

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.039.743

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>

Поступила в редакцию 09.04.2021

Received 09.04.2021

**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, Минск, Республика Беларусь*

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ ПОДЛЕЖАЩИХ ГЛУБИННОМУ ЗАХОРОНЕНИЮ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АКТИВАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 БЕЛОРУССКОЙ АЭС

Аннотация. Проработка вопроса о сооружении пункта захоронения радиоактивных отходов высокой активности в Республике Беларусь связана с оценкой объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. В данной работе представлены результаты расчетных исследований образования твердых высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов (ДСАО) при нейтронной активации материалов конструкций, прилегающих к активной зоне реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. 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, ТВС-М, DYN3D, MCU-PD). В результате исследований установлено, что при активации нейтронами материалов участков конструкций реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС, близлежащих к активной зоне (в стальных конструкциях выгородки, шахты, наплавки, части корпуса реактора, конструкциях блока защитных труб (БЗТ), пространств под активной зоной, в материалах теплоизоляции, стержней поглощающих элементов (Dy_2TiO_5)) образуются ВАО и ДСАО общей массой 272,5 т и объемом 43 м³. Расчетные исследования активации материалов сухой защиты, строительного бетона, опорной фермы и биологической защиты показали, что данные элементы конструкции не будут относиться ни к ВАО, ни к ДСАО.

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

Для цитирования: 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. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №3. – С. 365–377. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>

**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, Minsk,
Republic of Belarus*

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

Abstract. The study of the issue of constructing a disposal facility for high-activity radioactive waste in the Republic of Belarus is associated with an assessment of the volume of radioactive waste to be deeply disposed of, generated as a result of the activation of structural materials of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP. This paper presents the results of computational studies of the formation of solid high-level radioactive waste (HLW) and long-lived intermediate level radioactive waste (ILW-LL) during neutron activation of materials adjacent to the core of the VVER-1200 reactor structures of the Belarusian NPP. 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 the research, it was found that when neutrons activate materials of the sections of the VVER-1200 reactor structures of the Belarusian NPP adjacent to the core (in the steel structures of the baffle, shaft, surfacing, part of the reactor vessel, struc-

tures of the protective tube unit (PTU), the space under the core, in heat insulation materials, rods of absorbing elements (Dy_2TiO_5) are formed by HLW and ILW-LL with a total weight of 272,5 tons and a volume of 43 m³. Calculated studies of the activation of dry protection materials, building concrete, support truss and biological protection showed that these structural elements will not belong to either HLW or ILW-LL.

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. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the WWER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh 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>

Введение. Радиационная опасность при выводе из эксплуатации ядерных установок, в которых генерируются интенсивные потоки нейтронного излучения вследствие протекающей в них цепной реакции деления, определяется наведенной радиоактивностью за счет активации части оборудования, систем, конструкционных и защитных материалов, а также, отчасти, загрязнения их радионуклидами в процессе эксплуатации. Данные факторы в значительной степени обуславливают объемы радиоактивных отходов (РАО) на стадии вывода из эксплуатации.

Одной из основных проблем при выводе из эксплуатации блока АЭС является проблема переработки и удаления для последующего хранения или захоронения радиоактивных отходов, которые будут образовываться при демонтаже реактора и радиоактивных конструкций блока. В настоящее время в Беларуси отсутствуют хранилища и могильники РАО, требуемые при выводе из эксплуатации блока атомной электростанции.

Категоризация среднеактивных, высокоактивных твердых РАО по удельной активности радионуклидов производится в соответствии с таблицей 1 приложения 2 СПОРО-2015 (Санитарные нормы и правила «Требования радиационной безопасности при обращении с радиоактивными отходами», утвержденные постановлением Минздрава Республики Беларусь от 31.12.2015 № 142). Классификация РАО при захоронении производится в соответствии с приложением «Классификация радиоактивных отходов для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении» к нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» (утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 28.09.2010 № 47 (в редакции постановления Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 24.07.2017 № 33)).

При этом необходимо учитывать, что ДСАО также включены в класс 2 РАО и для них требуется создание пункта захоронения радиоактивных отходов глубокого заложения. Рассматриваемые в данной работе РАО относятся к классу 2 и, возможно, к классу 1.

Проработка вопроса о сооружении пункта захоронения радиоактивных отходов высокой активности, образуемых в результате эксплуатации Белорусской АЭС, в глубокой геологической формации является основной задачей «Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции» (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: 29.03.2021).

В связи с этим как научный, так и практический интерес представляет оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. Для этого в качестве активируемых конструкций и материалов должны рассматриваться выгородка, шахта реактора, внутрикорпусная наплавка, корпус реактора, блок защитных труб (БЗТ), пространство под активной зоной, опорная ферма, теплоизоляция, сухая защита, биологическая защита, строительный бетон, поглощающие элементы (ПЭЛ) с карбидом бора (B_4C) и титанатом диспрозия (Dy_2TiO_5).

Расчетное прогнозирование объемов радиоактивных отходов, образующихся в результате нейтронной активации бетонов радиационной защиты при выводе из эксплуатации действующей

щих ядерных установок, рассмотрено в [1, 2]. В [3] применено расчетное моделирование активации элементов конструкций реактора при эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200. В данной работе в соответствии с российскими санитарными правилами обращения с РАО все конструкции реактора были разделены на три группы твердых РАО (высоко-, средне- и низкоактивные).

Наведенная активность зависит от плотности потока и энергетического спектра нейтронов, сечений активации, времени облучения, выдержки и др. Также одним из основных показателей, определяющих активационные характеристики металлов и бетонов, является химический состав (включая основные, примесные и следовые элементы). В количественном отношении под основными принято подразумевать элементы с массовым содержанием в материале более 1 %, под примесными – с содержанием от 0,01 до 1 % и под следовыми – с содержанием менее 0,01 % масс. При этом содержание в металлах и защитных бетонах активационно-опасных элементов изменяется в широких пределах в зависимости от места добычи материалов для их производства.

В настоящее время проектные и литературные данные по образованию РАО отдельно по категориям в результате активации конструкционных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС отсутствуют.

Предварительные результаты выполненных нами расчетных исследований наведенной активности конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС приведены в [4, 5]. В данной работе представлены уточненные результаты этих исследований.

Цель настоящего исследования – определение объемов ВАО и ДСАО активационного происхождения, образующихся за 60 лет эксплуатации реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС, с использованием уточненных исходных данных.

Методика исследований. Оценка объемов ВАО и ДСАО выполнена на основании расчетных исследований наведенной активности конструкционных и защитных материалов с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов – SERPENT 2 (трехмерный Монте-Карло код расчета реакторов, VTT Technical Research Centre of Finland, лицензия № L1K002/JIPNRMINSK) и ТВС-М (аттестационный паспорт от 21.02.2002 № 135), DYN3D (лицензионное соглашение № 0 012 011 между Helmholtz-Zentrum Dresden–Rossendorf и Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси) и MCU-PD (аттестационный паспорт от 24.10.2018 № 456).

Для этого с помощью программных кодов SERPENT 2 и ТВС-М проведены нейтронно-физические расчеты фрагмента активной зоны ядерного реактора для подготовки малоугрупповых констант для программного кода DYN3D. Использование программного кода DYN3D позволило выполнить расчеты основных нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВВЭР-1200. Для определения прохождения нейтронов за активной зоной реактора применены программные коды SERPENT 2 и MCU-PD. Программный код MCU-PD, реализующий метод Монте-Карло, предназначен для расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов типа ВВЭР, хранилищ ядерного топлива, мощности эквивалентной дозы нейтронов и фотонов; радиационных характеристик отработавшего ядерного топлива; нуклидного состава облучаемых топливных композиций.

Применение расчетных данных программного кода DYN3D по плотности потока нейтронов в активной зоне реактора и данных, полученных по программным кодам SERPENT 2 и MCU-PD, позволило получить распределение нейтронов в четырехгрупповом приближении (быстрые, промежуточные, резонансные и тепловые) за активной зоной реактора ВВЭР-1200.

Используя распределения нейтронов внутри и за активной зоной реактора и данные по групповым сечениям активации изотопов-предшественников в конструкционных и защитных материалах, мы рассчитали групповые активационные интегралы и наведенную удельную активность материалов внутри и вне корпуса реактора.

Данные по составам материалов в основном взяты из проектных документов блока № 1 Белорусской АЭС, а также из ссылочных и поддерживающих документов. Ввиду сложной геометрии реакторного блока Белорусской АЭС в [4, 5] расчеты наведенной активности проводились с использованием упрощенной 3D-геометрии реактора.

Сравнение результатов расчета активностей наработанных изотопов, полученных по коду SERPENT 2 и MCU-PD, показало незначительное расхождение полученных в результате этого расчета данных, которое вызвано прежде всего отличием в заданных объемах для моделирования, проблемами с достоверной оценкой нейтронного потока за корпусом реактора, а также в используемой методологии для оценки наработанных изотопов.

В настоящей работе по сравнению с [4, 5] увеличено количество рассматриваемых радионуклидов (и реакций их образования), уточнены химические составы и плотности материалов опорной фермы и сухой защиты, выполнено более детальное геометрическое разбиение на участки. Поскольку конструкционные материалы за активной зоной имеют достаточно большие размеры, образование радионуклидов в них неоднородно. Для учета неравномерности наведенной активности по высоте материалы внутрикорпусной шахты, внутрикорпусной наплавки и корпуса дополнительно разбиты на две части. В материалах теплоизоляции, сухой защиты, строительного бетона ниже уровня 20 см под активной зоной также дополнительно выделены отдельные участки.

Внешние источники в участках, расположенных в разных местах на периферии активной зоны, соответственно создают наибольшую наведенную активность в конструкционных материалах, ближайших к тому или иному участку. Так, активность стали в слоях пространства под активной зоной в принятой расчетной модели полностью обусловлена источниками в нижних участках тепловыделяющей сборки (ТВС). Активность материалов в нижней плите БЗТ и в БЗТ, включая ПЭЛ с титанатом диспрозия и карбидом бора, а также в биологической защите наводятся источниками только в верхних участках ТВС. Во всех остальных конструкционных материалах, кроме ПЭЛ регулирующей группы, наведенная активность обусловлена главным образом внешними источниками, расположенными в обоих участках периферийных ТВС.

В режиме нормальной эксплуатации реактора ВВЭР-1200 регулирующая группа ПЭЛ погружена примерно на 10 % (37,5 см) сверху, то есть в активной зоне находится часть поглотителя из титаната диспрозия. Срок службы ПЭЛ регулирующей группы – 3 года, а остальных ПЭЛ – 10 лет. Участками $j = 29, 30$ поглотителя и оболочки ПЭЛ были их верхние части в соответствующих ТВС (по 37,5 см).

Полные размеры расчетной области оставлены без изменения по сравнению с [4, 5]. Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора ВВЭР-1200, рассматриваемых в расчетах, приведены в табл. 1. Расчетная геометрия конструкции реактора представлена 38 участками. Схема расположения активируемых конструкций и материалов в районе активной зоны реактора ВВЭР-1200 в радиальном направлении представлена на рис. 1, а в аксиальном направлении – на рис. 2.

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 WWER-1200 reactor

Элемент конструкции	Номер участка, j	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 (В ₄ С, каждый слой 20 см высотой)		42XHM + В ₄ С	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

Окончание табл. 1

Элемент конструкции		Номер участка, <i>j</i>	Материал	Плотность, т/м ³	Активируемая масса, т	Объем, м ³
Пространство под активной зоной (каждый слой высотой 20 см)		4–8	08X18N10T-Y	7,9	1,52	0,19
Внутрикорпусная наплавка		16	08X18N10T + Nb	7,9	3,97	0,50
		32			2,27	0,29
Корпус (без наплавки)		17	15XНМФА	7,9	91,4	11,57
		33			52,3	6,62
Теплоизоляция	Нижняя часть	34	09Г2С + 08X18N10Т	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

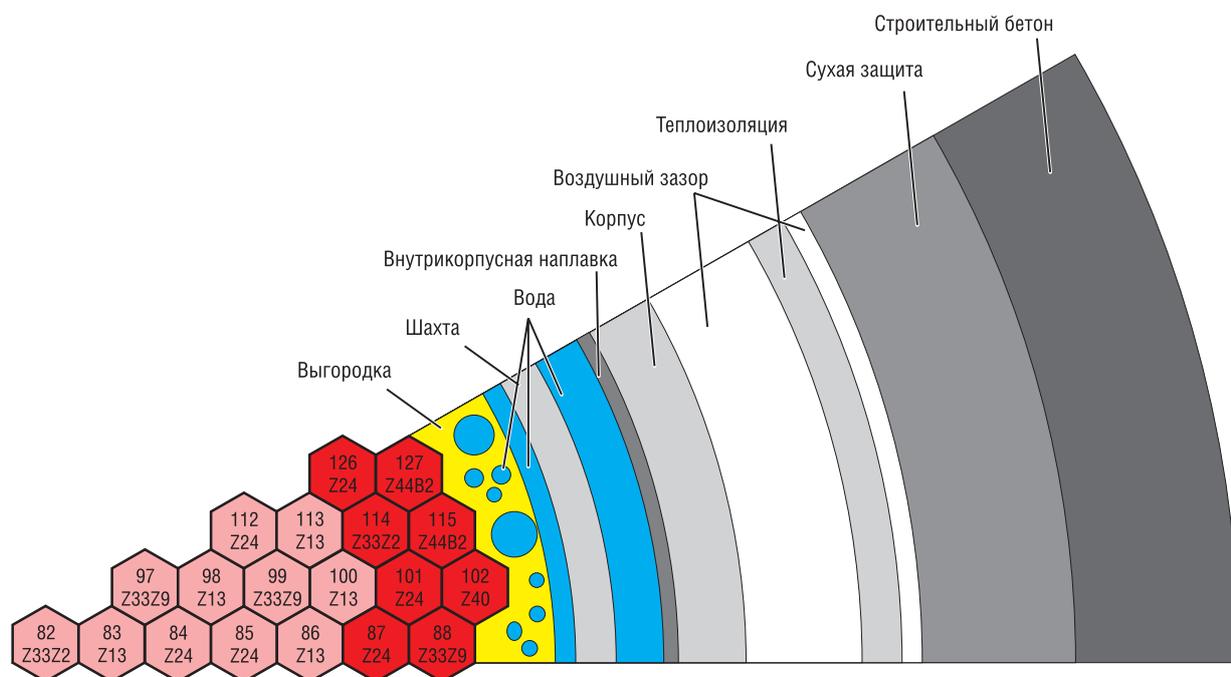


Рис. 1. Расположение активируемых конструкций и материалов в районе активной зоны реактора ВВЭР-1200 в радиальном направлении (элемент симметрии 30°)

Fig. 1. Arrangement of activated structures and materials in the area of the WWER-1200 reactor core in the radial direction (the element of symmetry 30°)

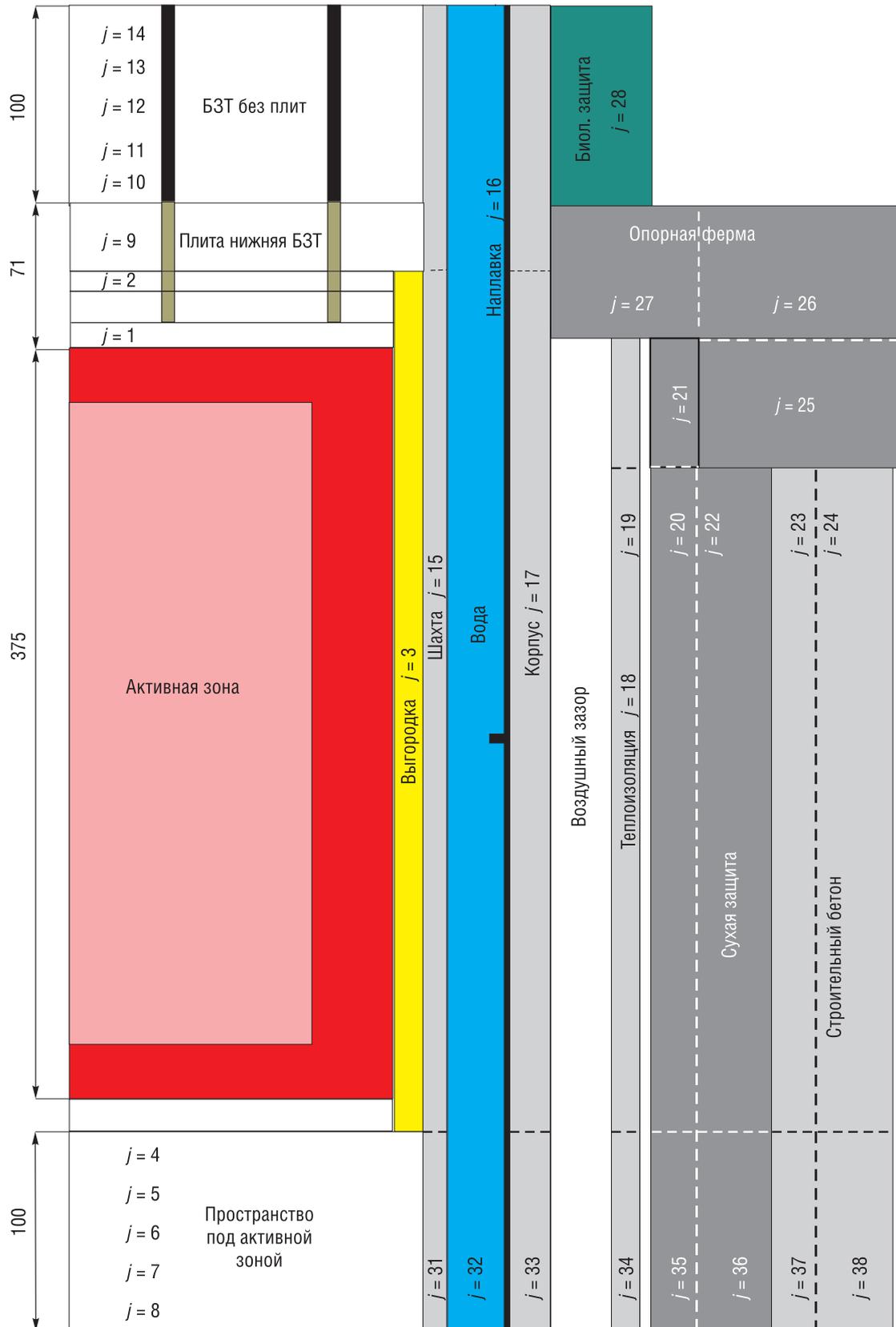


Рис. 2. Расположение активируемых конструкций и материалов в районе активной зоны реактора ВВЭР-1200 в аксиальном направлении

Fig. 2. Arrangement of activated structures and materials in the area of the WWER-1200 reactor core in the axial direction

Результаты и их обсуждение. Уточненные прогнозные данные по количественным и радиационным характеристикам ВАО и ДСаО, образующихся в результате активации нейтронами конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 за 60 лет эксплуатации Белорусской АЭС, даны в табл. 2–8. Также в них представлены активности по изотопам, их суммарные активности и суммарные удельные активности, суммарные активности и суммарные удельные активности ДСаО, массы и объемы активированных материалов.

К РАО классов 1 и 2, согласно нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения», относятся ВАО, если они являются твердыми РАО и содержат бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития) с удельной активностью более 10^7 Бк/г. К классу 2 относятся также ДСаО, содержащие бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития), с периодом полураспада более 31 года и удельной активностью от 10^4 до 10^7 Бк/г.

При расчетах активности элементов конструкций уровня ВАО суммировались все представленные изотопы, при расчетах ДСаО – лишь изотопы с периодом полураспада более 31 года.

В табл. 2–8 желтым цветом выделены изотопы с периодом полураспада более 31 года. В табл. 2, 4–6, 8 красным цветом отмечены активности, удельные активности, массы, плотности и объемы материалов, относящиеся к ВАО. В табл. 2–5, 7 зеленым цветом выделены активности, удельные активности, массы, плотности и объемы материалов, относящихся к ДСаО.

Расчетные исследования активации материалов сухой защиты, строительного бетона, опорной фермы и биологической защиты показали, что данные элементы конструкции не будут относиться ни к ВАО, ни к ДСаО, ввиду ограничений по объему представляемых материалов в данной работе не приведены. В расчетах активации материалов этих элементов конструкции учитывалось образование трития.

Т а б л и ц а 2. Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в выгородке, шахте, наплавке, образующиеся за 60 лет работы Белорусской АЭС

T a b l e 2. Activities and specific activities, masses and volumes of activated materials in the baffle, mine, surfacing, formed over 60 years of operation of the Belarusian NPP

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк						
			Выгородка	Шахта			Наплавка		
			$j = 3$	$j = 15$	$j = 31$	Сумма	$j = 16$	$j = 32$	Сумма
^{14}C	5736,00		7,46E+08*	7,64E+07	5,30E+05	7,69E+07	1,93E+09	2,17E+07	1,95E+09
^{54}Mn	0,85		1,99E+16	1,87E+15	5,86E+12	1,87E+15	1,82E+12	2,16E+10	1,84E+12
^{55}Fe	2,70		1,82E+17	1,85E+16	1,29E+14	1,86E+16	6,49E+13	7,29E+11	6,57E+13
^{60}Co	5,27		2,83E+16	3,30E+15	1,85E+13	3,32E+15	1,40E+13	1,64E+11	1,42E+13
^{59}Ni	7,50E+04		1,95E+14	2,94E+13	2,31E+11	2,96E+13	1,33E+11	1,48E+09	1,34E+11
^{63}Ni	96,00		3,14E+16	3,13E+15	2,25E+13	3,15E+15	1,32E+13	1,47E+11	1,33E+13
^{93}Zr	1,53E+06		1,20E+06	1,09E+05	8,96E+02	1,10E+05	2,68E+02	2,95E+00	2,71E+02
$^{93\text{m}}\text{Nb}$	13,60		3,05E+12	5,11E+11	2,05E+09	5,14E+11	4,88E+12	5,86E+10	4,94E+12
^{94}Nb	2,03E+04		7,82E+08	7,34E+07	2,29E+05	7,36E+07	1,96E+10	2,53E+08	1,99E+10
^{93}Mo	3,50E+03		3,20E+12	5,30E+11	2,12E+09	5,33E+11	1,66E+08	2,45E+06	1,68E+08
^{99}Tc	2,13E+05		5,46E+11	9,03E+10	3,34E+08	9,06E+10	1,98E+07	3,30E+05	2,01E+07
		$A_{\text{сумма}}$, Бк	2,61E+17	2,68E+16	1,76E+14	2,71E+16	9,91E+13	1,10E+12	1,00E+14
		Масса, г	4,15E+07	2,41E+07	1,37E+07	3,78E+07	3,97E+06	2,27E+06	6,24E+06
		$A_{\text{сумма}}$, Бк/г	6,29E+09	1,11E+09	1,28E+07	7,17E+08	2,50E+07	4,85E+05	1,60E+07
		$A_{\text{ДСаО}}$, Бк						1,49E+11	
		$A_{\text{ДСаО}}$, Бк/г						6,55E+04	
		ρ , г/м ³	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06
		V , м ³	5,26E+00	3,05E+00	1,73E+00	4,78E+00	5,00E-01	2,90E-01	7,90E-01

*Здесь и далее запись 7,46E+08 означает $7,46 \cdot 10^{+8}$.

Т а б л и ц а 5. Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в плите нижней БЗТ и БЗТ, образующиеся за 60 лет работы Белорусской АЭС

Table 5. Activities and specific activities, masses and volumes of activated materials in the plate of the lower PTU and PTU, formed over 60 years of operation of the Belarusian NPP

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк						Сумма по БЗТ
			Плита нижняя БЗТ	БЗТ без плит					
				$j = 9$	$j = 10$	$j = 11$	$j = 12$	$j = 13$	
¹⁴ C	5736,00		1,19E+06	6,76E+03	3,49E+02	4,13E+01	5,81E+00	7,51E-01	1,20E+06
⁵⁴ Mn	0,85		4,29E+13	5,82E+10	6,02E+09	8,52E+08	1,09E+08	1,81E+07	4,30E+13
⁵⁵ Fe	2,70		2,93E+14	1,67E+12	8,62E+10	1,02E+10	1,43E+09	1,85E+08	2,95E+14
⁶⁰ Co	5,27		4,47E+13	1,90E+11	9,91E+09	1,17E+09	1,63E+08	2,22E+07	4,49E+13
⁵⁹ Ni	7,50E+04		5,14E+11	2,99E+09	1,54E+08	1,82E+07	2,56E+06	3,30E+05	5,17E+11
⁶³ Ni	96,00		5,04E+13	2,97E+11	1,53E+10	1,81E+09	2,55E+08	3,27E+07	5,07E+13
⁹³ Zr	1,53E+06		1,95E+03	1,29E+01	6,62E-01	7,82E-02	1,11E-02	1,40E-03	1,96E+03
^{93m} Nb	13,60		4,89E+09	9,58E+06	5,64E+05	6,88E+04	8,84E+03	1,50E+03	4,90E+09
⁹⁴ Nb	2,03E+04		1,66E+06	2,25E+03	2,33E+02	3,29E+01	4,23E+00	6,98E-01	1,66E+06
⁹³ Mo	3,50E+03		5,06E+09	9,91E+06	5,83E+05	7,12E+04	9,14E+03	1,55E+03	5,07E+09
⁹⁹ Tc	2,13E+05		7,55E+08	1,16E+06	7,23E+04	8,94E+03	1,10E+03	2,04E+02	7,56E+08
		A _{сумма} , Бк	4,32E+14	2,22E+12	1,18E+11	1,41E+10	1,96E+09	2,59E+08	4,34E+14
		Масса, г	1,46E+07	1,51E+06	1,51E+06	1,51E+06	1,51E+06	1,51E+06	2,22E+07
		A _{сумма} , Бк/г	2,96E+07	1,47E+06	1,47E+06	1,47E+06	1,47E+06	1,47E+06	1,96E+07
		A _{ДСАО} , Бк		3,00E+11	1,55E+10	1,83E+09	2,58E+08	3,30E+07	
		A _{ДСАО} , Бк/г		1,99E+05	1,02E+04	1,21E+03	1,71E+02	2,19E+01	
		ρ, г/м ³	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06
		V, м ³	1,84E+00	1,90E-01	1,90E-01	1,90E-01	1,90E-01	1,90E-01	2,79E+00

Т а б л и ц а 6. Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в ПЭЛ (DyTiO) над активной зоной, образующиеся за срок службы 10 лет (одна загрузка) и за 60 лет работы Белорусской АЭС (шесть загрузок ПЭЛ)

Table 6. Activities and specific activities, masses and volumes of activated materials in absorber elements (DyTiO) above the core, formed over a service life of 10 years (one load) and over 60 years of operation of the Belarusian NPP (six loads of absorber elements)

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк					60 лет
			ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) над активной зоной, срок службы 10 лет				Сумма	
			$j = 1$	$j = 2$	$j = 9$	Сумма		
¹⁴ C	5736		2,82E+08	9,10E+06	5,44E+06	2,97E+08	1,78E+09	
⁵⁴ Mn	0,85		1,77E+10	1,89E+09	1,95E+09	2,15E+10	1,29E+11	
⁵⁵ Fe	2,70		1,69E+12	3,96E+10	1,21E+10	1,74E+12	1,04E+13	
⁶⁰ Co	5,27		1,15E+11	1,23E+10	1,27E+10	1,40E+11	8,40E+11	
⁵⁹ Ni	7,50E+04		3,07E+11	7,74E+09	2,25E+09	3,17E+11	1,90E+12	
⁶³ Ni	96		4,01E+13	9,19E+11	2,59E+11	4,13E+13	2,48E+14	
⁹³ Zr	1,53E+06		1,16E+03	2,60E+01	6,46E+00	1,19E+03	7,14E+03	
⁹⁴ Nb	2,03E+04		5,00E+04	5,33E+03	5,50E+03	6,08E+04	3,65E+05	
⁹³ Mo	3,50E+03		3,59E+08	1,72E+07	1,69E+07	3,93E+08	2,36E+09	
⁹⁹ Tc	2,13E+05		2,29E+07	1,93E+06	2,50E+06	2,73E+07	1,64E+08	
¹⁵⁷ Tb	150		1,36E+12	1,48E+11	2,01E+11	1,71E+12	1,03E+13	
¹⁵⁸ Tb	150		1,03E+12	1,15E+11	1,40E+11	1,29E+12	7,74E+12	
¹⁵⁹ Dy	0,396		2,54E+13	2,74E+12	3,29E+12	3,14E+13	1,88E+14	

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк				
			ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) над активной зоной, срок службы 10 лет				60 лет
			j = 1	j = 2	j = 9	Сумма	Сумма
		A _{сумма} , Бк	7,00E+13	3,98E+12	3,92E+12	7,79E+13	4,68E+14
		Масса, г	9,00E+04	3,28E+04	1,98E+05	3,21E+05	1,92E+06
		A _{сумма} , Бк/г	7,78E+08	1,22E+08	1,98E+07	2,43E+08	2,43E+08
		A _{ДСАО} , Бк					
		A _{ДСАО} , Бк/г					
		ρ, г/м ³	5,65E+06	5,65E+06	5,65E+06	5,65E+06	5,65E+06
		V, м ³	1,60E-02	5,80E-03	3,50E-02	5,68E-02	3,41E-01

Т а б л и ц а 7. Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в ПЭЛ (BC) над активной зоной, образующиеся за срок службы ПЭЛ 10 лет (одна загрузка ПЭЛ) и за 60 лет работы Белорусской АЭС (шесть загрузок ПЭЛ)

T a b l e 7. Activities and specific activities, masses and volumes of activated materials in absorber elements (BC) above the core, formed during the absorber elements service life of 10 years (one absorber elements load) and for 60 years of operation of the Belarusian NPP (six absorber elements loads)

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк						
			ПЭЛ (B ₄ C) над активной зоной за срок службы 10 лет (одна загрузка)						За 60 лет
			j = 10	j = 11	j = 12	j = 13	j = 14	Сумма (одна загрузка)	Сумма (шесть загрузок)
¹⁴ C	5736		1,91E+03	1,00E+02	1,19E+01	1,65E+00	2,25E-01	2,03E+03	1,22E+04
⁵⁴ Mn	0,85		1,81E+07	1,87E+06	2,65E+05	3,40E+04	5,62E+03	2,03E+07	1,22E+08
⁵⁵ Fe	2,70		1,38E+08	7,53E+06	9,08E+05	1,25E+05	1,74E+04	1,46E+08	8,76E+08
⁶⁰ Co	5,27		1,18E+08	1,22E+07	1,73E+06	2,22E+05	3,67E+04	1,32E+08	7,92E+08
⁵⁹ Ni	7,50E+04		2,59E+07	1,35E+06	1,59E+05	2,21E+04	3,00E+03	2,74E+07	1,64E+08
⁶³ Ni	96		2,99E+09	1,55E+08	1,83E+07	2,55E+06	3,42E+05	3,17E+09	1,90E+10
⁹³ Zr	1,53E+06		7,33E-02	3,77E-03	4,45E-04	6,30E-05	7,95E-06	7,76E-02	4,66E-01
⁹⁴ Nb	2,03E+04		5,11E+01	5,29E+00	7,48E-01	9,61E-02	1,59E-02	5,73E+01	3,44E+02
⁹³ Mo	3,50E+03		1,83E+05	1,11E+04	1,36E+03	1,72E+02	3,07E+01	1,96E+05	1,18E+06
⁹⁹ Tc	2,13E+05		2,56E+04	1,61E+03	1,99E+02	2,44E+01	4,55E+00	2,75E+04	1,65E+05
		A _{сумма} , Бк	3,29E+09	1,78E+08	2,14E+07	2,96E+06	4,05E+05	3,49E+09	2,10E+10
		Масса, г	8,10E+04	8,10E+04	8,10E+04	8,10E+04	8,10E+04	4,05E+05	2,43E+06
		A _{сумма} , Бк/г	4,06E+04	2,20E+03	2,64E+02	3,65E+01	5,00E+00	8,62E+03	8,63E+03
		A _{ДСАО} , Бк	3,02E+09	1,56E+08	1,85E+07	2,57E+06	3,45E+05	3,20E+09	1,92E+10
		A _{ДСАО} , Бк/г	3,72E+04	1,93E+03	2,28E+02	3,18E+01	4,26E+00	7,90E+03	7,90E+03
		ρ, г/м ³	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06
		V, м ³	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	1,25E-01	7,50E-01

Т а б л и ц а 8. Активность и удельная активность, массы и объемы активированных материалов в ПЭЛ (DyTiO) за срок службы ПЭЛ 3 года (одна загрузка ПЭЛ) и за 60 лет работы Белорусской АЭС (20 загрузок ПЭЛ)

T a b l e 8. Activity and specific activity, masses and volumes of activated materials in PEL (DyTiO) for PEL service life of 3 years (one PEL load) and for 60 years of operation of the Belarusian NPP (20 PEL loads)

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк		Сумма (одна загрузка)	Сумма за 60 лет (20 загрузок)
			Поглотитель (Dy ₂ TiO ₅)	Оболочка 42XHM		
			j = 29	j = 30		
¹⁴ C	5736		1,01E+08	5,93E+03	1,01E+08	2,02E+09
⁵⁴ Mn	0,85		0,00E+00	1,29E+11	1,29E+11	2,58E+12
⁵⁵ Fe	2,70		0,00E+00	3,98E+11	3,98E+11	7,96E+12
⁶⁰ Co	5,27		0,00E+00	4,14E+11	4,14E+11	8,28E+12

Нуклиды	Период полураспада, лет	Расчетные параметры	Активность, Бк		Сумма (одна загрузка)	Сумма за 60 лет (20 загрузок)
			Поглотитель (Dy ₂ TiO ₅)	Оболочка 42ХНМ		
			<i>j</i> = 29	<i>j</i> = 30		
⁵⁹ Ni	7,50E+04		0,00E+00	3,32E+10	3,32E+10	6,64E+11
⁶³ Ni	96		0,00E+00	4,38E+12	4,38E+12	8,76E+13
⁹³ Zr	1,53E+06		0,00E+00	1,05E+02	1,05E+02	2,10E+03
⁹⁴ Nb	2,03E+04		0,00E+00	1,21E+05	1,21E+05	2,42E+06
⁹³ Mo	3,50E+03		0,00E+00	3,53E+08	3,53E+08	7,06E+09
⁹⁹ Tc	2,13E+05		0,00E+00	5,91E+07	5,91E+07	1,18E+09
¹⁵⁷ Tb	150		8,35E+11	0,00E+00	8,35E+11	1,67E+13
¹⁵⁸ Tb	150		5,74E+11	0,00E+00	5,74E+11	1,15E+13
¹⁵⁹ Dy	0,396		2,94E+13	0,00E+00	2,94E+13	5,88E+14
		A _{сумма} , Бк	3,08E+13	5,35E+12	3,62E+13	7,24E+14
		Масса, г	7,90E+03	4,20E+03	1,21E+04	2,42E+05
		A _{сумма} , Бк/г	3,90E+09	1,27E+09	2,99E+09	2,99E+09
		A _{ДСАО} , Бк				
		A _{ДСАО} , Бк/г				
		ρ, г/м ³	4,90E+06	7,90E+06	5,76E+06	5,76E+06
		V, м ³	1,60E-03	5,00E-04	2,10E-03	4,20E-02

Заключение. В результате выполненных расчетных исследований установлено, что через 60 лет эксплуатации реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС при активации нейтронами близлежащих к активной зоне реакторных и защитных конструкций будут образованы ВАО и ДСАО в следующих количествах:

- в стальных конструкциях выгородки, шахты и наплавки – массой 85,5 т, объемом 10,8 м³ (ВАО);
- в части корпуса реактора – массой 144 т и объемом 18,2 м³ (ДСАО);
- в теплоизоляции – массой 11 т и объемом 10,1 м³ (ДСАО);
- в стальных конструкциях БЗТ – общей массой 22,2 т и объемом 2,79 м³ (ВАО);
- в металлоконструкциях пространства под активной зоной – общей массой 7,6 т и объемом 0,96 м³ (ДСАО);
- в материалах ПЭЛ (Dy₂TiO₅) со сроком службы 10 лет – общей массой 1,96 т и объемом 0,34 м³ (ВАО);
- в материалах ПЭЛ (Dy₂TiO₅) со сроком службы 3 года – общей массой 0,242 т и объемом 4,2 · 10⁻² м³ (ВАО).

Всего за счет активации материалов конструкций реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС образуются ВАО и ДСАО общим весом 272,5 т и объемом 43 м³.

Список использованных источников

1. К определению категории РАО для бетонов радиационной защиты ядерных установок при их выводе из эксплуатации / Б. К. Былкин [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 5. – С. 298–301.
2. Наведенная активность радиационной защиты в проблеме вывода из эксплуатации ядерных установок / Б. К. Былкин [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – №3 (85). – С. 1–14.
3. Радиационные характеристики реакторных конструкций после окончательного останова АЭС с ВВЭР / Б. К. Былкин [и др.] // Атомная энергия. – 2009. – Т. 106, вып. 1. – С. 56–60.
4. 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 Междунар. конф. «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии 21-го века». – Минск, 2020. – С. 11–21.
5. 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.

References

1. Bylkin B. K., Engovatov I. A., Kozhevnikov A. N., Sinyushin D. K. On the definition of the category of radioactive waste for concrete for radiation protection of nuclear facilities during their decommissioning. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 2016, vol. 121, issue 5, pp. 298–301 (in Russian).
2. 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).
3. Bylkin B. K., Yegorov A. L., Zhurbenko Ye. A., Tsofin V. I. Radiation characteristics of reactor structures after final shutdown of NPP with WWER. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 2009, vol. 106, issue 1, pp. 56–60 (in Russian).
4. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryanyy G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Gribova 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 WWER-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).
5. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryanyy 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. *Nonlinear Dynamics and Applications*, 2020, vol. 66, pp. 66–75.

Информация об авторах

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

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, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: jema@sosny.bas-net.by

Georgiy M. Zhmura – Senior Researcher at 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: georgiyzhmura@mail.ru

Isaak E. Rubin – Senior Researcher at 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: silver@sosny.bas-net.by

Nina M. Dneprovskaya – Researcher at 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: dneprnina@mail.ru

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

Natalia A. Teterova – Researcher at 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, 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, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: babichev@sosny.bas-net.by