

## **ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

### **DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

УДК 621.039.743

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-72-81>

Поступила в редакцию 09.06.2022

Received 09.06.2022

**Н. В. Горбачева, Ю. А. Корчева, Н. Д. Кузьмина, Н. В. Кулич, С. Н. Яцко**

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

### **РАНЖИРОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА БЕЛОРУССКОЙ АЭС ПО ВКЛАДАМ В ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ БИОЛОГИЧЕСКУЮ ОПАСНОСТЬ**

**Аннотация.** С использованием методического подхода оценки потенциальной биологической опасности (радиотоксичности) радионуклидов проведены расчетные исследования и сравнительный анализ вкладов в суммарную радиотоксичность долгоживущих продуктов деления и актинидов, накапливающихся в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) Белорусской АЭС. Для корректной оценки массы изотопа  $^{237}\text{Np}$  на долговременном этапе обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) проведена доработка математической модели ЯТЦ Белорусской АЭС расчетного кода SUB в части учета последовательных превращений изотопов  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$ . Начальные концентрации по основным радиационно-опасным радионуклидам на момент выгрузки топлива из активной зоны реактора ВВЭР-1200 представлены в разработанной авторами и оформленной в виде электронного справочника «Радиационные характеристики отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС» базе данных. Подготовка баз данных ведется согласно рекомендациям Руководства по безопасности РБ-093-20 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных». Основные характеристики, используемые при моделировании ЯТЦ в коде SUB: общая масса ОЯТ (2492 т), количество отработавших тепловыделяющих сборок (5294 шт.) и среднее выгорание, – приняты в соответствии с данными Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС. Показано, что на этапе до 100 лет основной вклад в суммарную радиотоксичность вносят актиниды  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , при этом вклады  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  равны 0,07, 49,0 и 0,007 % соответственно. Через 5 тыс. лет вклад  $^{241}\text{Am}$  составит 0,24 %, а изотопа  $^{237}\text{Np}$  – до 0,1 % от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования требований к фракционированию (извлечению  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) при переработке ОЯТ Белорусской АЭС.

**Ключевые слова:** Белорусская атомная электростанция, водо-водяной энергетический реактор, переработка, отработавшее ядерное топливо, радиотоксичность, ядерный топливный цикл, радиационная безопасность, актиниды, продукты деления, математическая модель

**Для цитирования:** Ранжирование долгоживущих радионуклидов ядерного топливного цикла Белорусской АЭС по вкладам в потенциальную биологическую опасность / Н. В. Горбачева [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 72–81. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-72-81>

**Natalia V. Harbachova, Julia. A. Korchova, Natalia D. Kuzmina, Nikolai V. Kulich, Svetlana N. Yacko**

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Prilesye village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus*

### **THE LONG-LIVED RADIONUCLIDES RADIOTOXICITY RANKING THE NUCLEAR FUEL CYCLE OF THE BELARUSIAN NPP**

**Abstract.** Using a methodical approach to the potential biological hazard (radiotoxicity) assessment of radionuclides, computational studies and a comparative analysis of the contributions to the total radiotoxicity of long-lived fission products and actinides accumulated in the nuclear fuel cycle of the Belarusian NPP were carried out. In order to estimate correctly

the  $^{237}\text{Np}$  isotope mass at the long-term stage of SNF management, the mathematical model of the nuclear fuel cycle of the Belarusian NPP of the code CUB was modified to take into account the transmutation chain of  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{237}\text{Np}$  isotopes. The initial concentrations for the main radiation-hazardous radionuclides at the time of fuel unloading from the VVER-1200 reactor core are presented in the database “Radiation Characteristics of Spent Nuclear Fuel of the Belarusian NPP” developed by the authors. The database development is carried out in accordance with the recommendations of the RB-093-20 “Radiation and thermophysical characteristics of spent nuclear fuel of pressurized water power reactors and high-power channel reactors”. The main characteristics used in the nuclear fuel cycle simulation in the CUB code, such as the total mass of spent nuclear fuel (2492 tons), the number of spent fuel assemblies (5294) and the average burnup, are taken in accordance with the Spent Fuel Management Strategy of the Belarusian NPP data. It is shown that at the stage up to 100 years, the main contributors to the total radiotoxicity are the isotopes of  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , where contributions of three last of them are 0.07, 49.0 and 0.007%, respectively. But 5000 years later, the contribution of  $^{241}\text{Am}$  will be 0.24%, and the isotope  $^{237}\text{Np}$  – up to 0.1% of the total actinides radiotoxicity. The results obtained can be used to substantiate for the recovery degree requirements of  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  during the SNF of the Belarusian NPP reprocessing.

**Keywords:** Belarusian nuclear power plant, water-water power reactor, reprocessing, spent nuclear fuel, radiotoxicity, nuclear fuel cycle, radiation safety, actinides, fission products, mathematical model

**For citation:** Harbachova N. V., Korchova Ju. A., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Yacko S. N. The long-lived radionuclides radiotoxicity ranking the nuclear fuel cycle 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*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-72-81>

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь введен в эксплуатацию первый энергоблок Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200, ввод второго энергоблока запланирован на 2023 год. Одной из составляющих ядерной и радиационной безопасности на всех этапах жизненного цикла атомной электростанции является безопасность при обращении с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Государственная политика Республики Беларусь в области обращения с ОЯТ подчинена реализации оптимальной с технологической точки зрения, экономически целесообразной, экологически и социально безопасной Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС (далее – Стратегия), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь 22.08.2019, № 558. Так, после выгрузки топлива из активных зон реакторов и обязательной выдержки в приреакторных бассейнах выдержки (сроком до 10 лет) для уменьшения радиоактивности и снижения остаточного тепловыделения Стратегией предусматриваются следующие этапы: промежуточное (включая технологическое) хранение ОЯТ, передача на переработку и переработка ОЯТ на предприятиях Российской Федерации, долговременное обращение с продуктами переработки ОЯТ.

Следует отметить, что возврат высокоактивных радиоактивных отходов (далее – ВАО) продуктов переработки ОЯТ в страну происхождения топлива является общепринятой практикой. В соответствии со Стратегией предпочтительным вариантом является переработка ОЯТ с исключением долгоживущих радионуклидов – изотопов U, Pu, Np. Возврату в Республику Беларусь подлежат радиоактивные отходы, включенные в стеклоподобную матрицу и содержащие сравнительно короткоживущие изотопы щелочно-земельных элементов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  (так называемую цезиево-стронциевую фракцию).

Объективную количественную основу для оценки долговременной безопасности систем по обращению с ОЯТ и расчетов экономических затрат на обращение с ним при реализации вариантов Стратегии можно получить на основе прогнозных оценок запасов высокотоксичных актинидов и долгоживущих продуктов деления, входящих в состав ОЯТ. На период времени до 10 тыс. лет, сопоставимый с периодами полураспадов долгоживущих актинидов, в современной международной практике оценки безопасности систем обращения с ОЯТ в качестве индикаторов безопасности используются допустимые санитарными нормами концентрации радиотоксичных элементов в биосферной воде.

Авторами ранее были выполнены расчетные исследования и получены прогнозные оценки радиационных характеристик продуктов деления и актинидов, образовавшихся в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) Белорусской АЭС на промежуточном и долговременном этапах обращения с ОЯТ [1–3]. Предварительный анализ показал, что  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  – одни из тех актинидов, которые накапливаются в ОЯТ ВВЭР-1200 в наибольшем количестве. В связи с этим можно ожидать, что их высокая природная радиотоксичность будет обуславливать значительный вклад

в потенциальную биологическую опасность всего ОЯТ, что следует принимать во внимание при определении требований к степени извлечения изотопов U, Pu, Np при его переработке.

*Цель настоящей работы* – проведение расчетных исследований и сравнительного анализа по потенциальной биологической опасности долгоживущих продуктов деления и актинидов, накапливающихся в ЯТЦ Белорусской АЭС, с учетом дополнительного образования на этапе долговременного обращения изотопа  $^{237}\text{Np}$  при распаде его материнского ядра  $^{241}\text{Am}$ .

**Исходные данные и нормативная база.** На основании сведений, представленных в Руководстве по безопасности РБ-093-20 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных» (далее – РБ-093-20), авторами ведется разработка баз данных по радиационным характеристикам (концентрации и удельные активности) основных радиационно-опасных продуктов деления и актинидов в топливе отработавших тепловыделяющих сборок (далее – ОТВС) реактора ВВЭР-1200. Разрабатываемая база данных оформлена в виде справочного инструмента (Электронный справочник) «Радиационные характеристики отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС». Перечень основных радиационно-опасных радионуклидов предусматривает учет 49 изотопов продуктов деления и актинидов, включая изотопы  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . Справочные данные содержат рассчитанные начальные концентрации и удельные активности радионуклидов для различных типов топлива, отличающихся начальным обогащением по  $^{235}\text{U}$  (3,53, 4,40, 4,81 %) в диапазоне от 2 ГВт·сут/кг U до проектной глубины выгорания топлива каждого типа. Продолжается работа по расширению базы данных на перспективные для Белорусской АЭС типы топлива, в частности на топливо с начальным обогащением 4,95 % по  $^{235}\text{U}$ .

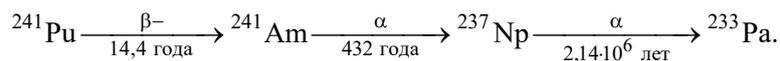
Характеристики ЯТЦ Белорусской АЭС приняты на основании сведений Стратегии, согласно которой на Белорусской АЭС будет реализован четырехгодичный топливный цикл с перегрузкой один раз в 12 месяцев, так что количество ОТВС, выгруженных из двух энергоблоков Белорусской АЭС за 60 лет эксплуатации, составит 5294 ед. с массой 2492 т тяжелого металла ( $\text{UO}_2$ ) при средней глубине выгорания топлива 55,6 МВт·сут/т U.

**Методика анализа и математические модели.** Решение проблемы безопасности ВАО, подлежащих окончательному захоронению, требует расчетного обоснования с использованием радиоэкологических подходов и методов. Такие оценки послужат основой разработки требований к составу и активности захораниваемых радионуклидов.

В качестве методического подхода использована концепция оценки и сравнительного анализа потенциальной биологической опасности (радиотоксичности) радионуклидов, входящих в состав ОЯТ Белорусской АЭС [4, 5].

С целью определения запасов активностей и оценки характеристик радиотоксичности на промежуточном и долговременном этапах обращения с ОЯТ и ВАО, предусмотренных Стратегией, разработана модель формирования запасов радиоактивности ЯТЦ Белорусской АЭС [6].

Для корректной оценки концентраций и активностей продуктов деления и актинидов, накапливающихся в ЯТЦ на этапах промежуточного и долговременного обращения, РБ-093-20 регламентируется учет последовательных взаимосвязанных превращений  $^{241}\text{Pu}$  (период полураспада 14,4 года),  $^{241}\text{Am}$  (период полураспада 432 года) и  $^{237}\text{Np}$  (период полураспада  $2,14 \cdot 10^6$  лет) в ОЯТ в соответствии со схемой радиоактивных превращений:



Чтобы выявить наиболее значимые вкладчики в потенциальную биологическую опасность ОЯТ Белорусской АЭС на промежуточном и долговременном этапах обращения, проведена модификация модели формирования запасов радиоактивности в ОЯТ в части учета взаимосвязанных превращений  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  согласно РБ-093-20.

Дополнительная масса  $^{237}\text{Np}$ , которая образуется за счет распадов предшественников в момент времени  $t$  на этапах промежуточного и долговременного обращения с ОЯТ, определяется на основании следующих уравнений для концентраций  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ :

$$y_{237\text{Np}}(t) = y_{241\text{Am}}(0) \cdot \frac{A_{241\text{Am}}}{A_{241\text{Pu}}} \cdot \frac{\lambda_{241\text{Pu}}}{\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{241\text{Pu}}} \left[ \exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t) - \exp(-\lambda_{241\text{Am}} t) \right] + y_{241\text{Pu}}(0) \cdot \frac{A_{237\text{Np}}}{A_{241\text{Pu}}} \times$$

$$\times \lambda_{241\text{Pu}} \lambda_{241\text{Am}} \left[ \frac{\exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t)}{(\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{241\text{Pu}})(\lambda_{237\text{Np}} - \lambda_{241\text{Pu}})} + \frac{\exp(-\lambda_{241\text{Am}} t)}{(\lambda_{241\text{Pu}} - \lambda_{241\text{Am}})(\lambda_{237\text{Np}} - \lambda_{241\text{Am}})} + \right.$$

$$\left. + \frac{\exp(-\lambda_{237\text{Np}} t)}{(\lambda_{241\text{Pu}} - \lambda_{237\text{Np}})(\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{237\text{Np}})} \right], \quad (1)$$

$$y_{241\text{Am}}(t) = y_{241\text{Am}}(0) \cdot \exp(-\lambda_{241\text{Am}} t) + y_{241\text{Pu}}(0) \cdot \frac{A_{241\text{Am}}}{A_{241\text{Pu}}} \times$$

$$\times \frac{\lambda_{241\text{Pu}}}{\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{241\text{Pu}}} \left[ \exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t) - \exp(-\lambda_{241\text{Am}} t) \right], \quad (2)$$

$$y_{241\text{Pu}}(t) = y_{241\text{Pu}}(0) \cdot \exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t), \quad (3)$$

где  $y_{237\text{Np}}(0)$ ,  $y_{241\text{Pu}}(0)$ ,  $y_{241\text{Am}}(0)$  – начальные концентрации  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в момент времени  $t$  с учетом времени выдержки ОТВС  $t_n$ , равным «возрасту кассеты»,  $\text{г}\cdot\text{т}^{-1}$ ;  $\lambda_{237\text{Np}}$ ,  $\lambda_{241\text{Pu}}$ ,  $\lambda_{241\text{Am}}$  – постоянные распада  $^{237}\text{Np}$  и его предшественников,  $\text{с}^{-1}$ ;  $A_{237\text{Np}}$ ,  $A_{241\text{Pu}}$ ,  $A_{241\text{Am}}$  – атомные массы радионуклидов  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

Зависимости удельных активностей радионуклидов от времени выдержки на промежуточном и долговременном этапах рассчитываются по формуле

$$C_i(t) = \lambda_i \cdot k_i \cdot y_i(t), \quad (4)$$

где  $C_i$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида, Бк/г;  $k_i$  – переводной коэффициент для расчета удельной активности (Приложение № 5 к РБ-093-20), Бк/г; индекс  $i$  соответствует радионуклидам  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

Модель, описывающая изменения концентраций при радиоактивных превращениях  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в соответствии с уравнениями (1)–(4), включена в расчетный код CUB.

Верификация кода CUB проведена с помощью проверочных расчетов баланса масс  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  в трехзвенной цепочке радиоактивных распадов по формулам (1)–(3) и аналитического выражения для максимума концентрации  $^{241}\text{Am}$ . Рассчитанные начальные концентрации  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  для средней глубины выгорания 55,6 МВт·сут/т U, представленные в Электронном справочнике, на момент выгрузки ОТВС из активной зоны реактора ВВЭР-1200 составляют соответственно 1810, 73,4 и 839 г/т  $\text{UO}_2$ . Радиоактивный распад  $^{241}\text{Pu}$  приводит к росту концентрации его дочернего радионуклида  $^{241}\text{Am}$ , за счет чего максимальная концентрация  $^{241}\text{Am}$  достигается через 60 лет от момента извлечения  $n$ -й ОТВС из активной зоны и составляет 1680,0 г/т. Максимальная концентрация  $^{237}\text{Np}$  за счет радиоактивного распада материнского нуклида  $^{241}\text{Am}$  достигается примерно через 5 тыс. лет и составляет 2640,0 г/т  $\text{UO}_2$  (рис. 1).

В соответствии с реализованной в коде CUB моделью (уравнения (1)–(4)) выполнены расчеты динамики удельных активностей  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  с учетом «возраста» (продолжительности выдержки после извлечения из активной зоны реактора) каждой из 5294 ОТВС. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Анализ показал, что на промежуточном этапе основной вклад в активность вносит  $^{241}\text{Am}$ . После 5 тыс. лет выдержки доминирующий вклад будет вносить  $^{237}\text{Np}$ .

**Расчет характеристик потенциальной биологической опасности (радиотоксичности) отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС.** Радиотоксичность  $i$ -го радионуклида определяет массу воды, которая необходима для разбавления 1 т ядерного топлива с целью снижения активности  $i$ -го радионуклида до референтного уровня. Под указанным уровнем подразумевается

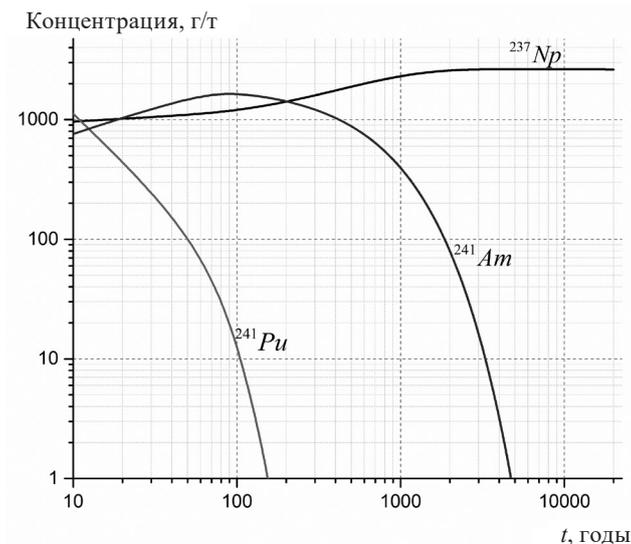


Рис 1. Зависимости концентраций  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  от времени выдержки отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС

Fig. 1.  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  dependencies of concentrations on the exposure time of the spent nuclear fuel of the Belarusian NPP

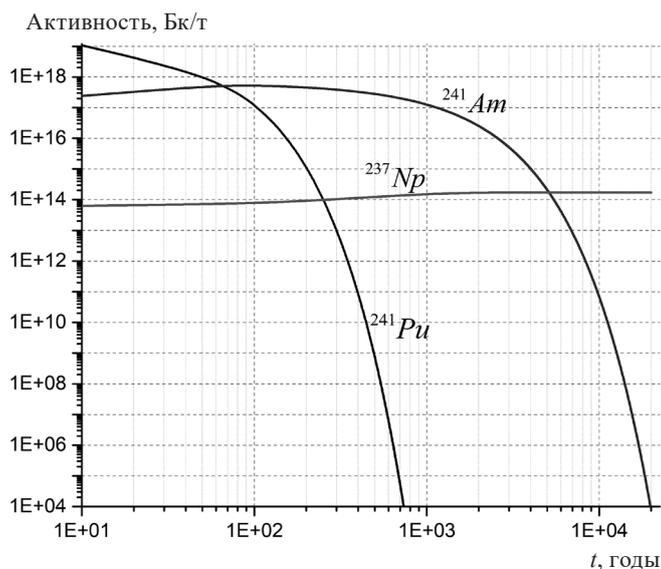


Рис 2. Зависимость удельных активностей  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  от времени выдержки отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС

Fig. 2.  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  dependencies of specific activities on the exposure time of the spent nuclear fuel of the Belarusian NPP

уровень радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия для населения. Данная величина представлена в Гигиеническом нормативе, утвержденном постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 213, и определяется по формуле

$$RT_{\text{вода}}^i = \frac{C_i}{\text{PY}_i}, \quad (5)$$

где  $RT_{\text{вода}}^i$  – радиотоксичность  $i$ -го нуклида по воде, кг/т;  $C_i$  – удельная активность  $i$ -го нуклида в ОЯТ, Бк/т;  $\text{PY}_i$  – референтный уровень содержания  $i$ -го радионуклида в питьевой воде для данного нуклида при поступлении с водой в организм человека, Бк/кг.

**Ранжирование вкладов продуктов деления и актинидов в радиотоксичность на этапах промежуточного и долговременного обращения с отработавшим ядерным топливом.** Первичными данными для расчетов радиотоксичности по воде служат данные по радионуклидному составу и удельной активности ядерного топлива, выгружаемого из реактора ВВЭР-1200, представленные в базе данных Электронного справочника, совместно со значениями референтных уровней содержания радионуклидов в питьевой воде. Значения радиотоксичности актинидов и продуктов деления (по воде) на промежуточном (100 лет) и долговременном (до 10 тыс. лет) этапах обращения рассчитывались кодом CUB с учетом особенностей радиоактивных превращений в двух- либо трехзвенных цепочках радиоактивных превращений, их периодов полураспадов, а также токсических свойств.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости характеристик радиотоксичности продуктов деления и актинидов от времени на этапах промежуточного и долговременного обращения (до 10 тыс. лет).

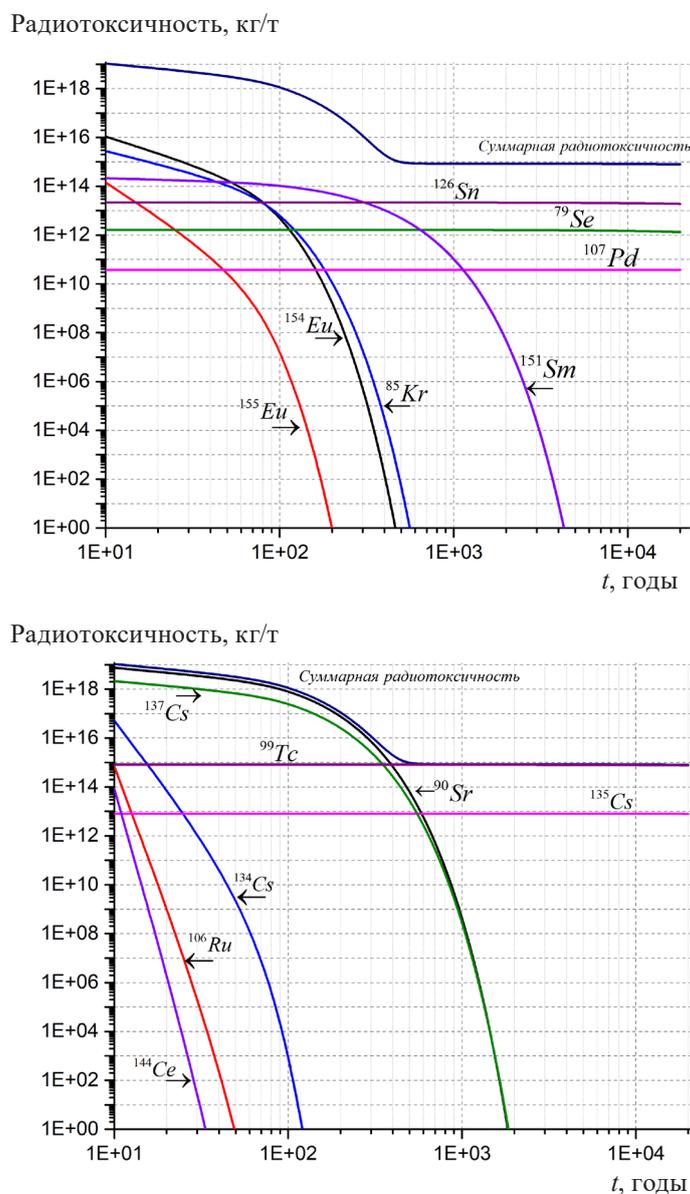


Рис. 3. Радиотоксичность по воде продуктов деления при длительном хранении 1 т отработавшего ядерного топлива реактора ВВЭР-1200 (обогащение по  $^{235}\text{U}$  4,81 %)

Fig. 3. Water radiotoxicity of fission products with long-term storage of 1 t of the spent nuclear fuel of the VVER-1200 reactor (enrichment by  $^{235}\text{U}$  4.81 %)

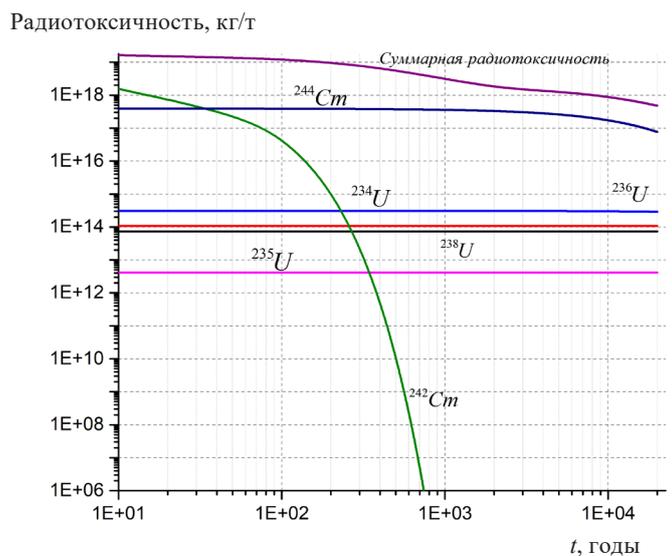
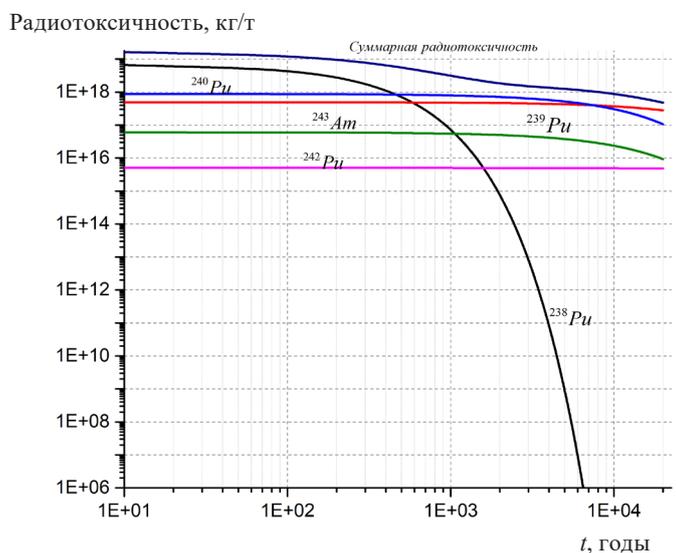
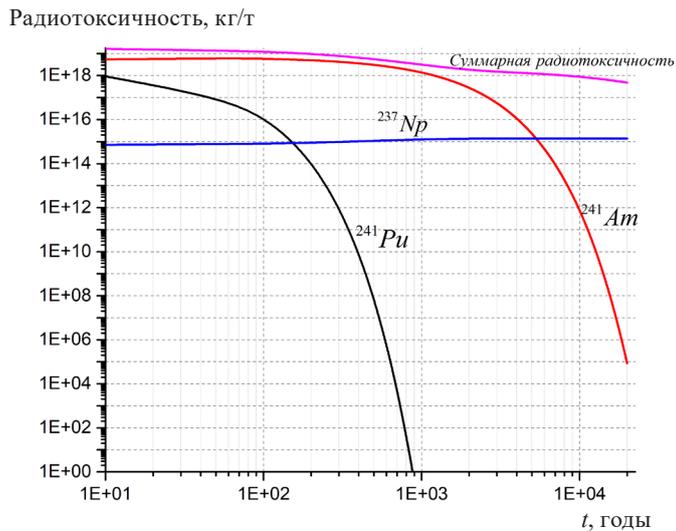


Рис. 4. Радиотоксичность по воде актинидов при длительном хранении 1 т отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1200 (обогащение по  $^{235}\text{U}$  4,81 %)

Fig. 4. Water radiotoxicity of actinides with long-term storage of 1 t of the spent nuclear fuel of the VVER-1200 (enrichment by  $^{235}\text{U}$  4.81 %)

Оценка суммарной радиотоксичности ОЯТ показала, что на этапе хранения до 100 лет данная величина обусловлена радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . При этом суммарная радиотоксичность продуктов деления определяется вкладом  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ . Радиотоксичность продуктов деления за 100 лет снижается на три порядка – от  $10^{18}$  до  $10^{15}$  кг/т. Преобладающий вклад в суммарную радиотоксичность актинидов на этапе до 100 лет вносят изотопы  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . Следует отметить, что в течение первых 10 лет хранения ОЯТ вклад  $^{241}\text{Pu}$  составляет 6 % от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность, вклад  $^{241}\text{Am}$  – 33 %, а  $^{237}\text{Np}$  – 0,005 %. К концу промежуточного этапа обращения с ОЯТ вклады  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  равны 0,07, 49 и 0,007 % соответственно от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность. При этом суммарная радиотоксичность актинидов по воде снижается на три порядка – от  $10^{19}$  до  $10^{16}$  кг/т.

Что касается  $^{241}\text{Am}$ , то через 5 тыс. лет его вклад в радиотоксичность снижается до 0,24 %, при этом вклад  $^{237}\text{Np}$  возрастет до 0,1 % от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность. Таким образом, на долговременном этапе обращения вклад  $^{237}\text{Np}$  в общую радиотоксичность увеличивается в 20 раз. В целом на этапе долговременного хранения до 10 тыс. лет вклад актинидов в суммарную радиотоксичность на два порядка превышает вклад продуктов деления.

**Заключение.** С использованием разработанной и реализованной в коде CUB модели проведены расчетные исследования динамики снижения характеристик радиотоксичности долгоживущих радионуклидов в зависимости от времени выдержки на промежуточном и долговременном этапах обращения с ОЯТ и/или ВАО переработки Белорусской АЭС. Модель формирования запасов активности и характеристик радиотоксичности ОЯТ учитывает «возраст» каждой из 5294 ОТВС, выгружаемой из активных зон реакторов блоков № 1 и 2 в течение проектного времени жизни 60 лет Белорусской АЭС. Модель учитывает также дополнительное накопление  $^{237}\text{Np}$  за счет распада материнского радионуклида  $^{241}\text{Am}$ , что в наибольшей степени проявляется на долговременном этапе обращения с ОЯТ.

Проведен сравнительный анализ характеристик радиотоксичности долгоживущих радионуклидов, который показал, что на долговременном этапе обращения (до 10 тыс. лет) основной вклад в потенциальную биологическую опасность ОЯТ определяют актиниды, радиотоксичность которых на три порядка выше, чем у продуктов деления. Расчетный анализ показал, что изотопы  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  – одни из тех актинидов, которые накапливаются в наибольших количествах в отработавшем ядерном топливе ядерного топливного цикла Белорусской АЭС, причем, вклад  $^{237}\text{Np}$  в общую радиотоксичность на долговременном этапе обращения увеличивается в 20 раз по сравнению с его содержанием на промежуточном этапе (до 100 лет).

Таким образом, показано, что на долговременном этапе потенциальная биологическая опасность всего ОЯТ без переработки и извлечения изотопов  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в значительной степени будет обуславливаться вкладом  $^{237}\text{Np}$ . Полученные результаты могут быть использованы для обоснования требований к фракционированию (извлечению  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) при переработке ОЯТ Белорусской АЭС для обеспечения долговременной безопасности при обращении с ВАО его переработки.

### Список использованных источников

1. 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. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 243–251. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>
2. Расчетные исследования радиотоксичности облученного топлива ВВЭР-1200 и запасов активности при долгосрочном обращении с ОЯТ Белорусской АЭС / Ю. А. Корчева [и др.] // Изв. Рос. акад. наук. Сер. физическая. – 2020. – Т. 84, № 10. – С. 1509–1513.
3. Analysis of potential hazard of the spent nuclear fuel at the intermediate and long-term stages of the nuclear fuel / J. A. Korchova [et al.] // Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of the 28<sup>th</sup> Anniversary Seminar NPCSS-2021, May 18–21, 2021, Minsk, Belarus. – Minsk, 2021. – Vol. 27. – P. 217–227.
4. Лопаткин, А. В. Условия достижения радиационной эквивалентности природного сырья и долгоживущих радиоактивных отходов в ядерной энергетике России / А. В. Лопаткин, И. В. Платонов, В. Е. Попов // Атом. энергия. – 2020. – Т. 129, вып. 4. – С. 194–199.

5. A Basic Toxicity classification of radionuclides. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1963. – 45 p. – (Technical Reports series; 15).

6. Верификация и использование комплекса математических программ для оценки запасов радиоактивности в обеспечении 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>

## References

1. 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 Natsyonal'noi 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>

2. Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Petrovskiy A. M. Computational Studies of the Radiotoxicity of Irradiated WWER-1200 Fuel and Its Loss of Activity during the Long-Term Treatment of Spent Nuclear Fuel from the Belarusian NPP. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, no. 10, pp. 1300–1303. <https://doi.org/10.3103/S1062873820100159>

3. Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Yatsko S. N. Analysis of potential hazard of the spent nuclear fuel at the intermediate and long-term stages of the nuclear fuel. *Nonlinear Dynamics and Applications: Proceeding of the 28<sup>th</sup> Anniversary Seminar NPC-2021, May 18–21, 2021, Minsk Belarus*. Minsk, 2021, vol. 27, pp. 217–227.

4. Lopatkin A. V., Platonov I. V., Popov V. E. Conditions for Reaching Radiation Equivalence of Native Raw Materials and Long-Lived Radioactive Waste in Nuclear Energy in Russia. *Atomic Energy*, 2020, vol. 129, iss. 4, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00732-9>

5. *A Basic Toxicity classification of radionuclides. Technical reports series no. 15*. Vienna, IAEA, 1963. 45 p.

6. 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-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with WWER: Reports of the 6<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Podol'sk, 2009. Available at: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf> (in Russian).

## Информация об авторах

*Горбачева Наталья Владимировна* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: [harbachova.nv@sosny.bas-net.by](mailto:harbachova.nv@sosny.bas-net.by)

*Корчева Юлия Александровна* – научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: [julia.korchova@sosny.bas-net.by](mailto:julia.korchova@sosny.bas-net.by)

*Кузьмина Наталья Дмитриевна* – старший научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: [ndkuzmina@sosny.bas-net.by](mailto:ndkuzmina@sosny.bas-net.by)

*Кулич Николай Васильевич* – старший научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования

## Information about the authors

*Natalia V. Harbachova* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, 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: [harbachova.nv@sosny.bas-net.by](mailto:harbachova.nv@sosny.bas-net.by)

*Julia A. Korchova* – Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, 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: [julia.korchova@sosny.bas-net.by](mailto:julia.korchova@sosny.bas-net.by)

*Natalia D. Kuzmina* – Senior Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, 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: [ndkuzmina@sosny.bas-net.by](mailto:ndkuzmina@sosny.bas-net.by)

*Nikolai V. Kulich* – Senior Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, 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: [2993826@mail.ru](mailto:2993826@mail.ru)

атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: 2993826@mail.ru

*Яцко Светлана Николаевна* – старший научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: snyacko@sosny.bas-net.by

*Svetlana N. Yacko* – Senior Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, 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: snyacko@sosny.bas-net.by