

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ И ДОЛГОЖИВУЩИХ СРЕДНЕАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, АКТИВАЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЗА СРОК СЛУЖБЫ РЕАКТОРА ВВЭР 1200 БЕЛОРУССКОЙ АЭС

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

Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси  
*e-mail*: jema@sosny.bas-net.by

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 радиоактивных отходов (РАО), требуемые при выводе из эксплуатации блока атомной станции.

Проработка вопроса о сооружении пункта захоронения высокоактивных РАО (ВАО), образуемых в результате эксплуатации Белорусской АЭС, в глубокой геологической формации является основной задачей «Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 02.06.2015 № 460. При этом необходимо учитывать, что долгоживущие среднеактивные отходы (ДСАО) также включены во 2-й класс РАО и для них требуется создание пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) глубокого заложения.

Категоризация среднеактивных, высокоактивных твердых РАО по удельной активности радионуклидов производится в соответствии таблицей 1 Приложения 2 СПОРО-2015 [1]. 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» [2].

Радиационная опасность при выводе из эксплуатации ядерных установок, в которых генерируются, интенсивные потоки нейтронного излучения за счет 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 определяют объемы РАО на стадии вывода из эксплуатации.

В связи с этим как научный, так и практический интерес представляет изучение пространственного распределения продуктов активации материалов, оборудования и конструкций (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 ( $Dy_2TiO_5$ )) при облучении их нейтронами, генерируемыми в активной зоне реактора.

Оценка объемов ВАО и ДСАО активационного происхождения 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 (трехмерный Монте-Карло код расчета реакторов, VTT Technical Research Centre of Finland, лицензия № L1K002/JIPNRMINSK) и

ТВС-М (аттестационный паспорт №135 от 21.02.2002), DYN3D (лицензионное соглашение № 0012011 между Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf и научным учреждением «ОИЭЯИ – Сосны») и MCU-PD.

Ввиду сложной геометрии реакторного блока Белорусской АЭС, на первом этапе расчеты наведенной активности проводились с использованием упрощенной 3D геометрии реактора.

Данные по составам материалов в основном взяты из проектных документов блока №1 Белорусской АЭС, а также из ссылочных и поддерживающих документов. Перечень наиболее облучаемых областей конструкционных материалов, участвующих в расчётах, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики конструкционных материалов ВВЭР-1200, принятые на данном этапе с учётом разбиения на участки

Элемент конструкции	Номер участка	Материал	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Активируемая масса, т	Объём, м <sup>3</sup>
Выгородка	3	08X18H10T-У	7,9	41,5	5,26
Шахта	15	08X18H10T-У	7,9	37,8	4,79
Плита нижняя БЗТ без ПЭЛ	9	08X18H10T-У	7,9	14,6	1,84
ПЭЛ в плите нижней 34,7 см		42ХНМ + Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	5,65	0,23	0,04
БЗТ без плит и ПЭЛ (на слой 20 см)	10-14	08X18H10T-У	7,9	1,51	0,19
ПЭЛ (В <sub>4</sub> С, на слой 20 см высоты)		42ХНМ + В <sub>4</sub> С	3,25	0,081	0,025
ПЭЛ (Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> ) 13,7 см	1	42ХНМ + Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	5,65	0,09	0,016
ПЭЛ (Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> ) 5 см	2	Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>		0,034	0,006
Поглотитель ПЭЛ Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	29	Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	4,9	0,0079	0,0016
Оболочка ПЭЛ	30	42ХНМ	7,9	0,0042	0,0005
Простр. под активн. зоной (20 см)	4-8	08X18H10T-У	7,9	1,52	0,19
Внутрикорпусная наплавка	16	08X18H10T + Nb	7,9	6,24	0,79
Корпус (без наплавки)	17	15ХНМФА	7,9	143,7	18,19
Теплоизоляция	Основ	09Г2С+08Х18Н10Т	1,089	9,60	8,82
	Верх.			1,44	1,32
Сухая защита	Слева осн.	08X18H10T-У + серпентинитовый бетон	2,45	43,4	17,7
	Слева верх.			6,5	2,66
	Справа			74,2	30,3
Опорная ферма	Внизу	Серпентинитовый бетон + 08X18H10T-У	2,78	28,8	10,4
	Сверху спр.			28,8	10,4
	Сверху слева			20,6	7,4
Биологическая защита	28	Серпентинитовый бетон + бор	2,78	19,6	7,05
Строительный бетон	Слева	Бетон	2,2	41,4	18,8
	Справа			43,8	19,9

Схемы расположения активируемых конструкций и материалов в районе активной зоны реактора ВВЭР-1200 в радиальном направлении представлена на рисунке 1, в аксиальном на рисунке 2.

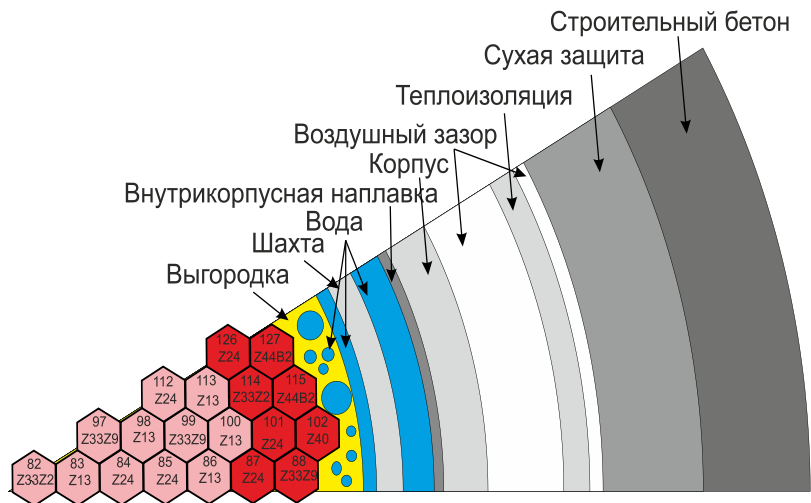


Рисунок 1 – Схема расположения активируемых конструкций и материалов в районе активной зоны реактора ВВЭР-1200 в радиальном направлении

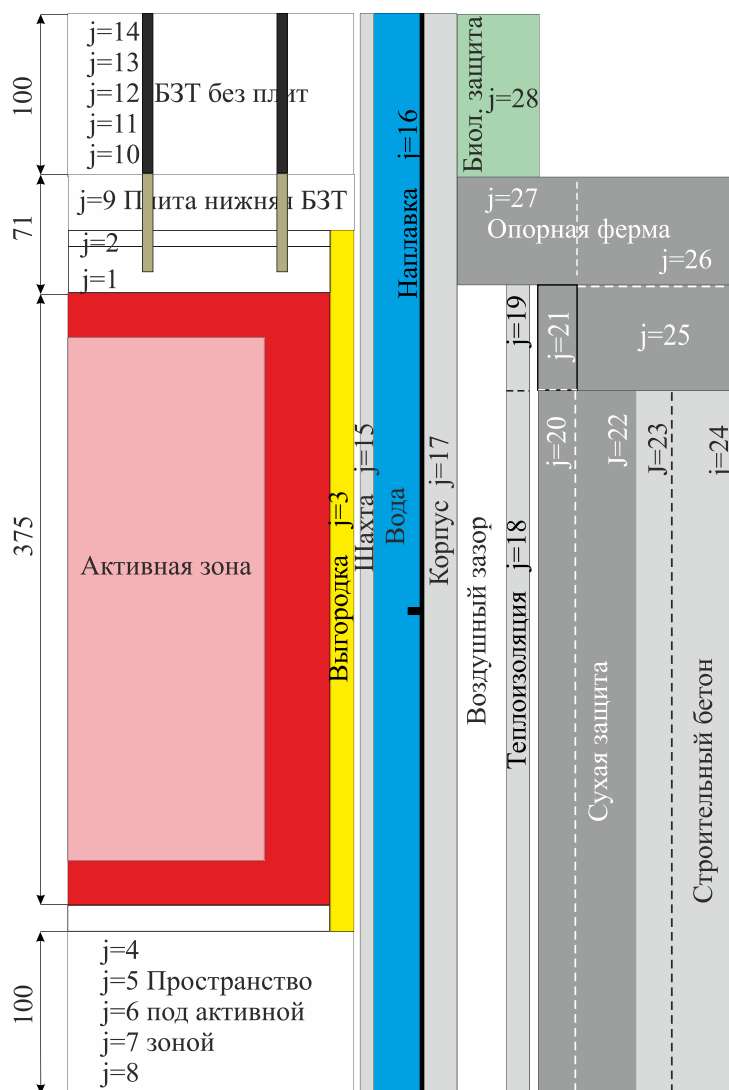


Рисунок 2 – Расположение активируемых конструкций и материалов для реактора ВВЭР-1200 в аксиальном направлении

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

Оценки удельных активностей, объемов и масс ВАО и ДСАО в материалах конструкций реактора ВВЭР 1200 Белорусской АЭС и представлены в таблицах 2–7. В таблицах представлены общие удельные активности, общие и удельные активности без учета трития, общие и удельные активности ДСАО, массы и объемы активированных материалов. Вклады каждого радионуклида представлены по участкам.

Таблице 2 – Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в выгородке, шахте, наплавке, корпусе и теплоизоляции на момент останова реактора (Т=60 лет)

Нуклиды	Материалы и участки						
	Выгородка	Шахта	Наплавка	Корпус	Теплоизоляция		
	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	17	18	19	Сумма
$^{14}\text{C}$	7,43E+08	7,68E+07	1,98E+09	9,84E+05	1,99E+08	3,24E+07	2,32E+08
$^{54}\text{Mn}$	1,99E+16	1,87E+15	1,87E+12	2,36E+13	3,31E+11	4,73E+10	3,79E+11
$^{55}\text{Fe}$	1,81E+17	1,86E+16	6,65E+13	1,72E+14	6,84E+12	1,13E+12	7,96E+12
$^{60}\text{Co}$	2,82E+16	3,30E+15	1,44E+13	2,09E+13	7,61E+11	1,23E+11	8,83E+11
$^{59}\text{Ni}$	1,94E+14	3,07E+13	1,36E+11	2,57E+10	2,07E+09	3,43E+08	2,42E+09
$^{63}\text{Ni}$	3,13E+16	3,14E+15	1,35E+13	2,67E+12	2,00E+11	3,31E+10	2,33E+11
$^{93\text{m}}\text{Nb}$	0,00E+00	0,00E+00	5,01E+12	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
$^{94}\text{Nb}$	7,82E+08	7,36E+07	2,00E+10	1,34E+06	2,00E+03	2,85E+02	2,29E+03
$A_{\Sigma}$ , Бк	2,60E+17	2,69E+16	1,01E+14	2,20E+14	8,13E+12	1,33E+12	9,46E+12
Масса, г	<b>4,15E+07</b>	<b>3,78E+07</b>	<b>6,24E+06</b>	<b>1,44E+08</b>	<b>9,60E+06</b>	<b>1,44E+06</b>	<b>1,04E+07</b>
$A_{\Sigma}$ , Бк/г	<b>6,27E+09</b>	<b>7,12E+08</b>	<b>1,62E+07</b>	1,53E+06	8,47E+05	9,24E+05	9,10E+05
АДСАО, Бк				2,70E+12	2,02E+11	3,35E+10	2,36E+11
АДСАО', Бк/г				<b>1,88E+04</b>	<b>2,11E+04</b>	<b>2,32E+04</b>	<b>2,27E+04</b>
$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	1,09E+06	1,09E+06	1,09E+06
$V$ , м <sup>3</sup>	<b>5,25E+00</b>	<b>4,78E+00</b>	<b>7,90E-01</b>	<b>1,82E+01</b>	<b>8,82E+00</b>	<b>1,32E+00</b>	<b>9,55E+00</b>

Примечание: В таблицах 2–7 жирным шрифтом выделены материалы и участки, удельные активности, объемы и массы, относящиеся к ВАО и ДСАО

Как видно из таблицы 2 стальные конструкции выгородки, шахты и наплавки (участки 3, 15, 16) объемом 10 м<sup>3</sup> и массой 85,5 т являются ВАО. Рассматриваемая часть корпуса реактора (144 т, объемом 18,2 м<sup>3</sup>) и теплоизоляция (10,4 т, объемом 9,55 м<sup>3</sup>) будут относиться к ДСАО.

Таблице 3 – Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в плите нижней БЗТ и БЗТ на момент останова реактора (Т=60 лет)

Нуклиды	Материалы и участки							Сумма по БЗТ
	Плита ниж. БЗТ	БЗТ без плит						
	9	10	11	12	13	14		
<sup>14</sup> C	5,48E+05	2,83E+03	1,50E+02	2,15E+01	4,65E+00	1,37E+00	5,51E+05	
<sup>54</sup> Mn	1,81E+13	2,43E+10	2,53E+09	3,65E+08	9,53E+07	1,65E+07	1,81E+13	
<sup>55</sup> Fe	1,35E+14	6,96E+11	3,69E+10	5,30E+09	1,14E+09	3,39E+08	1,36E+14	
<sup>60</sup> Co	2,04E+13	7,94E+10	4,24E+09	5,89E+08	1,30E+08	3,69E+07	2,05E+13	
<sup>59</sup> Ni	2,38E+11	1,25E+09	6,61E+07	9,50E+06	2,05E+06	6,07E+05	2,39E+11	
<sup>63</sup> Ni	2,33E+13	1,24E+11	6,56E+09	9,45E+08	2,04E+08	6,04E+07	2,34E+13	
<sup>94</sup> Nb	7,03E+05	9,42E+02	9,82E+01	1,42E+01	3,69E+00	6,39E-01	7,04E+05	
A <sub>Σ</sub> , Бк	1,97E+14	9,25E+11	5,03E+10	7,21E+09	1,57E+09	4,53E+08	1,98E+14	
Масса, г	<b>1,46E+07</b>	<b>1,51E+06</b>	1,51E+06	1,51E+06	1,51E+06	1,51E+06	<b>2,22E+07</b>	
A <sub>Σ</sub> , Бк/г	<b>1,35E+07</b>	6,13E+05	3,33E+04	4,77E+03	1,04E+03	3,00E+02	8,92E+06	
A <sub>ДСАО</sub> , Бк	2,35E+13	1,25E+11	6,63E+09	9,55E+08	2,06E+08	6,10E+07	2,36E+13	
A <sub>ДСАО'</sub> Бк/г	<i>1,61E+06</i>	<b>8,29E+04</b>	4,39E+03	6,32E+02	1,36E+02	4,04E+01	<b>1,06E+06</b>	
ρ, г/м <sup>3</sup>	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	
V, м <sup>3</sup>	<b>1,85E+00</b>	<b>1,91E-01</b>	1,91E-01	1,91E-01	1,91E-01	1,91E-01	<b>2,81E+00</b>	

Как видно из таблицы 3 стальные конструкции участка 9 БЗТ относятся к ВАО, участка 10 к ДСАО и в целом металлоконструкции участков 9–14 БЗТ будут относиться к ДСАО. Общая масса металлоконструкций участков 9–14 БЗТ составит 22,2 т с объемом 2,81 м<sup>3</sup>.

Таблице 4 – Активности и удельные активности, массы и объемы активированных материалов в пространстве под активной зоной на момент останова реактора (Т=60 лет)

Нуклиды	Материалы и участки						Сумма
	Пространство под активной зоной						
	4	5	6	7	8		
<sup>14</sup> C	1,22E+07	7,59E+05	6,69E+04	7,80E+03	9,90E+02	1,31E+07	
<sup>54</sup> Mn	4,87E+13	4,12E+12	4,68E+11	6,09E+10	8,28E+09	5,33E+13	
<sup>55</sup> Fe	3,02E+15	1,87E+14	1,65E+13	1,92E+12	2,45E+11	3,22E+15	
<sup>60</sup> Co	3,13E+14	1,93E+13	1,71E+12	1,99E+11	2,53E+10	3,35E+14	
<sup>59</sup> Ni	4,52E+12	3,32E+11	2,96E+10	3,45E+09	4,38E+08	4,89E+12	

$^{63}\text{Ni}$	5,41E+14	3,36E+13	2,96E+12	3,44E+11	4,37E+10	5,78E+14
$^{94}\text{Nb}$	1,88E+06	1,59E+05	1,81E+04	2,35E+03	3,20E+02	2,06E+06
$A_{\Sigma}$ , Бк	3,92E+15	2,44E+14	2,17E+13	2,53E+12	3,22E+11	4,19E+15
Масса, г	<b>1,52E+06</b>	<b>1,52E+06</b>	<b>1,52E+06</b>	<b>1,52E+06</b>	<b>1,52E+06</b>	<b>7,60E+06</b>
$A_{\Sigma}$ , Бк/г	<b>2,58E+09</b>	<b>1,61E+08</b>	<b>1,43E+07</b>	1,66E+06	2,12E+05	<b>5,51E+08</b>
$A_{\text{ДСАО}}$ , Бк				3,47E+11	4,41E+10	
$A_{\text{ДСАО}}$ Бк/г				<b>2,29E+05</b>	<b>2,90E+04</b>	
$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06	7,90E+06
$V$ , м <sup>3</sup>	<b>1,92E-01</b>	<b>1,92E-01</b>	<b>1,92E-01</b>	<b>1,92E-01</b>	<b>1,92E-01</b>	<b>9,62E-01</b>

Металлоконструкции пространства под активной зоной (участки 4–6) относятся к ВАО, (участки 7–8) относятся к Д САО. В целом металлоконструкции пространства под активной зоной (участки 4–8) будут относиться к ДСАО. Общая масса металлоконструкций участков 4–8 пространства под активной зоной составит 7,6 т с объемом 0,96 м<sup>3</sup>.

Расчеты показали, что материалы сухой защиты (участки 20–22), строительного бетона (участки 23–24), опорной фермы (участки 25–27) и биологической защиты (участок 28) по удельной активности радионуклидов ни к ВАО ни к ДСАО относиться не будут.

Таблица 5 – Активность и удельная активность, массы и объемы активированных материалов в ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) (участки 1, 2, 9) над активной зоной (срок службы 10 лет) на момент останова реактора ( $T=60$  лет)

Нуклиды	Материалы и участки				
	ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) над активной зоной, срок службы 10 лет				
	1	2	9	Сумма за 10 лет	За 60 лет
$^{14}\text{C}$	1,07E+09	3,72E+06	2,39E+06	1,08E+09	6,48E+09
$^{54}\text{Mn}$	7,04E+10	7,35E+08	8,22E+08	7,19E+10	4,31E+11
$^{55}\text{Fe}$	6,36E+12	1,65E+10	5,54E+09	6,38E+12	3,83E+13
$^{60}\text{Co}$	4,59E+11	4,79E+09	5,36E+09	4,69E+11	2,81E+12
$^{59}\text{Ni}$	1,23E+12	3,24E+09	1,03E+09	1,23E+12	7,38E+12
$^{63}\text{Ni}$	1,51E+14	3,84E+11	1,20E+11	1,51E+14	9,06E+14
$^{94}\text{Nb}$	1,99E+05	2,08E+03	2,32E+03	2,03E+05	1,22E+06
$A_{\Sigma}$ , Бк	1,59E+14	4,09E+11	1,32E+11	1,60E+14	9,60E+14
Масса, г	<b>9,00E+04</b>	<b>3,40E+04</b>	<b>2,30E+05</b>	<b>3,54E+05</b>	<b>2,12E+06</b>
$A$ , Бк/г	<b>1,77E+09</b>	<b>1,20E+07</b>	5,74E+05	<b>4,52E+08</b>	<b>4,52E+08</b>
$A_{\text{ДСАО}}$ , Бк			1,21E+11		
$A_{\text{ДСАО}}$ Бк/г			<b>5,26E+05</b>		
$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	5,65E+06	5,65E+06	5,65E+06	5,65E+06	5,65E+06
$V$ , м <sup>3</sup>	<b>1,59E-02</b>	<b>6,02E-03</b>	<b>4,07E-02</b>	<b>6,27E-02</b>	<b>3,76E-01</b>

Таблица 6 – Активность и удельная активность, массы и объемы активированных материалов в ПЭЛ (Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>) (участки 10–14) над активной зоной (срок службы 10 лет) на момент останова реактора (T=60 лет)

Нуклиды	Материалы и участки					
	ПЭЛ (B <sub>4</sub> C) над активной зоной, срок службы 10 лет					
	10	11	12	13	14	Сумма
<sup>14</sup> C	7,99E+02	4,28E+01	5,98E+00	1,32E+00	3,72E-01	8,49E+02
<sup>54</sup> Mn	7,55E+06	7,88E+05	1,14E+05	2,96E+04	5,13E+03	8,49E+06
<sup>55</sup> Fe	5,74E+07	3,21E+06	4,50E+05	1,01E+05	2,74E+04	6,12E+07
<sup>60</sup> Co	4,92E+07	5,14E+06	7,41E+05	1,93E+05	3,35E+04	5,53E+07
<sup>59</sup> Ni	1,08E+07	5,76E+05	8,05E+04	1,77E+04	5,05E+03	1,15E+07
<sup>63</sup> Ni	1,25E+09	6,63E+07	9,31E+06	2,04E+06	5,87E+05	1,33E+09
<sup>94</sup> Nb	2,13E+01	2,23E+00	3,21E-01	8,37E-02	1,45E-02	2,40E+01
A <sub>Σ</sub> , Бк	1,37E+09	7,60E+07	1,07E+07	2,38E+06	6,58E+05	1,46E+09
Масса, г	<b>8,10E+04</b>	8,10E+04	8,10E+04	8,10E+04	8,10E+04	4,05E+05
A <sub>Σ</sub> , Бк/г	1,69E+04	9,38E+02	1,32E+02	2,94E+01	8,12E+00	3,60E+03
A <sub>ДСАО</sub> , Бк	1,26E+09	6,69E+07	9,39E+06	2,06E+06	5,92E+05	1,34E+09
A <sub>ДСАО</sub> Бк/г	<b>1,56E+04</b>	8,26E+02	1,16E+02	2,54E+01	7,31E+00	3,31E+03
ρ, г/м <sup>3</sup>	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06	3,25E+06
V, м <sup>3</sup>	<b>2,49E-02</b>	2,49E-02	2,49E-02	2,49E-02	2,49E-02	1,25E-01

Таблица 7 – Активность и удельная активность, массы и объемы активированных материалов в ПЭЛ (Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>) (участки 29–30) со сроком службы 3 года на момент останова реактора (T=60 лет)

Нуклиды	Материалы и участки			
	Поглотитель (Dy <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> )	Оболочка 42ХНМ	Сумма (одна загрузка)	Сумма за 60 лет (20 загрузок)
	29	30		
<sup>14</sup> C	2,18E+11	2,40E+07	2,18E+11	4,36E+12
<sup>54</sup> Mn	0,00E+00	1,05E+12	1,05E+12	2,10E+13
<sup>55</sup> Fe	0,00E+00	9,89E+14	9,89E+14	1,98E+16
<sup>60</sup> Co	0,00E+00	7,25E+12	7,25E+12	1,45E+14
<sup>59</sup> Ni	0,00E+00	1,26E+11	1,26E+11	2,52E+12
<sup>63</sup> Ni	0,00E+00	1,87E+16	1,87E+16	3,74E+17

$^{94}\text{Nb}$	0,00E+00	3,86E+07	3,86E+07	7,72E+08
$A_{\Sigma}$ , Бк	2,18E+11	1,97E+16	1,97E+16	3,94E+17
Масса, г	<b>7,90E+03</b>	<b>4,20E+03</b>	<b>1,21E+04</b>	<b>2,42E+05</b>
$A_{\Sigma}$ , Бк/г	<b>2,76E+07</b>	<b>4,69E+12</b>	<b>1,63E+12</b>	<b>1,63E+12</b>
$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	4,90E+06	7,90E+06	5,64E+06	5,64E+06
V, м <sup>3</sup>	<b>1,61E-03</b>	<b>5,32E-04</b>	<b>2,14E-03</b>	<b>4,29E-02</b>

Из таблицы 5 следует, что материалы ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) со сроком службы 10 лет (участки 1, 2) над активной зоной на момент останова реактора ( $T=60$  лет) будут относиться к ВАО, участок 9 к долгоживущим САО и в среднем по участкам 1, 2 и 9 материалы ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) одной загрузки (10 лет) и всех загрузок за 60 лет будут относиться к ВАО. Общая масса этих материалов на момент останова реактора составит 2,12 т с объемом 0,38 м<sup>3</sup>.

Отметим, что в таблице 5 приведены активности и удельные активности без учета распада радионуклидов в отработавших ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) на момент останова реактора. Оценки учета распада радионуклидов в ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) на момент останова реактора дают незначительное снижение активности и удельной активности (около 4 %) от приведенной в таблицах 5.

Из таблицы 6 следует, что в целом материалы ПЭЛ ( $\text{B}_4\text{C}$ ) со сроком службы 10 лет (участки 10–14) над активной зоной на момент останова реактора ( $T=60$  лет) не будут относиться ни к ВАО, ни ДСАО. Только участок 10 ПЭЛ ( $\text{B}_4\text{C}$ ) со сроком службы 10 лет относится к ДСАО.

Материалы ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) со сроком службы 3 года (участки 29–30), представленные в таблице 7, будут относиться к ВАО. Общая масса этих материалов на момент останова реактора составит 0,242 т с объемом  $4,29 \times 10^{-2}$  м<sup>3</sup>.

### Заключение

В результате исследований установлено, что при активации нейтронами образуются ВАО и ДСАО в материалах участков конструкций реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС близлежащих к активной зоне: в стальных конструкциях выгородки, шахты и наплавки объемом 10 м<sup>3</sup> и массой 85,5 т (ВАО), в части корпуса реактора массой 144 т и объемом 18,2 м<sup>3</sup> (ДСАО), в теплоизоляции массой 10,4 т и объемом 9,55 м<sup>3</sup> (ДСАО), в стальных конструкциях БЗТ общей массой 22,2 т и объемом 2,81 м<sup>3</sup> (ДСАО), в металлоконструкциях пространства под активной зоной общей массой 7,6 т и объемом 0,96 м<sup>3</sup> (ДСАО), в материалах ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) со сроком службы 10 лет общей массой 2,12 т и объемом 0,38 м<sup>3</sup> (ВАО), в материалах ПЭЛ ( $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ ) со сроком службы 3 года общей массой 0,242 т с объемом  $4,29 \times 10^{-2}$  м<sup>3</sup> (ВАО). Итого за счет активации материалов конструкций реактора ВВЭР 1200 Белорусской АЭС образуются ВАО и ДСАО общим весом 272 т и объемом 48 м<sup>3</sup>.

### Список использованных источников

1 Санитарные нормы и правила «Требования радиационной безопасности при обращении с радиоактивными отходами», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.12.2015 № 142.

2 Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения», утвержденные постановлением МЧС РБ 28.09.2010 №47 (в ред. постановления МЧС РБ 24.07.2017 №33).