

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

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Прилесье, Минский район, Минская область, Республика Беларусь*

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМОВ ПОДЛЕЖАЩИХ ГЛУБИННОМУ ЗАХОРОНЕНИЮ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫХ РЕАКТОРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В ПРОЦЕССЕ ИХ ВЫДЕРЖКИ ПОСЛЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ОСТАНОВА ЭНЕРГОБЛОКОВ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований количества твердых высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов (ВАО и ДСАО), образующихся при нейтронной активации материалов конструкций, прилегающих к активной зоне реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС, в зависимости от времени после окончательного останова реактора. Оценка объемов ВАО и ДСАО активационного происхождения, образующихся за 60 лет эксплуатации реактора ВВЭР-1200, выполнена на основании расчетных исследований наведенной активности конструкционных и защитных материалов с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов (SERPENT 2, TVS-M, DYN3D, MCU-PD). В результате расчетных исследований установлено, что массы и объемы активированных материалов, по уровням загрязнения относящихся к ВАО и ДСАО, в течение 10 лет после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС будут составлять соответственно 273 т и 43 м³. В интервале 30–70 лет выдержки массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 262 т и 33 м³. При выдержке от 100 до 200 лет массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 118 т и 15 м³. Основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов конструкций выгородки, шахты, наплавки, корпуса реактора, блока защитных труб (БЗТ), пространства под активной зоной, теплоизоляции в течение 10 лет после останова реактора будут вносить изотопы ⁵⁵Fe (период полураспада 2,7 года), ⁶⁰Co (5,27 года) и ⁶³Ni (96 лет), а после 10 лет выдержки – ⁶³Ni. Основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов поглощающих элементов (ПЭЛ) с Ду₂TiO₅ в течение всего срока хранения будет вносить ⁶³Ni.

Ключевые слова: радиоактивные отходы атомных электростанций, высокоактивные твердые радиоактивные отходы, долгоживущие среднеактивные радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов

Для цитирования: 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.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 332–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>

**Mikhail L. Zhemzhurov, Georgy M. Zhmura, Isaak E. Rubin, Grigory Z. Serebryany, 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, Prilesye village,
Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus*

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

Abstract. This paper presents the results of computational studies of the amount of solid high-level and long-lived intermediate level radioactive waste (HLW and ILW-LL) generated during neutron activation of structural materials adjacent to the core of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP, depending on the time after the final shutdown of the reactor. The assessment of the volumes of HLW and ILW-LL of activation origin, formed over 60 years of operation of the VVER-1200 reactor, was carried out on the basis of computational studies of the induced activity of structural and shielding materials using reactor and Monte Carlo program codes (SERPENT 2, TVS-M, DYN3D, MCU-PD). As a result of calculation studies, it was established that the masses and volumes of activated materials, according to the levels of pollution related to HLW and ILW-LL, within 10 years after the final shutdown of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP will be 273 tons and 43 m³, respectively. In the interval of 30–70 years, the masses and volumes of activated materials of these categories of RW will amount to 262 t and 33 m³, respectively. From 100 years to 200 years, the masses and volumes of activated materials of these categories of RW will be 118 t and 15 m³, respectively. Within 10 years after the reactor shutdown, isotopes ⁵⁵Fe

(2.7 years), ^{60}Co (5.27 years), ^{63}Ni (96 years) will make the main contribution to the value of the integral specific activity of the materials of the structures of the fence, shaft, surfacing, reactor vessel, block of protective tubes (BPT), the space under the core, thermal insulation; after 10 years – ^{63}Ni . The main contribution to the value of the integral specific activity of materials of absorbing elements (PEL) with Dy_2TiO_5 during the entire period of storage will be made by ^{63}Ni .

Keywords: radioactive waste of nuclear power plants, solid high-level radioactive waste, long-lived intermediate level radioactive waste, burial of radioactive waste

For citation: Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryany G. Z., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Predictive evaluation of changes in the volumes of radioactive waste to be deeply disposed in activated reactor structures in the process of their storage after the final shutdown of the Belarusian NPP power units. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = 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>

Введение. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и требованиями, содержащимися в национальных нормативных документах, процесс вывода блоков АЭС из эксплуатации должен учитываться, начиная со стадии проектирования станции. Для этого уже на этом этапе необходима оценка объема и радиационных характеристик отходов, которые будут образовываться при выводе энергоблока из эксплуатации.

Вывод из эксплуатации блока АЭС может осуществляться различными способами (вариантами) [1], выбор которых определяется национальной технической политикой, реализуемой при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии, либо путем многофакторного анализа ряда технико-экономических, социальных и других факторов.

Действующими нормативными документами ряда стран предусматривается реализация следующих базовых вариантов вывода из эксплуатации отработавших назначенный срок службы блоков АЭС: захоронение, немедленная ликвидация, отложенная ликвидация (в зарубежной нормативно-технической литературе они имеют следующие обозначения: ENTOMB, DECON и SAFSTOR).

Вариант «захоронение» предполагает локализацию и захоронение высокоактивных конструкций, систем и оборудования, как правило, на их штатном месте за счет создания защитных барьеров, исключающих несанкционированный доступ к ним и распространение радиоактивности в окружающую среду. Следует отметить, что указанный вариант не соответствует установленным в Республике Беларусь нормативным требованиям к захоронению радиоактивных отходов (РАО) в зависимости от их класса и общим критериям приемлемости данных отходов для захоронения.

Вариант «немедленная ликвидация» предполагает полный демонтаж строительных конструкций, систем и оборудования после подготовительного этапа и последующую рекультивацию (восстановление) площадки АЭС. Работы по демонтажу высокоактивных конструкций реактора, других радиоактивно загрязненных систем и оборудования производятся практически сразу после окончательного останова блока АЭС, выгрузки и удаления ядерного топлива. Недостатком данного варианта являются большие материальные и финансовые затраты, обусловленные высоким уровнем радиоактивности и большим объемом РАО различных классов.

Вариант «отложенная ликвидация» заключается в полном демонтаже конструкций реактора, систем и оборудования, производимом после этапа их длительной безопасной выдержки под наблюдением в целях естественного спада радиоактивности до уровня, приемлемого для проведения демонтажных работ на базе имеющихся средств технологического оснащения.

В отношении образуемых при ликвидации энергоблока высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) их длительная выдержка может также требоваться для снижения объемного энерговыделения до значений, регламентированных для РАО классов 1 и 2, и перевода РАО класса 1 в класс 2 для упрощения системы захоронения. Кроме того, за счет выдержки может быть снижена мощность дозы гамма-излучения на поверхности планируемых к использованию упаковок РАО до значений, регламентируемых правилами безопасности при транспортировании радиоактивных материалов.

Продолжительность этапа длительной выдержки должна определяться в результате детальных технико-экономических оптимизационных расчетов и может составить от 30 до 100 лет. Следует отметить, что необходимость организации длительного хранения ВАО и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов (ДСАО) и сроки хранения при реализации варианта «отложенная ликвидация» для вывода из эксплуатации энергоблоков Белорусской АЭС

могут быть обусловлены сроками создания и введения в эксплуатацию пункта глубинного захоронения РАО. Согласно классификации РАО для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении ВАО и ДСАО включены в классы 1 и 2 и должны захораниваться в глубоких геологических формациях. Проработка вопроса о сооружении пункта захоронения РАО высокой активности, образуемых в результате эксплуатации Белорусской АЭС, в глубокой геологической формации является одной из основных задач «Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 2 июня 2015 г., №460 «Об утверждении стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции»).

Таким образом, для разработки технических предложений, прогнозных план-графиков по организации системы обращения с ВАО и ДСАО в процессе вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, возможных технологических и конструктивных решений по системе глубинного захоронения этих РАО необходимо иметь прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций, относящихся по уровню удельной активности к ВАО и ДСАО, 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 [2–4]. Данные по активности конструкций реакторной установки исходя из времени после ее останова представлены в материалах проекта Белорусской АЭС и частично опубликованы в [1, 2]. В [2] выполнено расчетное моделирование активации элементов конструкций реактора при эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200, при этом в соответствии с российскими санитарными правилами обращения с РАО (СанПиН 2.6.6.2796-10 «Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002)») все конструкции реактора были разделены на три группы твердых РАО (высоко-, средне- и низкоактивные). Однако в настоящее время проектные и литературные данные по объемам активированных РАО отдельно по категориям, в том числе подлежащих глубинному захоронению ВАО и ДСАО, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС отсутствуют.

Цель настоящего исследования – получение прогнозных количественных данных по объемам и массе активированных реакторных конструкций, относящихся по уровню удельной активности к ВАО и ДСАО, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока Белорусской АЭС.

Методика исследований. Для расчета количественных изменений ВАО и ДСАО в активированных реакторных конструкциях в процессе их выдержки после завершения эксплуатации энергоблока использованы полученные авторами настоящей публикации в [5–7] результаты оценки объемов и радиационных характеристик ВАО и ДСАО на момент останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. В указанных работах расчеты наведенной активности конструкционных и защитных материалов производились для срока эксплуатации реактора 60 лет с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов: SERPENT 2 (трехмерный Монте-Карло код расчета реакторов, VTT Technical Research Centre of Finland, лицензия № L1K002/JPNRMINSK); ТВС-М (аттестационный паспорт от 21.02.2002 №135); DYN3D (лицензионное соглашение №0012011 между Центром им. Гельмгольца Дрезден-Россендорф, Германия, и Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси); MCU-PD (аттестационный паспорт от 24.10.2018 №456).

Прогнозные данные по активностям ВАО и ДСАО, образующихся в результате активации нейтронами конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 за 60 лет эксплуатации Белорусской АЭС, в зависимости от времени выдержки после останова реактора, были получены на основе данных на момент останова с учетом радиоактивного распада по формуле [8]

$$A_i(t) = A_i(0)e^{-0,693\frac{t}{T}},$$

где A_i – активность i -го радионуклида, Бк; $A_i(0)$ – активность радионуклида на момент останова реактора, Бк; T – период полураспада радионуклида, с; t – время после останова, с.

Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора 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 реактора ВВЭР-1200 в радиальном и аксиальном направлениях представлены в [7].

Т а б л и ц а 1. Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора ВВЭР-1200

T a b l e 1. Characteristics of the most irradiated structural elements of the VVER-1200 reactor

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	34	09Г2С + 08X18H10Т	1,09	2,22	2,04
	Основная часть	18			7,38	6,78
	Верхняя часть	19			1,44	1,32
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

П р и м е ч а н и е. ПЭЛ – поглощающий элемент, БЗТ – блок защитных труб.

Т а б л и ц а 11. Массы (г) и объемы (м³) высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов в зависимости от времени после останова реактора

Table 11. Weights (g) and volumes (m³) of high-level and long-lived intermediate level radioactive waste, depending on the time after the shutdown of the reactor

Элемент конструкции	Параметр	Время выдержки, лет									
		0	3	5	10	30	50	70	100	150	200
Выгородка	$V, \text{ м}^3$	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00
	Масса, г	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07
Шахта реактора	$V, \text{ м}^3$	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00
	Масса, г	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07
Наплавка	$V, \text{ м}^3$	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01
	Масса, г	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06
Корпус реактора	$V, \text{ м}^3$	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01			
	Масса, г	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08			
Теплоизоляция	$V, \text{ м}^3$	1,01E+01	1,01E+01	1,01E+01	1,01E+01						
	Масса, г	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07						
БЗТ	$V, \text{ м}^3$	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00
	Масса, г	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07
Пространство под активной зоной	$V, \text{ м}^3$	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01
	Масса, г	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) со сроком службы 10 года	$V, \text{ м}^3$	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01
	Масса, г	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) со сроком службы 3 года	$V, \text{ м}^3$	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02
	Масса, г	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05
Сумма	$V, \text{ м}^3$	4,33E+01	4,33E+01	4,33E+01	4,33E+01	3,32E+01	3,32E+01	3,32E+01	1,50E+01	1,50E+01	1,50E+01
	Масса, г	2,73E+08	2,73E+08	2,73E+08	2,73E+08	2,62E+08	2,62E+08	2,62E+08	1,18E+08	1,18E+08	1,18E+08

П р и м е ч а н и е. ПЭЛ – поглощающий элемент, БЗТ – блок защитных труб.

В табл. 12 приведены сравнительные данные по интегральной активности элементов конструкций через 5 лет после останова реактора ВВЭР-1200, полученные в данной работе и в [1].

Отличие абсолютных величин процентного отклонения интегральных активностей материалов выгородки, шахты, корпуса, теплоизоляции, опорной фермы, полученных в данной работе, по сравнению с [1] составляет от 8 до 92 %. Учитывая различия расчетных методик, принятых в расчетах составов материалов, примесей, рассматриваемых изотопных составов совпадение можно считать удовлетворительным.

В результате выполненных расчетных исследований установлено, что при сроке службы реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС 60 лет при активации нейтронами близлежащих к активной зоне реакторных и защитных конструкций будут образованы ВАО и ДСАО в следующих количествах (на один энергоблок):

в стальных конструкциях выгородки, шахты массой 79,3 т и объемом 10 м³ – ВАО при выдержке до 200 лет;

в наплавке массой 6,24 т и объемом 0,79 м³ – ВАО на момент останова, а в период от 3 до 200 лет выдержки эти РАО будут относиться к ДСАО;

в части корпуса реактора массой 144 т и объемом 18,2 м³ – ДСАО в течение до 200 лет выдержки;

в теплоизоляции массой 11 т и объемом 10,1 м³ – ДСАО до 10 лет выдержки, а после 30 лет эти РАО к ДСАО уже не относятся;

Т а б л и ц а 12. Интегральные активности элементов конструкций через 5 лет после останова реактора ВВЭР-1200

Table 12. Integral activity of structural elements 5 years after the shutdown of the VVER-1200 reactor

Элемент конструкции	А, Бк	А, Бк [1]	$\frac{(A_{[1]} - A)}{A_{[1]}} \times 100, \%$
Выгородка	9,59E+16	1,57E+17	38,9
Шахта	9,98E+15	1,09E+16	8,4
Корпус с наплавкой	1,00E+14	1,25E+15	92,0
Теплоизоляция	1,87E+12	1,20E+12	-55,8
БЗТ	1,55E+14	4,27E+14	63,7
Опорная ферма	5,20E+11	7,36E+11	29,3

в стальных конструкциях БЗТ общей массой 22,2 т и объемом 2,8 м³ – ВАО на момент останова, а в период от 3 до 200 лет выдержки эти РАО будут являться ДСАО;

в металлоконструкциях пространства под активной зоной общей массой 7,6 т и объемом 0,96 м³ – ВАО в течение до 200 лет выдержки;

в материалах ПЭЛ (Dy₂TiO₅) со сроком их службы 10 лет общей массой 1,92 т и объемом 0,34 м³ – ВАО в течение до 200 лет выдержки;

в материалах ПЭЛ (Dy₂TiO₅) со сроком их службы 3 года общей массой 0,242 т и объемом 4,2·10⁻² м³ – ВАО в течение до 200 лет выдержки.

Выполненные расчеты показывают, что в широких диапазонах времен выдержки прогнозные суммарные количества подлежащих глубинному захоронению рассматриваемых ВАО и ДСАО остаются постоянными. Массы и объемы активированных материалов, по уровням загрязнения относящихся к ВАО и ДСАО, в течение 10 лет выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС будут составлять соответственно 273 т и 43 м³. В интервале 30–70 лет выдержки массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 262 т и 33 м³. При выдержке от 100 до 200 лет массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 118 т и 15 м³.

В остальных диапазонах времен выдержки происходит изменение суммарного количества ВАО и ДСАО из-за перераспределения РАО между категориями. Из табл. 11 видно, что материалы наплавки и БЗТ в течение трех лет с момента останова реактора перейдут из категории ВАО в ДСАО. Материалы корпуса реактора в течение периода 70–100 лет и материалы теплоизоляции в течение периода 10–30 лет выдержки перестают быть ДСАО. Следует отметить, что использованные в данной работе программные средства позволяют рассчитать точное время перехода РАО из одной категории в другую и, соответственно, количество ВАО и ДСАО для заданного времени выдержки.

В течение 10 лет после останова реактора изотопы ⁵⁵Fe (период полураспада 2,7 года), ⁶⁰Co (5,27 года), ⁶³Ni (96 лет) будут вносить основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов конструкций выгородки, шахты, наплавки, корпуса реактора, БЗТ, пространства под активной зоной, теплоизоляции, а после 10 лет выдержки доминирующей является активность изотопа ⁶³Ni. Основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов ПЭЛ (Dy₂TiO₅) в течение всего срока хранения будет вносить изотоп ⁶³Ni.

Расчетные исследования активации материалов сухой защиты, строительного бетона, опорной фермы и биологической защиты реактора показали, что данные элементы конструкции с момента останова реактора не будут относиться ни к ВАО, ни к ДСАО. При активации материалов этих элементов конструкции учитывалось образование трития. Ввиду ограничений по объему представляемых материалов в данной работе эти расчеты не даны.

Заключение. В результате расчетных исследований установлено, что массы и объемы активированных материалов, по уровням загрязнения относящихся к ВАО и ДСАО, в течение 10 лет выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС будут составлять соответственно 273 т и 43 м³. В интервале 30–70 лет выдержки массы и объемы активированных материалов категорий ВАО и ДСАО составят соответственно 262 т и 33 м³. При выдержке от 100 до 200 лет массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 118 т и 15 м³. В остальных диапазонах времен выдержки происходит изменение суммарного количества ВАО и ДСАО из-за перераспределения РАО между категориями.

Полученные прогнозные количественные данные используются при разработке технических предложений, прогнозных план-графиков по организации системы обращения с ВАО и ДСАО в процессе вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, возможных технологических и конструктивных решений по системе глубинного захоронения этих РАО.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам отдела по обращению с РАО Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – «ВНИПИЭТ» за советы и ценные замечания при выполнении данной работы.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the specialists of the Department for the treatment of RAW materials of the St. Petersburg Branch of JSC “FCNIVT “SNPO “Aileron” – “VNIPIET” for advice and valuable comments when performing this work.

Список использованных источников

1. Практические основы разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. – 480 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
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.] // Материалы 8-й Международ. конф. «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии 21-го века». – Минск, 2020. – С. 11–21.
6. 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 / M.L. Zhemzhurov [et al.] // Nonlinear Dynamics and Applications. – 2020. – Vol. 66. – P. 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. Машкович, В.П. Защита от ионизирующих излучений: справочник / В.П. Машкович. – 3-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат, 1982. – 296 с.

References

1. *Practical Foundations for the Development and Substantiation of Technical Characteristics and Operational Safety of VVER-type Reactor Plants*. Moscow, NRC “Kurchatov Institute”, 2015. 480 p. (in Russian).
2. 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, iss. 1, pp. 73–78. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9133-2>
3. 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, iss. 5, pp. 383–387. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0216-1>
4. 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).
5. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryanyy G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Teterova 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. *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Atomnaya energetika, yadernyye i radiatsionnyye tekhnologii 21-go veka”* [Materials of the 8th International Conference “Nuclear Power Engineering, Nuclear and Radiation Technologies of the 21st Century”]. Minsk, 2020, pp. 11–21 (in Russian).
6. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryanyy G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Teterova 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. *Nonlinear Dynamics and Applications*, 2020, vol. 66, pp. 66–75.
7. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryanyy G. Z., Dneprovskaya N. M., Teterova 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 VVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = 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. Mashkovich V.P. *Ionizing Radiation Protection*. 3rd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 296 p. (in Russian).

Информация об авторах

Жемжуров Михаил Леонидович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: jema@sosny.bas-net.by

Жмура Георгий Митрофанович – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: georgiyzhmura@mail.ru

Рубин Исаак Ефимович – старший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Серебряный Григорий Зиновьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: silver@sosny.bas-net.by

Днепровская Нина Михайловна – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: dneprnina@mail.ru

Тетерева Наталья Александровна – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: tetna@mail.ru

Руденков Ивантон Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: godder@tut.by

Бабичев Леонид Филипович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: babichev@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Mikhail L. Zhemzhurov – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic 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, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: georgiyzhmura@mail.ru

Isaak E. Rubin – Senior Researcher of the Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Grigory Z. Serebryany – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: silver@sosny.bas-net.by

Nina M. Dneprovskaya – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: dneprnina@mail.ru

Natalia A. Tetereva – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic 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, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: godder@tut.by

Leonid F. Babichev – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory for Modeling Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: babichev@sosny.bas-net.by