

УДК 621.039.743

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТОКСИЧНОСТИ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА ВВЭР-1200 И ЗАПАСОВ АКТИВНОСТИ ПРИ ДОЛГОСРОЧНОМ ОБРАЩЕНИИ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

© 2020 г. Ю. А. Корчева<sup>1</sup> \*, Н. В. Горбачева<sup>1</sup>, Н. Д. Кузьмина<sup>1</sup>,  
Н. В. Кулич<sup>1</sup>, А. М. Петровский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение “Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны”  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

\*E-mail: julia.korchova@sosny.bas-net.by

Поступила в редакцию 11.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Представлены результаты расчетов активностей продуктов деления и актинидов для средней глубины выгорания топлива Белорусской АЭС ( $55.6 \text{ МВт} \cdot \text{сут} \cdot \text{т}^{-1} \text{ У}$ ). Получены темпы снижения суммарной активности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в зависимости от времени выдержки. На основании проведенных расчетных исследований характеристик радиотоксичности ОЯТ ВВЭР-1200 определены перечни радиационно-опасных радионуклидов, определяющих потенциальную опасность на различных фазах обращения с ОЯТ Белорусской АЭС. Полученные результаты имеют значение для принятия решений по экологически приемлемому варианту обращения с отработавшим ядерным топливом, представленные в Стратегии обращения с ОЯТ Белорусской АЭС.

DOI: 10.31857/S0367676520100154

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Республике Беларусь завершается этап сооружения Белорусской АЭС и идет подготовка к вводу ее в эксплуатацию в составе двух энергоблоков АЭС-2006 с ВВЭР-1200. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны с участием АО “Техснабэкспорт”, как базового отраслевого центра российских технологий по обращению с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), разработал Проект Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС (далее – Проект Стратегии), отражающий национальную политику в этой области. В соответствии с Законом Республики Беларусь “О государственной экологической экспертизе, стратегической экологической оценке и оценке воздействия на окружающую среду” [1] эксплуатирующей организацией проведена процедура по стратегической экологической оценке (далее – СЭО) Проекта Стратегии. Важным элементом процедуры по СЭО для обоснования экологически приемлемого варианта обращения с ОЯТ Белорусской АЭС стали разработка Экологического доклада по СЭО Проекта Стратегии и его обсуждение с общественностью.

Принимая во внимание современную мировую практику обращения с ОЯТ атомных электростан-

ций, вариантами Проекта Стратегии предусматриваются следующие основные фазы [2, 3]:

- промежуточное хранение ОЯТ после выгрузки его из приреакторных бассейнов выдержки до отправки на переработку;
- переработка ОЯТ на предприятиях Российской Федерации;
- возврат и хранение продуктов переработки ОЯТ с учетом принципа радиационного эквивалента;
- захоронение продуктов переработки ОЯТ на территории Республики Беларусь.

По предварительным данным на Белорусской АЭС будет реализован четырехгодичный топливный цикл с одной перегрузкой в 12 мес, средняя расчетная глубина выгорания тепловыделяющих сборок (далее – ТВС) в установившемся режиме перегрузок ядерного топлива равна  $55.6 \text{ МВт} \cdot \text{сут} \cdot \text{т}^{-1} \text{ У}$ . Общее количество ТВС с различной степенью обогащения, включая топливо нового типа обогащением 4.95% по  $^{235}\text{U}$ , выгружаемых за 60 лет эксплуатации двух энергоблоков Белорусской АЭС, составит ориентировочно  $N_{\text{tot}} = 5300$  единиц, общая масса достигнет  $M_{\text{tot}} = 2500 \text{ т}$  [3].

Целью настоящей работы являются прогнозные исследования запасов активности и характеристик радиотоксичности ОЯТ в объектах хранения и захоронения при долговременном обращении 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 отработавших тепловыделяющих сборок (далее – 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 [4]. 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  $r$  – 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 актиноидов для всей массы  $M_{\text{от}}$  ОЯТ в момент  $t = t_p$  определяется по следующей формуле:

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

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. С

помощью процедур Монте-Карло, реализованных в разработанном для этих целей программном средстве имитационного моделирования CUB [5], реальная последовательность моментов выгрузки ОТВС моделируется равномерной выборкой случайных значений на интервале  $[t_A, t_B]$ . С помощью уравнения (1) строится выборка случайных значений активности  $A(\theta_n)$ . Размер выборки принимает значение  $N$ , равное суммарному числу ОТВС, разработанных на энергоблоках № 1 и 2 Белорусской АЭС за прогнозный срок эксплуатации.

### ОЦЕНКА ЗАПАСОВ АКТИВНОСТИ НА РАЗНЫХ ФАЗАХ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

В качестве исходных данных использованы методические материалы документа РБ-093-14 “Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных” по удельным активностям продуктов деления и актиноидов в ОТВС с начальным обогащением 4.81% по  $^{235}\text{U}$  в зависимости от глубины выгорания в реакторе ВВЭР-1000 [6]. Для проведения расчетных исследований авторами подготовлены базы данных в среде Microsoft Excel по активностям продуктов деления и актиноидов (в расчете на 1 ОТВС) для топлива с начальным обогащением 4.81% и средней глубиной выгорания топлива Белорусской АЭС (табл. 1). Оцененная неопределенность результатов расчета концентраций (удельных активностей) актиноидов и продуктов деления при использовании аппроксимирующей зависимости лежит в диапазоне 1–64% [6], что коррелирует с неопределенностью оценки глубины выгорания топлива в ТВС расчетным либо экспериментальным методами. Выполненный авторами с помощью программного средства Serpent [7] численный расчет удельных активностей продуктов деления и актиноидов для топлива с начальным обогащением 4.95% и выгоранием 55.6 МВт · сут · кг<sup>-1</sup> U показал, что отличие от данных, представленных в табл. 1, составляет 7–15% [8], что для целей данной работы является вполне приемлемым.

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 [5]. Результаты оценки суммарной активности продуктов деления и актиноидов 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 медлен-

**Таблица 1.** Результаты расчета активностей продуктов деления и актинидов для средней глубины выгорания 55.6 МВт · сут · т<sup>-1</sup> U в ТВС с обогащением 4.81%

Радионуклид	Активность на 1 ТВС, Бк · ТВС <sup>-1</sup>	T <sub>1/2</sub> , с	Радионуклид	Активность на 1 ТВС, Бк · ТВС <sup>-1</sup>	T <sub>1/2</sub> , с
<sup>144</sup> Ce	2.53 · 10 <sup>16</sup>	2.46 · 10 <sup>07</sup>	<sup>93</sup> Zr	3.19 · 10 <sup>10</sup>	4.83 · 10 <sup>13</sup>
<sup>134</sup> Cs	4.73 · 10 <sup>15</sup>	6.51 · 10 <sup>07</sup>	<sup>125m</sup> Te	4.11 · 10 <sup>13</sup>	5.01 · 10 <sup>06</sup>
<sup>135</sup> Cs	1.17 · 10 <sup>10</sup>	7.26 · 10 <sup>13</sup>	<sup>237</sup> Np	1.63 · 10 <sup>10</sup>	6.75 · 10 <sup>13</sup>
<sup>137</sup> Cs	2.83 · 10 <sup>15</sup>	9.47 · 10 <sup>08</sup>	<sup>238</sup> Pu	1.79 · 10 <sup>14</sup>	2.77 · 10 <sup>09</sup>
<sup>154</sup> Eu	2.16 · 10 <sup>14</sup>	2.71 · 10 <sup>08</sup>	<sup>239</sup> Pu	1.04 · 10 <sup>13</sup>	7.61 · 10 <sup>11</sup>
<sup>155</sup> Eu	8.97 · 10 <sup>13</sup>	1.48 · 10 <sup>08</sup>	<sup>240</sup> Pu	1.87 · 10 <sup>13</sup>	2.07 · 10 <sup>11</sup>
<sup>3</sup> H	3.37 · 10 <sup>11</sup>	3.89 · 10 <sup>08</sup>	<sup>241</sup> Pu	5.22 · 10 <sup>15</sup>	4.53 · 10 <sup>08</sup>
<sup>85</sup> Kr	1.57 · 10 <sup>14</sup>	3.38 · 10 <sup>08</sup>	<sup>242</sup> Pu	1.10 · 10 <sup>11</sup>	1.18 · 10 <sup>13</sup>
<sup>107</sup> Pd	2.41 · 10 <sup>09</sup>	2.05 · 10 <sup>14</sup>	<sup>234</sup> U	3.31 · 10 <sup>10</sup>	7.75 · 10 <sup>12</sup>
<sup>106</sup> Ru	1.01 · 10 <sup>16</sup>	3.21 · 10 <sup>07</sup>	<sup>235</sup> U	4.64 · 10 <sup>08</sup>	2.22 · 10 <sup>16</sup>
<sup>125</sup> Sb	1.86 · 10 <sup>14</sup>	8.61 · 10 <sup>07</sup>	<sup>236</sup> U	1.19 · 10 <sup>10</sup>	7.39 · 10 <sup>14</sup>
<sup>79</sup> Se	9.87 · 10 <sup>09</sup>	1.04 · 10 <sup>12</sup>	<sup>238</sup> U	8.48 · 10 <sup>09</sup>	1.41 · 10 <sup>17</sup>
<sup>151</sup> Sm	9.77 · 10 <sup>12</sup>	2.84 · 10 <sup>09</sup>	<sup>241</sup> Am	7.00 · 10 <sup>12</sup>	1.37 · 10 <sup>10</sup>
<sup>121m</sup> Sn	3.03 · 10 <sup>11</sup>	1.74 · 10 <sup>09</sup>	<sup>243</sup> Am	1.60 · 10 <sup>12</sup>	2.33 · 10 <sup>11</sup>
<sup>126</sup> Sn	1.30 · 10 <sup>10</sup>	3.15 · 10 <sup>12</sup>	<sup>242</sup> Cm	2.29 · 10 <sup>15</sup>	1.41 · 10 <sup>07</sup>
<sup>90</sup> Sr	1.31 · 10 <sup>15</sup>	8.88 · 10 <sup>08</sup>	<sup>244</sup> Cm	2.81 · 10 <sup>14</sup>	5.41 · 10 <sup>08</sup>
<sup>99</sup> Tc	2.56 · 10 <sup>11</sup>	6.66 · 10 <sup>12</sup>	<sup>245</sup> Cm	1.00 · 10 <sup>13</sup>	2.68 · 10 <sup>11</sup>

но и через 1000 лет достигает уровня порядка  $1.77 \cdot 10^{17}$  Бк. Оцененная суммарная активность ОЯТ после выдержки 10 000 лет составит величину  $3.88 \cdot 10^{16}$  Бк.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТОКСИЧНОСТИ ОЯТ ВВЭР-1200

Для оценки потенциальной опасности ОЯТ Белорусской АЭС на различных фазах обращения наряду с радиационными характеристиками, важно располагать сведениями по характеристикам радиотоксичности радионуклидов на различных временных фазах обращения [9, 10]. В Республике Беларусь для целей нормирования поступления радионуклидов в организм человека пероральным путем нормативно установлены уровни вмешательства по воде [11]. По определению радиотоксичность радионуклида по воде определяет объем воды, который необходим для разбавления активности *i*-го радионуклида, содержащегося в 1 т уранового топлива, для снижения до приемлемого уровня.

После выдержки в приреакторе бассейне облученное топливо перемещается на хранение в промежуточное хранилище ОЯТ на срок не менее 50 лет, после которого, вследствие радиоактивного распада продуктов деления, радиационные ха-

рактеристики ОЯТ снижаются до уровней, допускающих дальнейшее обращение на установках по переработке.

На рис. 1, 2 представлены темпы снижения радиотоксичности продуктов деления и актинидов на этапах хранения от 10 до 10000 лет при долговременном хранении ОЯТ. Расчеты выполнены на основании данных, представленных в табл. 1.

На этапе промежуточного хранения топлива со средним выгоранием  $55.6 \text{ МВт} \cdot \text{сут} \cdot \text{т}^{-1}$  U радиотоксичность по воде определяется вкладом

**Таблица 2.** Результаты расчетов темпов снижения суммарной активности ОЯТ в зависимости от времени выдержки

Время выдержки, годы	Суммарная активность радионуклидов, Бк
100	$4.87 \cdot 10^{18}$
200	$9.75 \cdot 10^{17}$
500	$3.50 \cdot 10^{17}$
1000	$1.77 \cdot 10^{17}$
5000	$5.44 \cdot 10^{16}$
10000	$3.88 \cdot 10^{16}$

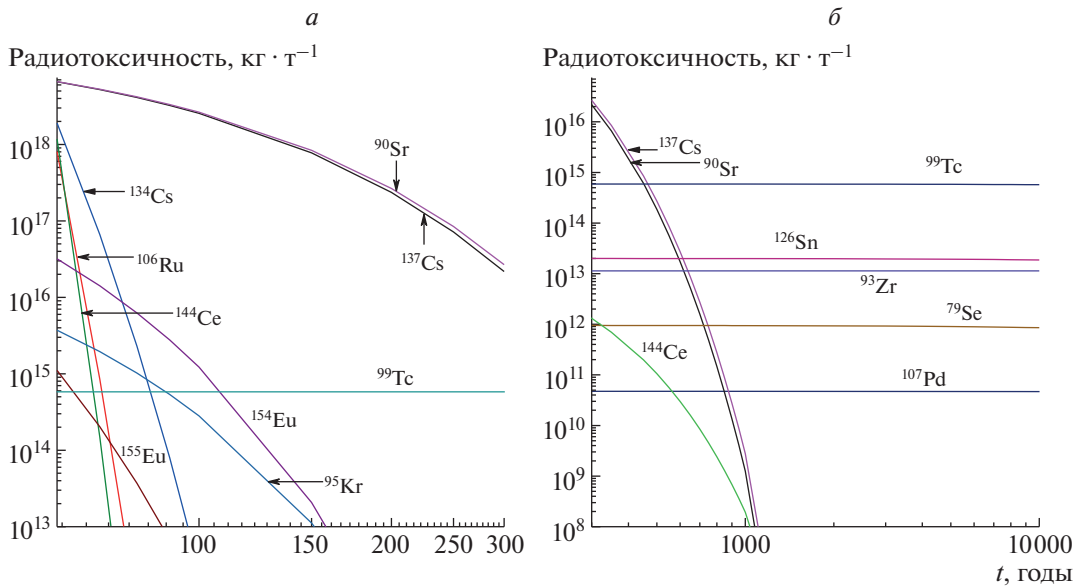


Рис. 1. Радиотоксичность ПД по воде с момента выгрузки: а – до 300 лет; б – с 300 лет до 10 тысяч лет.

продуктов деления  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ . Радиотоксичность по воде продуктов деления за 100 лет снижается от  $10^{18}$  до  $10^{15}$   $\text{кг} \cdot \text{т}^{-1}$ . Преобладающий вклад в суммарную радиотоксичность ОЯТ на временном этапе до 100 лет вносят изотопы актиноидов  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Cm}$  и  $^{244}\text{Cm}$ . Наблюдается рост удельной активности и, соответственно, радиотоксичности  $^{241}\text{Am}$ , что связано с его накоплением за счет распада ма-

теринского нуклида  $^{241}\text{Pu}$ . Радиотоксичность актиноидов по воде снижается от  $10^{19}$  до  $10^{17}$   $\text{кг} \cdot \text{т}^{-1}$ , что на два порядка превышает вклад в суммарную радиотоксичность продуктов деления. Оценка вкладов в суммарную радиотоксичность по воде ОЯТ показала, что на этапе хранения до 100 лет основной вклад дают радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ , а также  $^{241}\text{Am}$ .

На этапе долговременного хранения ОЯТ от 1000 до 10 тыс. лет потенциальная опасность определяется основными долгоживущими продуктами деления и актиноидами, из которых основной вклад в радиотоксичность топлива вносит  $^{99}\text{Tc}$ , и в меньшей степени  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  и  $^{243}\text{Am}$ . Радиотоксичность по воде продуктов деления снижается до  $10^{13}$   $\text{кг} \cdot \text{т}^{-1}$ . Радиотоксичность актиноидов по воде снижается до  $10^{15}$   $\text{кг} \cdot \text{т}^{-1}$ . В целом, вклад актиноидов на два порядка превышает вклад в суммарную радиотоксичность продуктов деления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная вероятностная модель, реализованная в виде программного средства СUB, обеспечивает прогнозирование запасов активности ОЯТ по перечню наиболее опасных продуктов деления и актиноидов на разных фазах обращения с ОЯТ АЭС с ВВЭР-1200.

Результаты моделирования показали, что вследствие радиоактивного распада продуктов деления на этапе хранения в промежуточном хранилище ОЯТ (в течение 100 лет) суммарная

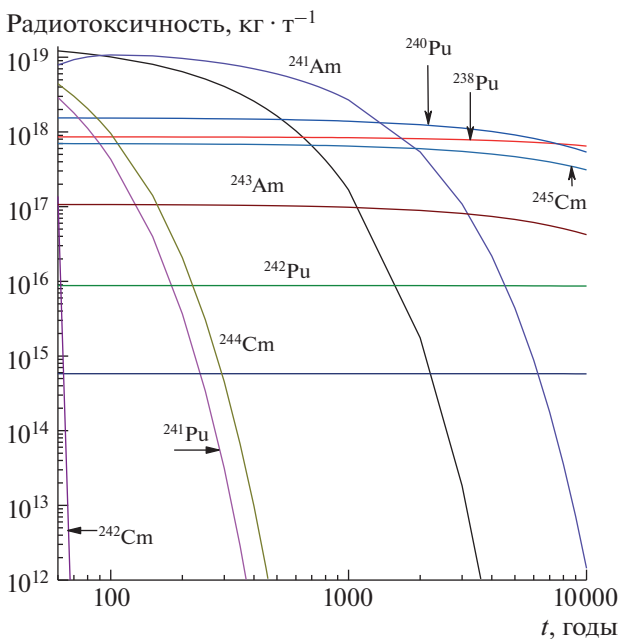


Рис. 2. Радиотоксичность актиноидов по воде.

активность ОЯТ Белорусской АЭС снижается до уровня  $4.87 \cdot 10^{18}$  Бк. На этапе длительного хранения суммарная активность не превышает  $10^{16}$  Бк.

На основании проведенных расчетных исследований характеристик радиотоксичности ОЯТ ВВЭР-1200 определены перечни радиационно-опасных радионуклидов, определяющих потенциальную опасность на различных фазах обращения с ОЯТ Белорусской АЭС.

Результаты исследований могут быть использованы в поддержку обоснования экологически приемлемого варианта обращения с ОЯТ Белорусской АЭС. Надежность оценок может быть повышена при получении детальных сведений по характеристикам ядерного топливного цикла Белорусской АЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [https://kodeksy-by.com/zakon\\_rb\\_o\\_gosudarstvennoj\\_ekologicheskoy\\_ekspertize.htm](https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_gosudarstvennoj_ekologicheskoy_ekspertize.htm).
2. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. IAEA nuclear energy series № NW-T-1.14. Vienna, 2018.
3. Экологический доклад по стратегической экологической оценке проекта Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской атомной электростанции. Минск, 2018.
4. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М.: Наука, 1972. С. 552.
5. *Горбачева Н.В.* // Докл. 6-й Межд. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР" (Москва, 2009). С. 020.
6. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных РБ-093-14 // ЯРБ. 2014. № 4(74). С. 49.
7. *Leppanen J.* Serpent, continuous-energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code. VTT technical research center of Finland, 2013.
8. *Petrovskii A.M., Rudak E.A., Korbut T.N., Kravchenko M.O.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1133. Art № 012009.
9. A basic toxicity classification of radionuclides. Technical reports series № 15. Vienna: IAEA, 1963. P. 39.
10. *Korchova J.A., Harbachova N.V., Kuzmina N.D.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1133. Art № 012025.
11. Критерии оценки радиационного воздействия: гигиенический норматив. Нац. реестр правовых актов РБ. 8/26850, 2013.