

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-39-52>
УДК 621.039.743



Оригинальная статья

**М. Л. Жемжуров, Г. М. Жмура*, И. Е. Рубин, Н. М. Днепровская, Н. А. Тетерева,
И. В. Руденков, Л. Ф. Бабичев**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
Луговослободской с/с, 47/17, 223063, д. Прилесье, Минский район,
Минская область, Республика Беларусь*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
В АКТИВИРОВАННЫХ РЕАКТОРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ВВЭР-1200**

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований количества твердых высокоактивных, среднеактивных, низкоактивных, очень низкоактивных радиоактивных отходов (соответственно ВАО, САО, НАО, ОНАО), образующихся при нейтронной активации материалов конструкций, прилегающих к активной зоне реакторной установки ВВЭР-1200, в зависимости от времени после окончательного ее останова. Оценка объемов радиоактивных отходов (РАО) активационного происхождения, образующихся за 60 лет эксплуатации реактора типа ВВЭР-1200, выполнена на основании расчетных исследований наведенной активности конструкционных и защитных материалов с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов (SERPENT 2, ТВС-М, DYN3D, MCU-PD). Рассчитаны удельные активности по каждому изотопу, суммарные удельные активности и активности, массы и объемы активированных конструкционных и защитных реакторных материалов для различных категорий РАО после указанного периода эксплуатации ВВЭР-1200 и с течением времени после окончательного останова реактора. Полученные зависимости изменений масс и объемов активированных материалов с течением времени после окончательного останова реактора позволяют определить эти параметры материалов отдельно для каждой категории РАО и в сумме на любой момент времени. Так, массы активированных материалов, относящиеся к РАО, за 200 лет выдержки уменьшатся на 264 т (от 713 до 449 т), а объемы – на 74,3 м³ (от 169 до 94,7 м³). Прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока позволят разработать технические предложения, прогнозные планы-графики по организации системы обращения с РАО в процессе вывода из эксплуатации реакторной установки ВВЭР-1200, а также возможные технологические и конструктивные решения по системе захоронения этих РАО.

Ключевые слова: радиоактивные отходы атомных электростанций, твердые радиоактивные отходы, категория твердых радиоактивных отходов, ВВЭР-1200, программные коды

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Жемжуров Михаил Леонидович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией радиационной безопасности объектов использования атомной энергии Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: jema@sosny.bas-net.by; Жмура Георгий Митрофанович* – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-химических исследований окружающей среды Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: georgiyzhmura@mail.ru; Рубин Исаак Ефимович – старший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: rubin@sosny.bas-net.by; Днепровская Нина Михайловна – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Национальной академии наук Беларуси. E-mail: dneprnina@mail.ru; *Тетерева Наталья Александровна* – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: tetna@mail.ru; *Руденков Ивантон Владимирович* – младший научный сотрудник лаборатории моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: godder@tut.by; *Бабичев Леонид Филипович* – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: babichev@sosny.bas-net.by

Вклад авторов: *Жемжуров Михаил Леонидович* – обоснование концепции исследования, постановка исследовательских целей из задач, формулировка выводов и интерпретация результатов, редактирование; *Жмура Георгий Митрофанович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений, написание текста рукописи, формулировка выводов и интерпретация результатов; *Рубин Исаак Ефимович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений и интерпретация результатов; *Днепровская Нина Михайловна* – проведение вычислений; *Тетерева Наталья Александровна* – проведение вычислений; *Руденков Ивантон Владимирович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений; *Бабичев Леонид Филипович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений.

Для цитирования: Определение объемов радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях ВВЭР-1200 / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 39–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-39-52>

Поступила в редакцию: 10.07.2023

Доработанный вариант: 08.01.2024

Утверждена к публикации: 22.02.2024

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

**Mikhail L. Zhemzhurov, Georgy M. Zhmura*, Isaak E. Rubin, Nina M. Dneprovskaya,
Natalia A. Tetereva, Ivanton V. Rudenkov, Leonid F. Babichev**

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
47/17, Lugovoslobodskaya village, 223063, Prilesye village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus*

DETERMINATION OF VOLUME OF RADIOACTIVE WASTE IN ACTIVATED VVER-1200 REACTOR STRUCTURES

Abstract. The results of calculation studies of the amount of solid high-level, intermediate-level, low-level, very low-level radioactive waste (HLW, ILW, LLW, VLLW, respectively) generated during neutron activation of structural materials adjacent to the core of the VVER-1200 reactor plant, depending on the time after the final stopping it. An assessment of the volumes of radioactive waste (RAW) of activation origin generated over 60 years of operation of a VVER-1200 type reactor was carried out on the basis of computational studies of the induced activity of structural and protective materials using reactor and Monte Carlo program codes (SERPENT 2, TVS-M, DYN3D, MCU-PD). Specific activities for each isotope, total specific activities and activities, masses and volumes of activated structural and protective reactor materials for various categories of radioactive waste were calculated after the specified period of operation of VVER-1200 and over time after the final shutdown of the reactor. The obtained dependences of changes in the masses and volumes of activated materials over time after the final shutdown of the reactor make it possible to determine these parameters of materials separately for each category of radioactive waste and in total at any point in time. Thus, the masses of activated materials related to radioactive waste will decrease by 264 tons (from 713 to 449 tons) over 200 years of aging, and the volumes will decrease by 74.3 m³ (from 169 to 94.7 m³). Forecast quantitative data on the volumes and mass of activated reactor structures, depending on the duration of their exposure after the final shutdown of the power unit, will make it possible to develop technical proposals, forecast plans and schedules for organizing a radioactive waste management system during the decommissioning of the VVER-1200 reactor plant, as well as possible technological and design solutions for the disposal system for these radioactive waste.

Key words: radioactive waste from nuclear power plants, solid radioactive waste, category of solid radioactive waste, VVER-1200, program codes

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Mikhail L. Zhemzhurov* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Radiation Safety of Nuclear Facilities at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: jema@sosny.bas-net.by; *Georgy M. Zhmura** – Senior Researcher of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: georgiyzhmura@mail.ru; *Isaak E. Rubin* – Senior Researcher at the Laboratory of Neutron Physics at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: rubin@sosny.bas-net.by; *Nina M. Dneprovskaya* – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: dneprnina@mail.ru; *Natalia A. Tetereva* – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: tetna@mail.ru; *Ivanton V. Rudenkov* – Junior Researcher of the Laboratory of Modeling of Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering at Joint

Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: godder@tut.by; Leonid F. Babichev – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory for Modeling Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: babichev@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: Mikhail L. Zhemzhurov – justification of the research concept, setting research goals from the tasks, formulating conclusions and interpreting the results, editing; Georgy M. Zhmura – development of research methodology, carrying out calculations, writing the text of the manuscript, formulating conclusions and interpreting the results; Isaak E. Rubin – development of research methodology, calculations and interpretation of results; Nina M. Dneprovskaya – carrying out calculations; Natalia A. Tetereva – carrying out calculations; Ivanton V. Rudenkov – development of research methodology, carrying out calculations; Leonid F. Babichev – development of research methodology, carrying out calculations.

For citation: Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Determination of volume of radioactive waste in activated VVER-1200 reactor structures. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 39–52 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-39-52>

Received: 10.07.2023

Modified version: 08.01.2024

Approved for publication: 22.02.2024

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ¹ и требованиями, содержащимися в национальных нормативных правовых документах², процесс вывода блоков атомных электростанций (АЭС) из эксплуатации должен учитываться, начиная уже со стадии проектирования станции. Для этого уже на данной стадии необходима оценка объема и радиационных характеристик отходов, которые будут образовываться при выводе из эксплуатации энергоблока.

В частности, проработка вопросов создания системы захоронения радиоактивных отходов (РАО), образуемых в результате эксплуатации и вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, входит в число основных задач Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции³.

Согласно нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения»⁴, в Беларуси для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении твердые РАО (ТРО) подразделяются на четыре класса. Они аналогичны классам 1–4 по российской классификации, изложенной в документе «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»⁵. Указанная классификация устанавливает прямую связь категории твердых РАО с вариантом их захоронения. Так, высокоактивные (ВАО) и долгоживущие среднеактивные (ДСАО) РАО классов 1, 2 должны быть изолированы в пунктах глубинного захоронения, а очень низкоактивные (ОНРАО), низкоактивные (НАО) и короткоживущие среднеактивные (КСАО) РАО классов 3, 4 – в пунктах приповерхностного захоронения.

¹ Вывод из эксплуатации установок. Общие требования безопасности, ч. 6 (№ GSR part 6) / IAEA (Международное агентство по атомной энергетике). Вена, 2015. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652r_web.pdf (дата обращения: 05.01.2024).

² Закон Республики Беларусь «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» от 10 октября 2022 года № 208-З и Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности» от 18 июня 2019 года № 198-З.

³ Об утверждении Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 2 июня 2015 г., № 460 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/natsionalnyu-reestr/poisk-v-reestre/?p1=5/40619> (дата обращения: 05.06.2023).

⁴ Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения»: утв. постановлением МЧС Респ. Беларусь от 28.09.2010 № 47 (в ред. постановления МЧС Респ. Беларусь от 24.07.2017 № 33). URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a98/postanovlenie_mchs_47.pdf (дата обращения: 26.06.2023).

⁵ 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: утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 19.10.2012 № 1069 (в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 04.02.2015 № 95) // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902376375> (дата обращения: 26.06.2023).

При демонтаже реакторного и технологического оборудования в ходе вывода АЭС из эксплуатации образуются РАО, полученные двумя путями: 1) за счет нейтронной активации конструкционных и защитных материалов реактора и 2) в ходе накопления радионуклидов в технологическом оборудовании за срок службы АЭС. Основную массу при эксплуатации реактора типа ВВЭР-1200 будут составлять РАО, образующиеся первым путем.

Для разработки технических предложений, прогнозных планов-графиков по организации системы обращения с РАО в процессе вывода из эксплуатации АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200, а также возможных технологических и конструктивных решений по системе захоронения этих РАО необходимо иметь прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока. Расчетное прогнозирование объемов радиоактивных отходов, образующихся в результате нейтронной активации бетонов радиационной защиты за срок эксплуатации реактора типа ВВЭР, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора рассмотрено в [1–3]. Данные по активности конструкций реакторной установки в зависимости от времени после ее останова представлены в материалах проекта Белорусской АЭС и частично опубликованы в [1, 4]. В [1] выполнено расчетное моделирование активации элементов конструкций реактора при эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200, при этом в соответствии с российскими санитарными правилами обращения с РАО⁶ все конструкции реактора были разделены на три группы твердых РАО (высоко-, средне- и низкоактивные). Однако в настоящее время проектные и литературные данные по объемам всех активированных РАО раздельно по категориям в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 отсутствуют.

Цель настоящего исследования – получение прогнозных количественных данных по объемам и массе активированных реакторных конструкций, относящихся по уровню удельной активности к РАО различных категорий, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока реактора типа ВВЭР-1200.

Методика исследований. В [5–7] авторами настоящей публикации представлены результаты оценки объемов и радиационных характеристик твердых ВАО и ДСАО на момент останова реактора типа ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. Расчеты производились с целью разработки технической концепции системы глубинного захоронения этих групп РАО. В указанных работах расчеты наведенной активности конструкционных и защитных материалов выполнялись для срока эксплуатации реактора 60 лет с использованием кодов Монте-Карло (основанных на использовании генератора случайных величин и вычислении вероятностных характеристик нейтронно-физических процессов) и других реакторных программных кодов:

SERPENT 2 – трехмерный код на основе метода Монте-Карло, предназначенный для определения нейтронно-физических характеристик систем, которые содержат ядерные делящиеся материалы (VTT Technical Research Centre of Finland, лицензия № L1K002/JIPNRMINSK);

MCU-PD – компьютерная программа для численного моделирования процессов переноса различного вида излучений (нейтронов, гамма-квантов, электронов, позитронов) в трехмерных системах методом Монте-Карло (аттестационный паспорт от 24.10.2018 № 456);

TBC-M – программа для расчета нейтронно-физических характеристик и малогрупповых констант различных типов топливных кассет ВВЭР для программы DYN3D (аттестационный паспорт от 21.02.2002 № 135);

DYN3D – программа для расчета установившихся и переходных процессов в ядерных реакторах различных типов (лицензионное соглашение № 0012011 между Центром имени Гельмгольца Дрезден-Росендорф и Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси).

⁶ Санитарные правила и гигиенические нормативы СанПин 2.6.1.24-03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03)»: утв. Гл. гос. санитарным врачом РФ 22 апр. 2003 г. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294814/4294814649.htm> (дата обращения: 05.01.2024).

Оценки объемов твердых ВАО и ДСАО, образующихся при нейтронной активации материалов конструкций ВВЭР-1200 Белорусской АЭС и необходимых для принятия технологических и конструктивных решений по системе глубинного захоронения этих РАО, в зависимости от времени после окончательного останова реактора представлены в [8]. Прогнозные данные по активностям РАО в зависимости от времени выдержки были определены исходя из полученных ранее с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов данных по наведенной активности материалов после 60 лет эксплуатации реактора на момент окончательного останова путем расчетов радиоактивного распада каждого изотопа на конкретный момент времени, определения суммарных удельных активностей бета-излучающих радионуклидов и сопоставления их с граничными значениями отнесения к той или иной категории РАО [7].

В настоящей работе с использованием тех же расчетных методик определены объемы каждой категории радиоактивных отходов (высокоактивные, среднеактивные, низкоактивные, очень низкоактивные (ОНАО)) в активированных реакторных конструкциях на момент окончательного останова после 60 лет эксплуатации энергоблоков АЭС и их изменения в процессе выдержки.

Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реакторной установки ВВЭР-1200, рассматриваемых в расчетах, приведены в табл. 1. Расчетная геометрия конструкции реактора представлена 38 участками (каждый элемент конструкции может состоять из нескольких участков в соответствии со схемой расположения активизируемых конструкций). Схемы расположения активизируемых конструкций и материалов в районе активной зоны ВВЭР-1200 в радиальном и аксиальном направлениях представлены в [7].

Таблица 1. Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора типа ВВЭР-1200 [8]

Table 1. Characteristics of the most irradiated structural elements of the VVER-1200 reactor [8]

Элемент конструкции	Номер участка, <i>j</i>	Материал	Плотность, т/м ³	Активируемая масса, т	Объем, м ³
Выгородка	3	08X18H10T-Y	7,9	41,5	5,26
Шахта	15	08X18H10T-Y	7,9	24,1	3,05
	31			13,7	1,74
Плита нижняя БЗТ высотой 34,7 см (без ПЭЛ)	9	08X18H10T-Y	7,9	14,6	1,84
ПЭЛ в плите нижней высотой 34,7 см		42XHM + Dy ₂ TiO ₅	5,65	0,20	0,04
БЗТ без плит и ПЭЛ (слой высотой 20 см)	10–14	08X18H10T-Y	7,9	1,51	0,19
ПЭЛ (B ₄ C, каждый слой 20 см высотой)		42XHM + B ₄ C	3,25	0,081	0,025
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) в зоне концевиков твэлов, слой высотой 13,7 см	1	42XHM + Dy ₂ TiO ₅	5,65	0,09	0,016
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) в зоне направляющих каналов, слой высотой 5 см	2			0,034	0,006
Поглотитель ПЭЛ Dy ₂ TiO ₅	29	Dy ₂ TiO ₅	4,9	0,0079	0,0016
Оболочка ПЭЛ	30	42XHM	7,9	0,0042	0,0005
Пространство под активной зоной (каждый слой высотой 20 см)	4–8	08X18H10T-Y	7,9	1,52	0,19
Внутрикорпусная наплавка	16	08X18H10T + Nb	7,9	3,97	0,50
	32			2,27	0,29
Корпус (без наплавки)	17	15XHMФА	7,9	91,4	11,57
	33			52,3	6,62
Теплоизоляция	Нижняя часть	09Г2С + 08X18H10Т	1,09	2,22	2,04
	Основная часть			7,38	6,78
	Верхняя часть			1,44	1,32

Окончание табл. 1

Элемент конструкции		Номер участка, j	Материал	Плотность, t/m^3	Активируемая масса, т	Объем, m^3
Сухая защита	Левая нижняя часть	35	Серпентинитовый бетон + сталь 3	3,45	14,1	4,09
	Левая основная часть	20			47,0	13,6
	Левая верхняя часть	21			9,18	2,66
	Правая нижняя часть	36			24,1	7,0
	Правая основная часть	22			80,4	23,3
Опорная ферма	Нижняя часть	25	Серпентинитовый бетон + сталь 3	5,64	58,7	10,4
	Правая верхняя часть	26			58,7	10,4
	Левая верхняя часть	27			41,7	7,4
Биологическая защита		28	Серпентинитовый бетон + бор	2,78	19,6	7,05
Строительный бетон за сухой защитой	Левая нижняя часть	37	Строительный бетон с добавкой бора	2,2	9,6	4,3
	Левая основная часть	23			31,8	14,5
	Правая нижняя часть	38			10,1	4,6
	Правая основная часть	24			33,7	15,3

Результаты и их обсуждение. Согласно данным расчетных исследований по кодам SERPENT 2 и MCU изотопного состава и активностей радионуклидов на момент окончательного останова реактора активируемых конструкционных и защитных материалов реакторной установки ВВЭР-1200, были рассчитаны удельные активности по каждому изотопу, суммарные удельные активности и активности, массы и объемы активированных материалов с течением времени для всех элементов конструкций. Ввиду ограничений по объему представляемых материалов, в данной работе представлены только расчеты для шахты (табл. 2) и сухой защиты (табл. 3).

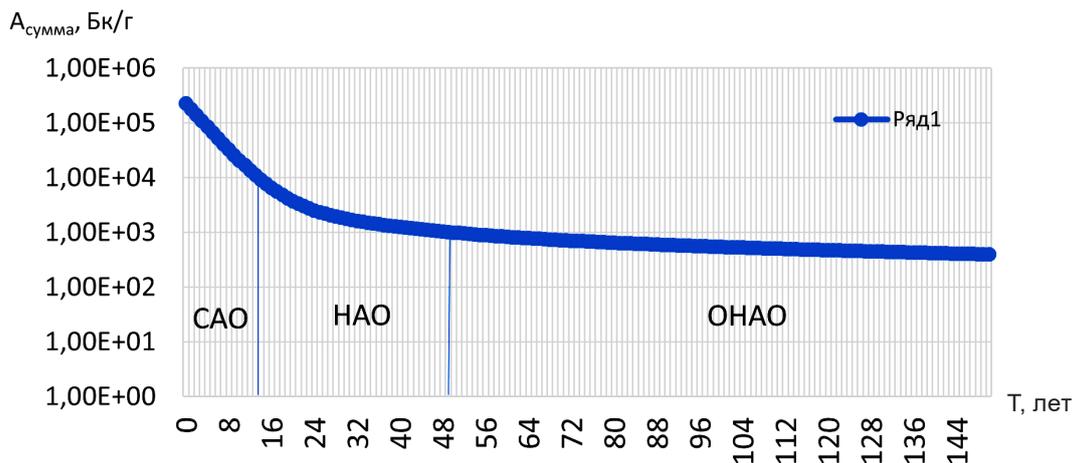
Красным, желтым, синим и голубым цветами в табл. 2 и 3 выделены радиоактивные отходы, содержащие бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития) и относящиеся соответственно к радиоактивным отходам следующих типов: высокоактивные (ВАО – более 10^7 Бк/г), среднеактивные (САО – от 10^4 до 10^7 Бк/г), низкоактивные (НАО – от 10^3 до 10^4 Бк/г) и очень низкоактивные (ОНАО – до 10^3 Бк/г).

По тритию материалы нормируются отдельно. В соответствии с табл. 3 приложения 4 к гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного взаимодействия»⁷ и табл. 1 из приложения 2 СПОРО-2015⁸, к ОНАО относятся материалы, содержащие тритий от 10^2 до 10^7 Бк/г. В табл. 3 материалы сухой защиты, относящиеся к ОНАО по тритию, выделены оранжевым цветом.

На рисунке представлен график зависимости суммарных удельных активностей бета-излучающих радионуклидов (за исключением трития) в материалах сухой защиты реакторной установки ВВЭР-1200 с течением времени после окончательного останова АЭС. Из графика с точностью до года можно определить переход из одной категории РАО в другую. Время перехода из одной категории РАО в другую определялось исходя из того, будет ли величина суммарной удельной активности бета-излучающих радионуклидов (за исключением трития) в материалах

⁷ Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенического норматива «Критерии оценки радиационного воздействия»: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 28.12.2012 № 213 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 25.05.2013, 8/26 850. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21326850p> (дата обращения: 05.01.2024).

⁸ Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами» и признании утратившими силу постановлений Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 7 апреля 2005 г. № 45, Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28 марта 2014 г. № 21: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 31.12.2015 № 142 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 05.03.2016, 8/30 613. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21630613p> (дата обращения: 05.01.2024).



Зависимость суммарной удельной бета-активности активированных материалов сухой защиты от времени выдержки после окончательного останова реакторной установки ВВЭР-1200

Dependence of the total specific beta activity of activated dry shielding materials on the holding time after the final shutdown of the VVER-1200 reactor plant

находиться в интервалах отнесения к CAO, HAO и OHAO. Такие графики сделаны для всех элементов конструкций, но ввиду ограничений по объему представляемых материалов в этой работе даны только для сухой защиты.

Для некоторых элементов конструкций из графиков можно с точностью до года определить и переход из категории OHAO в нерадиоактивные отходы. Время данного перехода определялось исходя из того, будет ли сумма отношений удельных активностей бета-излучающих радионуклидов (за исключением трития) в материалах к соответствующим уровням изъятия для больших количеств материалов и освобождения от контроля, приведенных в табл. 3 приложения 4 к гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного взаимодействия», удовлетворять критерию

$$\sum_i \left(\frac{A_i}{УИ_i} \right) \leq 1,$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида; $УИ_i$ – уровень изъятия i -го радионуклида.

Из расчетов следует, что:

материалы выгородки, шахты, пространства под активной зоной, ПЭЛ (Du_2TiO_5) со сроком службы 10 лет, ПЭЛ (Du_2TiO_5) со сроком службы 3 года будут относиться к категории ВАО с момента останова реактора до 200 лет включительно;

материалы ПЭЛ (B_4C) со сроком службы 10 лет будут HAO в течение 200 лет;

после 2 лет выдержки материалы наплавки перейдут из категории ВАО в CAO, после 88 лет выдержки материалы наплавки перейдут из категории CAO в HAO, а после 36 лет выдержки материалы теплозащиты перейдут из категории CAO в HAO;

после 2 лет выдержки материалы БЗТ перейдут из категории ВАО в CAO, после 13 лет выдержки материалы сухой защиты перейдут из категории CAO в HAO, а после 49 лет выдержки – из категории HAO в OHAO (см. рисунок);

уже через 1 год выдержки материалы опорной фермы перейдут из категории HAO в OHAO, а через 139 лет выдержки – из OHAO в нерадиоактивные отходы;

после 44 лет выдержки материалы биологической защиты перейдут из категории OHAO в нерадиоактивные отходы и после 78 лет выдержки материалы строительного бетона перейдут из категории OHAO в нерадиоактивные отходы.

Таблица 5. Суммарные массы и объемы активированных материалов по всем элементам конструкций реактора ВВЭР-1200 по категориям РАО в зависимости от времени после останова реактора

Table 5. Total masses and volumes of activated materials for all structural elements of the VVER-1200 reactor by RW categories depending on the time after the reactor shutdown

Категория РАО	Время, лет											
	0	1	5	10	20	30	50	70	90	100	150	200
BAO	Масса, г	1,17E+08	1,17E+08	8,91E+07								
	Объем, м ³	1,50E+01	1,50E+01	1,14E+01								
CAO	Масса, г	3,30E+08	3,30E+08	3,58E+08	3,58E+08	1,83E+08	1,72E+08	1,72E+08	2,84E+07	2,84E+07	2,84E+07	2,84E+07
	Объем, м ³	7,90E+01	7,90E+01	8,26E+01	8,26E+01	3,19E+01	3,19E+01	2,18E+01	3,59E+00	3,59E+00	3,59E+00	3,59E+00
HAO	Масса, г	1,62E+08	2,43E+06	2,43E+06	2,43E+06	1,77E+08	1,77E+08	1,35E+07	1,35E+07	1,57E+08	1,57E+08	1,57E+08
	Объем, м ³	2,90E+01	7,48E-01	7,48E-01	7,48E-01	5,14E+01	5,14E+01	1,09E+01	1,09E+01	2,91E+01	2,91E+01	2,91E+01
OHAO	Масса, г	1,05E+08	2,64E+08	2,64E+08	2,64E+08	2,64E+08	2,64E+08	4,19E+08	4,19E+08	3,34E+08	1,75E+08	1,75E+08
	Объем, м ³	4,58E+01	7,40E+01	7,40E+01	7,40E+01	7,40E+01	7,40E+01	1,18E+02	1,18E+02	7,89E+01	5,07E+01	5,07E+01
Сумма по всем РАО	Масса, г	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	6,94E+08	6,94E+08	6,09E+08	4,49E+08	4,49E+08
	Объем, м ³	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,62E+02	1,23E+02	1,23E+02	9,47E+01	9,47E+01

Материалы сухой защиты в период 0–13 лет будут сначала САО, в период 14–49 лет – НАО, а в период 50–200 лет – ОНАО по бета-излучающим радионуклидам (см. табл. 3). При этом в период 0–70 лет будут относиться к ОНАО по тритию, то есть в период 50–70 лет материалы сухой защиты будут ОНАО по бета-излучающим радионуклидам и по тритию одновременно.

Из расчетов следует, что материалы опорной фермы до года будут НАО, а в период 1–139 лет – ОНАО по бета-излучающим радионуклидам. При этом материалы опорной фермы в период 0–20 лет будут относиться к ОНАО по тритию, то есть в период 1–20 лет материалы опорной фермы будут ОНАО по бета-излучающим радионуклидам и по тритию одновременно.

В табл. 4 представлены массы и объемы активированных материалов по каждому элементу конструкции реакторной установки ВВЭР-1200 по категориям РАО в зависимости от времени после ее останова.

Суммарные массы и объемы активированных материалов по всем элементам конструкций ВВЭР-1200 по категориям РАО в зависимости от времени после останова реактора приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что масса ВАО первые несколько лет будет постоянной (117 т), затем она снизится на 24 % и будет постоянной до 200 лет включительно. Через несколько лет после останова реактора суммарная масса САО возрастет на 8 %, затем будет уменьшаться, а после 90 лет выдержки станет постоянной. Что касается массы НАО, то на момент останова основной вклад будет давать опорная ферма, но уже через год ее материалы перейдут в ОНАО и масса НАО снизится на два порядка. В период 20–30 лет вклад в НАО даст сухая защита, которая в этот период перейдет из САО в НАО. Но после 50 лет выдержки материалы сухой защиты перейдут в ОНАО, зато в НАО в это время перейдут материалы теплоизоляции и около 90 лет корпус без наплавки. Масса ОНАО с течением времени будет расти от 105 т до максимума в 445 т (период 50–70 лет) и затем будет уменьшаться.

Зависимости величин объемов материалов от времени, представленных в табл. 4, 5, носят такой же характер, как и для масс материалов.

Массу и объем короткоживущих САО можно определить, как разницу масс и объемов САО и ДСАО. Так, масса короткоживущих САО на момент останова составит 175 т, а объем 49,8 м³.

Заключение. На основе данных расчетных исследований по кодам SERPENT 2 и MCU изотопного состава и активности по каждому элементу активируемых конструкционных и защитных материалов на момент останова реакторной установки ВВЭР-1200 были рассчитаны удельные активности по каждому изотопу, суммарные удельные активности и активности, массы и объемы активированных материалов различных категорий РАО с течением времени после окончательного останова реактора.

Полученные зависимости изменений масс и объемов активированных материалов с течением времени после окончательного останова реактора позволяют определить массы и объемы материалов каждой категории РАО отдельно и в сумме на любой момент времени. Так, из анализа зависимостей следует, что, массы активированных материалов, относящиеся к РАО, за 200 лет выдержки уменьшатся на 264 т (от 713 до 449 т), а объемы материалов, относящиеся к РАО, – на 74,3 м³ (от 169 до 94,7 м³).

Прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока позволят разработать технические предложения, прогнозные планы-графики по организации системы обращения с РАО в процессе вывода из эксплуатации АЭС, а также возможные технологические и конструктивные решения по системе захоронения этих РАО.

Список использованных источников

1. Радиационные характеристики реакторных конструкций после окончательного останова АЭС с ВВЭР / Б. К. Былкин [и др.] // Атом. энергия. – 2009. – Т. 106, вып. 1. – С. 56–60.
2. К определению категории РАО для бетонов радиационной защиты ядерных установок при их выводе из эксплуатации / Б. К. Былкин [и др.] // Атом. энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 5. – С. 298–301.
3. Наведенная активность радиационной защиты в проблеме вывода из эксплуатации ядерных установок / Б. К. Былкин [и др.] // Ядер. и радиац. безопасность. – 2017. – № 3 (85). – С. 1–14.
4. Практические основы разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. – 480 с.
5. Оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // VIII Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века»: доклады, Минск, 23–26 окт. 2020 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; отв. за вып. А.В. Радкевич. – Минск: Право и экономика, 2020. – С. 11–21.
6. Расчетные исследования образования высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов активационного происхождения для реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Нелинейная динамика и приложения: труды XXVII Междунар. семинара, Минск, 19–22 мая 2020 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; под ред. В. И. Кувшинова, В. А. Шапорова. – Минск: А. Н. Вараксин, 2020. – С. 66–75.
7. Оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 365–377. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>
8. Прогнозная оценка изменения объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях в процессе их выдержки после окончательного останова энергоблоков Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 332–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>

References

1. Bylkin B. K., Yegorov A. L., Zhurbenko Ye. A., Tsofin V. I. Radiation characteristics of reactor structures after the final shutdown of a nuclear power plant with VVER. *Atomic Energy*, 2009, vol. 106, pp. 73–78. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9133-2>
2. Bylkin B. K., Engovatov I. A., Kozhevnikov A. N., Sinyushin D. K. Radioactivity Category Determination for Radiation-Protection Concrete in Nuclear Facilities Undergoing Decommissioning. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, pp. 383–387. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0216-1>
3. Bylkin B. K., Kozhevnikov A. N., Engovatov I. A., Sinyushin D. K. Induced activity of radiation shielding before NPP decommissioning. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2017, no. 3 (85), pp. 1–14 (in Russian).
4. *Practical Foundations for the Development and Substantiation of Technical Characteristics and Operational Safety of VVER-type Reactor Plants*. Moscow, National Research Center “Kurchatov Institute”, 2015. 480 p. (in Russian).
5. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryany G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Griбанова K. A., Kovalevich V. G. Estimation of the volumes of radioactive waste subject to deep burial, generated as a result of activation of structural and protective materials of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP. *VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya “Atomnaya energetika, yadernye i radiatsionnye tekhnologii XXI veka”: doklady, Minsk, 23–26 oktyabrya 2020 g.* [VIII International Conference “Nuclear Energy, Nuclear and Radiation Technologies of the 21st century”: Reports, Minsk, October 23–26, 2020]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2020, pp. 11–21 (in Russian).
6. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryany G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Yrashevich K. A., Kovalevich V. G. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the VVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Nelineinaya dinamika i prilozheniya: trudy XXVII Mezhdunarodnogo seminar, Minsk, 19–22 maya 2020 g.* [Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the XXVII International Seminar, Minsk, May 19–22, 2020]. Minsk, A. N. Varaksin Publ., 2020, pp. 66–75 (in Russian).
7. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryany G. Z., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the WVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekh-*

nichnykh navuk = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 365–377 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>

8. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryany G. Z., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Predictive evaluation of changes in the volumes of radioactive waste to be deeply dispositioned in activated reactor structures in the process of their storage after the final shutdown of the Belarusian NPP power units. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 332–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>