

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЗАГРУЗКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯОП-УСТАНОВКИ ПО УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А.В. Карелин  
(ФГУП ЦНИИмаш)  
Л.А. Амелин  
(ОАО «НИИЭМ»)  
И.Н. Хиблин  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Рассмотрены монтаж и испытания газгольдера на герметичность, транспортирование и загрузка бочек с ОЯТ (отработанное ядерное топливо) в ЯОП-установку, безопасное расположение персонала для обслуживания преобразователя, расположение насосов и теплообменников, границы зоны отчуждения. Правила по обеспечению безопасного использования ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов приняты исходя из правил, применяемых для объектов атомной энергетики. При соблюдении данных правил эксплуатация ЯОП-установки будет безопасной и менее затратной, чем ТЭЦ той же мощности.*

**Ключевые слова:** ЯОП-установка, газгольдер, давление, радиоактивные отходы, цезий-137, гамма-излучение, правила безопасности.

На этапе проектирования и создания установки для утилизации радиоактивных отходов на основе ядерно-оптического преобразования энергии (ЯОП-установки) на первый план выходит безопасность использования установки (агрегатов и узлов) и организация безопасной работы персонала.

Целью настоящей работы является рассмотрение правил безопасного использования ЯОП-установки с применением правил для объектов ядерной энергетики.

Для утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) с помощью преобразования ионизирующего излучения в оптическое с дальнейшей конверсией оптического излучения в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) необходимы ОЯТ или РАО, обладающие гамма-активностью ( $^{137}\text{Cs}$ ) со скоростью  $f = 8,6 \cdot 10^{16}$  распадов/( $\text{м}^3 \cdot \text{с}$ ) [1 – 3], которые размещают в 216 бочках по  $0,2 \text{ м}^3$  в центральной части сферического хранилища (газгольдера). Учитывая результаты химической переработки РАО для выделения радиоактивных элементов цезия и стронция в Хэнфэрде (США) в 1960 – 1970 гг., для обеспечения возможности долговременного хранения РАО бочки следует изготовить в виде двойных цилиндров из реакторной стали 12X18Н9Т или из циркониевого сплава [4]. Кроме коррозионной стойкости бочек и химической совместимости с содержимым для безопасной эксплуатации установки важно, чтобы теплопроводность содержимого бочек была не менее  $20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Основным элементом конструкции ЯОП-установки, представляющим особую опасность, является сферический газгольдер объёмом  $15\,000 \text{ м}^3$ , через который циркулирует аргон (точнее смесь с соотношением

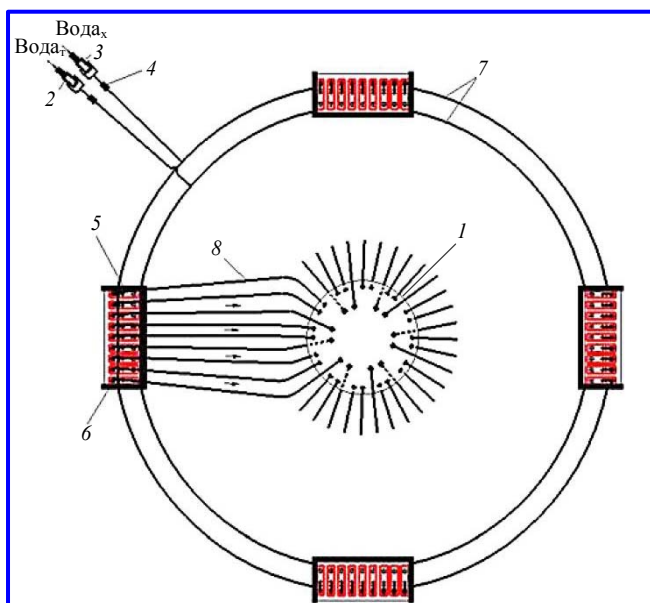
концентраций  $[\text{Ar}]:[\text{N}_2] = 45:1$ ), находящийся под давлением 1 МПа. Оболочка газгольдера является вторым защитным барьером на пути проникновения радиоактивных веществ в окружающую среду.

При возведении и эксплуатации ЯОП-установки газгольдер с радиусом оболочки  $R = 15 \text{ м}$  (рис. 1) должен быть устойчивым к опрокидыванию при действии ветровой нагрузки и стойким к сейсмическим воздействиям. Эти требования должны выполняться за счёт достаточной жёсткости и прочности конструкции и применения специальной оснастки.

Монтаж и испытания крупногабаритного оборудования выполняются до замыкания оболочки газгольдера, который должен быть оснащён предохранительными устройствами от повышения давления выше допустимого значения 1,2 – 1,3 МПа, включая дистанционные средства регистрации и сброса давления.

После завершения всех работ с газгольдером (включая устройства защиты резервуаров от прямых ударов молнии и защиту от заноса высокого потенциала по подземным и наземным металлическим коммуникациям) до загрузки радиоактивных отходов проводятся пневматические испытания сжатым воздухом или инертным газом по инструкции, предусматривающей необходимые меры безопасности и утверждённой в установленном порядке при условии контроля этого испытания методом акустической эмиссии или другим, согласованным с Госгортехнадзором России методом [5].

До нагружения давлением должен быть выполнен радиографический и ультразвуковой контроль конструкции с целью выявления в сварных соединениях внутренних дефектов (трещин, непроваров, пор, шлаковых включений и др.).



**Рис. 1.** Оболочка 1 хранилища (вид сверху); 2, 3 – насосы Д1600-90а (показаны только основные); 4 – задвижка; 5 – теплообменник (36 шт.); 6 – вентилятор; 7 – кольцевые трубопроводы подвода и отвода воды; 8 – трубопроводы для подвода охлаждённого газа.

**П р и м е ч а н и е:** верхние люки и трубопроводы для отвода газа не показаны

Расстояние $r$ (м) от центра хранилища	Мощность дозы $P_x$ (Р/ч)	Толщина $d$ защиты из бетона, см
20	653	73
40	134	64
60	49	59
80	22	54
100	12	51
120	7	48
140	4	45
160	3	42
180	2	40
200	1	37
220	0,73	35
240	0,5	33
260	0,35	31
300	0,18	27
400	0,04	18
500	0,009	10
600	0,002	2,5
700	0,001	0
800	0,00017	0
900	0,00005	0
1000	0,00001	0

Время выдержки под пробным давлением устанавливается разработчиком проекта, но должно быть не менее 5 мин. Величина пробного давления определяется по формуле:

$$P_{пр} = 1,25P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}, \quad (1)$$

где  $P = 1$  МПа – проектное давление сосуда;  $[\sigma]_{20}$ ,  $[\sigma]_t$  – допускаемые напряжения для материала газгольдера или его элементов соответственно при 20°C и проектной температуре, МПа. Отношение  $[\sigma]_{20} / [\sigma]_t$  принимается по тому из использованных материалов элементов газгольдера (обечаяк, днищ, фланцев, крепежа, патрубков и др.), для которого оно является наименьшим.

Произошедшие аварии на промышленных объектах (включая случаи взрыва, которые были вызваны внезапным разрушением сосудов со сжатым газом) показали, что одним из возможных путей снижения риска является обеспечение безопасного расстояния от места взрыва до жилой застройки. Из расчёта избыточного давления на фронте ударной волны следует, что в данном случае промышленные здания следует располагать не ближе 250 м от газгольдера, а безопасное расстояние от места взрыва для человека 216 м. Эти требования должны выполняться и при проведении пневматических испытаний сжатым воздухом или инертным газом.

Для размещения персонала (10 чел.), пульта управления с возможностью нести вахту, двух инверторов и аккумуляторной батареи должно быть построено здание площадью 120 м<sup>2</sup> и гараж – не ближе 250 м от газгольдера.

До загрузки бочек с РАО для уменьшения риска их разгерметизации установка по утилизации радиоактивных отходов должна иметь несколько высоконадёжных автономных источников электроэнергии (по 200 кВт) для обеспечения непрерывной работы насосов и вентиляторов на случай отказа выработки электроэнергии ЯОП-установкой.

При транспортировке бочек важно обеспечить надёжное и непрерывное охлаждение; учитывая высокий уровень гамма-излучения, бочки можно перевозить в модифицированных стандартных контейнерах для перевозок отработавшего топлива. Монтаж корзин с бочками в хранилище производится после выхода на рабочий режим разомкнутой воздушной системы охлаждения.

По окончании монтажа бочек и герметизации контуры системы охлаждения замыкают через

охлаждаемые водой теплообменники; обеспечивая надёжное и непрерывное охлаждение бочек, далее повышают давление до 10 атм.

Для поддержания качества аргоновой смеси и очистки её от различных примесей, часть смеси непрерывно прокачивается через фильтры; на случай разгерметизации нескольких бочек подключаются дополнительные фильтры системы очистки (в каждой из 36 труб, по которым отводится аргоновая смесь из газгольдера).

На маловероятный случай отказа более 30% вентиляторов в ЯОП-установке предусмотрена подача холодной воды непосредственно на бочки с РАО; мощность на подачу воды – 2 – 5 кВт. Для подвода и отвода воды использовано четыре насоса (из них два резервных), поэтому имеет смысл предусмотреть их привод от бензиновых двигателей.

Основным источником проникающей радиации отработанного топлива ядерных реакторов является гамма-излучение  $^{137}\text{Cs}$  (период полураспада 30 лет) с энергией фотонов  $E_\gamma = 0,662$  МэВ. Активность ОЯТ или РАО, размещённых в  $N = 216$  бочках; объёмом по  $V_1 = 0,196$  м<sup>3</sup>:

$$A = NV_1 f = 3,65 \cdot 10^{18} \text{ Бк} \sim 10^8 \text{ Ки}. \quad (2)$$

Мощность воздушной экспозиционной дозы  $P$  (Рентген/час) зависит от расстояния  $r$  (м) от источника до рабочего места:

$$P(r) = \frac{AK_\gamma e^{-\mu_2 r - \mu_1 \delta_1 - \tau R}}{r^2}, \quad (3)$$

где  $A = 10^8$  Ки – активность ОЯТ;  $T = 0,112$  м<sup>-1</sup> – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в аргоне;  $\mu_1 = 58,8$  м<sup>-1</sup> – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в железе;  $K_\gamma = 0,324$  Р·м<sup>2</sup>/(Ки·ч) – гамма-постоянная  $^{137}\text{Cs}$ ;  $R = 15$  м – радиус оболочки газгольдера;  $\delta_1 = 0,05$  м – толщина оболочки газгольдера;  $\mu_2 = 0,01$  м<sup>-1</sup> – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе при давлении 0,1 МПа [6].

Мощность эквивалентной дозы, используемая при проектировании защиты персонала от внешнего ионизирующего излучения для стандартной продолжительности пребывания в помещениях и на территории равна  $H = 1,4$  мбэр/ч – для продолжительности облучения 1700 ч/год [7].

В таблице показаны мощность дозы  $P_x$  и толщина  $d$  (см) защиты из бетона, которая вычисляется по формуле  $d = \ln(P_x/H)/\mu$ , где  $\mu = 0,178$  см<sup>-1</sup> – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в бетоне (плотность 2,3 г/см<sup>3</sup>) [8, 9].

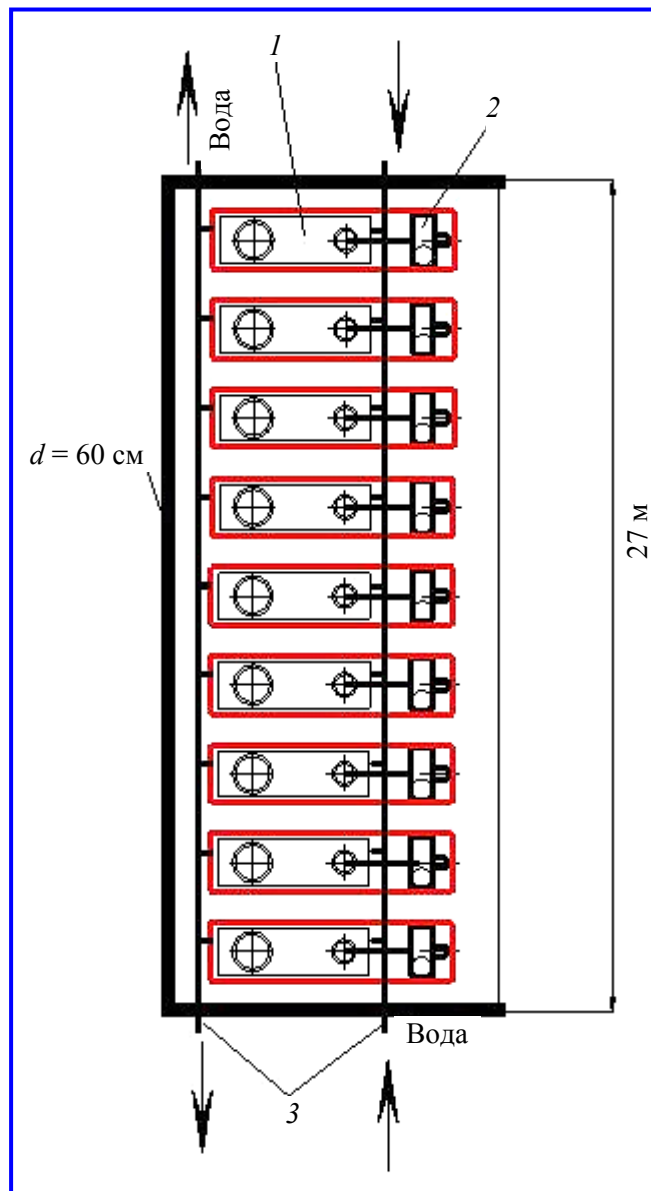


Рис. 2. Размещение теплообменников 1 и вентиляторов 2 в защищённом здании; 3 – трубы для подвода и отвода воды

Учитывая результаты расчётов, целесообразно разместить теплообменники и вентиляторы на расстоянии 60 м от центра сферического хранилища в четырёх железобетонных зданиях (по девять теплообменников и по девять вентиляторов в каждом, рис. 2); насосы для подвода воды к теплообменникам можно разместить на расстоянии 60 м (или большем удалении от газгольдера) в здании такой же конструкции (длиной 13 м) или объединить это здание с одним из четырёх сооружений, где размещены вентиляторы.

Для соблюдения действующих правил безопасности необходимы подъездная дорога и достаточный радиус санитарной зоны вокруг газгольдера –

не менее 4 км. Подъездная дорога должна иметь ширину проезжей части 6 м и обеспечивать интенсивность движения до 100 грузовых автомобилей в сутки грузоподъемностью свыше 14 т при нагрузке на одиночную, наиболее нагруженную ось двухосного автомобиля 10 тс (дорога IV категории по СНиП 2.05.02-85) [3].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что при соблюдении действующих правил безопасности для объектов использования атомной энергии ЯОП-установка будет иметь достаточный уровень безопасности – не ниже, чем на объектах использования атомной энергии. Размещать насосы и теплообменники следует на расстоянии не менее 60 м от газгольдера и не менее 250 м от персонала. Зона отчуждения вокруг ЯОП-установки – 4 км.

#### Литература

1. Карелин А. В. Теплофизические ограничения ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 43 – 51.  
2. Особенности конструкции сферического хранилища ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2011. – Т. 127. – № 2. – С. 49 – 53.

3. Экономические характеристики ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 33 – 44.

4. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом / И. А. Андрюшин, Ю. А. Юдин. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 1990. – 97 с.

5. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, для объектов использования атомной энергии. НП-044-03. – Введ. 2003 – 10 – 01. – М. : ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. – 70 с.

6. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 729 с.

7. Козлов В. Ф. Справочник по радиационной безопасности / В. Ф. Козлов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 352 с.

8. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: справочник / В. П. Машкович. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 296 с.

9. Нормы радиационной безопасности НРБ – 76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП – 72/87 / Минздрав СССР. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

Поступила в редакцию 19.11.2013

*Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела, т. (985) 121-84-49, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Леонид Алексеевич Амелин, канд. физ.-мат. наук, начальник сектора, т. (495) 994-54-88, e-mail: am-leonid@mail.ru.*

*Иван Николаевич Хиблин, нач. лаборатории, т. (495) 366-14-11, e-mail: nilbix@mail.ru.*