

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-218-227>

УДК 621.039; 628.398

ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-350 В ШАХТНОМ ХРАНИЛИЩЕ ТИПА «SILO»

Д. И. Абулгазиева*, В. А. Поспелов, В. В. Яковлев, А. Г. Коровиков

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: davydenko@nnc.kz

В статье представлено научно-техническое обоснование технологии долговременного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторной установки БН-350 в специализированном шахтном хранилище типа «silos». Приведены основные концептуальные решения, а также комплекс инженерных решений по обеспечению ядерной и коррозионной устойчивости шахтного хранилища. Проведены расчеты в обоснование безопасности хранения ОЯТ. Тепловой расчет ячейки шахтного хранилища показал, что даже без использования принудительного охлаждения максимальные температуры топлива и конструкционных элементов не превысят установленных пределов. Принятые объемно-планировочные решения по устройству шахтного хранилища обеспечивают подкритичность системы при всех рассмотренных условиях, включая не штатные ситуации. Результаты представленной работы могут быть использованы при рассмотрении дальнейших вариантов обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350.

Ключевые слова: реакторная установка БН-350, ОЯТ, шахтное хранилище, silo, безопасность, долговременное хранение.

ВВЕДЕНИЕ

Вывод из эксплуатации реактора на быстрых нейтронах БН-350 обусловил необходимость разработки безопасной и научно обоснованной системы обращения с образовавшимся ОЯТ. Долговременное хранение отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС) требует комплексного учета факторов радиационного воздействия, коррозионной агрессивности окружающей среды, механических нагрузок и длительности проектной эксплуатации.

В настоящее время существует ряд технологических решений по способам хранения ОЯТ после его выдержки в приреакторных бассейнах. Так называемые «сухие» хранилища могут представлять собой различные конструктивные решения. Например, бетонные модули вертикального и горизонтального исполнения. Каждый модуль рассчитан на установку нескольких ОТВС. Охлаждение ОЯТ в модулях происходит за счет естественной конвекции воздуха. В целом, железобетонный модуль обеспечивает достаточно надежную защиту от внешних воздействий и уменьшает до допустимых значений уровень излучения от ОЯТ. Большое распространение получило хранение ОЯТ в металлических, а позже, в железобетонных контейнерах двойного назначения [1]. Данный способ долговременного хранения был выбран для текущего обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350.

Одним из способов долговременного «сухого» хранения широко используемым в мире является хранилище шахтного типа или «silos». Концепция вертикального хранения шахтного типа состоит в следующем. Трубы из нержавеющей стали, называемые обсадная труба или шахта, устанавливаются вертикально в землю таким образом, чтобы верхняя

часть трубы выступала на несколько сантиметров над землей. Пеналы с ОЯТ загружаются в шахту, а сверху устанавливается крышка, защитная заглушка. Грунт обеспечивает пассивную защиту от радиации, что, в сочетании со специально заглушкой радиационной защиты, устанавливаемой поверх пеналов, обеспечивает требуемый уровень экранирования, в соответствии с нормативными требованиями. Почва также обеспечивает пассивный теплоотвод остаточного тепловыделения ОЯТ. Таким образом, вертикальное хранение шахтного типа обеспечивает радиационную и тепловую защиту, аналогичную защите, обеспечиваемой бассейнами мокрого хранения, но по своей природе такая защита является пассивной и безопасной и не зависит от оборудования или наличия электропитания, а также не вызывает опасений в отношении деградации, связанной с бассейнами мокрого хранения [1].

Примером использования концепции вертикального хранения шахтного типа является эксплуатация хранилища в Национальной лаборатории Айдахо. Данное хранилище успешно эксплуатируется более 60 лет. На площадке хранилища размещено 1350 обсадных труб из нержавеющей стали, вертикально заглубленных в землю. В них содержится ОЯТ реактора ЭРР-II, а также смешанные радиоактивные и опасные отходы. Шахты защищены от коррозии системой активной катодной защиты с анодным заземлением. Они установлены на расстоянии 1,83 м друг от друга в ряды, находящиеся на расстоянии 3,66 м друг от друга. В 1972 году в Национальной лаборатории Айдахо с целью хранения ОЯТ АЭС Пич-Боттом было построено хранилище ССР-749 (рисунок 1), состоящее из 47 шахт, которое впоследствии было расширено для ОЯТ других реакторов [2].



Рисунок 1. Хранилище ОЯТ CPP-749

Хранилище подобного типа также расположено в Японии в городе Токай. Основное различие между американской и японской версиями шахтного хранилища заключается в том, что в США обсадные трубы помещаются непосредственно в грунт, а в Японии используется подземная бетонная матрица, в которой размещаются скважины. Это хранилище эксплуатируется с 1982 года, в нем хранится около 15 тонн тяжелых металлов уранового металлического топлива исследовательского реактора JRR-3 [3].

В Австралии эксплуатируется хранилище Лукас Хайтс, которое состоит из 50 шахт, размещенных сеткой 5×10 м. Глубина каждой шахты, высверленной в скальном массиве, составляет около 15 м. Диаметр составляет 1,5 м. В каждую шахту вставлена труба из нержавеющей стали, которая проходит по всей её длине. В шахте может разместиться 11 канистр из нержавеющей стали, в каждой из которых содержится по 2 обрезанных тепловыделяющих элемента ОЯТ реактора NIFAR. Общая емкость хранилища составляет 1100 отработавших тепловыделяющих элемента [4].

С учетом применимости в мировой практике концепции шахтного хранилища в данной статье рассмотрены концептуальные решения и обоснования безопасности организации хранения ОЯТ реакторной установки БН-350 в хранилище данного типа.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными задачами при изучении вопроса размещения ОЯТ реакторной установки БН-350 в хранилище шахтного типа являлись выработка основных технических, конструкторских, проектных решений, а также проведение расчетного обоснования безопасности долговременно хранения.

При выработке проектных решений к хранилищу были определены основные технические требования:

- безопасное хранение чехлов с ОЯТ реакторной установки БН-350 должно осуществляться в ячейке хранилища в течение не менее 50 лет;
- глубина ячейки хранилища должна обеспечивать размещение в ней чехла с ОЯТ и установку защитной железобетонной пробки, достаточной для обеспечения радиационной безопасности;

– конструкция ячейки хранилища должна исключать несанкционированное извлечение ОЯТ из ячейки.

Каждая отдельная шахта рассчитана на загрузку чехла с ОЯТ реакторной установки БН-350, содержащего 6 тепловыделяющих сборок (ТВС) или 4 пенала с поврежденными ТВС (рисунок 2).

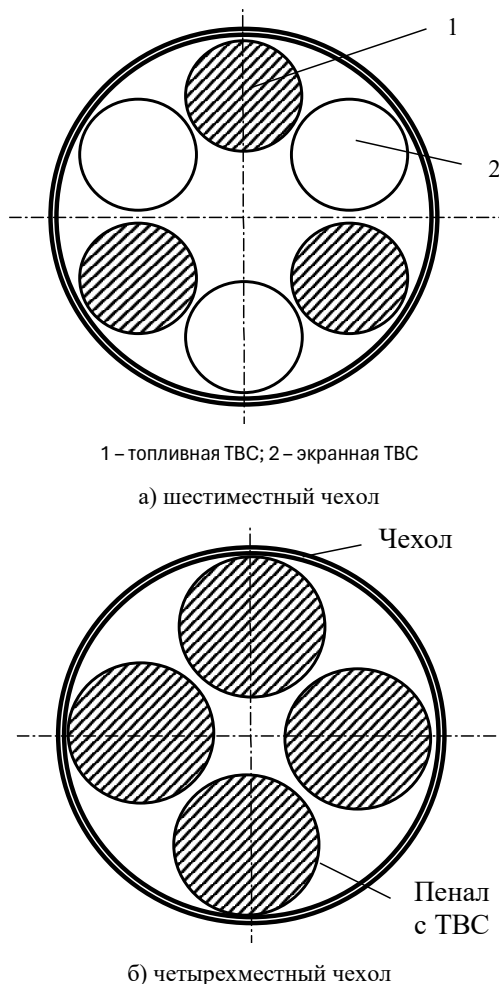


Рисунок 2. Схемы размещения топливных сборок в чехле

Данное решение обусловлено текущей конфигурацией ТВС в чехлах для ОЯТ реакторной установки БН-350, помещенных в транспортно-упаковочный комплект ТУК-123.

ШАХТНОЕ ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Хранилище ОЯТ представляет собой систему неглубоких вертикальных шахт (ячеек хранилища) глубиной 5 м, каждая из которых спроектирована и оборудована таким образом, чтобы обеспечить сохранность ядерных материалов и безопасность обслуживающего персонала.

Конструкция ячейки разрабатывалась с учетом дополнительной системы контроля сохранности ядерного материала (в состав ячейки входит контрольная скважина), требований прочности, долго-

**ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА
РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-350 В ШАХТНОМ ХРАНИЛИЩЕ ТИПА «SILO»**

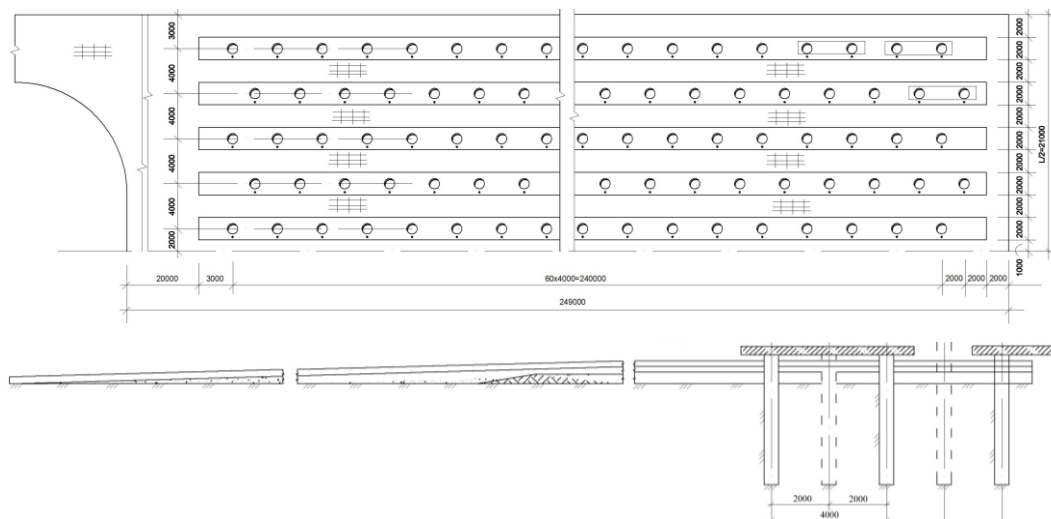


Рисунок 4. Схематический план шахтного хранилища

С целью предотвращения несанкционированного доступа к ячейке хранения, после загрузки чехла с ОЯТ реакторной установки БН-350, устанавливается защитная пробка, которая герметично заваривается, опционально сверху ячейки предусматривается дополнительная установка железобетонных блоков.

Для проведения транспортно-технологических мероприятий хранилище оборудуется грузоподъемными механизмами, перегрузочным контейнером, траверсами и другими приспособлениями.

ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ШАХТНОГО ХРАНИЛИЩА

Антикоррозионная защита ячеек хранилища

Долговременная надежность хранилища определяется устойчивостью металлических обсадных труб к коррозионным процессам в условиях воздействия влаги, хлоридов, продуктов радиолитического распада и ионизирующего излучения. Предложенная система антикоррозионной защиты носит многоуровневый характер и включает три функционально независимых уровня.

Первый уровень: конструктивно-химическая изоляция.

Обсадная труба изолируется от грунтовой среды посредством железобетонной трубы диаметром 800 мм. Межтрубное пространство заполняется цементно-известково-песчаным раствором состава.

Функциональное значение данного уровня защиты заключается в:

- ограничении проникновения влаги и ионов хлора;
- формировании щелочной среды, препятствующей развитию коррозии стали;
- нейтрализации продуктов радиолитического распада;
- предотвращении биокоррозионных процессов.

В случае локального разрушения защитного покрытия обсадной трубы ионы кальция (Ca^{2+}) образуют на поверхности металла малорастворимый карбонат кальция ($CaCO_3$), выполняющий функцию

катодного ингибитора. Применение анодных ингибиторов (нитритов) признано нецелесообразным вследствие возможного образования азотной кислоты под действием радиолитического распада.

Второй уровень: полимерная радиационно-стойкая изоляция.

Металлическая поверхность обсадной трубы защищается трехслойным эпоксидным покрытием, армированным стеклохолстом, с дополнительной обмоткой радиационно-обработанной термостойкой изоляционной лентой ЛЭТСАР-ЛПТ.

Основные критерии выбора покрытия:

- высокие диэлектрические характеристики;
- стойкость к ионизирующему излучению;
- низкую влагопроницаемость;
- устойчивость к действию хлоридов и сульфатов;
- биостойкость и механическую прочность;
- стабильность свойств в температурном диапазоне от $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Армирование стеклохолстом формирует стеклопластиковый композитный слой, повышающий механическую стойкость покрытия. Лента ЛЭТСАР-ЛПТ препятствует проникновению влаги к эпоксидному слою, что особенно важно на этапе заливки цементного раствора. Прогнозируемые дозы облучения покрытия соответствуют диапазону эксплуатационных характеристик, что подтверждает допустимость применения эпоксидных материалов в условиях длительного хранения ОЯТ реакторной установки БН-350.

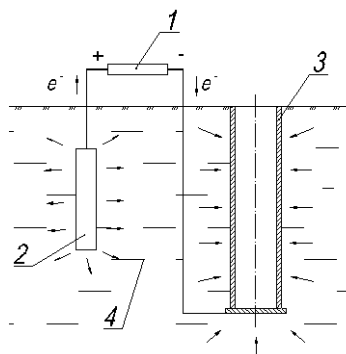
Третий уровень: электрохимическая защита.

Дополнительную устойчивость системы обеспечивает электрохимическая защита, предусматривающая:

- протекторную защиту (жертвенные аноды);
- катодную защиту;
- либо комбинированную схему.

На рисунке 5 показана принципиальная схема катодной защиты, осуществляемая от внешнего

источника тока. Защищаемая шахта поддерживается под отрицательным потенциалом по отношению к окружающей коррозионной среде, вследствие чего она является катодом. Второй электрод соответственно является анодом. Ток катодной защиты стекает в среду, окружающую шахту, с вспомогательного анода, на который и перемещается коррозионный процесс с защищаемой ячейки. Катодная защита возможна только тогда, когда защищаемая ячейка и вспомогательный анод находятся в электрическом и электролитическом контакте [5].



1 – внешний источник постоянного тока; 2 – вспомогательный анод;
3 – защищаемая шахта из стали Ст3 (Ст2, Ст4 и т.д.);
4 – коррозионная среда.

Рисунок 5. Принципиальная схема катодной защиты, осуществляемой от внешнего источника тока

В случае применения железобетонной обсадной и контрольной трубы с облицовкой нержавеющей сталью, катодная защита не применяется.

РАСЧЕТЫ

Тепловой расчет

При проведении теплового расчета шахтного хранилища были приняты следующие условия.

ТВС размещаются в индивидуальных чехлах внутри ячеек «трубной фермы» с минимальным расстоянием между ячейками 4 м. Максимальное энерговыделение принято для наиболее консервативного случая – 190 Вт на одну топливную сборку и 35 Вт для экранной ТВС (через 3 года выдержки).

Максимальная тепловая мощность чехла составляет:

- 760 Вт – при размещении 4 топливныхборок;
- 675 Вт – при размещении 3 топливных и 3 экранныхборок.

Тепло от ТВС отводится конвекцией к газовой среде (аргон) внутри контейнера, далее к стенке контейнера и ячейки, после чего распространяется теплопроводностью через конструкционные материалы и грунт в окружающую среду.

Рассмотрены два режима теплообмена на поверхности:

- нормальные условия: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи $20\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

- экстремальные условия: $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи $5\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

Рассмотрены три варианта конструкции ячейки:

- 1) Стальная цилиндрическая оболочка.
- 2) Стальная оболочка с дополнительной железобетонной защитой.
- 3) Бетонная оболочка с внешней стальной оболочкой из нержавеющей стали.

Теплофизические свойства материалов (сталь, бетон, грунт, песок) принимались при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно справочным данным. Температурное поле определялось методом конечных элементов в двумерной осесимметричной постановке.

Расчетная схема и результаты расчета температурного поля грунта для первого варианта конструкции ячейки при двух вариантах граничных условий на верхней границе расчетной схемы приведена на рисунке 6. Результаты расчета температурного поля грунта для второго и третьего варианта конструкции ячейки при двух вариантах граничных условий на верхней границе расчетной схемы приведены на рисунках 7 и 8 соответственно.

В таблице 1 приведены результаты расчета максимальной температуры внутри ячейки максимальной температуры поверхности бетонной крышки для всех шести вариантов расчета.

Таблица 1. Расчетная температура

Описание варианта расчета	Средняя температура внутренней поверхности ячейки, $^{\circ}\text{C}$	Максимальная температура поверхности бетонной крышки, $^{\circ}\text{C}$
1 конструкция; $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_1 = 20\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	112	37
1 конструкция; $T_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_2 = 5\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	146	84
2 конструкция; $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_1 = 20\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	107	36
2 конструкция; $T_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_2 = 5\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	141	82
3 конструкция; $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_1 = 20\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	125	30
3 конструкция; $T_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_2 = 5\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	155	67

Из результатов расчета, приведенных в таблице 1, видно, что для третьего варианта конструкции ячейки температура крышки меньше в среднем на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с результатами расчета для 1-й и 2-й конструкции. Но, в то же время, для третьего варианта конструкции средняя температура поверхности внутри ячейки больше на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчета температуры стенки ячейки, температуры среды в ячейке, температуры чехла, температуры среды в чехле и температуры пеналовборок твэлов при хранении ТВС в хранилище в чехле, помещенном в ячейку для шести рассмотренных выше вариантов расчета приведены в таблице 2.

**ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА
РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-350 В ШАХТНОМ ХРАНИЛИЩЕ ТИПА «SILO»**

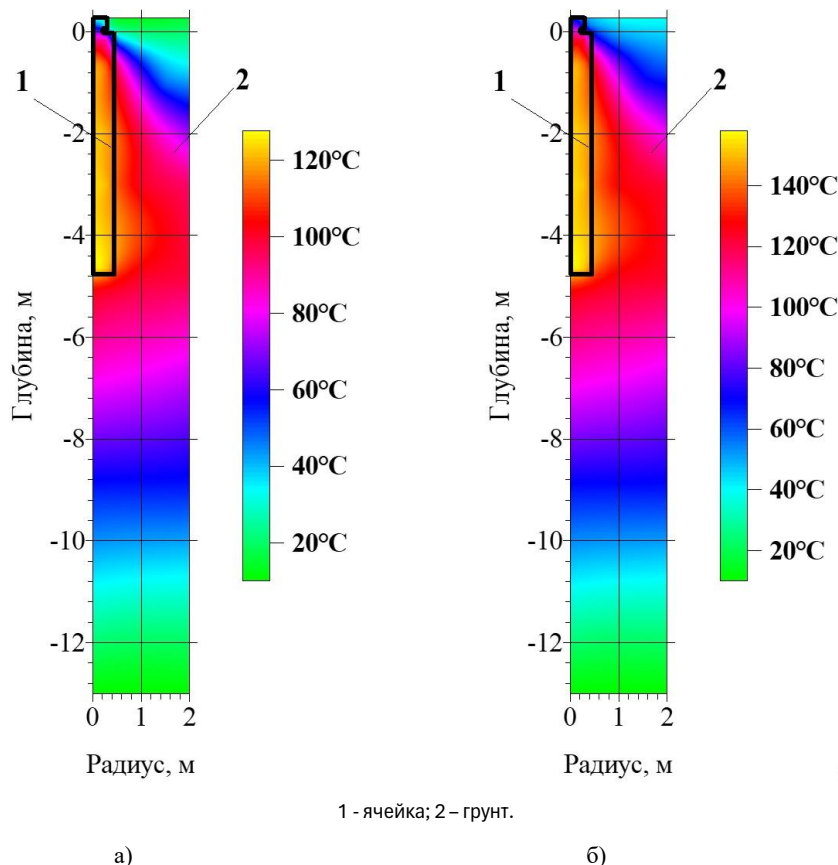


Рисунок 8. Результаты расчета для 3-го варианта ячейки (температура воздуха 20 °С, коэффициент теплоотдачи 20 Вт/м²·К (а) и 40 °С, 5 Вт/м²·К (б))

Таблица 2. Результаты расчета температуры

№ варианта	Температура внутренней поверхности ячейки, °С	Температура газа внутри ячейки, °С	Температура чехла, °С	Температура газа внутри чехла, °С	Температура пеналов ТВС, °С
1	112	142	168	200	221
2	146	176	202	234	255
3	107	137	163	195	216
4	141	171	197	229	250
5	125	155	181	213	234
6	155	185	211	243	264

Из результатов расчета, приведенных в таблице 2, видно, что для любой из трех рассмотренных здесь конструкций ячейки температура пеналов ТВС не превысит 264 °С, температура стенки чехлов не превысит 211 °С, температура внутренней стенки ячейки не превысит 155 °С.

Проведенные расчеты показали, что для рассмотренных вариантов конструкции ячейки при нормальной летней погоде, когда среднесуточная температура окружающей среды составляет 20 °С, максимальное значение температуры пеналов сборок ожидается ниже 235 °С, максимальное значение температуры внутренней поверхности ячейки хранилища не превысит 125 °С, максимальное значение температу-

ры внешней поверхности бетонной крышки не превысит 40 °С.

С точки зрения минимума температуры чехлов ТВС предпочтение следует отдать второму варианту конструкции ячейки.

Нейтронно-физические расчеты

Целью проведения нейтронно-физических расчетов являлся анализ шахтного хранилища с ОЯТ реакторной установки БН-350 на критичность. При этом были приняты следующие условия [6, 7]:

- при наличии в хранилище ядерного топлива с различной степенью обогащения анализ безопасности осуществлялся при условии, что топливо имеет максимальное обогащение;

ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-350 В ШАХТНОМ ХРАНИЛИЩЕ ТИПА «SILO»

– при наличии ядерного топлива с различным изотопным составом при анализе безопасности рассматривался такой его состав, который приводит к максимальному $K_{эфф}$;

– ОЯТ рассматривалось как свежее.

При проведении нейтронно-физических расчетов решались задачи по определению $K_{эфф}$ в хранилище в соответствии с расчетными моделями, представленными в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики расчетных моделей хранилища с топливом реакторной установки БН-350

Тип модели	Описание расчетной модели
1	Одиночная ТВС типа 2* с загрузкой 8,57 кг урана-235 в воздухе и в воде (с отражателем из воды толщиной 30 см)
2	Чехол из шести ТВС типа 2 с загрузкой 8,18 (8,57) кг урана-235 в воздухе и в воде (с отражателем из воды толщиной 30 см)
3	Группы из 2 и 3 чехлов, размещенных по треугольной решетке

**Примечание:* В реакторной установке БН-350 использовались ТВС трех типов с обогащением по урану-235 от 17% до 26%. Ввиду того, что количество ТВС типа 1 крайне невелико, в расчетных моделях использовались ТВС типа 2.

Расчетные модели групп из 2 и 3 чехлов рассмотрены в рамках консервативного подхода. Учитывая принятую компоновку ячеек хранилища (рисунок 4), данные конфигурации практически исключаются.

Расчеты выполнены в 3D геометрии с использованием кода MCNP6 [8, 9]. Расчетная модель твэла описывала его «активную» топливную часть (без газосборника и концевых элементов конструкции) и состояла из 4-х зон:

– оболочки из нержавеющей стали диаметром 6,9 мм и толщиной 0,3 мм;

– зазора между топливом и оболочкой толщиной 0,2 мм, заполненного гелием;

– сердечника из двуокиси урана с обогащением по урану-235 26% и плотностью 10,5–11,0 г/см³, внутри которого имеется газовая полость, диаметром 1,7 мм.

Расчетная модель ТВС по высоте состояла из трех зон: топливной части из 127 твэлов (ТВС типа 2), заключенных в оболочку из аустенитной нержавеющей стали. Из подобной же стали изготовлен и чехол ТВС, имеющий «размер под ключ» 96 мм и толщину 2 мм.

Во всех расчетных моделях высота активной (топливной) части составляла 1060 мм, сверху и снизу над ними находился отражатель (экранные зоны) из стержней с сердечником их обедненного урана толщиной 600 мм (практически бесконечные отражатели).

Расчетная модель чехла состояла из шести симметрично расположенных ТВС, окруженных двумя обечайками из нержавеющей стали и разделенных между собой перегородками из железа, толщиной 6 мм. Внутри упаковки эти перегородки доходят до внут-

ренней трубы из железа диаметром 60 и толщиной 2,5 мм.

Результаты проведения нейтронно-физических расчетов показали, что:

– одиночная ТВС реакторной установки БН-350 в воздушном окружении и не содержащая воды внутри себя имеет эффективный коэффициент размножения нейтронов не более $0,13 \pm 0,01$. Залив водой ее и окружающего пространства («бесконечный» отражатель) увеличивает $K_{эфф}$ до $0,55 \pm 0,01$;

– шесть сборок, расположенных на окружности диаметром 26 см в чехле (без разделительных стенок из железа толщиной 6 мм), залитые водой и в водяном окружении, имеют $K_{эфф} = 0,862 \pm 0,002$. Введение разделительных стенок уменьшает данный коэффициент до значения $0,793 \pm 0,002$. Одиночная канистра без воды внутри себя и в воздушном окружении имеет $K_{эфф}$ равный $0,463 \pm 0,005$;

– увеличение температуры топлива на 100 К приводит к небольшому росту $K_{эфф}$ – не более чем на 0,01. Удаление из чехла разделительных перегородок из углеродистой стали приводит к росту $K_{эфф}$ до $0,867 \pm 0,002$.

– изменение положения ТВС в ячейках чехла в пределах ее размеров изменяет $K_{эфф}$ в пределах $0,78 \dots 0,81$ (в водяном окружении);

– два расположенные чехла (зазор между чехлами 4 мм), залитые водой и в водяном окружении, имеют $K_{эфф} = 0,816 \pm 0,002$. Без разделяющих ТВС перегородок – $K_{эфф} = 0,882 \pm 0,002$.

– три рядом расположенных чехла (треугольная решетка, зазор между чехлами 4 мм) залитые водой и в водяном окружении имеют $K_{эфф} = 0,842 \pm 0,002$. Без разделяющих ТВС перегородок – $K_{эфф} = 0,908 \pm 0,002$.

По итогам проведенных расчетов можно сделать вывод, что при любых рассмотренных конфигурациях ТВС с ОЯТ реакторной установки БН-350 $K_{эфф}$ подкритичность системы соблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная концепция долговременного хранения ОЯТ реакторной установки БН-350 основана на принципах многобарьерной защиты. Шахтное хранилище имеет ряд преимуществ: относительная простота конструкции, приемлемая защита от внешних воздействий, обеспечение радиационной защиты и сохранности ядерного материала. При этом, размещение ОЯТ в ячейках шахтного хранилища позволяет при необходимости произвести их извлечение, транспортировку и переработку. В отличие от применения транспортно-упаковочных комплектов для хранения ОЯТ шахтное хранилище не требует прохождения процедуры периодической сертификации.

Комбинация конструктивной изоляции, радиационно-стойких полимерных покрытий и электрохимической защиты обеспечивает высокую коррозионную устойчивость металлических элементов шахтного хранилища «silo» и позволяет прогнозировать

безопасную эксплуатацию хранилища в течение проектного и пролонгированного срока хранения.

Принимая внимание вышеизложенное, данный способ хранения может быть применен для ОЯТ реакторной установки БН-350 после истечения проектного срока эксплуатации ТУК-123, если к тому времени ОЯТ не будет переработано или окончательно захоронено.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы BR24993104 «Проведение исследований в обоснование выбора эффективных и оптимальных способов и технологий обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency. Dry Storage of Spent Nuclear Fuel. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-G-3.2. Vienna : IAEA, 2014.
2. Национальная лаборатория Айдахо. Исследование вариантов технологии сухого хранения отработавшего топлива реактора БН-350. – Департамент энергетики США, 2000. [Natsional'naya laboratoriya Aydakho. Issledovanie variantov tekhnologii sukhogo khraneniya otrabotavshogo topliva reaktora BN-350. – Departament energetiki SShA, 2000.]
3. Japan Atomic Energy Agency. Spent Fuel Storage Facilities at Tokai-mura. – Tokai-mura : JAEA, 2016.
4. Ridal A., Bull P. Spent HIFAR fuel elements behaviour under extended dry storage // Australian Nuclear Science

- and Technology Organisation. – Lucas Heights, NSW : ANSTO, 1994. – Report ANSTO/E-719.
5. Коновалов В.П. Технологии сухого хранения отработавшего ядерного топлива. – СПб. : Наука, 2016. – 280 с. [Konovalov V.P. Tekhnologii sukhogo khraneniya otrabotavshogo yadernogo topliva. – SPb. : Nauka, 2016. – 280 p.]
 6. Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 февраля 2017 года № 58 «Об утверждении Технического регламента «Ядерная и радиационная безопасность»». – Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 11 апреля 2017 года № 15005. [Prikaz Ministra energetiki Respubliki Kazakhstan ot 20 fevralya 2017 goda No. 58 «Ob utverzhdenii Tekhnicheskogo reglamenta «Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'»». – Zaregistrirovan v Ministerstve yustitsii Respubliki Kazakhstan 11 aprelya 2017 goda No. 15005.]
 7. Приказ об утверждении и введении в действие стандарта Госкорпорации «Росатом» СТО 95 12002-2016 «Правила ядерной безопасности при хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-09-2016)». – № 1/1322-П от 26.12.2016. [Prikaz ob utverzhdenii i vvedenii v deystvie standartarta Goskorporatsii «Rosatom» STO 95 12002-2016 «Pravila yadernoy bezopasnosti pri khranenii i transportirovanii yadernykh delyashchikhsya materialov (PBYa-06-09-2016)». – No. 1/1322-P ot 26.12.2016.]
 8. RSICC Computer Code Collection MCNP6.2-EXE. – Los Alamos National Security, LLC, 2018.
 9. Brown B.F. Fundamentals of Monte Carlo particle transport. – Los Alamos : Los Alamos National Laboratory, 2005. – (LA-UR-05-4983).

БН-350 РЕАКТОРЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫҢ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЯДРОЛЫҚ ОТЫНЫН «SILO» ҮЛГІСІНДЕГІ ШАХТАЛЫҚ ҚОЙМАДА ҰЗАҚ УАҚЫТ САҚТАУ

Д. И. Абұлгазинова*, В. А. Поспелов, В. В. Яковлев, А. Г. Коровиков

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: davydenko@nnc.kz

Мақалада БН-350 реакторлық қондырғының пайдаланылған ядролық отынын (ПЯО) «silo» үлгісіндегі мамандандырылған шахталық сақтау орнында ұзақ уақыт сақтау технологиясының ғылыми-техникалық негіздемесі ұсынылған. Негізгі тұжырымдамалық шешімдер, сондай-ақ шахталық сақтау орнының ядролық және коррозиялық тұрақтылығын қамтамасыз ету жөніндегі инженерлік шешімдер кешені келтірілген. ПЯО сақтау қауіпсіздігінің негіздемесіне есептеулер жүргізілді. Шахталық сақтау орны ұяшығының жылулық есебі мәжбүрлі салқындатуды пайдаланбағанның өзінде отын мен конструкциялық элементтердің ең жоғары температурасы белгіленген шектен аспайтынын көрсетті. Шахталық сақтау орнының құрылысы бойынша қабылданған көлемдік-жоспарлау шешімдері штаттық емес жағдайларды қоса алғанда, барлық қаралған жағдайларда жүйенің сындарлылығын қамтамасыз етеді. Ұсынылған жұмыстың нәтижелері БН-350 реакторлық қондырғының ПЯО-мен жұмыс істеудің одан арғы нұсқаларын қарау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: БН-350 реакторлық қондырғы, ПЯО, шахталық сақтау орны, silo, қауіпсіздік, ұзақ уақыт сақтау.

LONG-TERM STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL FROM THE BN-350 REACTOR
IN A SILO-TYPE STORAGE FACILITY

D. I. Abulgazino^{*}, V. A. Pospelov, V. V. Yakovlev, A. G. Korovikov

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contact: davydenko@nnc.kz*

The paper presents the scientific and technical basis for the long-term storage of spent nuclear fuel (SNF) from the BN-350 reactor in a dedicated silo-type storage facility. The key conceptual provisions and engineering solutions aimed at ensuring nuclear safety and corrosion resistance of the storage system are described. Safety analyses were performed to substantiate the safety of SNF storage. Thermal analysis of an individual storage cell demonstrated that, even in the absence of forced cooling, the maximum temperatures of the fuel and structural components remain within established safety limits. The adopted layout and design solutions ensure subcriticality of the system under all considered conditions, including off-normal scenarios. The results of this study may be used to support the evaluation of further options for the management of SNF from the BN-350 reactor.

Keywords: *BN-350 reactor facility, SNF, silo-type storage facility, safety, long-term storage.*