

Сравнительный анализ изотопного состава отработавшего топлива компаний «Вестингауз» и «ТВЭЛ»

Рассмотрено влияние на изотопный состав отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000 различных эксплуатационных условий (наличия или отсутствия в направляющих каналах ТВС поглощающих стержней, изменений в течение кампании концентрации растворенной в замедлителе — воде — борной кислоты, температуры топлива и/или замедлителя), а также влияние технологических допусков при изготовлении кассет на массу и обогащение топлива. Расчеты проведены с использованием модели реакторной ячейки топливных кассет ВВЭР-1000, состоящих из новых ТВС производства компании «Вестингауз» и штатных ТВС российской компании «ТВЭЛ».

Ключевые слова: ядерная безопасность, коэффициент размножения нейтронов, обогащение топлива, изотопный состав, условия эксплуатации.

Ю. П. Ковбасенко

Порівняльний аналіз ізотопного складу відпрацьованого палива компаній «Вестінгауз» і «ТВЕЛ»

Розглянуто вплив на ізотопний склад відпрацьованого палива реакторів ВВЕР-1000 різних умов експлуатації (присутність або відсутність у направляючих каналах ТВЗ поглинаючих стрижнів, зміна впродовж кампанії концентрації в уповільнювачі — воді — розчиненої борної кислоти, температури палива та/або уповільнювача), а також вплив технологічних допусків у процесі виготовлення ТВЗ на масу й збагачення палива. Розрахунки проведено з використанням моделі реакторної чарунки паливних збірок ВВЕР-1000, що складаються з нових ТВЗ виробництва компанії «Вестінгауз» та штатних ТВЗ російської компанії «ТВЕЛ».

Ключові слова: ядерна безпека, коефіцієнт розмноження нейтронів, збагачення палива, ізотопний склад, умови експлуатації.

© Ю. П. Ковбасенко, 2016

Важные для безопасности характеристики отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) обуславливаются в первую очередь изотопным составом, сформировавшимся в процессе выгорания этого топлива. Определение изотопного состава ОЯТ необходимо для учета и контроля количества ядерно-опасных материалов; определения источников для анализа за тепловой и радиационной безопасности; использования выгорания в качестве параметра ядерной безопасности при обосновании ядерной безопасности систем обращения с ОЯТ (“burnup credit” principle).

Изотопный состав ОЯТ зависит не только от глубины его выгорания, но и тех условий (точнее — спектра нейтронов), в котором происходило выгорание [1]. В случае более жесткого спектра нейтронов при одной и той же глубине выгорания в процессе выгорания участвует больше ядер U-238 (главным образом, за счет образования ядер Pu-239) и меньше — ядер U-235. Цель статьи — рассмотреть влияние изменений условий эксплуатации на ужесточение спектра нейтронов в активной зоне реактора. (Публикация подготовлена по материалам доклада, представленного на конференции МАГАТЭ “Management of Spent Fuel from Nuclear Reactors: An Integrated Approach to the Back End of the Fuel Cycle”, 15—19 июня 2015 г.)

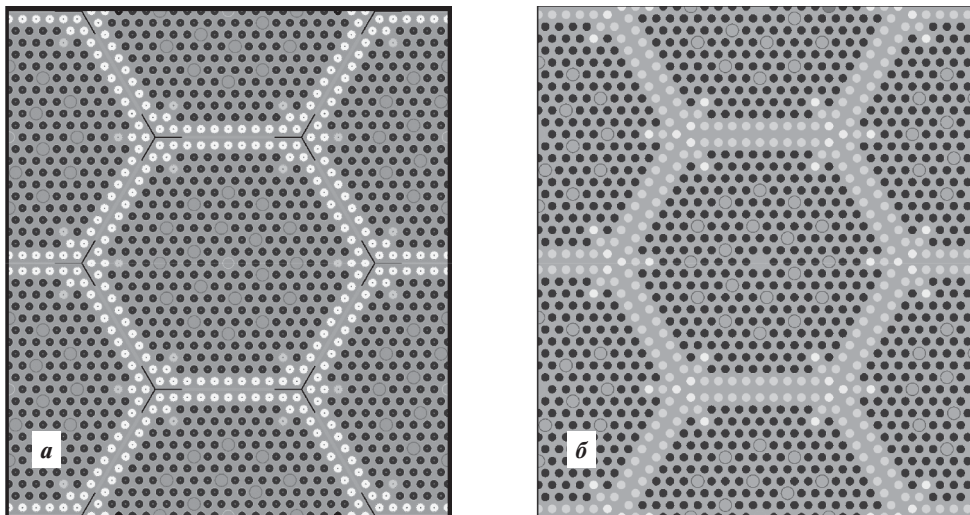
Расчетные коды и исходные данные. Рассмотрим влияние на изотопный состав отработанной ТВС реактора ВВЭР-1000 различных условий ее эксплуатации (в частности наличия или отсутствия в направляющих каналах ТВС поглощающих стержней — кластеров СУЗ; колебаний в течение кампании концентрации борной кислоты, растворенной в водяном замедлителе — теплоносителе; изменений в течение кампании и в зависимости от положения в активной зоне плотности воды, температуры топлива и/или замедлителя), а также влияние на изотопный состав отработанной ТВС технологических допусков по массе топлива и его обогащению, действующих при ее изготовлении (табл. 1).

Таблица 1. Диапазон изменений эксплуатационных параметров, который учитывался при проведении расчетов изотопного состава

Характеристика	Значения параметра		
	среднее (av)	максимальное (max)	минимальное (min)
Обогащение, % масс.	См. табл. 2	+0,5	-0,5
Масса топлива, кг/ТВС	См. табл. 2	+4,5; +5,0*	-4,5; -5,0*
Наличие в направляющих каналах стержней СУЗ	-	+	-
Концентрация борной кислоты, г/кг	3	6	0
Плотность воды, г/см ³	0,72	0,70	0,74
Температура воды, К	578	600	500
Температура топлива, К	1005	1100	900

*Первое значение относится к ТВСА, второе — к FA-WR.

Рис. 1. Схема решетки реакторной ячейки ТВС:
a — штатная ТВСА; *б* — FA-WR



Анализ проводился для реакторной ячейки ТВС реакторов ВВЭР-1000, работающих в 4-летнем топливном цикле при глубине выгорания в пределах 50 МВт-сут/кг U. Эта ячейка укомплектовывалась типичными штатными ТВСА производства российской компании «ТВЭЛ» (рис. 1, *a*) и новыми топливными кассетами FA-WR

производства компании «Вестингауз» (рис. 1, *б*). Основные различия в геометрических и материальных параметрах ТВСА и FA-WR, которые учитывались в расчетах, приведены в табл. 2.

Все представленные расчетные результаты получены с помощью американского пакета программ SCALE [1].

Таблица 2. Основные различия в геометрических параметрах и материалах ТВСА и FA-WR

Параметр	ТВСА (ТВЭЛ)	FA-WR (Вестингауз)
Длина столба топлива	3530 мм	3530 мм
Длина центральной зоны топлива (ном.)	3530 мм	3225,2 мм
Высота зоны бланкета (ном.)	—	2 зоны × 152,4 мм
Масса топлива (UO ₂), кг	494,5±4,5	550,6 ±5,0
<i>Топливные стержни (312 штук)</i>		
Обогащение, % масс. (в скобках — количество стержней)	4,4 % (306); 3,6 % (6 ВП*)	4,2 % (240); 3,9 % (60); 3,6 % (6); 3,0 % (6 ВП*) 0,714 % (312 бланкет)
ВД/НД** таблетки, мм	1,4/7,57	— / 7,84
ВД/НД оболочки, мм	7,73/9,1	8,0/9,14
Материал оболочки / плотность, г/см ³	Сплав Э110 / 6,45	Сплав ZIRLOTM / 6,55
<i>Центральная труба</i>		
ВД/НД, мм	11,0/13,0	11,0/12,6
Материал / плотность, г/см ³	Сплав Э635 / 6,45	Сплав ZIRLOTM / 6,55
<i>Направляющий канал (18 штук)</i>		
ВД/НД, мм	10,9/12,6	11,0/12,6
Материал	Сплав Э635	Сплав ZIRLOTM
<i>Дистанционирующие решетки (13 штук в зоне топлива)</i>		
Масса, г	550	830
Материал / плотность, г/см ³	Сплав Э110 / 6,45	Сплав 718 / 8,18
<i>Уголки</i>		
Ширина / толщина, мм	52 / 0,65	—
Материал	Сплав Э635	—

*ВП — выгорающий поглотитель

**ВД/НД — внутренний / наружный диаметр

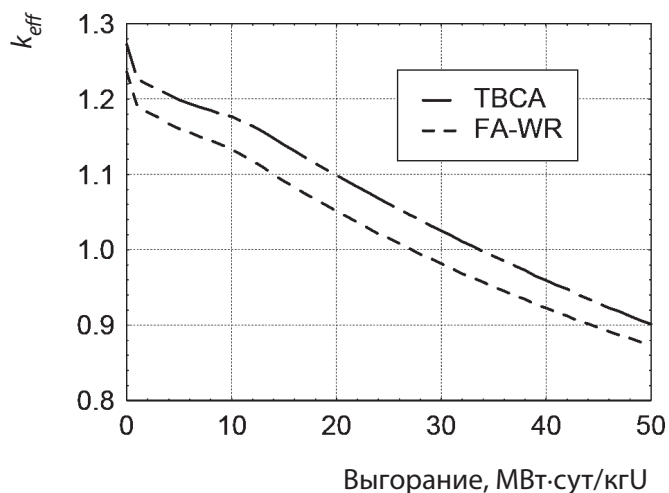


Рис. 2. Зависимость размножающих свойств ТВС от глубины выгорания

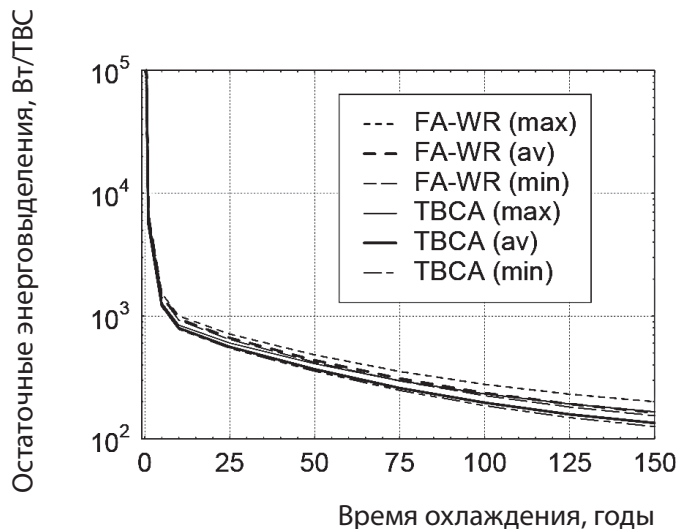


Рис. 3. Мощность остаточных энерговыделений в зависимости от времени охлаждения ТВС

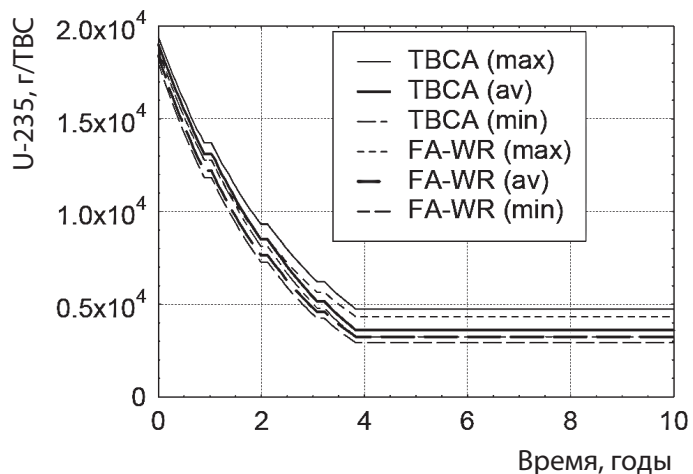


Рис. 4. Концентрация U-235 в ТВС в зависимости от времени эксплуатации и охлаждения

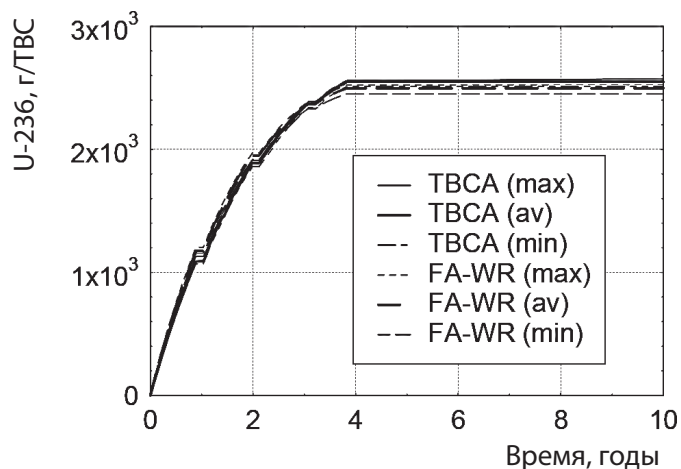


Рис. 5. Концентрация U-236 в ТВС в зависимости от времени эксплуатации и охлаждения

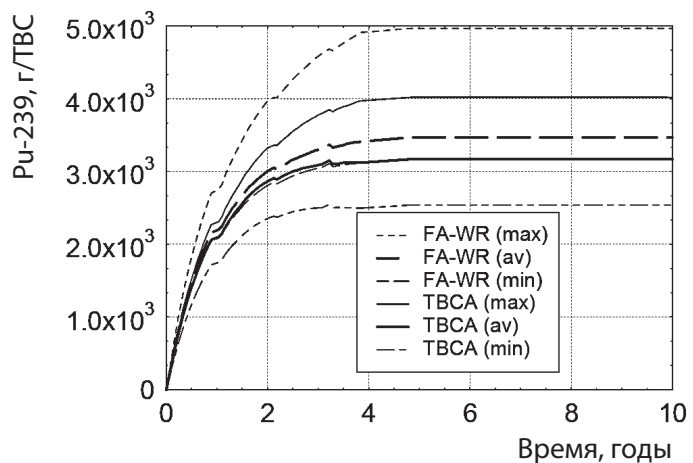


Рис. 6. Концентрация Pu-239 в ТВС в зависимости от времени эксплуатации и охлаждения

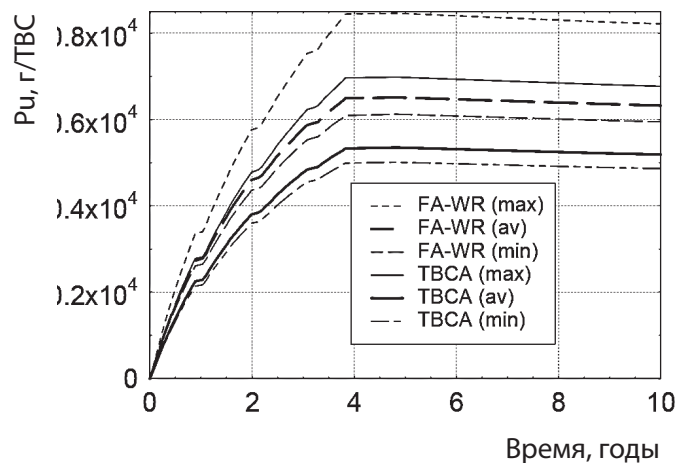


Рис. 7. Концентрация Pu в ТВС в зависимости от времени эксплуатации и охлаждения

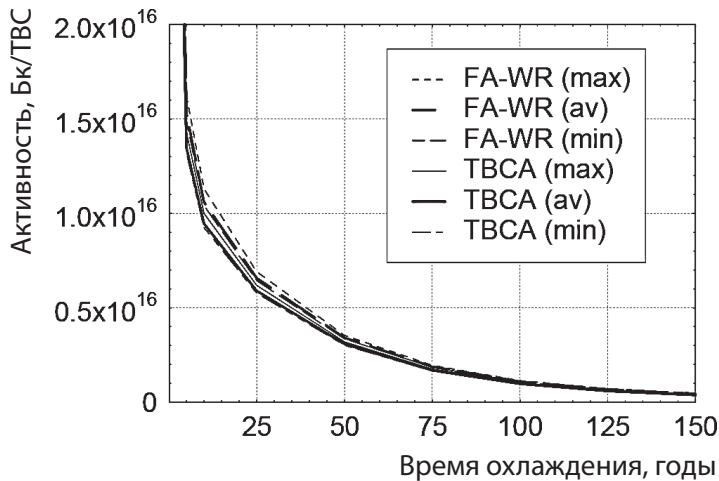


Рис. 8. Активность ТВС в зависимости от времени ее охлаждения

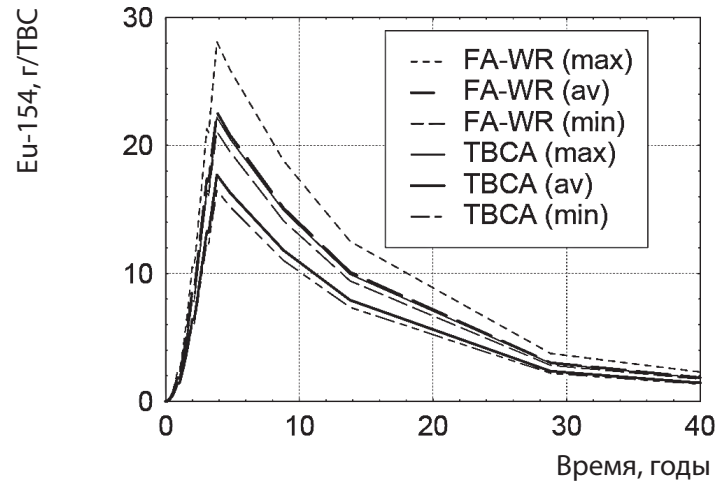


Рис. 9. Концентрация Eu-154 в ТВС в зависимости от времени эксплуатации и охлаждения

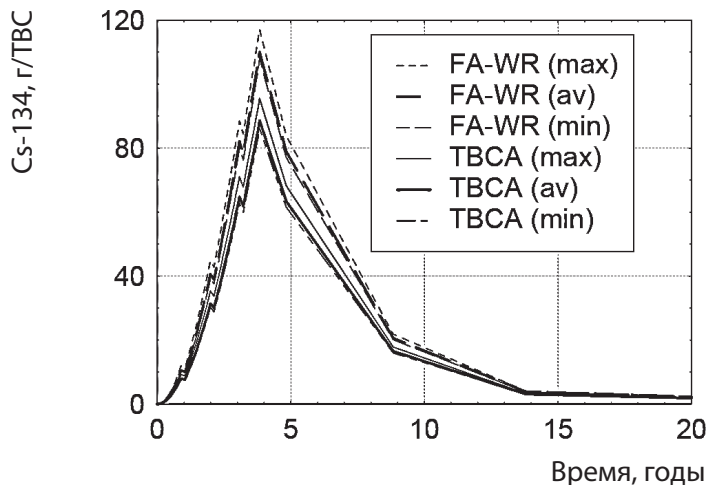


Рис. 10. Концентрация Cs134 в ТВС в зависимости от времени эксплуатации и охлаждения

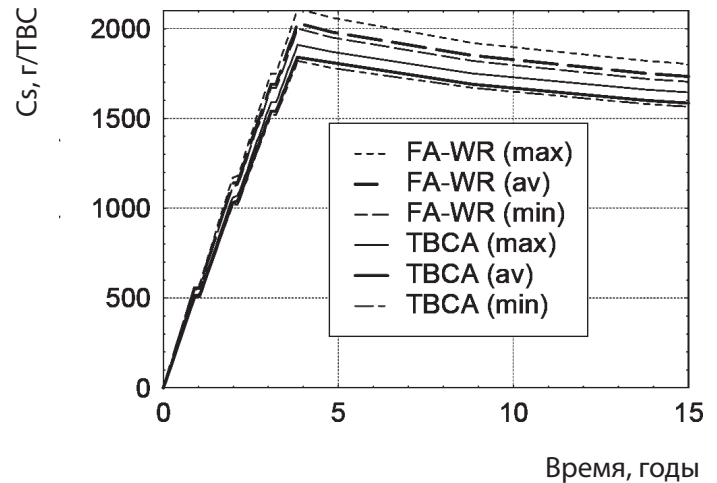


Рис. 11. Концентрация Cs в ТВС в зависимости от глубины выгорания топлива

Модели реакторных ячеек на основе ТВСА и FA-WR, визуализированные с помощью графических возможностей пакета SCALE, показаны на рис. 1.

Результаты численного моделирования. Размножающие свойства кассет в зависимости от выгорания для средних эксплуатационных параметров (табл. 1, столбец «ав») показаны на рис. 2.

Несмотря на большее количество топлива (550,6 кг по сравнению с 494,5 кг), FA-WR обладают более низкими размножающими свойствами относительно ТВСА. Очевидно, это связано с более низким средним обогащением топлива FA-WR.

Для последующего анализа отобраны параметры, играющие важную роль в оценке ядерной и радиационной безопасности при обращении и хранении ОЯТ: активность, остаточное энерговыделение, концентрации изотопов U, Pu, Cs and Eu. Для каждого из отобранных параметров по результатам предварительного анализа чувствительности сформированы наборы исходных данных,

включающие в себя характеристики топливных кассет (обогащение и масса топлива) и эксплуатационные данные (температура топлива, наличие или отсутствие в направляющих каналах стержней СУЗ, концентрация борной кислоты, плотность воды и ее температура), которые позволяют получить максимальное (табл. 1, столбец «max») и минимальное (табл. 1, столбец «min») относительно среднего (табл. 1, столбец «av») значение рассматриваемого параметра. Затем для каждого из наборов исходных данных (av, max, min) проведены расчеты остаточного энерговыделения (рис. 3), концентрации основных топливных изотопов — U-235, U-236, Pu-239, а также суммарной концентрации изотопов Pu, которые важны при оценке ядерной безопасности при обращении и хранении ОЯТ (рис. 4–7). Для анализа радиационной безопасности отобраны такие параметры, как активность ОЯТ и концентрации изотопов, которые дают существенный вклад в активность ОЯТ (Cs-134, Eu-154), а также суммарная концентрация изотопов Cs (рис. 8–11).

Таблица 3. Возможные изменения параметров ТВС в зависимости от условий их эксплуатации

Параметр	ТВСА		FA-WR		Отношение средних значений параметров ТВСА (ав) и FA-WR (ав)
	max/av	max/min	max/av	max/min	
Остаточное энерговыделение	1,23	1,31	1,22	1,30	1,22 (FA-WR/ ТВСА)
Концентрация U-235	1,32	1,46	1,34	1,48	1,12 (ТВСА /FA-WR)
Концентрация U-236	1,05	1,08	1,05	1,07	1,02 (ТВСА /FA-WR)
Концентрация Pu-239	1,45	1,59	1,44	1,57	1,25 (FA-WR/ ТВСА)
Концентрация Pu	1,31	1,39	1,30	1,38	1,24 (FA-WR/ ТВСА)
Активность	1,10	1,13	1,10	1,13	1,14 (FA-WR/ ТВСА)
Концентрация Eu-154	1,26	1,35	1,24	1,33	1,38 (FA-WR/ ТВСА)
Концентрация Cs-134	1,18	1,24	1,17	1,22	1,33 (FA-WR/ ТВСА)
Концентрация Cs	1,06	1,08	1,06	1,08	1,11 (FA-WR/ ТВСА)

Выводы

Выполненные расчеты показывают, что параметры отработавших топливных сборок ВВЭР-1000 ТВСА («ТВЭЛ») и FA-WR («Вестингауз») при глубине выгорания 50 МВт·сут/кг U могут колебаться относительно их значений для средних и минимальных эксплуатационных условий (max/av и max/min) в пределах, указанных в табл. 3.

Только для трех характеристик: активность, концентрация U-236 и концентрация Cs — полученные по результатам расчетов изменения величин в зависимости от условий эксплуатации и технологических допусков можно считать пренебрежимо малыми (менее 10 %). Для остальных характеристик такие изменения лежат в пределах от 20 до 50 %. Особенно большие отклонения от средних значений — в пределах 50 % — наблюдаются для концентрации Pu-239. Для остальных рассмотренных характеристик они существенно ниже (15–20 %) и не превышает 40 %. Основные различия наблюдаются после завершения эксплуатации топлива в реакторе, в первые годы хранения топливных кассет в приреакторном бассейне выдержки.

Для всех рассмотренных характеристик полученные значения, определяемые для средних (ав) эксплуатационных параметров, не являются средними по величине для характеристик ОЯТ и более близки к минимально возможным значениям. Это обусловлено влиянием на спектр нейтронов отсутствия или наличия регулирующих стержней в направляющих каналах ТВС, от которых заметно зависит изотопный состав ОЯТ. Наличие стержней выгорающих поглотителей не рассматривалось, поскольку при равном времени нахождения стержней в направляющих каналах ТВС их влияние на изотопный состав будет слабее по сравнению с влиянием стержней СУЗ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что с точки зрения безопасности хранения и обращения с ОЯТ внедрение на реакторах ВВЭР-1000 нового альтернативного топлива компании «Вестингауз» не требует изменения существующих условий и процедур.

Для большинства рассмотренных характеристик ОЯТ различия между ТВСА («ТВЭЛ») и FA-WR («Вестингауз») меньше, чем суммарные изменения этих же характеристик в зависимости от технологических допусков и условий эксплуатации.

Список использованной литературы

1. Ковбасенко Ю. П. Сравнительный анализ изотопного состава отработанного топлива реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 / Ю. П. Ковбасенко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2005. — № 2. — С. 51–57.
2. SCALE User's Manual. NUREG/CR-0200 Revision 6. RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.
3. NUREG/CR-6736, PNNL-13694 "Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs / Kovbasenko Y., Khalimonchuk V., Kuchin A., Bilodid Y., Yerenenko M., Dudka O. — Washington, U.S. : NRC, 2002.

References

1. Kovbasenko, Yu.P. (2005), "Comparative Analysis of Spent Fuel Isotope Composition of VVER440 and VVER-1000 Reactors" [Sravnitelnyi analiz izotopnogo sostava otrabotannogo topliva reaktorov VVER-440 i VVER-1000], Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2, pp. 51–57, Kyiv. (Rus)
2. SCALE User's Manual. NUREG/CR-0200 Revision 6. RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.
3. Kovbasenko, Y., Khalimonchuk, V., Kuchin, A., Bilodid, Ye., Yerenenko, M., Dudka, O. (2002), NUREG/CR-6736, PNNL-13694 "Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs", Washington, U.S. NRC.

Получено 02.11.2015.