

УДК 621.039.736

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Кащеев В.А., Черников М.А., Шадрин А.Ю. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)  
e-mail: mchernikov@yandex.ru

При изготовлении смешанного уран-плутониевого ядерного топлива на предприятиях образуются радиоактивные отходы. Их изотопный состав близок к изотопному составу производимого топлива, однако при изготовлении смешанного оксидного или нитридного топлива в отходах может содержаться  $^{241}\text{Am}$ , который образуется в результате  $\beta$ -распада относительно короткоживущего  $^{241}\text{Pu}$ .

В настоящей статье определен класс образующихся радиоактивных отходов и проведена оценка затрат на передачу отходов на захоронение Национальному оператору (без учета стоимости хранения на площадке), так как указанная характеристика является существенной для экономики производства.

**Критерии отнесения жидких растворов, содержащих уран и плутоний, к радиоактивным отходам.** В соответствии с нормативной документацией [1, 2] твердые и жидкие отходы классифицируются как радиоактивные, если сумма отношений удельной активности радионуклидов в отходах к их максимальным значениям превышает 1 (табл. 1).

Таблица 1. Максимальная удельная активность радионуклидов в материалах, при превышении которой отходы классифицируются как радиоактивные [1]

| Изотоп            | Период полураспада, лет | Тип распада | Максимальная удельная активность, Бк/кг среды |               |
|-------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------------------|---------------|
|                   |                         |             | Твердые отходы                                | Жидкие отходы |
| $^{232}\text{U}$  | 72                      | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 42            |
| $^{234}\text{U}$  | $2,44 \cdot 10^5$       | $\alpha$    | $1 \cdot 10^4$                                | 280           |
| $^{235}\text{U}$  | $7,04 \cdot 10^8$       | $\alpha$    | $1 \cdot 10^4$                                | 290           |
| $^{237}\text{U}$  | 6,75                    | $\beta$     | $1 \cdot 10^5$                                | 18 000        |
| $^{238}\text{U}$  | $4,47 \cdot 10^9$       | $\alpha$    | $1 \cdot 10^4$                                | 300           |
| $^{237}\text{Np}$ | $2,14 \cdot 10^6$       | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 130           |
| $^{236}\text{Pu}$ | 2,86                    | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 160           |
| $^{238}\text{Pu}$ | 87,7                    | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 60            |
| $^{239}\text{Pu}$ | $2,41 \cdot 10^4$       | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 55            |
| $^{240}\text{Pu}$ | 6540                    | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 55            |
| $^{241}\text{Pu}$ | 14,4                    | $\beta$     | $1 \cdot 10^5$                                | 2900          |
| $^{242}\text{Pu}$ | $3,76 \cdot 10^5$       | $\alpha$    | $1 \cdot 10^3$                                | 57            |

Определим содержание урана и плутония в жидких растворах, при которых они классифицируются как радиоактивные отходы.

**Критерии отнесения к радиоактивным отходам урана и плутония от производства нитридного топлива стартовой загрузки.** При производстве топлива стартовой загрузки не используются рециклированные уран, плутоний и нептуний (табл. 2). Урановая составляющая топлива состоит из обедненного урана. Изотопы плутония плутониевой составляющей можно разделить на две группы: относительно долгоживущие  $\alpha$ -излучающие изотопы плутония ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ), которые обозначим  $\alpha\text{Pu}$ , и относительно короткоживущий  $\beta$ -излучающий изотоп  $^{241}\text{Pu}$ , который обозначим  $\beta\text{Pu}$ .

Таблица 2. Примерный изотопный состав урана и плутония в нитридном топливе стартовой загрузки [3]

| Изотоп                    | Доля                | Удельная активность  |                      |
|---------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                           |                     | Бк/г изотопа         | Бк/г                 |
| $^{234}\text{U}$          | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $2,31 \cdot 10^8$    | $3,7 \cdot 10^3$     |
| $^{235}\text{U}$          | $2 \cdot 10^{-3}$   | $8 \cdot 10^4$       | $1,6 \cdot 10^4$     |
| $^{238}\text{U}$          | 0,998               | $1,25 \cdot 10^4$    | $1,25 \cdot 10^2$    |
| $\square \text{U}$        | 1                   | —                    | $1,64 \cdot 10^4$    |
| $^{238}\text{Pu}$         | 0,012               | $6,34 \cdot 10^{11}$ | $7,61 \cdot 10^9$    |
| $^{239}\text{Pu}$         | 0,682               | $2,29 \cdot 10^9$    | $1,58 \cdot 10^9$    |
| $^{240}\text{Pu}$         | 0,233               | $8,44 \cdot 10^9$    | $1,96 \cdot 10^9$    |
| $^{242}\text{Pu}$         | 0,042               | $1,41 \cdot 10^8$    | $5,92 \cdot 10^6$    |
| $\square \alpha\text{Pu}$ | 0,969               | —                    | $1,12 \cdot 10^{10}$ |
| $^{241}\text{Pu}$         | 0,031               | $3,81 \cdot 10^{12}$ | $1,18 \cdot 10^{11}$ |
| $\square \beta\text{Pu}$  | 0,031               | —                    | $1,18 \cdot 10^{11}$ |
| $\square \text{Pu}$       | 1                   | —                    | $1,29 \cdot 10^{11}$ |

Формула для определения максимальной концентрации элемента в жидкой или твердой среде, при превышении которой среда классифицируется как радиоактивный отход, имеет вид

$$\Omega \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{B_i} = 1, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — максимальная концентрация элемента, измеряемая в граммах на килограмм вмещаю-

щей среды, при превышении которой отходы, содержащие указанный элемент, классифицируются как радиоактивные; индекс  $i$  — изотоп выбранного элемента;  $N$  — количество изотопов элемента;  $A_i$  — удельная активность изотопа, Бк/г элемента;  $B_i$  — максимально допустимая удельная активность изотопа, Бк/кг вмещающей среды (твердой или жидкой).

Анализируя табл. 2 и используя формулу (1), можно сделать вывод, что жидкие отходы, образующиеся при производстве нитридного топлива стартовой загрузки, следует классифицировать как радиоактивные при содержании в них урана свыше 18 мг/кг, что эквивалентно 295 Бк/кг раствора или плутония свыше 0,0043 мкг/кг, что эквивалентно 552 Бк/кг раствора, из которых 505 Бк/кг (91,5%) —  $\beta$ -активность короткоживущего изотопа  $^{241}\text{Pu}$ .

Для твердых продуктов, классифицируемых как твердые радиоактивные отходы, концентрация урана или плутония должна превышать 0,61 г/кг или 0,08 мкг/кг твердой матрицы соответственно. Такая концентрация урана и плутония соответствует удельной активности матрицы  $10^4$  Бк/кг каждая. Твердые продукты, которые содержат уран и плутоний с изотопным составом, приведенным в табл. 2, не являются радиоактивными отходами, если их суммарная активность не превышает  $10^4$  Бк/кг.

**Критерии отнесения к радиоактивным отходам рециклированных урана, плутония и нептуния, использующихся при изготовлении нитридного топлива.** Нитридное топливо может быть изготовлено с использованием рециклированных урана, плутония и нептуния, образующихся при переработке отработавшего нитридного топлива. В этом случае, кроме урана и плутония, изотопный состав которых будет отличаться от приведенного в табл. 2, в составе топлива будет содержаться  $^{237}\text{Np}$ . Проанализируем расчетный изотопный состав нитридного топлива, соответствующий 10-й последовательной загрузке в реакторную установку топлива, изготовленного из рециклированных продуктов отработавшего топлива предыдущей загрузки.

Из табл. 3 следует, что жидкие отходы, содержащие рециклированные уран, плутоний или нептуний, следует классифицировать как радиоактивные при содержании в них урана свыше 2,4 мг/кг (1,3 кБк/кг раствора), плутония свыше

Таблица 3. Изотопный состав урановой, плутониевой и нептуниевой составляющих нитридного топлива 10-й загрузки, изготовленного из рециклированных продуктов [3]

| Изотоп                    | Доля                  | Удельная активность  |                      |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
|                           |                       | Бк/г изотопа         | Бк/г                 |
| $^{232}\text{U}$          | $1,41 \cdot 10^{-8}$  | $7,93 \cdot 10^{11}$ | $1,12 \cdot 10^3$    |
| $^{234}\text{U}$          | $2,13 \cdot 10^{-4}$  | $2,31 \cdot 10^8$    | $4,91 \cdot 10^4$    |
| $^{235}\text{U}$          | $5,18 \cdot 10^{-4}$  | $8 \cdot 10^4$       | 41,5                 |
| $^{238}\text{U}$          | 0,99927               | $1,25 \cdot 10^4$    | $1,25 \cdot 10^4$    |
| $\square \alpha\text{U}$  | 1                     | —                    | $6,27 \cdot 10^4$    |
| $^{237}\text{U}$          | $1,55 \cdot 10^{-10}$ | $3,02 \cdot 10^{15}$ | $4,69 \cdot 10^5$    |
| $\square \beta\text{U}$   | $1,55 \cdot 10^{-10}$ | —                    | $4,69 \cdot 10^5$    |
| $\square \text{U}$        | 1                     | —                    | $5,32 \cdot 10^5$    |
| $^{236}\text{Pu}$         | $1,73 \cdot 10^{-8}$  | $1,96 \cdot 10^{13}$ | $3,40 \cdot 10^5$    |
| $^{238}\text{Pu}$         | $5,6 \cdot 10^{-3}$   | $6,34 \cdot 10^{11}$ | $3,55 \cdot 10^9$    |
| $^{239}\text{Pu}$         | 0,668                 | $2,29 \cdot 10^9$    | $1,53 \cdot 10^9$    |
| $^{240}\text{Pu}$         | 0,273                 | $8,44 \cdot 10^9$    | $2,30 \cdot 10^9$    |
| $^{242}\text{Pu}$         | $2,19 \cdot 10^{-2}$  | $1,41 \cdot 10^8$    | $3,09 \cdot 10^6$    |
| $\square \alpha\text{Pu}$ | 0,968                 | —                    | $7,38 \cdot 10^9$    |
| $^{241}\text{Pu}$         | $3,16 \cdot 10^{-2}$  | $3,81 \cdot 10^{12}$ | $1,2 \cdot 10^{11}$  |
| $\square \beta\text{Pu}$  | 0,0316                | —                    | $1,2 \cdot 10^{11}$  |
| $\square \text{Pu}$       | 1                     | —                    | $1,27 \cdot 10^{11}$ |
| $^{237}\text{Np}$         | 1                     | —                    | $2,61 \cdot 10^7$    |

0,0058 мкг/кг (740 Бк/кг раствора) и нептуния свыше 5 мкг/кг (130 Бк/кг раствора). Твердые продукты классифицируются как твердые радиоактивные отходы, если концентрация урана превышает 84 мг на 1 кг твердой матрицы (44 кБк/кг), или концентрация плутония превышает 0,08 мкг/кг (10 кБк/кг), или концентрация нептуния выше 38 мг/кг твердой матрицы (1 кБк/кг).

**Классификация конечных форм радиоактивных отходов, образующихся при производстве нитридного топлива.** Изотопный состав жидких радиоактивных отходов, образующихся при производстве нитридного топлива, и состав их конечных форм — твердых радиоактивных отходов, образующихся в результате отверждения, представлен  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающими элементами (изотопы урана) и трансурановыми элементами (изотопы плутония и нептуния). Классификация таких отходов представлена в нормативной документации [1] (раздел «классификация удаляемых РАО»).

Пользуясь приведенной классификацией (табл. 4) и применяя формулу (1), где в качестве  $B_i$  принимается максимальная удельная ак-

Таблица 4. Классификация и требования к условиям захоронения твердых радиоактивных отходов, содержащих  $\alpha$ -,  $\beta$ -излучающие и трансурановые элементы [1]

| Класс<br>отходов | Удельная активность, Бк/кг                      |                       |                                                 |                    |                        |                    | Способ захоронения                                                          |
|------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|                  | β-излучающие (кроме<br>трансурановых элементов) |                       | α-излучающие (кроме<br>трансурановых элементов) |                    | трансурановые элементы |                    |                                                                             |
|                  | $T_{1/2}$                                       |                       | $T_{1/2}$                                       |                    | $T_{1/2}$              |                    |                                                                             |
|                  | <31 года                                        | >31 года              | <31 года                                        | >31 года           | <31 года               | >31 года           |                                                                             |
| 1-й              | $>10^{10}$                                      | $>10^{10}$            | $>10^9$                                         | $>10^9$            | $>10^8$                | $>10^8$            | Глубинные геологические<br>формации (после прекра-<br>щения тепловыделения) |
| 2-й              | $>10^{10}$                                      | $10^7\text{—}10^{10}$ | $>10^9$                                         | $10^6\text{—}10^9$ | $>10^8$                | $10^5\text{—}10^8$ | Глубинные геологические<br>формации                                         |
| 3-й              | $10^7\text{—}10^{10}$                           | $10^6\text{—}10^7$    | $10^6\text{—}10^9$                              | $10^5\text{—}10^6$ | $10^5\text{—}10^8$     | $10^4\text{—}10^5$ | Пункты захоронения на<br>глубине до 100 м                                   |
| 4-й              | $<10^7$                                         | $<10^6$               | $<10^6$                                         | $<10^5$            | $<10^5$                | $<10^4$            | Пункты захоронения на<br>поверхности земли                                  |

тивность изотопа для выбранного класса твердых отходов, можно определить диапазон концентрации урана, плутония и нептуния в отвержденных жидких радиоактивных отходах, соответствующий различным классам отходов (табл. 5). Учитывая, что жидкие отходы предполагается отверждать методом цементирования, при котором из 1 л жидкого раствора образуется примерно 2,3 кг цементной матрицы, можно оценить диапазон концентрации урана, плутония и нептуния в исходных жидких отходах, которые будут соответствовать определенным классам конечных форм радиоактивных отходов. Анализ табл. 5 показывает, что использование рециклируемых ядерных материалов приводит при классификации образующихся радиоактивных отходов к существенному ужесточению ограничений на концентрацию урана, в основном, за счет наработки при последовательном рециклировании  $^{234}\text{U}$ , к смягчению, хотя и несущественному, ограничений на концентрацию плутония, что связано с уменьшением при рециклировании доли  $^{238}\text{Pu}$ .

При одновременном содержании в растворе изотопов урана, плутония и нептуния концентрацией  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (г/л) оценим класс твердых радиоактивных отходов, образующихся при отверждении загрязненных растворов, по следующим соотношениям:

для жидких отходов изотопного состава, соответствующего стартовой загрузке смешанного нитридного топлива (без рециклирования ядерных материалов):

$$\begin{aligned} (Y/1,8 \cdot 10^{-3}) > 1 & \text{ — 1-й класс;} \\ (Y/1,8 \cdot 10^{-3}) < 1; (X/140) + (Y/2,1 \cdot 10^{-5}) > 1 & \text{ — 2-й класс;} \\ (X/140) + (Y/2,1 \cdot 10^{-5}) < 1; (X/14) + (Y/1 \cdot 10^{-6}) > 1 & \text{ — 3-й класс;} \\ (X/14) + (Y/1 \cdot 10^{-6}) < 1; \\ (X/4,1 \cdot 10^{-2}) + (Y/1 \cdot 10^{-8}) > 1 & \text{ — 4-й класс;} \\ (X/4,1 \cdot 10^{-2}) + (Y/1 \cdot 10^{-8}) < 1 & \text{ — промышленные отходы;} \end{aligned}$$

для жидких отходов изотопного состава, соответствующего 10-й загрузке, при использовании рециклированных ядерных материалов, полученных от переработки отработавшего нитридного топлива:

$$\begin{aligned} (Y/1,8 \cdot 10^{-3}) + (Z/8,8) > 1 & \text{ — 1-й класс;} \\ (Y/1,8 \cdot 10^{-3}) + (Z/8,8) < 1; \\ (X/37) + (Y/3,0 \cdot 10^{-5}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-3}) > 1 & \text{ — 2-й класс;} \\ (X/37) + (Y/3,0 \cdot 10^{-5}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-3}) < 1; \\ (X/3,4) + (Y/1,2 \cdot 10^{-6}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-4}) > 1 & \text{ — 3-й класс;} \\ (X/3,4) + (Y/1,2 \cdot 10^{-6}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-4}) < 1; \\ (X/5,5 \cdot 10^{-3}) + (Y/1,3 \cdot 10^{-8}) + (Z/1,2 \cdot 10^{-5}) > 1 & \text{ — 4-й класс;} \\ (X/5,5 \cdot 10^{-3}) + (Y/1,3 \cdot 10^{-8}) + (Z/1,2 \cdot 10^{-5}) < 1 & \text{ — промышленные отходы.} \end{aligned}$$

Здесь и в табл. 5 не учтено возможное поступление в отходы америция как продукта распада плутония.

**Влияние накопления  $^{241}\text{Am}$  на классификацию радиоактивных отходов, образующихся при изготовлении нитридного топлива.** Распад  $\beta$ -излучающего  $^{241}\text{Pu}$  сопровождается накоплением в отходах радиоактивного  $^{241}\text{Am}$ .

Таблица 5. Соответствующая классу отходов концентрация урана, плутония и нептуния в отвержденных и исходных жидких радиоактивных отходах, образующихся при производстве нитридного топлива

| Класс<br>отходов            | Концентрация U, г/кг(л)                    |         |               |         | Концентрация Pu, мкг/кг(л) |         |               |         | Концентрация <sup>237</sup> Np,<br>мг/кг(л) |         |
|-----------------------------|--------------------------------------------|---------|---------------|---------|----------------------------|---------|---------------|---------|---------------------------------------------|---------|
|                             | Стартовая загрузка                         |         | 10-я загрузка |         | Стартовая загрузка         |         | 10-я загрузка |         |                                             |         |
|                             | максимум                                   | минимум | максимум      | минимум | максимум                   | минимум | максимум      | минимум | максимум                                    | минимум |
| Промыш-<br>ленные<br>отходы | Отвержденные методом цементирования отходы |         |               |         |                            |         |               |         |                                             |         |
|                             | 1-й                                        | —       | —             | —       | —                          | 780     | —             | 780     | —                                           | 3800    |
|                             | 2-й                                        | —       | 61            | —       | 15,9                       | 780     | 8,9           | 780     | 13                                          | 3800    |
|                             | 3-й                                        | 61      | 6,1           | 15,9    | 1,48                       | 8,9     | 0,44          | 13      | 0,52                                        | 3,83    |
|                             | 4-й                                        | 6,1     | 0,018         | 1,48    | 0,0024                     | 0,44    | 0,0043        | 0,52    | 0,0058                                      | 0,38    |
|                             |                                            | 0,018   | —             | 0,0024  | —                          | 0,0043  | —             | 0,0058  | —                                           | 0,005   |
| Промыш-<br>ленные<br>отходы | Исходные жидкие отходы                     |         |               |         |                            |         |               |         |                                             |         |
|                             | 1-й                                        | —       | —             | —       | —                          | 1800    | —             | 1800    | —                                           | 8800    |
|                             | 2-й                                        | —       | 140           | —       | 37                         | 1800    | 21            | 1800    | 30                                          | 8800    |
|                             | 3-й                                        | 140     | 14            | 37      | 3,4                        | 21      | 1             | 30      | 1,2                                         | 8,8     |
|                             | 4-й                                        | 14      | 0,041         | 3,4     | 0,0055                     | 1       | 0,01          | 1,2     | 0,013                                       | 0,88    |
|                             |                                            | 0,041   | —             | 0,0055  | —                          | 0,01    | —             | 0,013   | —                                           | 0,012   |

Определим влияние накопленного америция на классификацию образующихся радиоактивных отходов.

Жидкие среды, содержащие изотоп <sup>241</sup>Am, классифицируются как радиоактивные при его концентрации выше  $0,54 \cdot 10^{-9}$  г/кг раствора (или 69 Бк/кг раствора). Для твердых сред максимальная концентрация <sup>241</sup>Am составляет  $0,79 \cdot 10^{-8}$  г/кг (или 1000 Бк/кг). Практический интерес представляет оценка влияния на классификацию отвержденных радиоактивных отходов накопления <sup>241</sup>Am за счет распада <sup>241</sup>Pu.

Плутоний и америций выводятся из растворов с разной степенью эффективности, поэтому соотношение их концентрации в направляемых на отверждение жидких отходах может варьироваться в широких пределах. В связи с этим целесообразно иметь данные о классификации радиоактивных отходов, содержащих уран, плутоний и нептуний изотопного состава изготавливаемого топлива, а также <sup>241</sup>Am (табл. 6).

Допустимое содержание <sup>241</sup>Am в жидких отходах для получения окончательной формы твердых отходов соответствующего класса (методом цементирования) можно оценить, используя коэффициент перевода 2,3 кг/л. При одновременном содержании в жидких отходах изотопов урана, плутония, нептуния и <sup>241</sup>Am класс

Таблица 6. Соответствующая классу отходов концентрация <sup>241</sup>Am в отвержденных и исходных жидких отходах, образующихся при производстве нитридного топлива

| Класс отходов                              | Максимальная концентрация, мкг/кг(л) | Минимальная концентрация, мкг/кг(л) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Отвержденные методом цементирования отходы |                                      |                                     |
| 1-й                                        | —                                    | 780                                 |
| 2-й                                        | 780                                  | 0,78                                |
| 3-й                                        | 0,78                                 | 0,078                               |
| 4-й                                        | 0,078                                | 0,0079                              |
| Промышленные отходы                        | 0,0079                               | —                                   |
| Исходные жидкие отходы                     |                                      |                                     |
| 1-й                                        | —                                    | $1,8 \cdot 10^3$                    |
| 2-й                                        | $1,8 \cdot 10^3$                     | 1,8                                 |
| 3-й                                        | 1,8                                  | 0,18                                |
| 4-й                                        | 0,18                                 | $1,8 \cdot 10^{-2}$                 |
| Промышленные отходы                        | $1,8 \cdot 10^{-2}$                  | —                                   |

конечных форм отходов, образующихся при отверждении жидких, можно оценить, используя соотношения для отходов с ураном, плутонием и нептунием и данные табл. 6. Соотношения можно упростить, исключив из рассмотрения

уран, так как технические средства очистки позволяют его выделить из растворов до миллиграммовой остаточной концентрации на 1 л раствора. Таким образом, влияние урана на классификацию конечных форм твердых радиоактивных отходов является незначительным. Кроме того, учитывая, что при классификации отходов наличие рециклируемых ядерных материалов приводит к незначительным изменениям в максимальном содержании плутония, можем использовать консервативную оценку — оценку на основе изотопного состава плутония, соответствующего стартовой загрузке топлива. Соотношения для определения класса отходов по концентрации плутония, нептуния и америция следующие:

$$(A/1,8 \cdot 10^{-3}) + (Y/1,8 \cdot 10^{-3}) + (Z/8,8) > 1 —$$

1-й класс;

$$(A/1,8 \cdot 10^{-3}) + (Y/1,8 \cdot 10^{-3}) + (Z/8,8) < 1;$$

$$(A/1,8 \cdot 10^{-6}) + (Y/2,1 \cdot 10^{-5}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-3}) > 1 —$$

2-й класс;

$$(A/1,8 \cdot 10^{-6}) + (Y/2,1 \cdot 10^{-5}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-3}) < 1;$$

$$(A/1,8 \cdot 10^{-7}) + (Y/1 \cdot 10^{-6}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-4}) > 1 —$$

3-й класс;

$$(A/1,8 \cdot 10^{-7}) + (Y/1 \cdot 10^{-6}) + (Z/8,8 \cdot 10^{-4}) < 1;$$

$$(A/1,8 \cdot 10^{-8}) + (Y/1 \cdot 10^{-8}) + (Z/1,2 \cdot 10^{-5}) > 1 —$$

4-й класс;

$$(A/1,8 \cdot 10^{-8}) + (Y/1 \cdot 10^{-8}) + (Z/1,2 \cdot 10^{-5}) < 1 —$$

промышленные отходы,

A — концентрация америция, г/л.

**Анализ результатов.** В проектной документации на создание производства смешанного нитридного ядерного топлива в рамках проекта «Прорыв» введено ограничение на активность жидких отходов, подаваемых на операцию цементирования,  $6 \cdot 10^7$  Бк/кг, лимитирующее образование конечных форм отходов категорией отходов среднего уровня активности. При такой активности концентрация плутония в жидких отходах в зависимости от их солесодержания составит 0,5—0,7 мг/л. Соответственно в отвержденных методом цементирования твердых отходах концентрация плутония составит 0,22—0,3 мг/кг, что соответствует отходам 2-го класса (см. табл. 5).

Оценим затраты на захоронение содержащих плутоний отходов. Для захоронения 1 г в соответствии с приведенной максимально допустимой концентрацией плутония потребуется около 4 т (или около 2 м<sup>3</sup>) цементной матрицы.

Учитывая тарифы на захоронение радиоактивных отходов [4] (в ценах 2017 г. 594 тыс. руб. за 1 м<sup>3</sup> отходов 2-го класса), стоимость захоронения 1 г плутония составит 1,2 млн руб. без учета объема и стоимости упаковки отходов. При принятых в проекте «Прорыв» допустимых потерях актиноидов в отходах 0,1% и проектной производительности на изготовление нитридного топлива 5 т/год потери плутония в отходах могут составить до 750 г в год. Затраты на захоронение отходов с таким количеством плутония, переработанных методом цементирования, составят 0,9 млрд руб. в год. При этом образующиеся 1500 м<sup>3</sup> радиоактивных отходов в год подлежат глубинному подземному захоронению.

Для снижения указанных затрат необходимо использовать другие методы переработки отходов или уменьшать потери плутония в отходах. Например, при остекловывании радиоактивных отходов допустимо включение до 0,6% по массе актиноидов в боросиликатное стекло, хотя в то же время есть ограничения на количество  $\alpha$ -распадов в единице объема стеклоподобной матрицы, а также на выделение энергии в единице массы матрицы [5]. Тем не менее даже при включении плутония на уровне 0,1 г на 1 кг боросиликатного стекла на утилизацию образующихся отходов потребуется 7,5 т, или 2,8 м<sup>3</sup> стекла в год, стоимость его захоронения составит 3,6 млн руб. в год (стоимость захоронения отходов 1-го класса — 1,3 млн руб. за 1 м<sup>3</sup> в ценах 2017 г. [4]). Необходимо учитывать, что включение плутония в стекло на уровне 0,1 г на 1 кг стекла требует создания инфраструктуры, предусматривающей обращение с отходами высокого уровня активности, включая установку остекловывания высокоактивных отходов.

Особый интерес с точки зрения снижения затрат на захоронение образующихся отходов представляет возможность формирования отходов 3-го класса, стоимость захоронения которых составляет 140 тыс. руб. за 1 м<sup>3</sup> и для которых допустимо приповерхностное захоронение [4]. Для получения отходов 3-го класса необходимо обеспечить соблюдение условия на концентрацию трансурановых элементов в отверждаемых жидких отходах, которое выражается соотношением  $A/1,8 \cdot 10^{-6} + Y/2,1 \cdot 10^{-5} + Z/8,8 \cdot 10^{-3} < 1$ .

Существенное снижение затрат возможно только при очистке жидких отходов от актиноидов.

дов до концентрации, определяемой указанным соотношением, с возвратом выделенного плутония в технологический цикл и ограничением его поступления в отходы.

Следует иметь в виду, что последнее соотношение, как и соотношения для определения класса отходов, получено на основе анализа изотопного состава плутония, который используется для изготовления смешанного нитридного топлива. Можно предположить, что при значительном промежутке времени между изготовлением топлива и передачей отходов на захоронение определенная часть короткоживущего  $^{241}\text{Pu}$  трансформируется в  $^{241}\text{Am}$ . Это следует учесть, ужесточив требования к максимальному содержанию плутония, так как классификация отходов определяется на время их передачи на захоронение Национальному оператору. Приведем соответствующие оценки.

Заменяя в табл. 2 изотоп  $^{241}\text{Pu}$  на  $^{241}\text{Am}$ , получим: суммарная удельная активность по  $\alpha\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ , образовавшегося из всего  $\beta\text{Pu}$ , составит  $1,5 \cdot 10^{10}$  Бк/г. С учетом этого получим более жесткое ограничение для отнесения отверждаемых отходов к 3-му классу, учитывающее трансформацию части  $^{241}\text{Pu}$  в  $^{241}\text{Am}$ :  $A/1,8 \cdot 10^{-6} + Y/1,5 \cdot 10^{-5} + Z/8,8 \cdot 10^{-3} < 1$ .

Таким образом, для отнесения отверженных отходов к 3-му классу, допускающему их приповерхностное захоронение, концентрация плутония в исходных жидких отходах не должна превышать 15 мкг/л,  $^{241}\text{Am}$  — 1,8 мкг/л. Для обеспечения указанной концентрации предусмотрена очистка жидких отходов от трансурановых элементов, включающая щелочное осаждение и ультрафильтрационную очистку маточных растворов. При возврате в технологический цикл 99,9% плутония затраты на захоронение недоизвлеченного плутония в зацементированных отходах 3-го класса составят около 8 млн руб. в год ( $58 \text{ м}^3$  отходов в год).

**Заключение.** Таким образом, анализ показывает, что отверждение жидких отходов методом цементирования без доизвлечения плутония и его возврата в технологический цикл приводит к большим затратам на последующее захоронение отходов. Для снижения затрат на захороне-

ние можно использовать технологию остекловывания жидких отходов. При этом необходимо предусмотреть создание на объекте условий работы с высокоактивными отходами и создать установку остекловывания высокоактивных жидких отходов. Другой возможностью снижения затрат является очистка образующихся жидких отходов от трансурановых элементов, обеспечивающая снижение количества передаваемых в отходы актиноидов и образование отходов 3-го класса, допускающих приповерхностное захоронение. При этом для получения отходов 3-го класса концентрация плутония в жидких отходах не должна превышать 15 мкг/л, америция 1,8 мкг/л. Оценки для концентрации плутония выполнены для изотопного состава плутония, используемого для производства смешанного нитридного топлива для реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, в том числе с учетом возможности рециклирования плутония.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (с изменениями от 05.02.2015). 15 с. <https://rosпотреbnadzor.ru/documents>.
2. **Основные** санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). М., Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 85 с.
3. **Васюхно В.П., Колмогорцев А.В., Моисеев А.В. и др.** Характеристики рециклируемого топлива РУ БРЕСТ-ОД-300 при различных сценариях ЗЯТЦ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2016, вып. 36, с. 12—16.
4. **Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 89 от 13 марта 2013 г. «О первоначальном установлении тарифов на захоронение РАО». Зарегистрировано в Минюсте РФ 21.05.2013 г. № 28445. 2 с. <https://minjust-prikaz.consultant.ru/documents>.
5. **Изменения** в федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование ЖРО. Требования безопасности» (НП-019—15). — Ядерная и радиационная безопасность. Проекты нормативных документов, 2016, № 3(81), с. 1—3.

Поступила в Редакцию 13.06.19