

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.039.743

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

Поступила в редакцию 02.04.2020

Received 02.04.2020

Ю. А. Корчева, Н. В. Горбачева, Н. Д. Кузьмина, Н. В. Кулич*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОЦЕНКА ЗАПАСОВ АКТИВНОСТИ ПО НОМЕНКЛАТУРЕ ОСНОВНЫХ
РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННОМ
ОБРАЩЕНИИ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

Аннотация. Разработаны вероятностная модель и математическая программа CUB, обеспечивающая прогноз запасов активности по перечню наиболее опасных продуктов деления и актиноидов на разных фазах обращения с отработавшим ядерным топливом и продуктами его переработки, определенных Стратегией обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС. Проведено обоснование возможности применения для прогнозирования запасов активностей радионуклидов на установках по обращению с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС референтных данных, полученных по материалам нормативного документа РБ-093-14 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных», в котором приведены сведения для отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1000 с разной степенью обогащения, включая 4,81 % по ^{235}U . Выполнен анализ влияния степени начального обогащения топлива по ^{235}U и глубины выгорания отработавшего ядерного топлива на удельные активности основных радиационно опасных продуктов деления и актиноидов. Представлены результаты расчета активностей продуктов деления и актиноидов в отработавших тепловыделяющих сборках со средней глубиной выгорания 55,6 МВт-сут/т U для топлива с начальным обогащением 4,81 % по ^{235}U . На основе полученных данных с использованием разработанной вероятностной модели выполнен прогноз запасов и темпов снижения активности по основным радиационно опасным продуктам деления и актиноидам отработавшего ядерного топлива энергоблоков №1 и 2 Белорусской АЭС на разных временных интервалах. Полученные результаты могут быть использованы при проведении оценки безопасности объектов хранения отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС и продуктов его переработки, а также предварительной оценки активности при возврате и хранении продуктов переработки отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС на основе принципа радиационного эквивалента.

Ключевые слова: Белорусская атомная электростанция, водо-водяной энергетический реактор, отработавшее ядерное топливо, актиноиды, продукты деления, суммарная активность

Для цитирования: Оценка запасов активности по номенклатуре основных радиационно опасных радионуклидов при долговременном обращении с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС / Ю. А. Корчева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 243–251. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

Julia A. Korchova, Natalia V. Harbachova, Natalia D. Kuzmina, Nikolai V. Kulich*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus***ASSESSMENT OF ACTIVITY RESOURCES BY NOMENCLATURE OF MAIN RADIATION-HAZARDOUS
RADIONUCLIDES DURING THE LONG-TERM MANAGEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL OF THE
BELARUSIAN NPP**

Abstract. The purpose of the study is calculation research of the radiation characteristics of fission products and actinides at different phases of spent nuclear fuel (SNF) management of the Belarusian Nuclear Power Plant (NPP). The study is aimed at the scientific support of the government decision as determined by the “On approval of the spent nuclear fuel management Strategy of the Belarusian nuclear power plant”. A probabilistic forecasting model and an effective code CUB for the spent nuclear fuel radioactivity inventory assessment were developed by the authors. Radionuclides activities as function of nuclear fuel burnup for nuclear fuel with the initial enrichment on the ^{235}U equals to 4.81 % on the base of approximation relations of Regulation RB-093-14 (Moscow, 2014) have been calculated. Basic relations between specific activities of the main hazardous fission products and actinide, the SNF burnup and initial degree of fuel enrichment were analyzed. The rates of decrease of individual and total fission products and actinides activities of the Units №1 and 2 of the Belarusian NPP were obtained depending on the specific phase of spent SNF management. The results are of value for decision-making on ecology acceptable SNF management option introduced by Spent Nuclear Fuel Management Strategy of the Belarusian NPP.

Keywords: Belarusian nuclear power plant, water-water power reactor, spent nuclear fuel, actinides, fission products, total activity

For citation: Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V. Assessment of activity resources by nomenclature of main radiation-hazardous radionuclides during the long-term management of spent nuclear fuel of the Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 243–251 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь завершается этап сооружения и идет подготовка к вводу в эксплуатацию первого энергоблока Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200. Одной из проблем, сдерживающих развитие атомной энергетики во всем мире, является накопление в процессе эксплуатации АЭС значительных запасов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Поиск путей эффективного и безопасного обращения с ОЯТ является приоритетной задачей, решение которой в Беларуси определено Стратегией обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС (далее – Стратегия), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22.08.2019 № 558. В соответствии с данным документом предусмотрены следующие основные фазы обращения с ОЯТ Белорусской АЭС:

- выгрузка из активной зоны реактора в приреакторный бассейн выдержки на срок до 10 лет;
- промежуточное хранение ОЯТ после выгрузки его из приреакторных бассейнов выдержки до отправки на переработку;
- переработка ОЯТ на предприятиях Российской Федерации;
- возврат продуктов переработки ОЯТ с учетом принципа радиационного эквивалента и их хранение;
- захоронение продуктов переработки в виде цезиево-стронциевой фракции на территории Республики Беларусь (предпочтительный вариант Стратегии).

По предварительным данным на Белорусской АЭС будет реализован четырехгодичный топливный цикл с перегрузкой один раз в 12 месяцев, так что количество отработавших тепло-выделяющих сборок (ОТВС), выгруженных из двух энергоблоков Белорусской АЭС за 60 лет эксплуатации, и масса содержащегося в них тяжелого металла (ТМ) составят: при глубине выгорания до 50 МВт·сут/кг U – 1076 ТВС (506 т ТМ); от 50 до 55 МВт·сут/кг U – 148 ТВС (70 т ТМ), а при выгорании свыше 55 МВт·сут/кг U – 4070 ТВС (1916 т ТМ). Общая оценка запасов ОЯТ дает 5294 ед. ОТВС с массой 2492 т ТМ.

Объективную количественную основу для оценки рисков технологий по обращению с ОЯТ и расчетов экономических затрат при реализации вариантов Стратегии можно получить на основе прогнозных оценок запасов высокотоксичных актинидов и долгоживущих продуктов деления, входящих в состав ОЯТ. Проведенные в данной работе исследования направлены на решение двух задач. Первая – изучение влияния степени начального обогащения топлива по ^{235}U и глубины выгорания на удельную активность актинидов и продуктов деления в топливе ВВЭР-1200. Вторая – расчетное исследование запасов активности по номенклатуре основных радиационно опасных радионуклидов в ОЯТ и прогноз на различных фазах обращения с ОЯТ Белорусской АЭС. Авторами разработаны вероятностная модель и математическая программа, с помощью которой выполнены расчеты суммарных активностей основных продуктов деления и актинидов для средней глубины выгорания топлива Белорусской АЭС (55,6 МВт·сут/т U). Получены темпы снижения суммарной активности ОЯТ в зависимости от времени выдержки на различных этапах обращения с ОЯТ Белорусской АЭС.

Математическая модель формирования запасов радиоактивности в хранилище ОЯТ АЭС. Для оценки запасов активности продуктов деления в условиях имеющейся на текущий момент неопределенности данных по режиму облучения, техническим характеристикам ОТВС, продолжительности фаз обращения с ОЯТ разработана вероятностная модель формирования запасов и прогнозирования темпов снижения радиоактивности ОЯТ в объектах ядерного топливного цикла Белорусской АЭС. Для разработки модели использована методология анализа дискретных вероятностных процессов [2, 3]. Первичным событием моделируемого процесса является перемещение ОТВС из активной зоны в бассейн выдержки энергоблоков № 1 или 2, выгорание которой достигло требуемой глубины выгорания топлива. Принимая во внимание прогнозируемое

количество ОТВС, отличающихся начальным обогащением k и глубиной выгорания B_n^k , недостаток на текущий момент информации по срокам выгрузки каждой ОТВС дает нам основание рассматривать процедуру перемещения n -й ОТВС случайным процессом на интервале времени жизни АЭС $[t_A, t_B]$. Тогда параметр, характеризующий длительность выдержки $\theta = t - t_n$ n -й ОТВС и, соответственно, активность r -го радионуклида $A_n^r(t_p - t_n)$ в момент времени, характерный для каждой фазы обращения $t = t_p$, также является случайной величиной.

Суммарная активность основных долгоживущих радиационно опасных продуктов деления и актинидов для всей массы M_{tot} ОЯТ в момент $t = t_p$ определяется по следующей формуле:

$$A(t_p) = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R A_n^r(t_p - t_n) = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R \left[A_n^r(t_p - t_n) \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}^r}(t_p - t_s)\right) \right],$$

где $T_{1/2}^r$ – период полураспада r -го нуклида.

Задача оценки суммарной активности на каждой фазе обращения с ОЯТ сводится к простой, но трудоемкой процедуре суммирования, в которой параметр t_n является случайной величиной, заданной на интервале $[t_A, t_B]$ его возможных значений, где t_A и t_B – моменты времени выгрузки из реактора первой партии и последней партий ОТВС. С помощью процедур Монте-Карло, реализованных в разработанном для этих целей программном средстве имитационного моделирования SUB, реальная последовательность моментов выгрузки ОТВС моделируется равномерной выборкой случайных значений на интервале $[t_A, t_B]$. С помощью приведенного выше уравнения строится выборка случайных значений активности $A(\theta_n)$. Размер выборки принимает значение N , равное суммарному числу ОТВС, наработанных на энергоблоках №1 и 2 Белорусской АЭС за прогнозный срок эксплуатации.

Влияние степени начального обогащения топлива по ^{235}U и глубины выгорания на удельную активность актинидов и продуктов деления в топливе ВВЭР-1000. В настоящее время в Российской Федерации разработан нормативный документ РБ-093-14 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных» (далее – РБ-093-14), содержащий рекомендации для подготовки радиационных характеристик ОЯТ различных типов реакторов, в том числе для водо-водяного типа (ВВЭР). В РБ-093-14 предложены приближенные аппроксимирующие зависимости удельных активностей основных радиационно опасных продуктов деления и актинидов от глубины выгорания для топлива с различным начальным обогащением по ^{235}U , используемого на АЭС с ВВЭР-1000, и оценена неопределенность приближенных расчетов концентраций (удельных активностей) актинидов и продуктов деления, которая лежит в диапазоне 1–64 %. В принципе, такой диапазон неопределенностей коррелирует с неопределенностью оценок глубины выгорания топлива в ОТВС, которая может быть получена расчетным либо экспериментальным методами. Для обозначенных в РБ-093-14 целей, а именно для проведения оценок радиационных характеристик ОЯТ в установках по обращению с ОЯТ, указанные неопределенности рассматриваются как приемлемые. Для подготовки необходимых исходных данных для предварительных расчетов запасов активности нами использованы методические материалы нормативного технического документа РБ-093-14. Пользуясь представленными в РБ-093-14 сведениями для топлива с начальным обогащением 4,81 % по ^{235}U ВВЭР-1000, авторами подготовлены базы данных в среде Microsoft Excel по активностям продуктов деления и актинидов в расчете на 1 ОТВС в зависимости от глубины выгорания [4]. Эти данные соответствуют фазе обращения с ОЯТ в приреакторном бассейне выдержки.

Для обоснования возможности применения данных на текущем этапе исследований для прогнозирования запасов активностей радионуклидов на установках по обращению с ОЯТ Белорусской АЭС, полученных по материалам РБ-093-14, выполнен анализ влияния степени начального обогащения и глубины выгорания топлива на удельные активности основных радиационно опасных продуктов деления и актинидов. Для этих целей выполнен сравнительный анализ полученных данных с результатами работы [5]. В данной работе для перспективного для ВВЭР-1200 топлива с начальным обогащением 4,95 % по ^{235}U результаты численных расчетов удельных активностей продуктов деления и актинидов, полученные с помощью программного средства MCU-PD, были представлены в аналитическом виде упрощенными аппроксимирующими зависимостями.

Зависимости удельных активностей продуктов деления и актинидов от глубины выгорания топлива в диапазоне выгорания от 40 до 70 МВт·сут/кг U для топлива с начальным обогащением 4,81 % в сопоставлении с аналогичными данными для топлива с начальным обогащением 4,95 % по ^{235}U представлены на рис. 1–4. Сравнительный анализ показал, что в интересующем нас диапазоне отличие результатов расчета удельных активностей продуктов деления и актинидов для топлива с начальным обогащением 4,95 % от референтных данных РБ-093-14 для топлива с обогащением 4,81 % составляет 3–15 %, что является вполне приемлемым для целей наших исследований. Для долгоживущих продуктов деления, таких как ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{99}Tc и некоторых других, влияние начального обогащения на их радиационные характеристики в рассматриваемом диапазоне выгорания не существенно. Влияние начального обогащения на удельные активности изотопов $^{239-241}\text{Pu}$ актинидов сказывается в большей степени, что связано со спецификой их образования в топливе ядерного реактора в процессе трансмутации. Авторами проведен анализ зависимости от степени обогащения и глубины выгорания одной из ключевых характеристик ОЯТ, на основании которой можно идентифицировать глубину выгорания – отношения активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs (рис. 5). Различие отношений активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, полученных по данным РБ-093-14 и по результатам расчетных исследований в [5], составляет величину порядка 8–10 %.

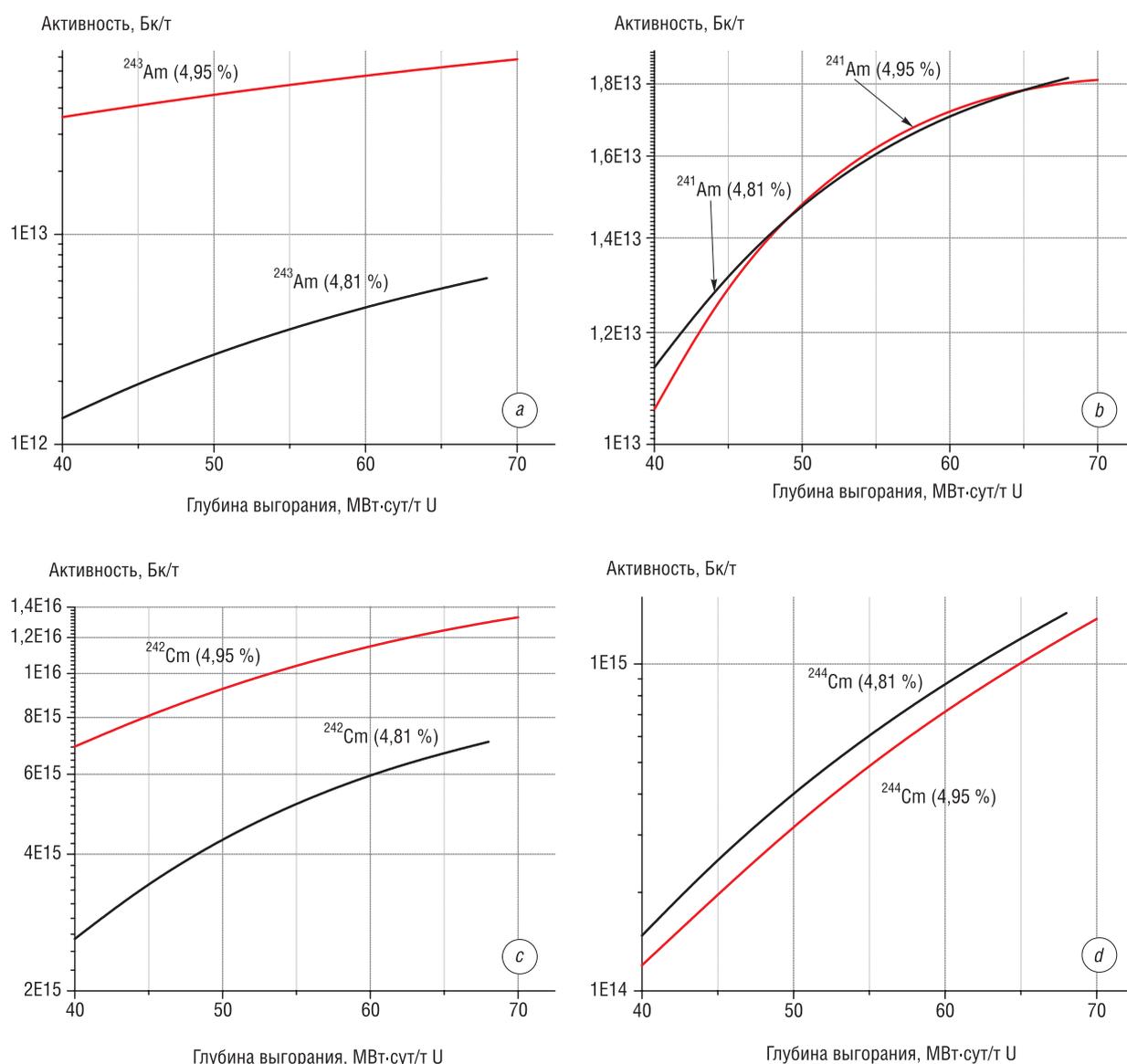


Рис. 1. Зависимости активностей ^{243}Am (a), ^{241}Am (b), ^{242}Cm (c), ^{244}Cm (d) от глубины выгорания топлива
 Fig. 1. ^{243}Am (a), ^{241}Am (b), ^{242}Cm (c), ^{244}Cm (d) activity dependencies from the fuel burnup

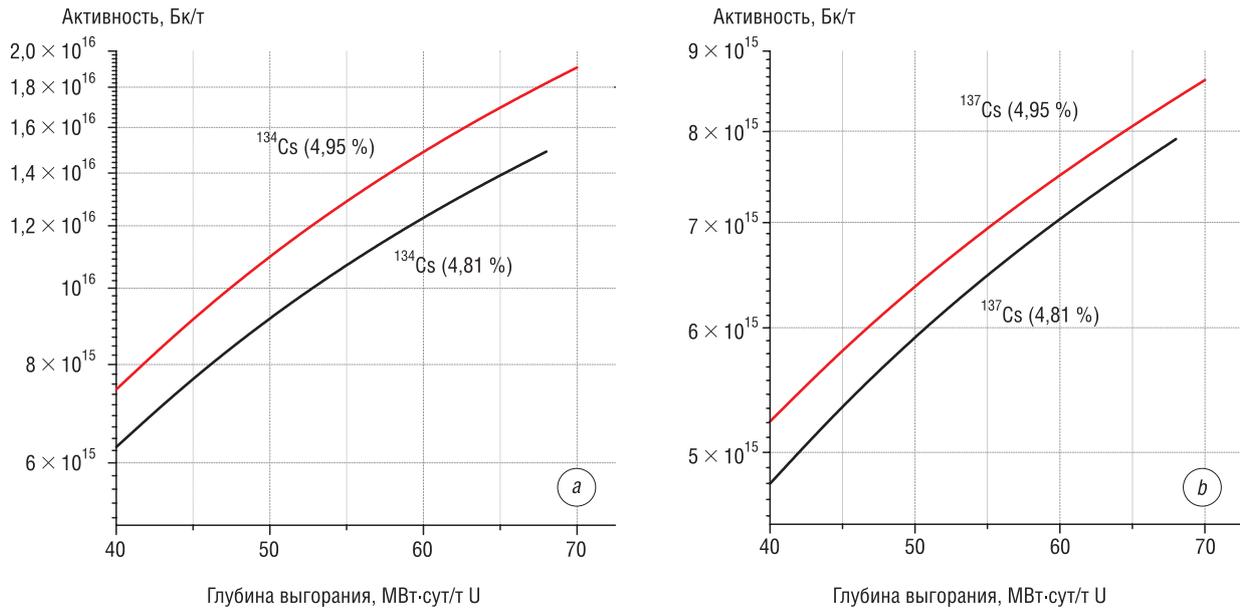


Рис. 2. Зависимости активностей ^{134}Cs (a), ^{137}Cs (b) от глубины выгорания топлива
 Fig. 2. ^{134}Cs (a), ^{137}Cs (b) activity dependencies from the fuel burnup

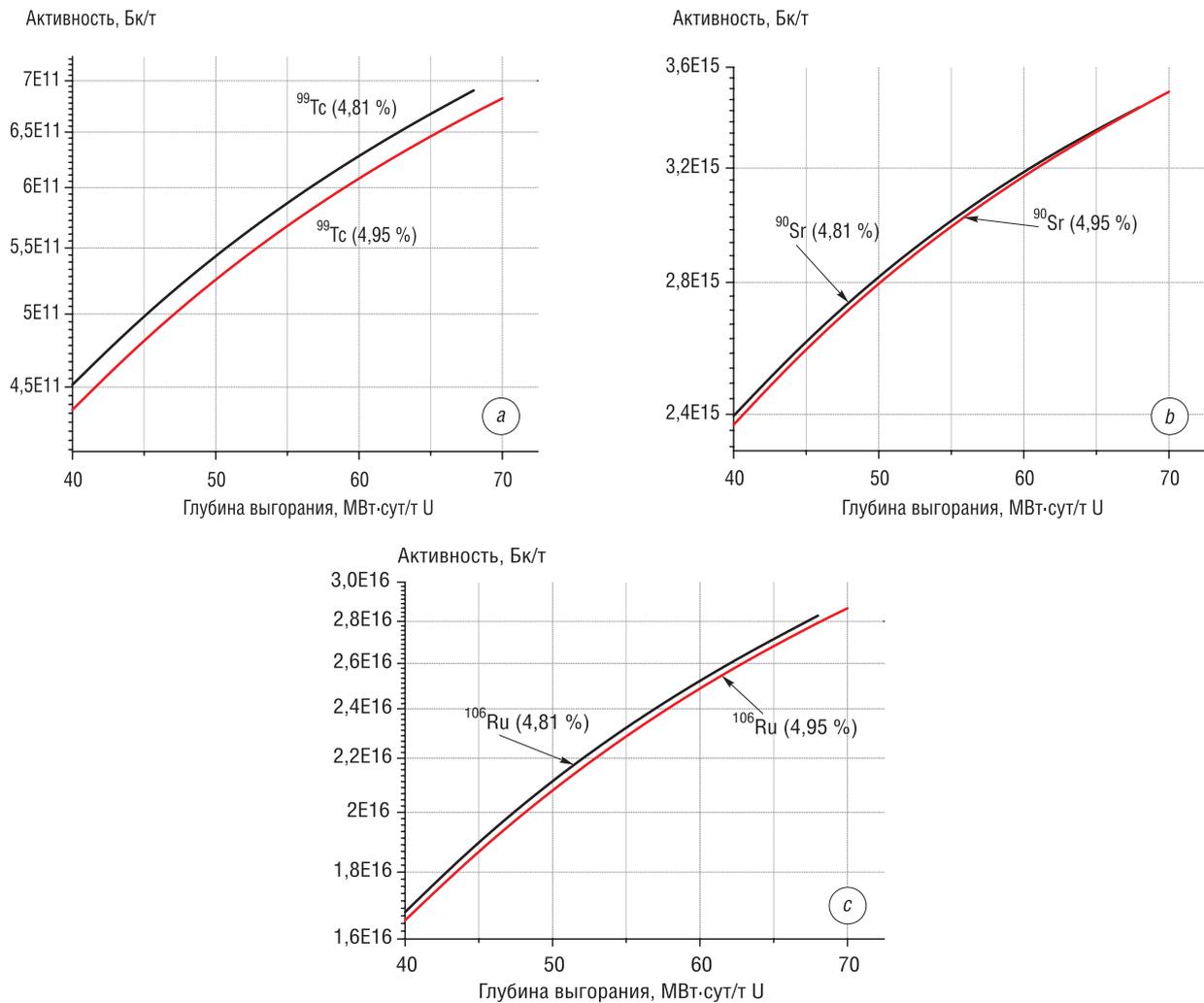


Рис. 3. Зависимости активностей ^{99}Tc (a), ^{90}Sr (b), ^{106}Ru (c) от глубины выгорания топлива
 Fig. 3. ^{99}Tc (a), ^{90}Sr (b), ^{106}Ru (c) activity dependencies from the fuel burnup

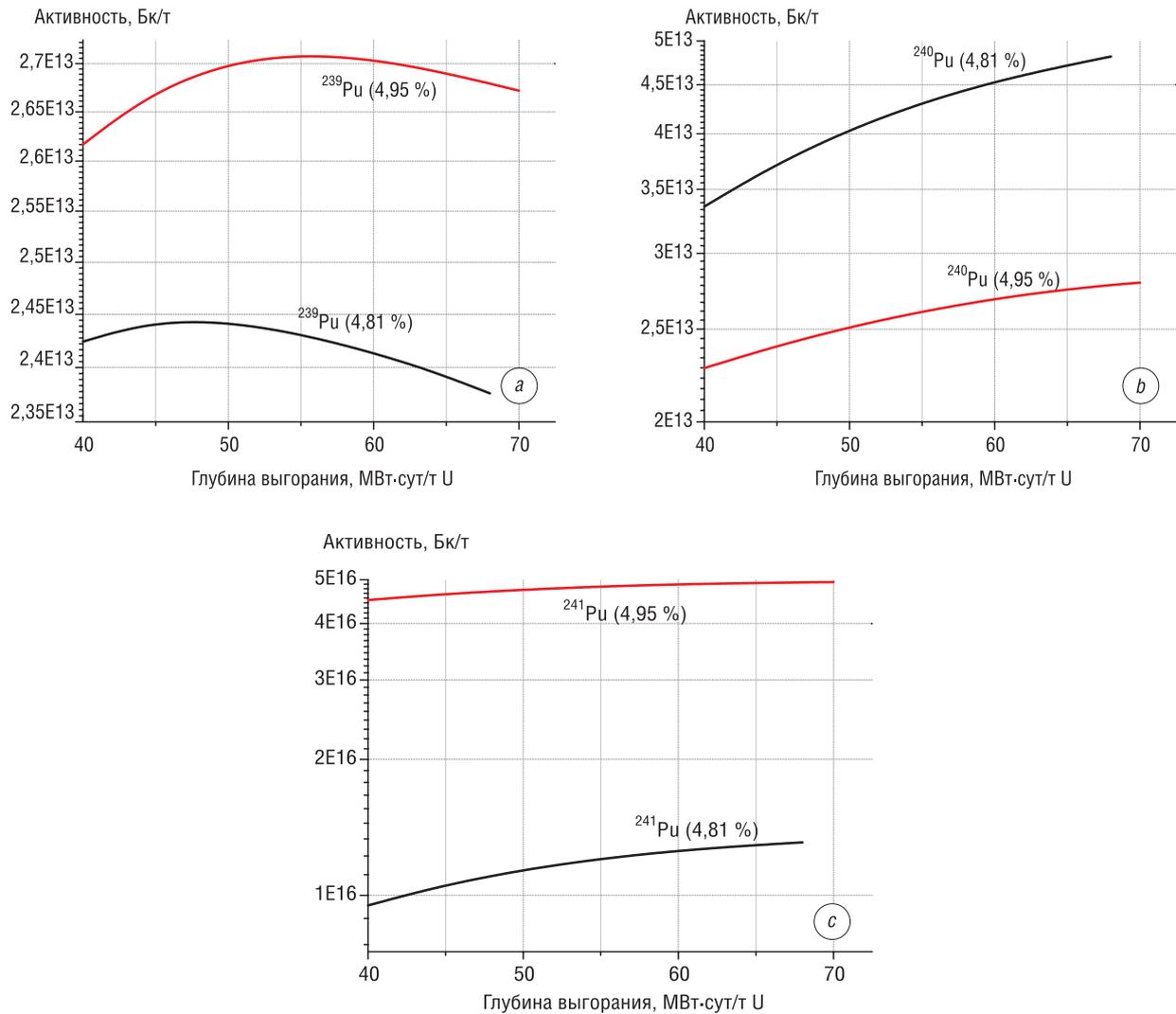
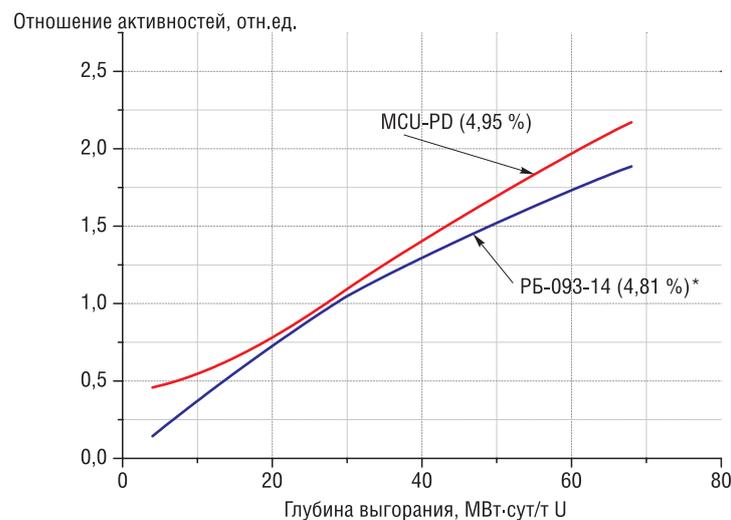


Рис. 4. Зависимости активностей ^{239}Pu (a), ^{240}Pu (b), ^{241}Pu (c) от глубины выгорания
 Fig. 4. ^{239}Pu (a), ^{240}Pu (b), ^{241}Pu (c) activity dependencies from the fuel burnup



* Для РБ-093-14 оцененная погрешность для Cs-134 и Cs-137 – 8 и 2,4 %.

Рис. 5. Цезиевое отношение активностей ($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$) в зависимости от глубины выгорания топлива
 Fig. 5. The ratio of ^{134}Cs to ^{137}Cs activity depending on the fuel burnup

Оценка запасов активности на разных фазах обращения с ОЯТ. Моделирование запасов активности на каждой фазе обращения с ОЯТ по каждому из радиационно опасных радионуклидов, а также суммарной активности проведено с использованием программного средства имитационного моделирования CUB с использованием процедур Монте-Карло [3]. В табл. 1 представлены результаты расчета активностей продуктов деления и актинидов в ОТВС со средней глубиной выгорания 55,6 МВт·сут/т U для топлива с начальным обогащением 4,81 %, полученные на основании референтных данных РБ-093-14.

Таблица 1. Результаты расчета активностей продуктов деления и актинидов для средней глубины выгорания 55,6 МВт·сут/т U в ОТВС с обогащением 4,81 %

Table 1. Results of calculating the activity of fission products and actinides for an average burnup of 55.6 MW·day/t U in SFA with initial enrichment of 4.81 %

Радионуклид	$T_{1/2}$	Активность на 1 ТВС, Бк/ТВС	Радионуклид	$T_{1/2}$	Активность на 1 ТВС, Бк/ТВС
^{144}Ce	285 сут	2,53E+16	^{93}Zr	$1,5 \cdot 10^6$ лет	3,19E+10
^{134}Cs	2 года	4,73E+15	$^{125\text{m}}\text{Te}$	58 сут	4,11E+13
^{135}Cs	$2,3 \cdot 10^6$ лет	1,17E+10	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$ лет	1,63E+10
^{137}Cs	30 лет	2,83E+15	^{238}Pu	84,74 года	1,79E+14
^{154}Eu	8,6 лет	2,16E+14	^{239}Pu	$24,11 \cdot 10^3$ лет	1,04E+13
^{155}Eu	5 лет	8,97E+13	^{240}Pu	$6,56 \cdot 10^3$ лет	1,87E+13
^3H	12,32 года	3,37E+11	^{241}Pu	14,29 года	5,22E+15
^{85}Kr	10,8 лет	1,57E+14	^{242}Pu	$3,73 \cdot 10^5$ лет	1,10E+11
^{107}Pd	$6,5 \cdot 10^6$ лет	2,41E+09	^{234}U	$2,45 \cdot 10^5$ лет	3,31E+10
^{106}Ru	373,6 сут	1,01E+16	^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$ лет	4,64E+08
^{125}Sb	2,75 лет	1,86E+14	^{236}U	$2,34 \cdot 10^7$ лет	1,19E+10
^{79}Se	$3,56 \cdot 10^5$ лет	9,87E+09	^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$ лет	8,48E+09
^{151}Sm	90 лет	9,77E+12	^{241}Am	432,6 года	7,00E+12
$^{121\text{m}}\text{Sn}$	50 лет	3,03E+11	^{243}Am	$7,37 \cdot 10^3$ лет	1,60E+12
^{126}Sn	$2,3 \cdot 10^5$ лет	1,30E+10	^{242}Cm	162,94 сут	2,29E+15
^{90}Sr	28,8 лет	1,31E+15	^{244}Cm	18,11 года	2,81E+14
^{99}Tc	$2,11 \cdot 10^5$ лет	2,56E+11	^{245}Cm	$8,5 \cdot 10^3$ лет	1,00E+13

Результаты оценки суммарной активности продуктов деления и актинидов отработавшего топлива энергоблоков №1 и 2 (5300 ед. ОТВС) в зависимости от времени выдержки приведены в табл. 2. Расчет показал, что после динамичного снижения в течение первых сотен лет удельная активность меняется медленно и через 1000 лет достигает уровня порядка $1,77 \cdot 10^{17}$ Бк. Оцененная суммарная активность ОЯТ после выдержки 10 000 лет будет равна $3,88 \cdot 10^{16}$ Бк.

Таблица 2. Результаты расчетов темпов снижения суммарной активности ОЯТ в зависимости от времени выдержки для средней глубины выгорания 55,6 МВт·сут/т U в ОТВС с обогащением 4,81 %

Table 2. Results of the calculation of the rate of decrease in the total activity of SNF depending on the exposure time for an average burnup depth of 55.6 MW·day/t U in the SFA with an enrichment of 4.81 %

Время выдержки, годы	Суммарная активность радионуклидов, Бк
100	4,87E+18
200	9,75E+17
500	3,50E+17
1000	1,77E+17
5000	5,44E+16
10000	3,88E+16

Заключение. В поддержку перспективных экологических проектов при обращении с ОЯТ Белорусской АЭС разработаны вероятностная модель и математическая программа SUB, обеспечивающая прогноз запасов активности по перечню наиболее опасных продуктов деления и актиноидов на разных фазах обращения с ОЯТ и продуктами его переработки. Разработанная модель использована для оценки запасов и темпов снижения активности по основным радиационно опасным радионуклидам ОЯТ ВВЭР-1000. Анализ влияния начального обогащения и глубины выгорания на наработку основных радиационно опасных продуктов деления и актиноидов, образующихся в ОЯТ, показал, что референтные данные для топлива с начальным обогащением 4,81 %, полученные по материалам РБ-093-14 реакторов ВВЭР-1000, с приемлемой точностью могут быть использованы для предварительных оценок запасов активности ОЯТ Белорусской АЭС.

В дальнейшем авторами планируется подготовить референтные данные для ОЯТ с начальным обогащением топлива 4,95 % по ^{235}U и доработать базы данных «Радиационные характеристики ОЯТ Белорусской АЭС» на всю номенклатуру топлива, планируемого для использования в ядерном топливном цикле Белорусской АЭС. Полученные результаты перспективны при проведении оценки безопасности объектов хранения ОЯТ Белорусской АЭС и продуктов их переработки и предварительной оценки активности при возврате и хранении продуктов переработки ОЯТ Белорусской АЭС с учетом принципа радиационного эквивалента.

Список использованных источников

1. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management [Electronic Resource] // IAEA nuclear energy series: NW-T-1.14. – Vienna, 2018. – Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf
2. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1972. – 552 с.
3. Верификация и использование комплекса математических программ для оценки запасов радиоактивности в обеспечение безопасности ядерных установок на промплощадке АЭС [Электронный ресурс] / Н. В. Горбачева [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Подольск, 26–29 мая 2009 г. / ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – Подольск, 2009. – Режим доступа: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf>
4. Горбачева, Н. В. Расчетные исследования радиотоксичности и удельной активности облученного топлива ВВЭР-1200 глубокого выгорания / Н. В. Горбачева, Н. В. Кулич, Ю. А. Корчева // Ядерные технологии XXI века: докл. VI Междунар. конф., Минск, 25–27 окт. 2016 г. / ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2016. – С. 79–88.
5. Серебряный, Г. С. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива реактора ВВЭР-1200 / Г. С. Серебряный, М. Л. Жемжуров // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: докл. VII Междунар. конф., Минск, 23–26 окт. 2018 г. / ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2018. – С. 63–89.

References

1. International Atomic Energy Agency. *Status and trends in spent fuel and radioactive waste management*. IAEA nuclear energy series: NW-T-1.14. Vienna, 2018. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf
2. Ventcel' E. S. *Operation Research*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 552 p. (in Russian).
3. Gorbacheva N. V., Beresneva N. V., Kulich N. V., Skurat V. V. Verification and use of a set of mathematical programs for assessing radioactivity reserves to ensure the safety of nuclear installations at the NP site. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: materialy 6-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with WWER: Reports of the 6th International Scientific and Technical Conference]. Podol'sk, 2009. Available at: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf> (in Russian).
4. Gorbacheva N.V., Kulich N. V., Korcheva Yu. A. Calculated studies of radiotoxicity and specific activity of irradiated deep burn WWER-1200 fuel. *Yadernye tekhnologii XXI veka: doklady VI Mezhdunar. konf.* [Nuclear Technologies of the XXI century: Reports of the 6th International Conference]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2016, pp. 79–88 (in Russian).
5. Serebryanyi G. S. Radiation and thermal characteristics of spent nuclear fuel of the WWER-1200 reactor. *Atomnaya energetika, yadernye i radiacionnye tekhnologii XXI veka: doklady VII Mezhdunar. konfer.* [Nuclear Energy, nuclear and radiation technologies of the XXI Century: Reports of the 7th International Conference]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2018, pp. 63–89 (in Russian).

Информация об авторах

Корчева Юлия Александровна – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: julia.korchova@sosny.bas-net.by

Горбачева Наталья Владимировна – ведущий научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: harbachova.nv@sosny.bas-net.by

Кузьмина Наталья Дмитриевна – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Кулич Николай Васильевич – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 2993826@mail.ru

Information about the authors

Julia A. Korchova – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia.korchova@sosny.bas-net.by

Natalia V. Harbachova – Leading Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: harbachova.nv@sosny.bas-net.by

Natalia D. Kuzmina – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Nikolai V. Kulich – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 2993826@mail.ru