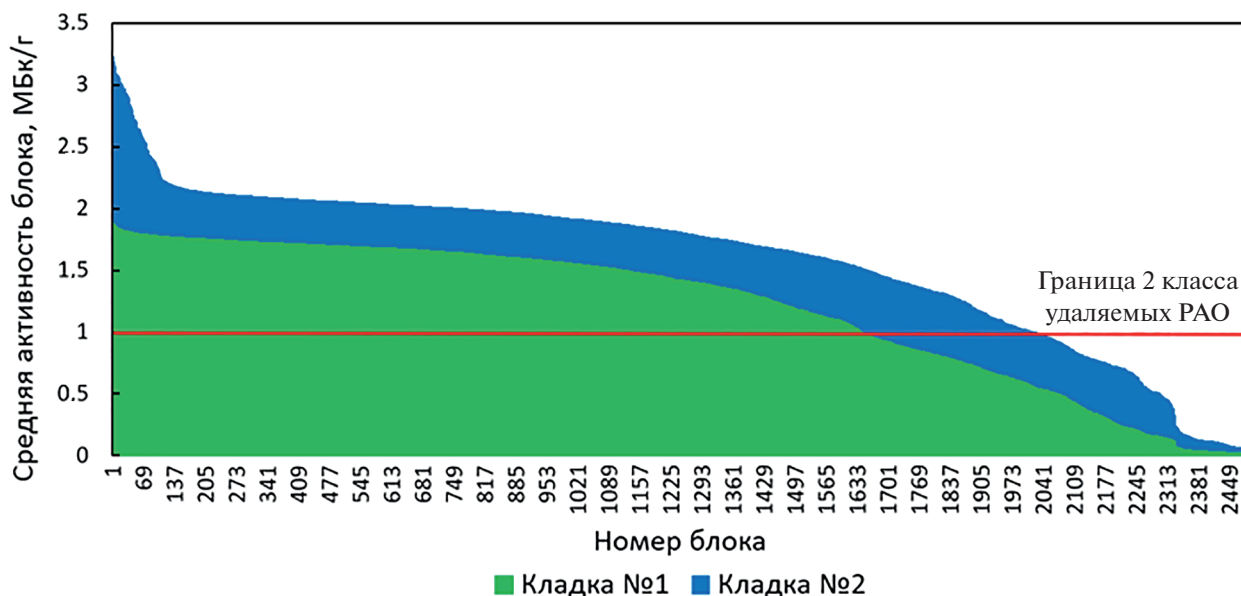
$$C_{\text{транспортирования}} = 0.05 C_{\text{захоронения}}. \quad (3)$$

Вариант размещения блоков в контейнерах изображен на рис. 8, однако в среднем вместимость контейнеров составит порядка 25 блоков на упаковку или 1200–1300 кг графитовых РАО на одну упаковку.

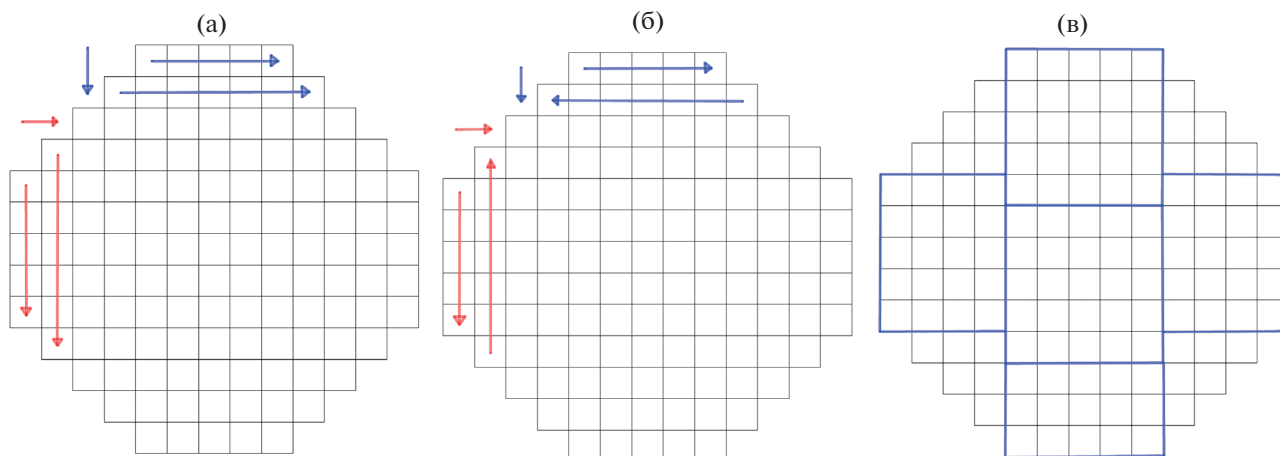
Результаты использования оптимизационного алгоритма программного продукта GRA [27] представлены на рис. 9, 10 и в табл. 2, 3.

Как видно из рисунков, имеется значительный потенциал в оптимизации последовательности





**Рис. 5.** Распределение блоков в наиболее активированном слое по величине средней активности на блок для графитовой кладки блоков № 1 и № 2 Ленинградской АЭС.



**Рис. 6.** Визуализация схемы демонтажа: (а) линейно: синий — слева-направо — сверху-вниз — "LR-UD", красный — сверху-вниз — слева-направо — "UD-LR"; (б) "змейкой": синий — слева-направо-налево — сверху-вниз — "LR-UD", красный — сверху-вниз-вверх — слева-направо — "UD-LR"; (в) группами.

демонтажа блоков слоя. Видно, что большинство блоков находятся выше допустимого уровня, но те блоки, которые укладываются в диапазон, имеют существенно меньшую активность (периферийные блоки). Смешивание блоков различной активности даст оптимальный вариант комплектации контейнеров. Средняя удельная активность  $^{14}\text{C}$  блоков графитовой кладки на блоке № 2 объясняется большей интегральной плотностью потока нейтронов по радиусу и высоте, определяемой более стабильной работой энергоблока на основании истории эксплуатации энергоблоков в пе-

риод с 1973 по 2018 и 1975 по 2020 г. для блоков № 1 и № 2 соответственно.

При последовательном извлечении виден недогруз по ряду контейнеров (с 80 по 100), в то время выборочное извлечение позволяет нагрузить каждый контейнер по максимуму и таким образом сократить количество контейнеров 2 класса с 65–71 до 30. По результатам оценочного расчета, стоимость демонтажа на примере данного слоя за счет использования оптимизационного алгоритма уменьшается в 1.7 раза или на 134 млн руб.

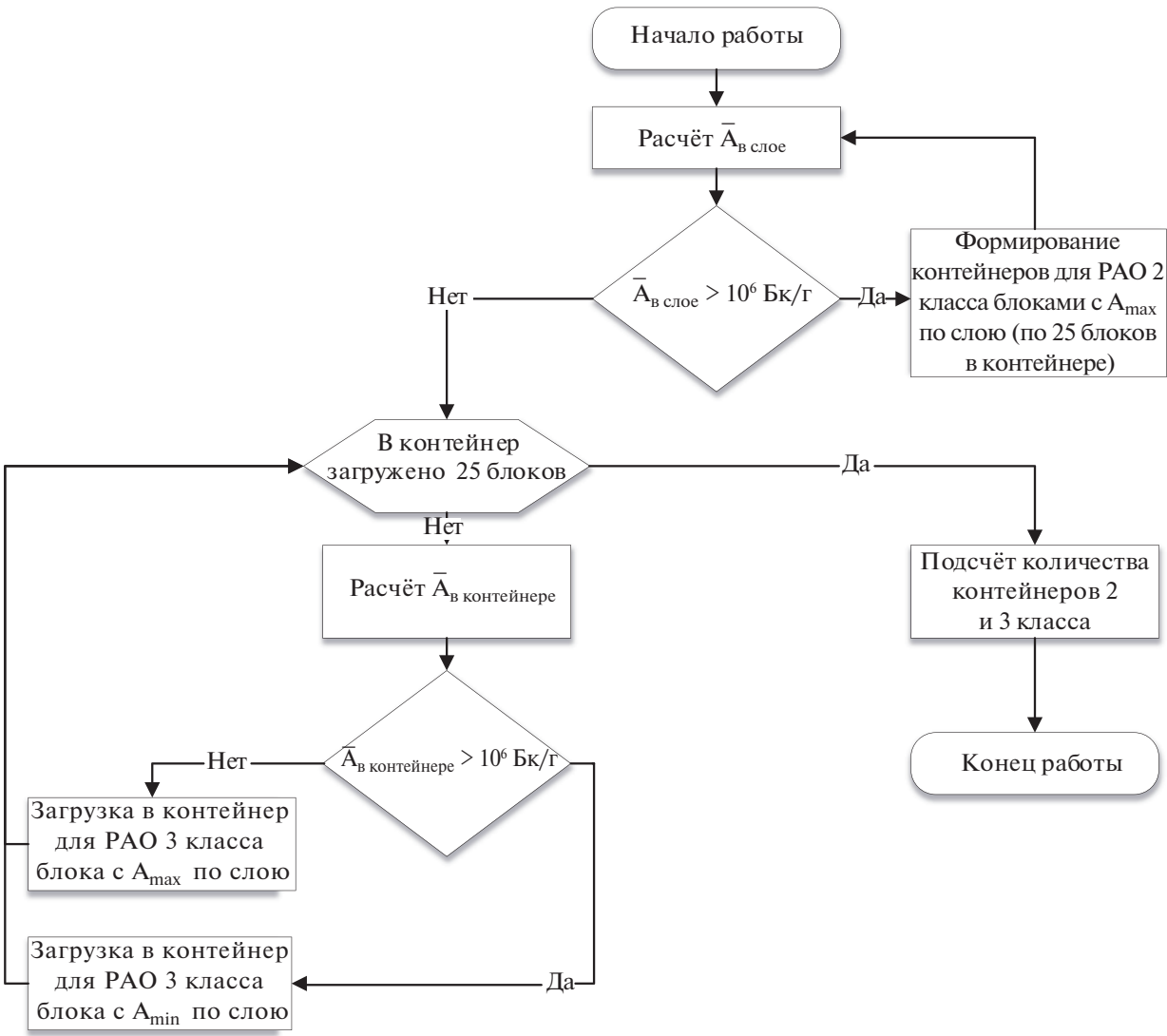


Рис. 7. Блок-схема работы алгоритма выборочного демонтажа.

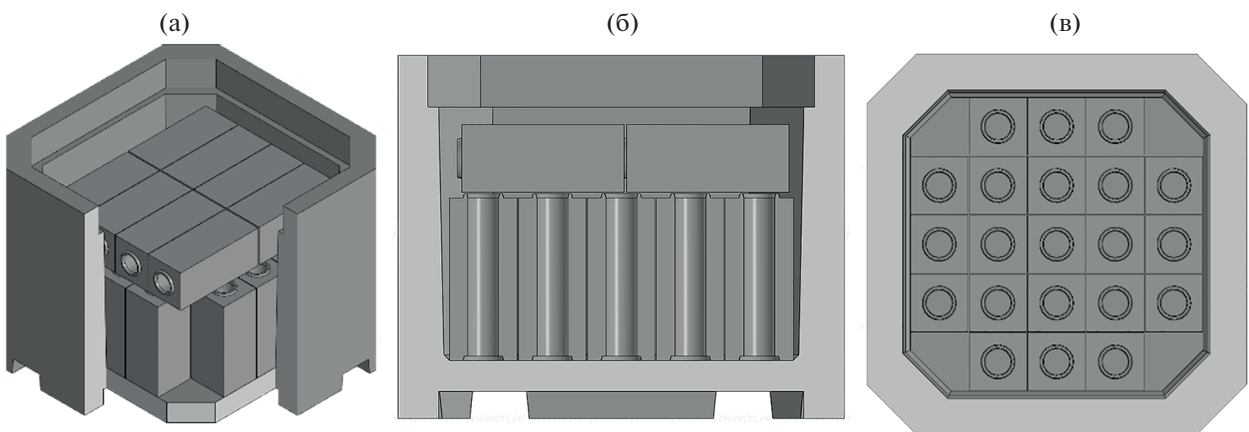


Рис. 8. Пример компоновки графитовых блоков в контейнере НЗК-150-1.5П: (а) изометрия; (б) вид сбоку; (в) вид сверху.

Табл. 1. Расчет стоимости обращения с упаковкой РАО (2024 г.)

Класс РАО	Модель контейнера	Стоимость контейнера*, руб	Объем внешний, м <sup>3</sup>	Стоимость захоронения 1 м <sup>3</sup> , руб	Стоимость захоронения контейнера, руб	Стоимость затаривания контейнера, руб	Стоимость транспортирования контейнера, руб	ИТОГО стоимость обращения с контейнером, руб
2	КЗХ-2кс (аналог НЗК-III)	878321.9	3.74	858198.6	3212612.8	76978	160630.6	4328543.3
3	НЗК-150-1.5П	288745.0	3.74	186407.0	697802.8	76978	34890.1	1098415.9
4	КМЗ-М	232027.2	3.80	62096.8	236137.0	76978	11806.9	556949.1

\* Сертифицирован только для внутристанционного обращения с отходами 2-го класса;

\*\* Стоимость контейнеров определялась на основании имеющихся ценовых предложений АО “345 МЗ” и данных Таблицы 3 Приложения III Единых отраслевых методических рекомендаций по оценке стоимости работ по обращению с радиоактивными отходами организаций Госкорпорации “Росатом” от 12 марта 2018 г. с учетом инфляционных коэффициентов в период с 2017 по 2024 гг.

Результаты сравнения оценочной стоимости обращения с графитом 2–4 классов для блоков № 1 и № 2 ЛАЭС в процессе ВЭ с использованием разных алгоритмов демонтажа приведены в табл. 4, 5.

Применяя алгоритм ко всем слоям кладки получаем существенную расчетную выгоду, относительно наиболее дорого способа демонтажа (в случае блока № 1 – способ “группами”, для блока № 2 – способ “линейный”, LR-UD) удастся со-

кратить использование контейнеров 2 класса на 451 шт. или сэкономить 1.45 млрд руб. на примере данных 1-го блока ЛАЭС, для 2-го блока ЛАЭС предельная экономия может составить 1.63 млрд руб., сокращение используемых контейнеров для РАО 2 класса – 504 упаковки.

Минимальная выгода на основании приведенных данных для блока № 1 составит 1.188 млрд руб.

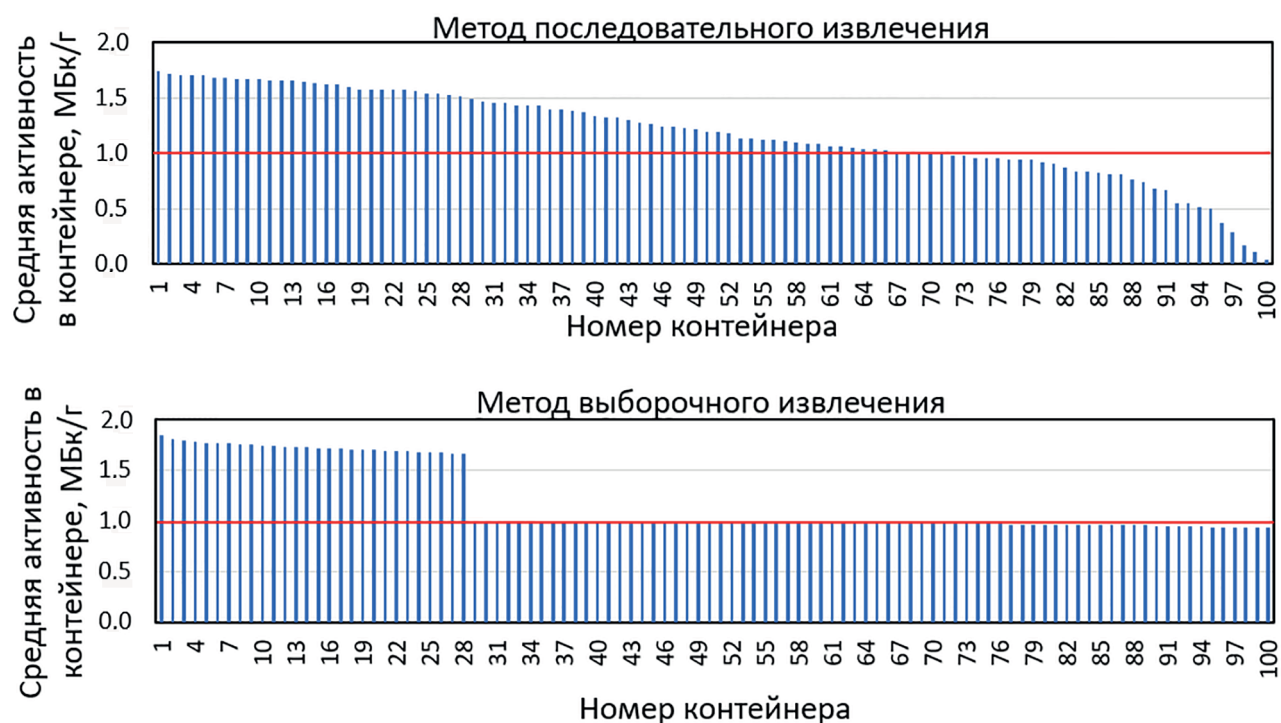


Рис. 9. Результаты сравнительного анализа демонтажа наиболее активированного слоя на примере графитовой кладки блока № 1 ЛАЭС.



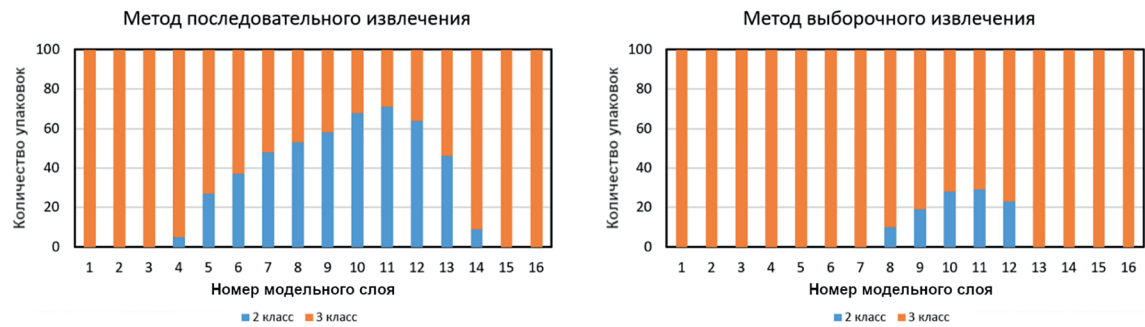


Рис. 10. Результаты сравнительного анализа демонтажа наиболее активированного слоя.

Таблица 2. Результаты сравнения количества формируемых упаковок с РАО соответствующего класса в рамках демонтажа графитовой кладки РУ блока № 1 Ленинградской АЭС

Класс РАО	Способ демонтажа					
	линейный		“змейка”		группами	оптимизи- рованный (v.1)
	LR-UD	UD-LR	LR-UD	UD-LR		
2	486	496	477	501	560	109
3	1111	1101	1120	1096	1040	1491

и 368 упаковок для РАО 2 класса, для блока № 2 – 1.49 млрд руб. и 462 упаковки для РАО 2 класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа раскрывает существенный потенциал снижения затрат при выводе из эксплуа-

тации АЭС с РБМК-1000, а также является основой для разработки оптимизационных алгоритмов демонтажа. Применение текущей версии алгоритма выборочного демонтажа графитовых блоков демонстрирует возможное сокращение затрат на обращение с облученным графитом от 35.5 до 43.5% для блока № 1 Ленинградской АЭС и от 32.9 до

Таблица 3. Результаты сравнения количества формируемых упаковок с РАО соответствующего класса в рамках демонтажа графитовой кладки РУ блока № 2 Ленинградской АЭС

Класс РАО	Способ демонтажа					оптимизи- рованный (v.1)
	линейный		“змейка”		группами	
	LR-UD	UD-LR	LR-UD	UD-LR		
2	928	923	927	916	886	424
3	671	676	672	683	714	1176

Таблица 4. Оценочная стоимость обращения с графитом 2, 3, 4 класса для блока № 1 Ленинградской АЭС для рассматриваемых способов демонтажа

	Способ демонтажа					
	линейный		“змейка”		группами	оптимизированный
	LR-UD	UD-LR	LR-UD	UD-LR		
Стоимость обращения, млрд руб.	3.107	3.139	3.078	3.156	3.347 <sub>max</sub>	1.890
Выгода (Δ) к максимуму стоимости, млрд руб.	0.240	0.207	0.269	0.191	0.000	1.457
Δ к максимум в процентном выражении, %	7.16	6.19	8.03	5.71	0.00	43.50

**Таблица 5.** Оценочная стоимость обращения с графитом 2, 3, 4 класса для блока № 2 Ленинградской АЭС для рассматриваемых способов демонтажа

	Способ демонтажа					
	линейный		“змейка”		группами	оптимизированный
	LR-UD	UD-LR	LR-UD	UD-LR		
Стоимость обращения, млрд руб.	4.541 <sub>max</sub>	4.525	4.537	4.502	4.405	2.913
Выгода (Δ) к максимуму стоимости, млрд руб.	0.000	0.016	0.003	0.039	0.136	1.628
Δ к максимум в процентном выражении, %	0.00	0.36	0.07	0.85	2.99	35.90

35.9% для блока № 2 по сравнению с наиболее затратными способами демонтажа.

В настоящее время в рамках улучшения функционала программного продукта GRA ведется внедрение и доработка оптимизационного алгоритма с учетом данных по:

- величине удельной активности блоков по  $^{60}\text{Co}$  (основной дозообразующий нуклид для ГБ);
- фрагментации кладки;
- высоте блоков верхнего и нижнего слоев;
- выбору точки начала демонтажных работ;
- времени транспортирования блоков до контейнера и, соответственно, до точки выгрузки;
- использованию разных средств демонтажа и времени работы захватных устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

- Новиков Г.А., Ташлыков О.Л., Шеклеин С.Е. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии. Уч.-к. 2017. Екатеринбург: Изд-во УрФУ.
- Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14. 2017. Москва: НТЦ ЯРБ.
- IAEA-TECDOC-1521. Characterization, Treatment and Conditioning of Radioactive Graphite from Decommissioning of Nuclear Reactors. 2006. Vienna: IAEA.
- Павлюк А.О. и др. // Радиоактивные отходы. 2022. № 2. С. 35–48.
- Абрамов А.А. и др. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. 2015. Т. 3. Москва: Энергопром-аналитика.
- Павлюк А.О. и др. // Радиоактивные отходы. 2023. № 2. С. 41–55.
- Павлюк А.О. и др. // Радиоактивные отходы. 2023. № 4. С. 35–54.
- Ташлыков О.Л. АЭС: продление ресурса и снятие с эксплуатации. Уч.-к. 2020. Екатеринбург: Изд-во УрФУ.
- Наумов А.А., Ташлыков О.Л. // Изв. вузов. Ядерн. энерг. 2010. № 1. С. 80–88.
- Valentin J. (Ed.) The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. V. 37 (2–4).
- Михайлова А.Ф., Ташлыков О.Л. // Ядерн. физ. инжир. 2018. Т. 9 (4). С. 393–401. [Mikhailova A.F., Tashlykov O.L. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 1718–1726.]
- Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий госкорпорации “Росатом”. Методические указания. МУ 2.6.5.054-2017. 2017. Москва: ФМБА.
- Tashlykov O.L. et al. // Energies. 2022. V. 15. P. 4788.
- Tashlykov O.L. et al. // Energies. 2022. V. 15. P. 8222.
- Кропачев Ю.А. и др. // Изв. вузов. Ядерн. энерг. 2019. Т. 1. С. 119–130.
- Абрамов М.А. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. 2006. Москва: НИКИЭТ.
- Ташлыков О.Л., Кузнецов А.Г., Арефьев О.Н. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС. 1995. Москва: Энергоатомиздат. Кн. 1.
- Wareing A. et al. // Nucl. Eng. Technol. 2017. V. 49 (5). P. 1010–1018.
- Петровская А.С. и др. // Вопр. ат. науки техн. Сер.: константы ядерных реакторов. 2018. Т. 4. С. 185.
- IAEA-TECDOC-1790. Processing of Irradiated Graphite to Meet Acceptance Criteria for Waste Disposal. 2016. Vienna: IAEA.
- Сидоров Н.М. Сб. тез. докл. X Междунар. научно-практ. конф. мол. уч. и спец. атом. отрасли “КО-МАНДА-2023”. 2023. Санкт-Петербург: Атом-энергопроект. С. 64–66.
- Wickham A. et al. // J. Environ. Radioact. 2017. V. 171. P. 34–40.
- О порядке государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов. Пост. Прав-ва РФ от 03.12.2012 № 1249 (ред. от 12.11.2021).
- Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов 1, 2, 3, 4, 5, 6 классов на период с 2023 по 2027 годы. Приказ ФАС России от 11.10.2022 № 732/22 (ред. от 23.10.2024).
- Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодатель-

- ные акты РФ. ФЗ от 11.07.2011 № 190-ФЗ (последняя редакция).
26. 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 (с изменениями и дополнениями). Пост. Прав-ва РФ от 19.10.2012 № 1069.
27. Каськов Д.О. и др. Программа Graphite Reactor Analyzer. Св-во гос. рег. прогп. ЭВМ. 2024. № 2024616224 РФ.

## Optimisation of Technological Solutions for Dismantling Graphite Stack of RBMK-1000 Reactors Based on Specific Activity of $^{14}\text{C}$

N. M. Sidorov<sup>1, 2, \*</sup>, D. O. Kaskov<sup>3</sup>, O. L. Tashlykov<sup>3</sup>, and N. V. Schukin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*“Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering” JSC, Moscow, 101000 Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

<sup>3</sup>*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, 620062 Russia*

*\*e-mail: NikMiSidorov@rosatom.ru*

Received October 14, 2024; revised November 2, 2024; accepted December 25, 2024

**Abstract**—The paper presents the results of numerical testing of the developed algorithm for optimization of the sequence of dismantling of graphite stack blocks. The article evaluates the reduction of financial expenses for radioactive graphite removal during decommissioning of RBMK-1000 reactor units on the example of Leningrad NPP. This effect is achieved by reducing the required number of containers for the 2nd class of radioactive waste to be removed.

**Keywords:** NPP decommissioning, RBMK-1000, graphite stack, *i*-graphite, carbon-14, dismantling, optimization