

УДК 621.8.035:621.039

ОБ ИСТОЧНИКЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин,
А. В. Карелин, В. В. Онуфриев

В статье рассмотрены возможность рационального использования соединений цезия-137 в качестве источника гамма-излучения, оценка энергетического баланса ЯОП-установки, конструктивные особенности пластинчатых элементов и фотоэлектрических преобразователей, размещение и эксплуатация ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов с новым видом пластинчатых источников.

Ключевые слова: ядерно-оптический преобразователь, отработанное ядерное топливо, фотоэлектрический преобразователь, аргон-азот, хранилище, коэффициент ослабления, гамма-квант, пластинчатые источники, цезий-137.

При использовании специально переработанных для минимизации нейтронного потока ядерных отходов (ОЯТ) в ядерно-оптических преобразователях (ЯОП) можно получать электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) [1]; остальную часть энергии радиоактивного распада можно использовать для получения горячей воды для теплоснабжения. Для получения электроэнергии в ядерно-оптической установке (ЯОП-установка) предполагается использование гамма-излучения (энергия квантов $E_\gamma = 661,7$ кэВ) дочернего нуклида $^{137}\text{Ba}^m$, порождаемого бета-распадом цезия – $^{137}(\text{Cs})$ (далее везде ^{137}Cs). В качестве активной среды предлагается смесь $\text{Ar} - \text{N}_2$ с соотношением концентраций $[\text{Ar}]:[\text{N}_2] = 45:1$, излучающая преимущественно в диапазонах длин волн 350 – 410 и 750 – 1050 нм; давление аргон-азотной смеси $p = 10$ атм. В этих условиях полный расчетный коэффициент полезного действия (КПД) смеси аргон – азот 6%.

Радионуклид ^{137}Cs образуется во всех атомных реакторах (в среднем 6 ядер из 100 ядер урана), его выделение из высокоактивных ОЯТ технической проблемы не представляет: из растворов, полученных при переработке ОЯТ, соединения ^{137}Cs извлекаются несколькими методами (соосаждение с гексацианоферратами железа, никеля, цинка или фторовольфрамом аммония; используют также ионный обмен и экстракцию). В данной работе рассматривается возможность рационального использования соединений цезия ^{137}Cs в качестве источника гамма-излучения в ЯОП.

Исследование источников гамма-излучения, содержащих хлорид цезия в двойных стальных цилиндрах, выявило коррозию части цилиндров [2]. Эта и другие работы стимулировали в радиоизотопном производстве разработку и проверку технологий синтеза малорастворимых, химически не-

агрессивных цезий содержащих веществ (фосфатов, цеолитов и алюмосиликатов цезия) [3].

Однако для эффективной работы ЯОП-установки требуются, как будет показано в дальнейшем, вещества с высоким (до 100%) содержанием ^{137}Cs : CsH , Cs_2O , CsF или металлический Cs (возможно с небольшой добавкой щелочных металлов). Способы получения и хранения этих веществ известны, включая защиту оболочек источников излучения от коррозии [4].

Из этих веществ Cs_2O и CsF безопаснее в обращении, а в оксиде Cs_2O содержание цезия выше. Целью данной работы является оценка энергетического баланса ЯОП-установки, использующей оксид Cs_2O .

Суммарная энергия, выделяющаяся при бета-распаде одного ядра цезия ^{137}Cs , составляет $\epsilon_\beta = 1175,63 \pm 0,17$ кэВ.

В 94,4% случаев распад происходит с промежуточным образованием ядерного изомера бария – $^{137}(\text{Ba}^m)$, его период полураспада составляет 2,55 мин), который в свою очередь в 84,99% случаев переходит в основное состояние с испусканием гамма-кванта с энергией 661,7 кэВ, а в 15,01% случаев с испусканием конверсионного электрона с энергией 661,7 кэВ (уменьшенной на величину энергии связи электрона) [5 – 7]. Доля случаев распада одного ядра цезия ^{137}Cs до ядерного изомера бария-137 ($^{137}\text{Ba}^m$) с последующим испусканием гамма-кванта с энергией 661,7 кэВ:

$$K_1 = 0,9443 \cdot 0,8499 = 0,802.$$

В ЯОП-источники с содержащим ^{137}Cs веществом должны мало ослаблять поток гамма-квантов оболочкой, т. е. содержимое источников должно быть достаточно прозрачным для гамма-излучения гамма-кванта с энергией 661,7 кэВ.

Чтобы оценить массу содержащего источников, имеющего необходимую активность, найдем сначала удельную активность $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$:

$$A_{\text{Cs}_2\text{O}} = A_{\text{Cs}} \frac{2M_{\text{Cs}}}{2M_{\text{Cs}} + M_{\text{O}}} \rho_{\text{Cs}_2\text{O}} = 1,022 \cdot 10^{19} \text{ Бк/м};$$

$$A_{\text{Cs}} = \frac{\ln(2)N_A}{T_{\text{Cs}}} \frac{1}{M_{\text{Cs}}} = 3,219 \cdot 10^{15} \text{ Бк/кг},$$

где удельная активность ^{137}Cs ; $T_{\text{Cs}} = 30$ лет – период полураспада ^{137}Cs ; $\rho_{\text{Cs}_2\text{O}} = 3360 \text{ кг/м}^3$ – плотность $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$; $M_{\text{Cs}} = 0,137 \text{ кг/моль}$ – молярная масса ^{137}Cs , $M_{\text{O}} = 0,016 \text{ кг/моль}$; N_A – число Авогадро.

Для минимизации самопоглощения гамма-квантов оксид цезия следует распределить тонкими слоями. Исходя из условия, что самопоглощение потока гамма-квантов, покидающих слой $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$, не приводит к потере более 10% нерассеянных (т. е. имеющих энергию 661,7 кэВ) гамма-квантов, толщина h радиоактивного слоя должна быть:

$$\ln(0,9) / \mu_s = -\ln(0,9)/0,265 \leq 0,4 \text{ см},$$

где $\mu_s = 0,265 \text{ см}^{-1}$ – линейный коэффициент ослабления потока гамма-квантов в $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$, определенный по формуле

$$\mu_s = (m_{m_1} a_1 + m_{m_2} a_2 + \dots + m_{m_i} a_i) \rho,$$

где $m_{m_i} = 0,078 \dots 0,079 \text{ см}^2 / \text{г}$ – массовый коэффициент ослабления гамма-квантов (с энергией 661,7 кэВ) в i -м элементе, входящем в соединение; a_i – весовая доля i -го элемента в соединении; ρ – плотность соединения; $\rho = 3,36 \text{ г/см}^3$ – плотность Cs_2O .

В ЯОП с герметичной сферической оболочкой хранилища пластинчатые источники I целесообразно размещать в вертикальных сегментах, равномерно распределенных вокруг центральной (вертикальной) оси сферического хранилища – газгольдера 3 (рис. 1, 2). Выберем вертикальный сегмент радиусом $R_k = 14,5 \text{ м}$ и расстоянием от хорды до центральной (вертикальной) оси газгольдера – $r = 3 \text{ м}$. В каждом сегменте имеется две плоские рамы (решетки) с вертикальными направляющими для укладки и закрепления источников между ними. По технологическим соображениям источник должен представлять собой герметичный прямоугольный параллелепипед со скругленными углами, содержащий слой $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$ толщиной $h = 4 \text{ мм}$, оболочка – алюминий толщиной $b_{\text{Al}} = 2 \text{ мм}$ (плотность алюминия $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ т/м}^3$) с антикоррозийным металлическим покрытием, исключающим контакт Cs_2O и алюминия. Предполагается, что длина и

ширина каждого источника находятся в пределах 1–2 м. Перемещение из контейнеров таких источников и закрепление в сегментах производится дистанционно. Площадь сегмента с источниками

$$S_{1k} = R_k^2 \arccos\left(\frac{r}{R_k}\right) - r\sqrt{R_k^2 - r^2} = 244 \text{ м}^2.$$

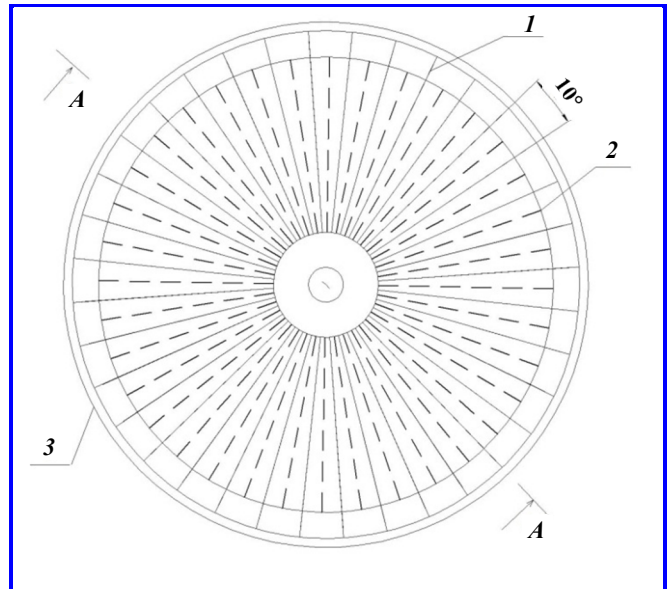


Рис. 1. Расположение пластинчатых контейнеров (1) и модулей фотоэлектрических преобразователей (2) в сферическом хранилище-газгольдере (3) – экваториальное сечение

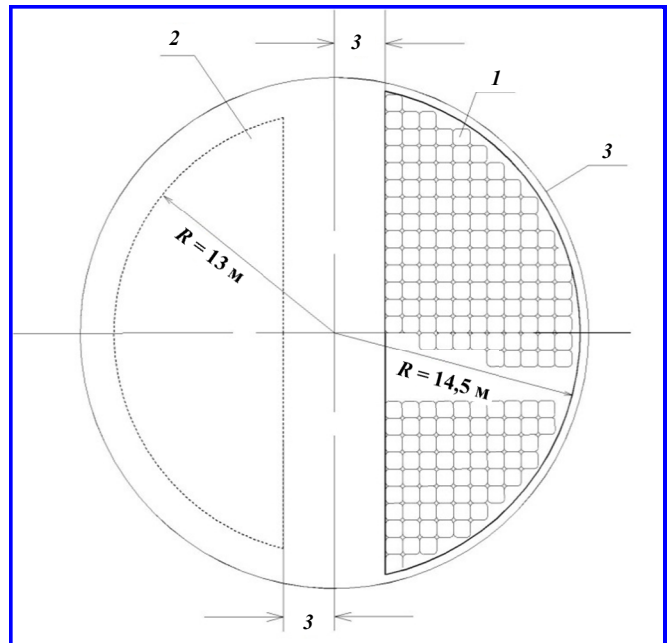


Рис. 2. Расположение пластинчатых контейнеров (1) и модулей фотоэлектрических преобразователей (2) в сферическом хранилище – газгольдере (3) – сечение А-А

Учитывая, что наименее подвержены воздействию радиации фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе халькопиритов, и принимая во внимание возможность создания лёгких и гибких элементов на основе металлической фольги и связанную с этим высокую удельную мощность по массе (2 – 2,5 кВт/кг, 100 Вт /м² [8]), предлагается установка ФЭП Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS).

С целью уменьшения газодинамического сопротивления при прокачке теплоносителя (аргон-азотная смесь с соотношением концентраций [Ar]:[N₂] = 45:1) конструкция каждого полностью собранного модуля ФЭП (рис. 3) может представлять собой сегмент (радиус 13 м, от хорды до центральной (вертикальной) оси газгольдера – 3 м, площадь сегмента с ФЭП – 188 м² (см. рис. 2, 3)), расположенный между сегментами с пластинчатыми источниками 2 в меридиональной плоскости. ФЭП (возможно на основе металлической фольги) устанавливаются на решетках-сегментах 1 (с двух сторон каждой решетки или устанавливаются двухсторонние ФЭП). Несущая конструкция сегмента ФЭП – решетчатая плоская рама из балок 4 с прямоугольным поперечным сечением 3, толщина стенки 5 мм (см. рис. 3). Масса вышеописанных ФЭП составляет несколько процентов от массы рамы.

Учитывая требования к несущей конструкции по прочности и жесткости, а также дополнительное нагружение от аэроупругих автоколебаний при прокачке теплоносителя, примем полную массу m_{1sf} одного сегмента (включая массу ФЭП) $m_{1sf} = 1114$ кг.

Решетки-сегменты для ФЭП 1 и для источников 2 закрепляются по контуру на нижней половине оболочки хранилища и на цилиндрической ($r = 3$ м) вертикальной раме. Вертикальные направляющие каждого сегмента для источников жестко закреплены между горизонтальными балками сегмента, образуя границы вертикальных колодцев 5.

Для оценки поглощения гамма-квантов в одном газгольдере при разном количестве n_K сегментов методом гомогенизации среды рассчитаем среднюю плотность вещества (r_c) и средний линейный коэффициент ослабления (μ_g) потока гамма-квантов, в приближении равномерно распределенной массы в хранилище (см. табл.), принимая:

$R_r = 15$ м – внутренний радиус сферического газгольдера;

$V_r = 4\pi R_r^3/3$ – объём газгольдера;

$p = 10^6$ Па и $T = 400$ К – давление и температура теплоносителя (аргон, $M_{Ar} = 39,95 \cdot 10^{-6}$ т/моль);

$m_{Ar} = p V_r M_{Ar} / (8,31 T) = 170$ т – масса аргона;

$R_k = 14,5$ м – радиус сегмента;

n_K – количество сегментов для размещения источников;

$m_{Cs_2O} = \rho_{Cs_2O} S_{lk} h = 3278$ кг – масса Cs₂O в одном сегменте;

$m_{1и} = 4330$ кг – масса одного сегмента источников (масса оболочек источников + масса балок без массы Cs₂O);

$m_{нк} = n_K(m_{1и} + m_{1f})$ – масса несущих конструкций в сумме с массой оболочек источников и ФЭП внутри газгольдера;

$\Sigma_m = n_K m_{1Cs} + m_{нк}$ – суммарная масса поддерживаемого газгольдера;

$r_c = \Sigma m / V_r$ – средняя плотность вещества;

$A_g = n_K m_{Cs_2O} A_{Cs_2O} / r_{Cs_2O}$ – суммарная активность источников.

Массовые коэффициенты ослабления гамма-квантов в алюминии (m_{mAl}), в Cs₂O (m_{mCs_2O}) и в аргоне (m_{mAr}), см²/г:

$$m_{mAl} = 0,075; m_{mCs_2O} = 0,079; m_{mAr} = 0,0696;$$

$$\mu_g = r_c (m_{mAl} m_{нк} + m_{mCs_2O} m_{Cs_2O} + m_{mAr} m_{Ar}) / \Sigma m \approx 0,075 r_c.$$

Доли нерассеянных гамма-квантов [9]:

$$\Delta_0 = \frac{1 - e^{-Z}}{Z} \text{ – в центре хранилища;}$$

$$\Delta_1 = \frac{1 - 1 - e^{-2Z}}{2Z} \text{ – на внутренней границе хранилища.}$$

$$\Delta = (\Delta_0 + \Delta_1) / 2, \text{ где } Z = R\mu_g, R = 1500 \text{ см.}$$

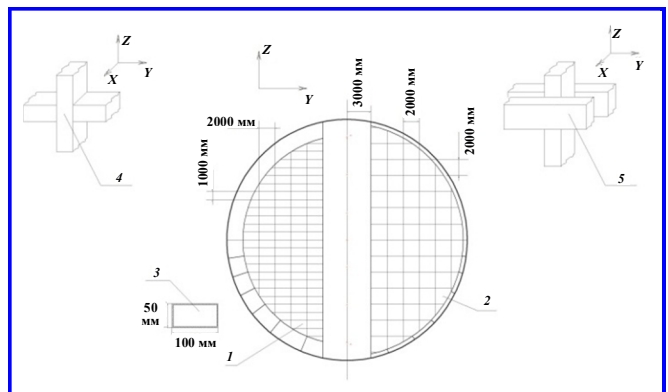


Рис. 3. Конструкция модуля фотоэлектрического преобразователя: 1 – сегмент для ФЭП; 2 – сегмент для источников; 3 – поперечное сечение балок; 4 – соединительные балки сегмента для ФЭП; 5 – соединение балок сегмента для источников

Принимая КПД современного двухслойного фотоэлектрического преобразователя примерно 20% и полный расчетный КПД смеси при облучении 6%, получим, что в этих условиях электрическая мощность $W_{эг}$ (кВт) и выделение тепла $W_{тг}$ (кВт) составляют

$$W_{эг} = A_g E_\gamma \Delta K_1 \cdot 0,2 \cdot 0,06;$$

$$W_{тг} = A_g \varepsilon_f - W_{эг},$$

где $E_\gamma = 661,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ кДж (энергия гамма-квантов $^{137}\text{Ba}^m$); $\varepsilon_f = 1175,63 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ кДж – суммарная энергия, выделяющаяся при бета-распаде одного ядра цезия $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$.

Оценку плотности потока нерассеянных гамма-квантов вне газгольдера можно провести в рамках модели «сферический источник со сферической защитой» [9]:

$$\varphi = \frac{q_v a}{\pi} N \left(\frac{a}{R}, \frac{d}{R}, \mu_g R, \mu d \right) \text{ фотонов} \cdot \text{см}^{-2} / \text{с},$$

где $R = 1500$ см – внутренний радиус сферического газгольдера; d – толщина защиты; a – расстояние от центра хранилища; μ – линейный коэффициент ослабления потока гамма-квантов в материале защиты; μ_g – средний линейный коэффициент ослабления внутри газгольдера;

$$q_v = \frac{3 \cdot A_g}{4 \cdot \pi \cdot R^3} \text{ Бк/см}^3 - \text{объемная активность};$$

$A_g = n_k A_{Cs_2O} S_{ik} h$ – суммарная активность источников;

$$N \left(\frac{a}{R}, \frac{d}{R}, \mu_g R, \mu d \right) = \frac{\pi R}{2a} \int_{\frac{a}{R}}^{\frac{a}{R}+1} dr \int_0^{\theta(r)} e^{-R\beta(r,\theta)\mu_g - d\mu(r,\theta)} \sin(\theta) d\theta;$$

$$\beta(r, \theta) = r - \frac{a}{R} \cos(\theta) + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2 \sin^2(\theta)};$$

$$\gamma(r, \theta) = \frac{R}{d} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{d}{R}\right)^2 - \left(\frac{a}{R}\right)^2 \sin^2 \theta} - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2 \sin^2(\theta)} \right];$$

$$\theta(r) = \arccos \frac{r^2 + \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 1}{2r \frac{a}{R}}.$$

Суммарная активность источников (A_g) одного хранилища-газгольдера – $2,4 \dots 0,97 \cdot 10^{10}$ Ки.

При расчете потока нерассеянных гамма-квантов непосредственно на внешней поверхности газгольдера $a = R + d$, d – толщина оболочки газгольдера, материал защиты – железо. Величины этих потоков (см. табл.) почти полностью исключают возможность использования традиционных телевизионных систем и манипуляторов для дистанционной работы вблизи газгольдера.

Для рентгеновских и гамма-лучей существует следующее приближенное линейное соотношение: $1p = 1,9 \cdot 10^9 / E$ фотонов/см², которое справедливо с точностью примерно $\pm 15\%$ в диапазоне энергий фотонов E от 0,07 до 2,0 МэВ [10]; для фотонов с энергией 661,7 кэВ:

$$1p = 1,9 \cdot 10^9 / 0,662 = 2,87 \cdot 10^9 \text{ фотонов/см}^2.$$

Если разместить газгольдер на открытой местности без защиты, то с учетом ослабления потока гамма-квантов оболочкой газгольдера (железо толщиной $d_{ж} = 5$ см, линейный коэффициент ослабления $\mu_{ж} = 0,57 \text{ см}^{-1}$) и воздухом ($\mu = 0,0001 \text{ см}^{-1}$) мощность экспозиционной дозы на расстоянии 10 радиусов от центра одного газгольдера (при отсутствии других) ориентировочно равна $1,2 \cdot 10^8 \dots 1,5 \cdot 10^8$ фотонов·см⁻²/с (150 ... 190 р/час). В соответствии с Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [11, 12] среднегодовая допустимая плотность потока моноэнергетических фотонов для лиц из персонала (при изотропном внешнем облучении всего тела) составляет около 1560 фотонов/(см²·с).

Толщину защиты рассчитаем на случай, когда загрузка сегментов-источников гамма-излучения выполнена полностью, но оболочка газгольдера отсутствует. Не учитывать ослабления потока гамма-квантов оболочкой газгольдера целесообразно, поскольку верхняя половина газгольдера монтируется после загрузки сегментов-источников (полностью сборочные операции описаны ниже); по соображениям безопасности защита должна оставаться достаточно эффективной после разрушения оболочки газгольдера. Исходя из средней плотности вещества (r_c) и среднего линейного коэффициента ослабления (μ_g) потока гамма-квантов, в приближении равномерно распределенной массы внутри сферы радиуса $R = 1500$ см, оценим мощность φ (фотонов с⁻¹·см⁻²) экспозиционной дозы от нерассеянных гамма-квантов непосредственно на внешней поверхности сферы:

$$\varphi = \frac{q_v}{2\mu_g} \frac{1 - e^{-2Z}}{2Z} = \left(\begin{array}{l} 5,8 \cdot 10^{12} \\ 4,8 \cdot 10^{12} \\ 4,310^{12} \end{array} \right),$$

где q_v , Бк/см³ – объемная активность; $Z = R \mu_g$.

Результаты оценки толщины защиты по универсальным таблицам Н. Г. Гусева [13] для ослабления потока гамма-квантов до $1560 \text{ фотонов} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ помещены в таблице, расчет проводился по двойной суммарной активности источников с поправкой на барьерность. При наличии защиты для моноэнергетического источника рассеянное в источнике излучение можно не учитывать с погрешностью 20%, если толщина защиты превышает 2,5 длины свободного пробега (д. с. п.) в железе или 3 д. с. п. в бетоне.

По соображениям безопасности целесообразно разместить каждое хранилище (газгольдер) в заглубленной железобетонной сухой камере с внутренними размерами $40 \times 40 \times 40 \text{ м}$ (рабочий объем), оснащенной вентиляцией для удаления озона и окислов азота, образующихся в результате радиолитического разложения воздуха в рабочей камере. В железобетонной крыше камеры располагаются дистанционно управляемые люки, размеры которых позволяют опустить полностью собранную верхнюю половину газгольдера для монтажа на его нижнюю часть.

Для обслуживания работ при строительстве оборудования, его эксплуатации и ремонте устанавливается мостовой кран с дистанционным управлением (используется также телевизионная система). При сооружении энергосистемы из нескольких ЯОП предпочтительным является применение портального крана.

Конструкция камеры, газгольдера и сборочно-разборочные операции должны быть согласованы с разработчиком сборочных роботизированных систем. Все роботизированные операции подлежат тщательной отработке до загрузки источников гамма-излучения. Нижняя часть газгольдера монтируется сваркой (от опор с противосейсмическими устройствами) до экваториального пояса с разъемным гермопангоутом, после чего монтируется верхняя половина газгольдера и проводятся пневматические испытания сжатым воздухом или инертным газом по инструкции, предусматривающей необходимые меры безопасности и утвержденной в установленном порядке при условии контроля этого испытания методом акустической эмиссии или другим, согласованным с Госгортехнадзором России методом.

Таблица

Параметры одного хранилища-газгольдера

Количество сегментов, n_k	Масса Cs_2O , т	Суммарная активность источников A_g , Бк	Средняя плотность вещества r_s , кг/м^3	Линейный коэффициент ослабления μ_g , $1/\text{см}$	Доля (Δ) нерассеянных гамма-квантов	Электрическая мощность $W_{эг}$, кВт	Выделение тепла $W_{тг}$, МВт	Мощность экспозиционной дозы от нерассеянных гамма-квантов на границе хранилища, р/с^*	Толщина защиты, см**		Расход газа ($T = 400 \text{ К}$), $\text{м}^3/\text{с}$	Расход газа, кг/с
									Бетон, $2,3 \text{ г/см}^3$	Железо		
90	295	$9 \cdot 10^{20}$	68	0,00508	0,127	116	169	28	158	48	266	3186
45	148	$4,5 \cdot 10^{20}$	40	0,00296	0,211	97	84	24	156	47	132	1584
36	118	$3,6 \cdot 10^{20}$	34	0,00254	0,243	89	67	22	156	47	105	1263

* – непосредственно на внешней поверхности газгольдера;

** – введен коэффициент запаса (2) по мощности дозы гамма-излучения.

Газгольдер должен быть оснащён предохранительными устройствами от повышения давления выше допустимого значения 1,2 – 1,3 МПа, включая дистанционные средства регистрации и сброса давления.

Эти работы можно выполнять традиционными методами, но все даже сборочные работы, начиная с загрузки источников гамма-излучения, можно производить только дистанционно, причем только посредством телевизионных систем и манипуляторов. После завершения всех работ с газгольдером (включая отжиг для снятия сварочных напряжений, устройство защиты от прямых ударов молнии и защиту от заноса высокого потенциала по подземным и наземным металлическим коммуникациям) винты разъемного гермошпангоута демонтируют, верхнюю половину газгольдера отделяют с помощью козлового крана и устанавливают на заранее подготовленную подставку рядом с нижней частью газгольдера, обеспечив в последнюю свободный доступ сверху для монтажа несущих конструкций, внешних трубопроводов, фотоэлектрических преобразователей, датчиков кабельной сети. Должны быть смонтированы и проверены вентиляция и система прокачки газа по замкнутому контуру, включающему, кроме закрытой железобетонной сухой камеры, насосные установки для воды, теплообменники, трубопроводы и герметичные вентиляторы.

После проверки установленного оборудования, а также и автоматизированной системы мониторинга и управления ЯОП, производится выгрузка пластинчатых источников гамма-излучения $^{137}\text{Cs}_2\text{O}$ из транспортировочных контейнеров и их загрузка в нижнюю часть газгольдера при включенных системах прокачки газа и мониторинга. Для транспортировки пластинчатых источников из контейнеров в сегменты газгольдера применяется перегрузочная машина. Начиная с этого момента, работы должны быть полностью механизированы и выполняться операторами дистанционно с автоматическим непрерывным контролем мощности экспозиционной дозы операторов и радиационной обстановки в зоне монтажа, оснащенной стереоцветной телевизионной системой высокой четкости (ТСВЧ) с лазерными излучателями, с помощью которых можно с высокой точностью произвести необходимые измерения. ТСН должна обеспечивать функции следящей системы при выполнении работ с высокой точностью в составе сварочной и сборочной роботизированных систем при дозах радиационного воздействия до 200 рад/с.

Посредством сборочной роботизированной системы сборка газгольдера завершается установкой его верхней половины и ввинчиванием винтов в разъемный гермошпангоут.

Объемный расход газа для отвода тепла оценивается по формуле

$$W_{\text{тг}}/(c_p \Delta T r),$$

Поступила в редакцию 19.05.2022

где $c_p = 520$ Дж/(кг·К) – удельная теплоёмкость аргона (при постоянном давлении); $r = 12$ кг/м³ – плотность аргона при давлении $p = 10$ атм и температуре $T = 400$ К; $\Delta T = 102$ К – нагрев аргона.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены существенные особенности конструкции и эксплуатации ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов с новым видом пластинчатых источников.

Литература

1. Теплофизические ограничения ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 43 – 51.
2. Андрияшин И. А., Юдин Ю. А. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом / И. А. Андрияшин, Ю. А. Юдин. – Саров, 1990. – С. 18.
3. Фосфатные матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов / А. Р. Зарипов, О. М. Слюнчев, С. И. Ровный [и др.] // Химическая технология. – 2007. – Т. 8. – № 2. – С. 82 – 86.
4. Плюшев В. Е., Степин В. Д. Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия / В. Е. Плюшев, В. Д. Степин. – Москва : Химия, 1970. – 410 с. : ил.
5. The AME2003 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs, and references / G. Audi, A. H. Wapstra, C. Thibault // Nuclear Physics. – Vol. A 729. – Issue 1. – P. 337 – 676. – DOI : 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.003.
6. The Ame2003 atomic mass evaluation: (I). Evaluation of input data, adjustment procedures / A. H. Wapstra, G. Audi, C. Thibault // Nuclear Physics. – 2003. – Vol. A729. – Issue 1. – P. 129 – 336. – DOI : 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.002/
7. Decay scheme of Caesium-137 / R. G. Helmer, V. P. Chechev // INEEL & KRI. – 7 [1] p. – URL : http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Cs-137_tables.pdf (дата обращения: 13.06.2006).
8. Международный проект по халькогенидным тонкопленочным солнечным батареям [презентация] // П. П. Гладышев, С. В. Филин, В. Ф. Гременок [и др.] – Дубна, 2010. – 24 с.
9. Бергельсон Б. Р. Справочник по защите от излучения протяженных источников / Б. Р. Бергельсон, Г. А. Зориков. – Москва : Атомиздат, 1965. – 177 с.
10. Справочник по ядерной физике. / Под ред. О. Р. Фриш ; пер. с англ. – Москва : Физматгиз, 1968. – 632 с.
11. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
12. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Санитарные правила и нормативы : утвержден Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26 апреля 2010 года № 40 : изменен и дополнен 16.09.2013.
13. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений : справочник / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 496 с. : ил.

Иван Николаевич Хиблин, начальник лаборатории, т. 8 (495) 366-14-11, e-mail: d45@mcc.vniiem.ru.
Леонид Алексеевич Амелин, ведущий инженер.
 (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,
 т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.
 (АО «ЦНИИмаши»).

Валерий Валентинович Онуфриев, профессор.
 (Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана).

ABOUT GAMMA-RAY RADIATION SOURCE IN NUCLEAR-OPTICAL CONVERTERS

**I. N. Khiblin, A. V. Karelin,
 V. V. Onufriyev, L. A. Amelin**

The article considers the possibility of rational use of caesium-137 compounds as a gamma-ray radiation source, evaluation of power balance of a NOC installation, design features of plate elements and photoelectric converters, location and operation of a NOC installation for nuclear waste disposal with a new type of plate sources.

Key words: nuclear-optical converter, spent nuclear fuel, photoelectric converter, argon-nitrogen, storage facility, attenuation factor, gamma quantum, plate sources, caesium-137.

References

1. Thermophysical limitations of a NOC installation for radioactive waste disposal / A. V. Karelin, I. N. Khiblin, L. A. Amelin [et al.] // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEEM Proceedings. – 2010. – Vol. 117. – No. 4. – P. 43 – 51.
2. Andryushin I. A., Yudin Yu. A. Overview of issues related to handling of radioactive waste and spent nuclear fuel / I. A. Andryushin, Yu. A. Yudin. – Sarov, 1990. – P. 18.
3. Phosphate matrices for immobilization of radioactive waste / A. R. Zaripov, O. M. Slyunchev, S. I. Rovny [et al.] // Chemical technology. – 2007. – Vol. 8. – No. 2. – P. 82 – 86.
4. Plyushchev V. Ye., Stepin V. D. Chemistry and technology of lithium, rubidium and caesium compounds / V. Ye. Plyushchev, V. D. Stepin. – Moscow : Khimiya (Chemistry), 1970. – 410 p. : with figures.
5. The AME2003 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs, and references / G. Audi, A. H. Wapstra, C. Thibault // Nuclear Physics. – Vol. A 729. – Issue 1. – P. 337 – 676. – DOI : 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.003.
6. The Ame2003 atomic mass evaluation: (I). Evaluation of input data, adjustment procedures / A.H. Wapstra, G. Audi, C. Thibault // Nuclear Physics. – 2003. – Vol. A729. – Issue 1. – P. 129 – 336. – DOI : 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.002/
7. Decay scheme of Caesium-137 / R.G. Helmer, V.P. Chechev // INEEL & KRI. – 7 [1] p. – URL : http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Cs-137_tables.pdf (date of access: 13.06.2006).
8. International project on chalcogenide thin-film solar arrays [presentation] // P. P. Gladyshev, S. V. Filin, V. F. Gremenok [et al.] – Dubna, 2010. – 24 p.
9. Bergelson B. R. Handbook for protection against radiation from extended sources / B. R. Bergelson, G. A. Zorikoyev. – Moscow : Atomizdat, 1965. – 177 p.
10. Handbook on nuclear physics. / Edited by O. R. Frish ; translated from Eng. – Moscow : Fizmatgiz, 1968. – 632 p.
11. Radiation safety standards (NRB-99/2009) : Sanitary and epidemiologic rules and regulations. – Moscow : Federal Hygiene and Epidemiology Centre of Rospotrebnadzor, 2009. – 100 p.
12. SP 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and regulations : approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 40 dated April 26, 2010 : modified and supplemented on 16.09.2013.
13. Mashkovich V. P. Protection against ionizing radiation : handbook / V. P. Mashkovich, A. V. Kudryavtseva. – 4th edition, revised and enlarged. – Moscow : Energoatomizdat, 1995. – 496 p. : with figures.

Ivan Nikolayevich Khiblin, Head of Laboratory, tel.: +7 (495) 366-14-11, e-mail: d45@mcc.vniiem.ru.
Leonid Alekseyevich Amelin, Leading Engineer.
 (JC «VNIIEEM Corporation»).

Aleksandr Vitalyevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Chief Researcher,
 tel.: +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.
 (JC «TSNIIMASH»).

Valery Valentinovich Onufriyev, Professor.
 (Bauman Moscow State Technical University).