

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-94-103>  
УДК 621.039.74

## АНАЛИЗ ПОДКРИТИЧНОСТИ В КОНТЕЙНЕРАХ ОЯТ РЕАКТОРА БН-350

**А. А. Прозоров\*, И. В. Прозорова, А. К. Мухамедиев, А. С. Акаев**

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатову Казахстан*

*\* E-mail для контактов: [raa@nnc.kz](mailto:raa@nnc.kz)*

Актуальность исследований связана с необходимостью анализа подкритичности при всех регламентированных и аварийных сценариях в условиях длительного хранения отработавшего топлива (ОЯТ) реактора БН-350. Хотя все основные расчеты и исследования были выполнены при разработке и проектировании хранилища, уточненные расчеты необходимы для подтверждения безопасного хранения ОЯТ БН-350 как реального и деградирующего объекта. Целью работы является оценка хранения контейнеров с точки зрения ядерной безопасности при соблюдении условий гарантированной подкритичности при некоторых аварийных ситуациях. Результаты исследования упаковочного комплекта хранения (УКХ) с восемью чехлами показывают, что при нахождении УКХ с ОЯТ в механически неповрежденном, либо поврежденном состоянии и даже в окружении группы УКХ величина эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{эфф}$  меняется незначительно, но начинает возрастать при появлении воды в расчетных конфигурациях. Наиболее критичной является ситуация при образовании в полостях контейнера и чехлов пароводяной смеси, что может произойти при деградации защитных оболочек контейнеров.

**Ключевые слова:** ОЯТ, метод сухого хранения, хранилище, реактор БН-350, эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k_{эфф}$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Все хранилища отработавшего топлива содержат большое количество радиоактивных материалов. Их эксплуатация осуществляется в строгом соответствии с требованиями компетентных национальных органов в сфере ядерной безопасности. Вопросы безопасности всех операций по хранению отработавшего топлива рассматриваются в серии международных руководств по безопасности, выпущенных МАГАТЭ и рядом других международных организаций и используемых в качестве основы для соответствующих национальных нормативных документов [1]. Каждое государство вводит собственные национальные правила ядерной безопасности на основе указанных нормативных документов. В своей совокупности они образуют свод строгих критериев и правил ядерной безопасности и радиационной защиты для достижения главной цели безопасности – защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения [2].

В соответствии с требованиями МАГАТЭ, изложенными в документе «Безопасность установок ядерного топливного цикла» №. SSR-4 [3], основная ответственность за безопасность установки ядерного топливного цикла на всех стадиях ее жизненного цикла возлагается на эксплуатирующую организацию. Эта ответственность включает обеспечение выполнения требований безопасности, в том числе на этапах проектирования, сооружения, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и подготовки к выводу из эксплуатации.

Физическая компоновка и размещение ОЯТ в хранилище должны обеспечивать поддержание под-

критичности в эксплуатационных состояниях и в аварийных условиях за счет геометрически безопасных конфигураций хранения (например, УКХ, стеллажей для хранения и пеналов). В проекте хранилища также должны быть указаны все дополнительные средства, необходимые для обеспечения безопасного хранения ОЯТ, такие как стационарные поглотители нейтронов, также использование запаса выгорания для достижения условий подкритичности в той степени, в какой это допускается регулирующим органом.

Для длительного хранения ОЯТ реактора БН-350 выбран способ сухого хранения. При реализации такого способа хранения отработавшие топливные сборки (ОТВС), упакованные в герметичные чехлы, размещаются в герметичных контейнерах на площадке длительного контейнерного хранения ОЯТ.

Системы сухого хранения обеспечивают те же функции безопасности, что и системы мокрого хранения, но без использования воды для целей охлаждения и защиты. Защита обеспечивается корпусом транспортно-упаковочного контейнера (ТУК) или транспортного пакета, а в некоторых случаях – экранированной камерой или специально оборудованным местом хранения. Локализация радионуклидов обеспечивается границами системы сухого хранения. Граница хранилища также играет важную роль в обеспечении безопасности по критичности, поскольку она исключает возможность появления в месте хранения ОЯТ замедлителя.

Оценка безопасности [4] должна систематически проводиться на протяжении всего жизненного цикла хранения ОЯТ с целью обеспечения соблюдения всех

соответствующих требований безопасности в предлагаемой (или фактической) конструкции.

Необходимо регулярно оценивать ожидаемые при эксплуатации события как «отклонение эксплуатационного процесса от нормальной эксплуатации, которое предположительно может произойти как минимум один раз в течение срока эксплуатации (эксплуатационного ресурса) хранилища, но которое благодаря соответствующим предусмотренным в проекте мерам не нанесет значительного повреждения узлам, важным для безопасности, и не приведет к аварийным условиям» [5].

Отработавшее ядерное топливо реакторов на быстрых нейтронах (ОЯТ РБН) имеет ряд отличий от топлива тепловых реакторов. Во-первых, это различия в геометрии и материалов (топливо реакторов на быстрых нейтронах – металлическое, нитридное, МОХ – обладает другими физико-химическими характеристиками, влияющими на его поведение во время хранения). Во-вторых, топливо БН характеризуется высоким содержанием актинидов и плутония – в ОЯТ РБН более высокая доля плутония и трансурановых элементов, что влияет на радиационную и критическую безопасность контейнеров. В-третьих, интенсивность дозы излучения и тепловыделение в топливе БН, как правило, более высокие, что обусловлено большей плотностью, и это предопределяет необходимость обеспечения усиленных мер отвода тепла и более точных расчетов нейтронно-физических характеристик. Такие особенности делают важным отдельные нормативы, методы оценки критичности и разработки защитных конструкций сухих хранилищ для ОЯТ РБН, что находит отражение в анализах подходов к управлению ОЯТ.

В статье [6] приведено обсуждение процессов пиromеталлургической переработки ОЯТ РБН, ключевого элемента закрытого топливного цикла. Авторами другой статьи описан новаторский подход к оценке ОЯТ перед захоронением с точки зрения нейтронных характеристик и тепловых ограничений [7]. В мировом сообществе стратегия обращения с ОЯТ сводится к полной оценке жизненного цикла топлива: промежуточное хранение (сухие контейнеры), переработка и извлечение ценных элементов (для закрытого цикла), окончательное захоронение [8].

Правовой основой для создания площадки долгосрочного контейнерного хранения отработавшего ядерного топлива (ДКХОЯТ) реакторной установки БН-350 послужило Постановление Правительства Республики Казахстан от 22 апреля 1999 года № 456 «О выводе из эксплуатации реактора БН-350 в городе Актау Мангистауской области», согласно которому РУ БН-350 должна быть приведена в состояние безопасного хранения на срок 50 лет с последующим демонтажем и захоронением [9].

В работе [10] приведены результаты расчета величин коэффициента размножения нейтронов ( $k_{эфф}$ ) при транспортировке восьмиместного металлобетонного контейнера, содержащего чехлы с отработавшим ядерным топливом реакторной установки БН-350 Мангышлакского атомного энергокомбината, рассмотрены нормальные условия перевозки ТУК с чехлами, а также аварийные ситуации – случаи повышения температуры ТУК (температура всех материалов ТУК достигает 800 °C).

В настоящее время все отработавшее ядерное топливо реактора БН-350 размещено на площадке долгосрочного контейнерного хранения отработанного ядерного топлива (ДКХОЯТ) в металлобетонных контейнерах, обеспечивающих возможность надежного, безопасного хранения ОЯТ в течение 50 лет [11]. Однако, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [12], концепция долгосрочного хранения не может рассматриваться в качестве окончательной «конечной точки» обращения с ОЯТ, а должна рассматриваться только в качестве временного решения.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования направлены на оценку условий хранения ОЯТ БН-350 контейнеров с точки зрения ядерной безопасности. Актуальность этих исследований обусловлена необходимостью проверки соблюдения условий гарантированной подкритичности при рассмотренных аварийных ситуациях.

В целом проведение уточненных расчетов при хранении ОЯТ БН-350 обусловлено необходимостью учета изотопного состава топлива, возможной деградации твэлов и внутренних конструкций контейнеров, а также анализа подкритичности при некоторых аварийных сценариях хранения в условиях длительной эксплуатации, которые ранее не были рассмотрены.

Результаты исследования возможно проверить с помощью других специализированных расчетных программ (MCU, SERPENT, SCALE и др.). Значение  $k_{эфф}$  не должно превышать нормативного ограничения по критерию безопасности  $k_{эфф} (+3\sigma) \leq 0,95$  при нормальных условиях эксплуатации и при рассмотренных аварийных ситуациях (без учета деформаций чехлов и решетки УКХ).

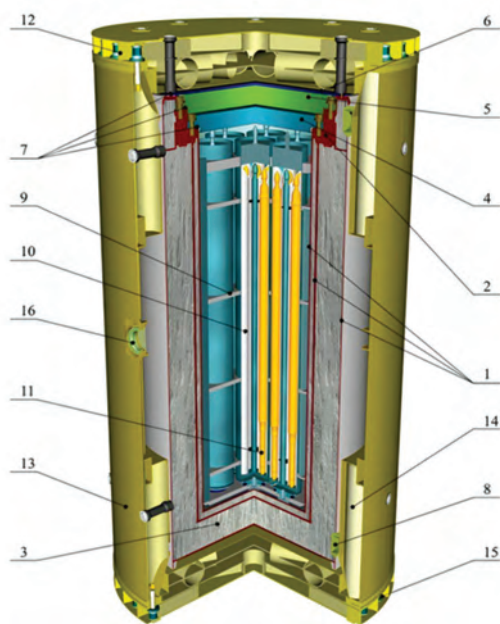
Результаты будут полезны для подтверждения безопасного хранения ОЯТ БН-350.

Технология хранения отработавшего топлива и конструктивное исполнение чехла предусматривают формирование нескольких последовательных барьеров на пути выхода радиоактивных продуктов и распространения ионизирующих излучений. Такой подход обеспечивает высокую степень безопасности персонала, населения, а также с необходимой степенью надежности исключает загрязнение окружающей среды.

В отчете [13] приведены разработанные в процессе анализа безопасности требования и критерии безопасности по размещению на хранение и хранению в течение 50 лет облученного ядерного топлива, которые соответствуют требованиям нормативно-технической документации, действующей в Республике Казахстан. В техническом обосновании безопасности хранилища показано, что количество барьеров на пути распространения продуктов деления достаточно для предотвращения их выхода в окружающую среду. Также обосновано сохранение целостности защитных барьеров как в условиях нормальной эксплуатации (в том числе при разогреве топливных сборок от остаточного энерговыделения), так и при авариях или стихийных бедствиях (ураган, землетрясение и т.п.). По результатам анализа безопасности разработаны планы противоаварийных мероприятий.

Для упаковки и длительного хранения ОЯТ БН-350 разработаны изделия ТУК-123 МБК (металлобетонный контейнер) БН-350. В состав изделия ТУК-123 входят следующие компоненты:

- упаковочный комплект для хранения (УКХ);
- защитно-демпфирующий кожух (ЗДК);



1 – стальные оболочки корпуса металлобетонного контейнера (МБК), 2 – комингс, 3 – особо прочный сверхтяжелый бетон, 4 – внутренняя крышка, 5 – наружная крышка, 6 – герметизирующий лист, 7 – уплотнительные элементы, 8 – гнезда для подъема и кантовки УКХ, 9 – дистанционирующая решетка, 10 – чехлы для ОЯТ БН-350, 11 – ОЯТ, 12 – верхняя крышка защитно-демпфирующего кожуха (ЗДК), 13 – цилиндрическая оболочка ЗДК, 14 – трубчатые упругопластические элементы, 15 – днище ЗДК, 16 – гнезда для подъема и кантовки ТУК

Рисунок 1. ТУК-123 в сборе (упаковочный комплект хранения УКХ-123 установлен в защитно-демпфирующий кожух ЗДК).

– запасные части и приспособления.

Упаковочный комплект хранения содержит:

- металлобетонный контейнер (МБК);
- дистанционирующую решетку.

Основные габаритно-массовые характеристики ТУК-123 и его составных частей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Габаритно-массовые характеристики ТУК-123 и его составных частей

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| УКХ                                  |      |
| Масса порожнего УКХ, т, не более     | 85,1 |
| Вместимость (количество чехлов), шт. | 8    |
| ЗДК                                  |      |
| Наружный диаметр, мм                 | 3140 |
| Длина, мм                            | 6300 |
| Масса, т, не более                   | 26,2 |
| ТУК-123                              |      |
| Вместимость (количество чехлов), шт. | 8    |
| Наружный диаметр, мм                 | 3140 |
| Длина, мм                            | 6230 |
| Масса с топливом, т, не более        | 130  |

Упаковка с 6 ОТВС (рисунок 2) – цилиндрическая емкость, изготовленная из нержавеющей стали и предназначенная для длительного сухого хранения отработанного топлива БН-350. Она состоит из цилиндрической оболочки с приваренным днищем (корпуса упаковки), защитной крышки упаковки и внутренней шестиместной корзины.

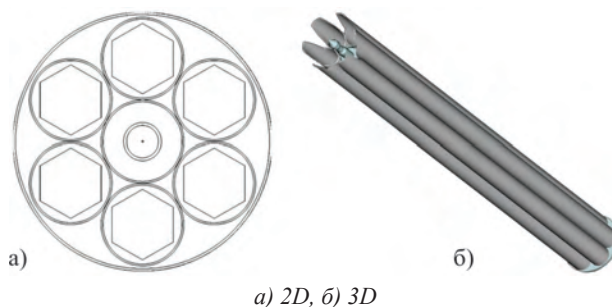


Рисунок 2. Схема 6-местной упаковки

6-местные упаковки установлены в восьмиместные чехлы (рисунок 3), которые для длительного хранения размещены в металлобетонные контейнеры УКХ.

Расчетная конфигурация ОТВС приведена на рисунке 4. Для описания твэла использовалась упрощенная модель: топливная таблетка предполагалась размещенной по всему объему внутри оболочки, без центрального отверстия диаметром 1,7 мм и зазора 0,1 мм между таблеткой и оболочкой (материал таблетки был гомогенизирован с учетом этого). Дистанционирующая проволока диаметром 1,05 мм гомогенизировалась вместе с оболочкой. Размеры оболочки

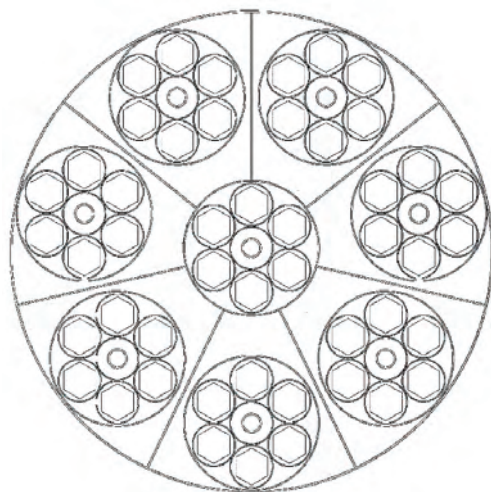


Рисунок 3. Схема восьмиместного чехла

твэла, дистанционирующей проволоки вытеснителей и шестигранного чехла ОТВС были уменьшены на величину допуска при изготовлении. Величина допуска при изготовлении для оболочки твэла принималась равной 0,04 мм и использовалась для всех элементов ОТВС. В модели вытеснители и шестигранный чехол ОТВС представлялись одним однородным слоем.

Технология сухого хранения, реализованная для размещения отработавшего ядерного топлива реактора БН-350, относится к сравнительно новым направлениям в области обращения с ОЯТ. В отличие от традиционных систем хранения в бассейнах выдержки, мировой опыт промышленной эксплуатации сухих контейнерных хранилищ насчитывает немногим более четырех десятилетий. В частности, первая лицензия на эксплуатацию сухого контейнерного хранилища ОЯТ была выдана в 1986 году для площадки атомной электростанции Surry (штат Вирджиния, США) [14, 15]). Для конструкторских организаций Российской Федерации, разработавших проект системы долговременного сухого хранения ОЯТ БН-350, решение подобной задачи осуществлялось фактически впервые, что обусловило необходимость опоры преимущественно на расчетные методы обоснования безопасности. Несмотря на наличие теоретических и расчетных оценок, свидетельствующих о возможности безопасного хранения ОЯТ в сухих контейнерных системах в течение 50-100 лет, фактическая экспериментальная база, подтверждающая надежность таких систем на сопоставимых временных интервалах, в настоящее время остается ограниченной. В статье [16] представлены результаты  $\gamma$ -спектрометрического обследования контейнеров, содержащих ОЯТ реактора БН-350.

Нейтронно-физические расчеты выполнены с использованием следующих консервативных предположений (критические конфигурации):

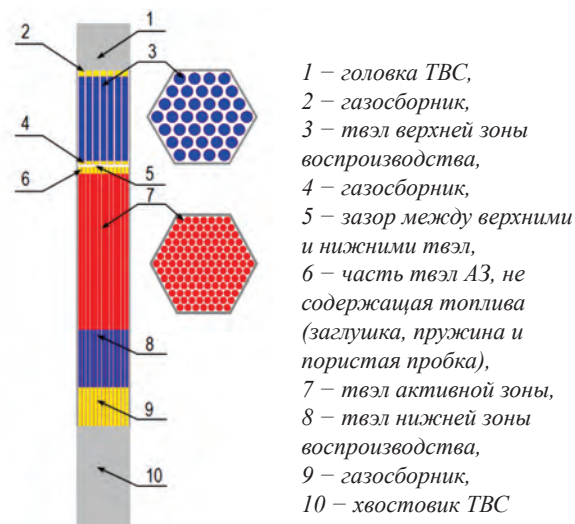


Рисунок 4. Расчетная конфигурация ТВС реактора БН-350

- «нулевой» вариант при нормальных условиях эксплуатации;
- при проведении расчетов учитывалось присутствие воды внутри ОТВС;
- присутствие воды вблизи делящегося материала учитывалось для имитации максимального нейтронного взаимодействия между несколькими делящимися системами;
- наиболее опасный вариант, когда вследствие разрушения защитных элементов в ТВС, находящихся в шестиместном чехле, их твэлы могут расположиться относительно друг друга на оптимальном расстоянии для возникновения СЦР.

Отражающий слой возле оборудования в нейтронно-физических расчетах был задан 200 мм слоем воды, который имитировал аварийные конфигурации или реальные отражатели и 600 мм слоем бетона.

Для расчетов  $k_{эфф}$  использовался код MCNP версия 6 [17, 18]. Данный код основан на использовании метода Монте-Карло, с непрерывными сечениями по энергиям (библиотека ENDF/V версия 6), что является одним из достоинств программы. Вторым важным положительным свойством программы является то, что метод Монте-Карло не имеет геометрических ограничений. В расчетах использовались нейтронные таблицы  $S(\alpha, \beta)$ . Было задано свыше ста установочных циклов для создания асимптотического распределения источников деления до задания основных циклов расчетов для статистического анализа с хорошей сходимостью результатов. Рассчитанные значения  $k_{эфф}$  и погрешности его вычисления (одно стандартное отклонение) для всех расчетов являются комбинацией оценок по поглощению, по длине трека и плотности столкновений.

Для расчетов на критичность был использован следующий критерий оценки критичности: эффективный коэффициент размножения должен удовлет-

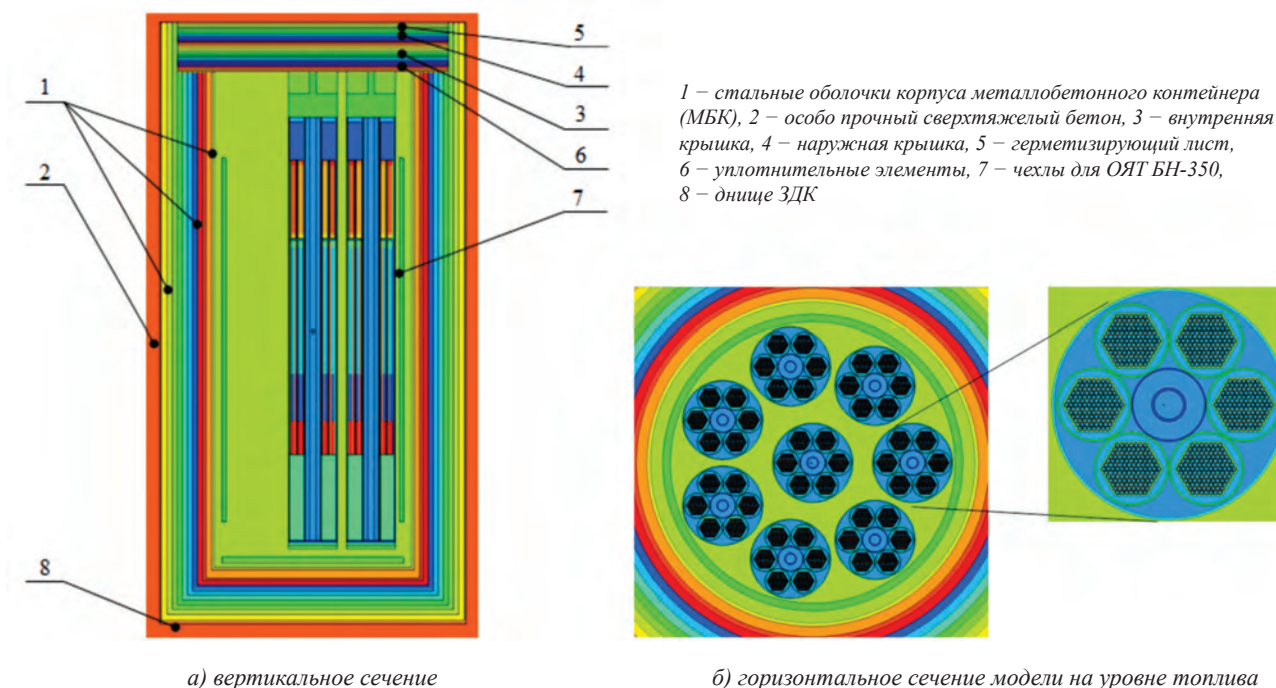


Рисунок 5. Модель ТУК-123 в сборе (упаковочный комплект хранения УКХ-123 установлен в защитно-демпфирующий кожух ЗДК).

ворять условию  $k_{эфф} + (3\sigma) \leq 0,95$  для нормальных режимов. Для аварийных ситуаций (присутствия воды или иных гидрогенизированных жидкостей, утраты защитного экранирования, сейсмического явления и т.д.) при любом единичном отказе, величина  $k_{эфф}$  отдельной единицы оборудования, изолированной системы оборудования должна быть не более 0,98 [19].

Присутствие воды на площадке ДХОЯТ может изменить условия замедления и/или отражения. В качестве консервативного предположения для расчетов безопасности по критичности рассматривается присутствие воды, паров воды в ТВС. Для каждой конфигурации рассматриваются наиболее опасные с точки зрения ядерной безопасности ситуации.

На рисунке 5 представлена нейтронно-физическая модель ТУК-123, указаны основные элементы модели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты по ядерной безопасности выполнены без учета выгорания топлива, что соответствует рассмотрению топлива с максимальным содержанием делящегося изотопа ( $^{235}\text{U}$ ). Это приводит к максимально возможному значению эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{эфф}$  и является консервативным подходом при обосновании ядерной безопасности. Стоит учесть факт отсутствия достоверных данных о реальном выгорании, фактическое выгорание ОЯТ БН-350 неоднородно и зависит от истории облучения. Его учет без верифицированных данных может привести к некорректному снижению  $k_{эфф}$ , что также

недопустимо с точки зрения безопасности. В практике расчетных обоснований подход с использованием «свежего» или условно малооблученного топлива широко применяется на этапах обоснования и лицензирования как наиболее консервативный.

Неучет деформаций внутренних конструкций контейнера хранения в расчетах ядерной безопасности обоснован отсутствием однозначного сценария деформации. Реальные деформации зависят от механических и термических факторов и требуют отдельного прочностного анализа. В рамках расчетов ядерной безопасности принято рассматривать предельные геометрические состояния, а не конкретные формы деформаций.

Проведены расчеты для нормальной эксплуатации – УКХ на слое бетона, внутри УКХ вода отсутствует, при этом значение  $k_{эфф}$  равно  $0,40652 \pm 0,00013$ .

Определены значения эффективного коэффициента размножения нейтронов для шестиместной упаковки (с 6 ТВС по 127 твэлов в каждой) с изменением расстояния между твэлами от минимального до максимально возможного. При этом упаковка заполнена и окружена водой, 127 твэлов располагались в узлах правильной треугольной решетки при различных шагах решетки, результаты расчетов представлены в таблице 2.

Для случая, когда пучок твэлов в ТВС, помещен в воду в плотно собранном виде (шаг решетки 0,81 см)  $k_{эфф} = 0,73012 \pm 0,00023$ . Для шага больше 1,6 см значение  $k_{эфф}$  превышает значение 0,98 для единичного отказа. С увеличением шага решетки расчетное значение

эффективного коэффициента размножения нейтронов возрастает до максимального  $1,22312 \pm 0,00033$  (при шаге 2,5 см), затем уменьшается. Это не удовлетворяет требованиям по ядерной безопасности и, следовательно, требуются мероприятия по недопустимости такой ситуации. Для предотвращения катастрофического разрушения ТВС в конструкции шестиместной упаковки для ТВС предусмотрено их размещение в отдельных трубах, чтобы ограничить возможность перераспределения топлива в случае разрушения шестигранного чехла ТВС.

Таблица 2. Результаты расчета  $k_{эфф}$  для аварийных ситуаций с изменением шага решетки твэлов

| Шаг, см | кэфф    | $\sigma$ (стандартное отклонение) |
|---------|---------|-----------------------------------|
| 0,81    | 0,73012 | $\pm 0,00023$                     |
| 1,00    | 0,85142 | $\pm 0,00025$                     |
| 1,05    | 0,88542 | $\pm 0,00021$                     |
| 1,10    | 0,91152 | $\pm 0,00023$                     |
| 1,20    | 0,97140 | $\pm 0,00033$                     |
| 1,50    | 1,08452 | $\pm 0,00025$                     |
| 2,00    | 1,18912 | $\pm 0,00019$                     |
| 2,30    | 1,22112 | $\pm 0,00031$                     |
| 2,50    | 1,22312 | $\pm 0,00033$                     |
| 2,70    | 1,22212 | $\pm 0,00027$                     |
| 3,00    | 1,20012 | $\pm 0,00031$                     |

Таким образом, рассчитан один из опасных вариантов, когда в следствие разрушения защитных элементов в ТВС (отсутствие шестигранного чехла в ТВС), находящихся в одном шестиместном чехле, их твэлы могут расположиться относительно друг друга на оптимальном расстоянии для возникновения СЦР.

В качестве гипотетических аварийных сценариев рассмотрены случаи последовательного нарушения защитных барьеров. В частности, при попадании транспортно-упаковочного контейнера (ТУК) в водную среду рассматривается сначала разгерметизация самого контейнера, а затем потеря герметичности защитных чехлов.

Следует учитывать, что нарушение герметичности чехлов возможно еще на стадии транспортирования, например, вследствие дефектов сварных соединений на этапе упаковки. В таких условиях проникновение воды внутрь чехлов может иметь место на этапе эксплуатации. В связи с этим при анализе аварийных ситуаций дополнительно рассмотрены следующие варианты распределения воды:

- наличие воды внутри УКХ при ее отсутствии в восьмиместных чехлах и во внешней среде;
- наличие воды внутри восьмиместных чехлов при ее отсутствии вне чехлов и за пределами УКХ;
- наличие воды внутри восьмиместных чехлов и во внешней среде при отсутствии воды вне чехлов.

Отдельно рассмотрен сценарий повышения температуры ТУК, например, в условиях возгорания. Было сделано предположение о внешнем возгорании, в частности, при падении самолета или дрона на хранилище ДХОЯТ БН-350. Температура плавления стали в среднем составляет от 1370 до 1540 °С, варьируясь в зависимости от марки, содержания углерода и легирующих элементов. Температура плавления бетона составляет в среднем 1200 °С. При этом существенная потеря структурной прочности и начало разрушения бетона происходят уже при 400–600 °С. Поэтому выбран такой уровень температуры, при котором существенно превышены нормальные эксплуатационные значения сухого хранения и он соответствует диапазону, при котором деградируют механические свойства материалов, возможно нарушение герметичности, изменение нейтронных свойств среды (через температурные сечения). Предполагается, что температура всех конструкционных материалов достигает 600 °С, при этом плавление не происходит, а геометрия элементов и их взаимное расположение остаются неизменными. Изменения линейных размеров и плотности материалов в расчетах не учитывались. Также проанализированы условия, возникающие при тушении пожара, включая возможное проникновение водяного пара во внутреннюю полость контейнера. Выполнены расчеты для значений плотности паров воды в полости контейнера: 1,0; 0,75; 0,5 и 0,25 г/см<sup>3</sup>. Задаваемая плотность воды в диапазоне от 1,0 до 0,25 г/см<sup>3</sup> отражает возможные состояния двухфазной пароводяной смеси при разгерметизации системы и кипении воды [20]. Уменьшение плотности моделирует рост паросодержания, что приводит к снижению эффективности замедления нейтронов. Критерием выбора значений плотности воды являлась необходимость проверить различные варианты и найти самый неблагоприятный.

В рамках исследования рассмотрен набор расчетных сценариев, отражающих возможные штатные и аварийные состояния упаковочного комплекта хранения (УКХ) при различных сочетаниях нарушений герметичности и внешних воздействий. Основное внимание уделено влиянию воды как эффективного замедлителя и отражателя нейтронов. Формирование сценариев выполнено по принципу последовательного отказа защитных барьеров и варьирования внешних условий, что соответствует консервативному подходу к анализу ядерной безопасности.

1. Внешнее обводнение при сохранении герметичности. УКХ рассматривается в окружении водяного отражателя при отсутствии воды во внутренних полостях. Данный сценарий моделирует внешние воздействия (атмосферные осадки, присутствие персонала), при которых вода действует исключительно как отражатель, не проникая внутрь системы.

2. Комбинированное влияние водного отражателя и отражателя из бетона. УКХ размещен на бетонном

основании и окружен водяным отражателем. Сценарий учитывает дополнительное влияние обратного рассеяния и отражения нейтронов со стороны бетона, что может увеличивать вероятность возврата нейтронов в область размещения топлива.

3. Частичная разгерметизация УКХ. Предполагается потеря герметичности корпуса УКХ с заполнением его внутренней полости водой при сохранении герметичности чехлов ТВС. Вода в данном случае выступает как замедлитель вне ТВС, не влияя непосредственно на внутреннюю структуру топливных сборок.

4. Полная разгерметизация системы. Рассматривается отказ всех барьеров герметичности: вода заполняет внутренние объемы УКХ, чехлов и ТВС. Сценарий соответствует наиболее консервативному случаю с максимальным замедлением нейтронов в топливной матрице.

5. Частичная (локальная) разгерметизация чехлов. При сохранении герметичности корпуса УКХ вода проникает только в чехлы и ТВС. Такая конфигурация может реализоваться при дефектах чехлов и характеризуется локальным увеличением замедления непосредственно в топливе.

6. Наличие паровой фазы в УКХ. Внутренний объем УКХ заполнен водяным паром. Сценарий моделирует условия неполного заполнения водой (например, после испарения), при которых плотность замедлителя внутри УКХ существенно ниже, чем у отражателя снаружи.

7. Обводнение УКХ в воздушной среде. УКХ находится в воздухе, при этом его внутренняя полость заполнена водой, а чехлы остаются герметичными. Сценарий отражает частичное проникновение воды внутрь контейнера без нарушения барьеров ТВС.

8. Полное обводнение в воздушной среде. Вода заполняет УКХ, чехлы и ТВС при отсутствии внешнего отражателя. Позволяет оценить вклад внутреннего замедления без дополнительного отражения извне.

9. Обводнение только чехлов в воздушной среде. Вода присутствует в чехлах и ТВС, но отсутствует в объеме УКХ. Рассматривается локальное изменение нейтронно-физических свойств системы без влияния внешнего замедлителя.

10. Пары воды внутри УКХ (без отражателя). Внутренний объем УКХ заполнен водяным паром при нахождении системы в воздухе. Сценарий используется для оценки промежуточных состояний между сухим и полностью обводненным режимами.

К рассмотренным ниже аварийным ситуациям отнесены случаи, связанные с проникновением воды через защитные барьеры и/или случаи возникновения пожара, когда преодолеваются несколько защитных барьеров. Рассмотрены ситуации, которые могут произойти при тушении возгорания и при попадании паров воды в центральную полость УКХ. Рассматриваемые состояния соответствуют постулируемым

аварийным ситуациям с тепловым воздействием, при которых возможно длительное отсутствие теплоотвода и/или последующее нарушение герметичности и поступление воды.

Сценарии 11–15 моделируют постулируемые аварийные состояния, сопровождающиеся перегревом системы хранения и последующей разгерметизацией. Температура материалов 600 °С принята в качестве консервативной оценки предельного нагрева при ухудшении теплоотвода. Предполагается, что к моменту поступления воды система разгерметизирована, вследствие чего давление в объеме близко к атмосферному, а температура пароводяной среды соответствует температуре насыщения (~100 °С). Варьирование плотности воды в диапазоне 0,25–1,0 г/см<sup>3</sup> моделирует различные режимы двухфазной пароводяной смеси – от полностью жидкого состояния до среды с высоким паросодержанием. Такой подход позволяет оценить влияние изменения плотности замедлителя на нейтронно-физические характеристики системы и обеспечивает консервативность анализа.

УКХ в воздухе на слое бетона. Температура всех материалов 600 °С. Для учета температуры была создана библиотека материалов на основе ENDF/B [21] с помощью программы NJOY по определенной процедуре, описанной ниже.

УКХ в воздухе на слое бетона. Температура всех материалов 600 °С. Все пустоты заполнены водой плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup>. Температура паров воды 100 °С, плотность водяного пара при этой температуре не учитывалась.

УКХ в воздухе на слое бетона. Температура всех материалов 600 °С. Все пустоты заполнены водой плотностью 0,75 г/см<sup>3</sup>. Температура паров воды 100 °С.

УКХ в воздухе на слое бетона. Температура всех материалов 600 °С. Все пустоты заполнены водой плотностью 0,5 г/см<sup>3</sup>. Температура паров воды 100 °С.

УКХ в воздухе на слое бетона. Температура всех материалов 600 °С. Все пустоты заполнены водой плотностью 0,25 г/см<sup>3</sup>. Температура паров воды 100 °С.

Температурная зависимость микроскопических сечений взаимодействия нейтронов с материалами учитывалась с использованием программного комплекса NJOY. Обработка исходных ядерных данных библиотеки ENDF/B включала реконструкцию сечений, доплеровское уширение резонансов до заданной температуры (600 °С ~ 873 К), а также формирование библиотек в формате ACE для последующего использования в коде Монте-Карло. Были сформированы температурные библиотеки для основных материалов при температуре 873 К с использованием модулей RECONR и BROADR комплекса NJOY.

Результаты расчетов по сценариям аварийных ситуаций представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета  $k_{эфф}$  для аварийных ситуаций

| Расчетная конфигурация | $k_{эфф}$ | $\sigma$ (стандартное отклонение) |
|------------------------|-----------|-----------------------------------|
| 1                      | 0,50305   | $\pm 0,00011$                     |
| 2                      | 0,50469   | $\pm 0,00014$                     |
| 3                      | 0,61164   | $\pm 0,00014$                     |
| 4                      | 0,73384   | $\pm 0,00013$                     |
| 5                      | 0,81443   | $\pm 0,00013$                     |
| 6                      | 0,88146   | $\pm 0,00012$                     |
| 7                      | 0,61154   | $\pm 0,00013$                     |
| 8                      | 0,73582   | $\pm 0,00012$                     |
| 9                      | 0,81506   | $\pm 0,00012$                     |
| 10                     | 0,88231   | $\pm 0,00012$                     |
| 11                     | 0,28189   | $\pm 0,00012$                     |
| 12                     | 0,44559   | $\pm 0,00014$                     |
| 13                     | 0,41446   | $\pm 0,00013$                     |
| 14                     | 0,38667   | $\pm 0,00013$                     |
| 15                     | 0,35298   | $\pm 0,00014$                     |

Анализ результатов показывает, что:

– значение эффективного коэффициента размножения  $k_{эфф}$  не превышает 0,95 при рассмотренных аварийных ситуациях.

– при изменении обстановки снаружи УКХ значение эффективного коэффициента размножения  $k_{эфф}$  почти не меняется, максимальное значение  $k_{эфф}$   $0,50469 \pm 0,00014$ .

– при появлении в расчетных конфигурациях воды значение эффективного коэффициента размножения  $k_{эфф}$  увеличивается. Наиболее критичной является ситуация при образовании в УКХ пароводяной смеси, максимальное значение  $k_{эфф}$  составляет  $0,88231 \pm 0,00012$ .

– при увеличении температуры материалов до 600°C значение эффективного коэффициента размножения  $k_{эфф}$  уменьшается, максимальное значение  $k_{эфф}$  составляет  $0,44559 \pm 0,00014$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что критерий безопасности  $k_{эфф} (+3\sigma) \leq 0,95$  [22,23] не превышен при рассмотренных аварийных ситуациях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка хранения контейнеров с точки зрения ядерной безопасности, при соблюдении условий гарантированной подкритичности при некоторых аварийных ситуациях.

В целом, проведение уточненных расчетов ядерной безопасности при хранении ОЯТ БН-350 обусловлено необходимостью учета возможной деградации ТВЭЛов и внутренних конструкций контейнеров, а также анализа результатов при некоторых аварийных сценариях хранения в условиях длительной эксплуатации.

Нейтронно-физические расчеты по ядерной безопасности выполнены с использованием консервативных предположений: выгорание топлива и деформации внутренних конструкций контейнера хранения не учитывались. Принятые допущения обеспечивают завышение значения эффективного коэффициента размножения нейтронов и соответствуют практике расчетного обоснования подкритичности.

В качестве консервативного предположения для расчетов безопасности по критичности рассматривается присутствие воды, паров воды в ТВС, так как присутствие воды на площадке ДХОЯТ может изменить условия замедления и/или отражения. Для каждой конфигурации рассмотрены наиболее опасные с точки зрения ядерной безопасности ситуации.

В ходе исследований проведены расчеты в обоснование ядерной безопасности для некоторых аварийных ситуаций (заполнение водой, увеличении температуры материалов до 600 °C). Во всех рассмотренных случаях коэффициент размножения нейтронов не превышает нормативного ограничения в 0,95.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Проект программно-целевого финансирования BR24993104 «Проведение исследований в обоснование выбора эффективных и оптимальных способов и технологий обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350»).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением. Серия норм безопасности МАГАТЭ, №GSR Part 5 – Вена: МАГАТЭ, 2010.
2. Руководство по вариантам и системам хранения отработавшего топлива. – Вена: МАГАТЭ, 2025.
3. Безопасность установок ядерного топливного цикла: конкретные требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № SSR-4. – Вена: МАГАТЭ, 2017.
4. Оценка безопасности установок и деятельности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 4 (Rev. 1), – Вена: МАГАТЭ, 2016.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022).
6. LIN Rushan, ZHONG Zhenya. Progress and Development Thinking of Dry Reprocessing Technology for Spent Nuclear Fuel from Fast Reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2025, 59(S1): 41-53. DOI: 10.7538/yzk.2025.youxian.0055
7. Wainwright, Haruko & Christiaen, Chloe & Atz, Milos & Tchakerian, John & Yu, Jiankai & Ridley, Gavin & Shirvan, Koroush. (2024). Cross-disciplinary Reactor-to-Repository Framework for Evaluating Spent Nuclear Fuel from Advanced Reactors. 10.21203/rs.3.rs-4579349/v1.
8. Finland will soon bury nuclear waste in a geological tomb that's built to last for 100,000 years. Sam Meredith <https://>

- www.cnbc.com/2024/08/29/onkalo-finland-to-bury-nuclear-waste-in-worlds-first-geological-tomb.html.
9. О выводе из эксплуатации реактора БН-350 в городе Актау Мангыстауской области Постановление Правительства Республики Казахстан от 22 апреля 1999 года № 456
10. Тур Е.С., Айсабеков А.Ж. Перевозка восьмиместного транспортно-упаковочного комплекта содержащего отработавшее ядерное топливо РУ БН-350 с точки зрения ядерной безопасности. *Вестник НЯЦ РК*. 2003;(4):94-98.
11. Mukhamedov, N.; Toleubekov, K.; Vityuk, G.; Bekmoldin, M.; Dolzhikov, S. Decommissioning of the BN-350 Fast Neutron Reactor: History Review and Current Status. *Energies* 2025, 18, 3486. <https://doi.org/10.3390/en18133486> <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3486?utm>
12. Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами. Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NW-G-1.1. – Вена: МАГАТЭ, 2012.
13. Обращение с отработавшим топливом реактора БН-350. Анализ и обоснование безопасности на этапе упаковки. Заключительный отчет. Том 1, 2, НЯЦ РК, 2001 г.
14. Dry Cask Storage <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/dry-cask-storage>
15. GAO-21-603 Commercial Spent Nuclear Fuel
16. Кривицкий П.Е., Мустафина Е.В., Прозорова И.В., Прозоров А.А., Чернов А.А. Оценка состояния ОЯТ реактора БН-350 в режиме долговременного хранения. *Вестник НЯЦ РК*. 2020;(2):167-170. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-2-167-170>
17. J. A. Kulesza, T. R. Adams, J. C. Armstrong, S. R. Bolding, F. B. Brown и др. MCNP® Code Version 6.3.1 Theory & User Manual. Los Alamos National Laboratory Technical Report LA-UR-24-24602, Rev. 1. Los Alamos, NM, USA. May 2024
18. Colvin J. Josey, R. Arthur Forster III, Fred B. Brown и др. The MCNP 6 code: A decade of progress, *EPJ Nuclear Sciences and Technologies* (2025). DOI: 10.1051/epjn/2025003.
19. ПБЯ-06-00-96. Основные отраслевые правила ядерной безопасности при использовании, переработке, хранении и транспортировании радиоактивных материалов: введ. приказом Министра от 14 декабря 1996 года №737
20. А.А. Александров, Б.А. Григорьев. «Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара». Справочник. Москва, «МЭИ», 1999.
21. F. B. Brown. Fundamentals of Monte Carlo Particle Transport. Los Alamos National Laboratory Presentation LA-UR-05-4983. Los Alamos, NM, USA. 2005.
22. Технический регламент «Ядерная и радиационная безопасность» (утвержден постановлением Правительства РК № 58 от 20 февраля 2017).
23. НП-061-05 «Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии»

## БН-350 ПЯО САҚТАУ КЕЗІНДЕ ЯДРОЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІКТІ НЕГІЗДЕУГЕ НАҚТЫЛАНҒАН ЕСЕПТЕУЛЕР

**А. А. Прозоров\*, И. В. Прозорова, А. К. Мухамедиев, А. С. Акаев**

*Атом энергиясы институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан*

\* Байланыс үшін E-mail: [raa@nnc.kz](mailto:raa@nnc.kz)

Зерттеулердің өзектілігі БН-350 реакторының пайдаланылған отынын (ПЯО) ұзақ мерзімді сақтау жағдайында сақтаудың барлық регламенттелген және авариялық сценарийлері кезінде субкритикалық талдау қажеттілігімен байланысты. Сақтау орнын әзірлеу және жобалау кезінде барлық қажетті есептеулермен зерттеулер жүргізілгенімен, нақты және деградациялық объект ретінде БН-350 ПЯО қауіпсіз сақталуын растау үшін нақтыланған есептеулер қажет. Жұмыстың мақсаты белгілі бір төтенше жағдайларда кепілдендірілген субкритикалық жағдайларды сақтай отырып, контейнерлерді ядролық қауіпсіздік тұрғысынан сақтауды бағалау болады. Сегіз қаптамасы бар сақтаудың қаптамалық жинағын (СҚЖ) зерттеу нәтижелері ПЯО бар СҚЖ механикалық зақымданбаған немесе зақымдалған күйде, тіпті СҚЖ тобымен қоршалған кезде,  $k_{эф}$  шамасы әлсіз өзгеретінін, бірақ есептелген конфигурацияларда су пайда болған кезде өсе бастайтынын көрсетеді. Ең маңыздысы – контейнер қуыстарында және бу-су қоспасының қаптарында пайда болған жағдай, бұл қорғаныс қабықтарының деградациясы кезінде пайда болуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** ПЯО, құрғақ сақтау әдісі, сақтау орны, БН-350 реакторы,  $k_{эф}$ .

SUBCRITICALITY ANALYSIS IN SNF CONTAINERS OF THE BN-350 REACTOR

A. A. Prozorov\*, I. V. Prozorova, A. K. Mukhamediev, A. S. Akaev

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,  
Kurchatov, Kazakhstan*

\* E-mail for contacts: paa@nnc.kz

The relevance of this research is associated with the need to analyze subcriticality under all regulated and accidental storage scenarios during the long-term storage of spent nuclear fuel (SNF) from the BN-350 reactor. Although all necessary calculations and studies were performed during the development and design of the storage facility, updated calculations are required to confirm the safe storage of BN-350 SNF as a real and aging facility. The objective of this work was to assess container storage from the standpoint of nuclear safety, ensuring guaranteed subcriticality under certain accident conditions. The results of the storage cask system (SCS) containing eight fuel canisters show that when the SCS with SNF is in either mechanically intact or damaged condition, and even when surrounded by a group of SCS units, the effective multiplication factor  $k_{\text{eff}}$  changes insignificantly. However, it begins to increase when water appears in the calculated configurations. The most critical situation occurs when a steam–water mixture forms in the cavities of the container and canisters, which may occur due to degradation of protective barriers.

**Keywords:** *spent nuclear fuel (SNF), dry storage method, storage facility, BN-350 reactor,  $k_{\text{eff}}$*