



СХК
РОСАТОМ

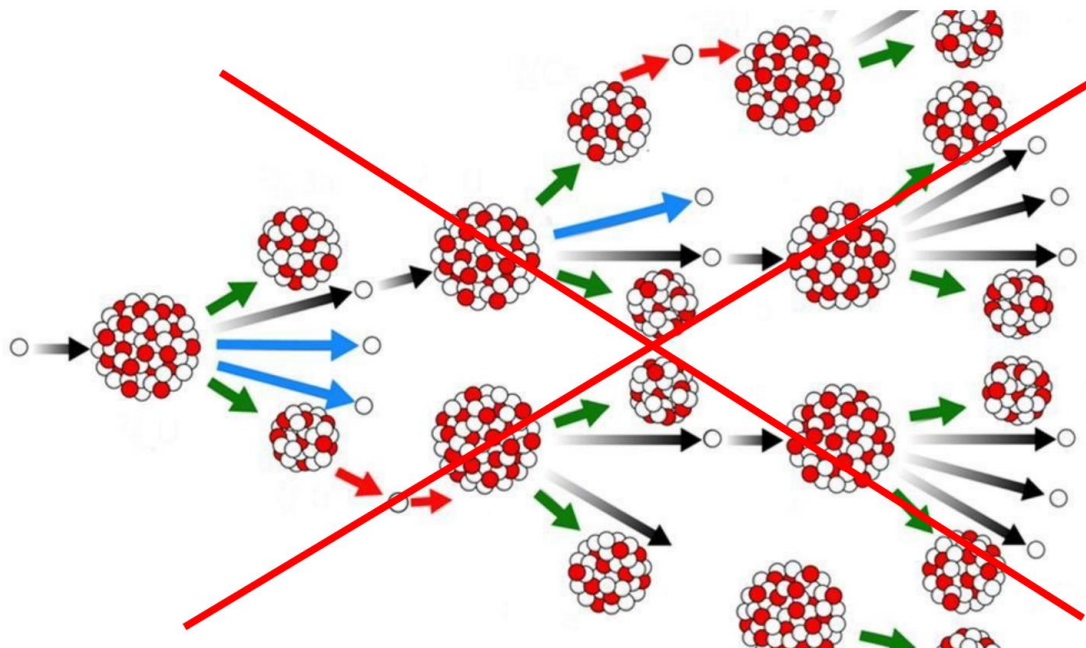
Обеспечение ядерной безопасности при хранении и транспортировании ЯДМ

Чередов Вячеслав Михайлович
Главный эксперт ЛРК ОРБ АО «СХК»

Введение.

Что такое «Ядерная безопасность»

Ядерная безопасность – это создание и поддержание условий, исключающих возникновение самоподдерживающейся реакции деления (СЦР) при переработке, хранении и транспортировке ЯДМ и снижению тяжести последствий ядерной аварии, если она произошла.



$$K_{эфф} < 1$$

Ядерное топливо



В соответствии **со статьей 3** Федерального закона **№ 170-ФЗ** «Об использовании атомной энергии»:

Ядерное топливо - ядерный материал, предназначенный для получения тепловой энергии и (или) потоков излучения в ядерной установке за счет осуществления контролируемой ядерной реакции деления;

Тепловыделяющая сборка ядерного реактора - машиностроительное изделие, содержащее ядерные материалы и предназначенное для получения тепловой энергии в ядерном реакторе за счет осуществления контролируемой ядерной реакции

Отработавшее ядерное топливо - ядерное топливо, облученное в активной зоне реактора и окончательно удаленное из нее

Свежее ядерное топливо - новое ЯТ или необлученное ЯТ, изготовленное из делящихся материалов, полученных в результате переработки облученного ядерного топлива.

Элемент тепловыделяющий ядерного реактора (твэл) — отдельная сборочная единица, содержащая ядерные материалы и предназначенная для получения тепловой энергии в ядерном реакторе за счет осуществления контролируемой ядерной реакции деления и удержания образующихся продуктов деления



Глоссарий НТЦ ЯРБ

Ядерные материалы - материалы, содержащие или способные воспроизвести делящиеся (расщепляющиеся) ядерные вещества;

Статья 3 170-ФЗ



Материал (вещество) ядерный делящийся — материал (вещество), содержащий делящиеся нуклиды (вещество), при работе с которым не исключена возможность возникновения самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления.



Обеспечение безопасности при хранении ЯДМ



Транспортный упаковочный комплект (упаковочный комплект) – предназначенный для транспортирования и/или хранения ЯДМ (В) комплекс (совокупность) конструкционных элементов, включающих при необходимости одну или несколько емкостей, сорбирующие вещества, дистанционирующие конструкции, устройства для защиты от излучений, для охлаждения и тепловой изоляции, амортизаторы и др., необходимых для обеспечения соответствия упаковки требованиям безопасности.

Упаковка (упаковка ЯДМ (В)) - упаковочный комплект с помещенным в него ЯДМ (В).



Упаковки (упаковочные комплекты)



Упаковки (упаковочные комплекты)



Упаковки (упаковочные комплекты)



Упаковки (упаковочные комплекты)



Упаковки (упаковочные комплекты)



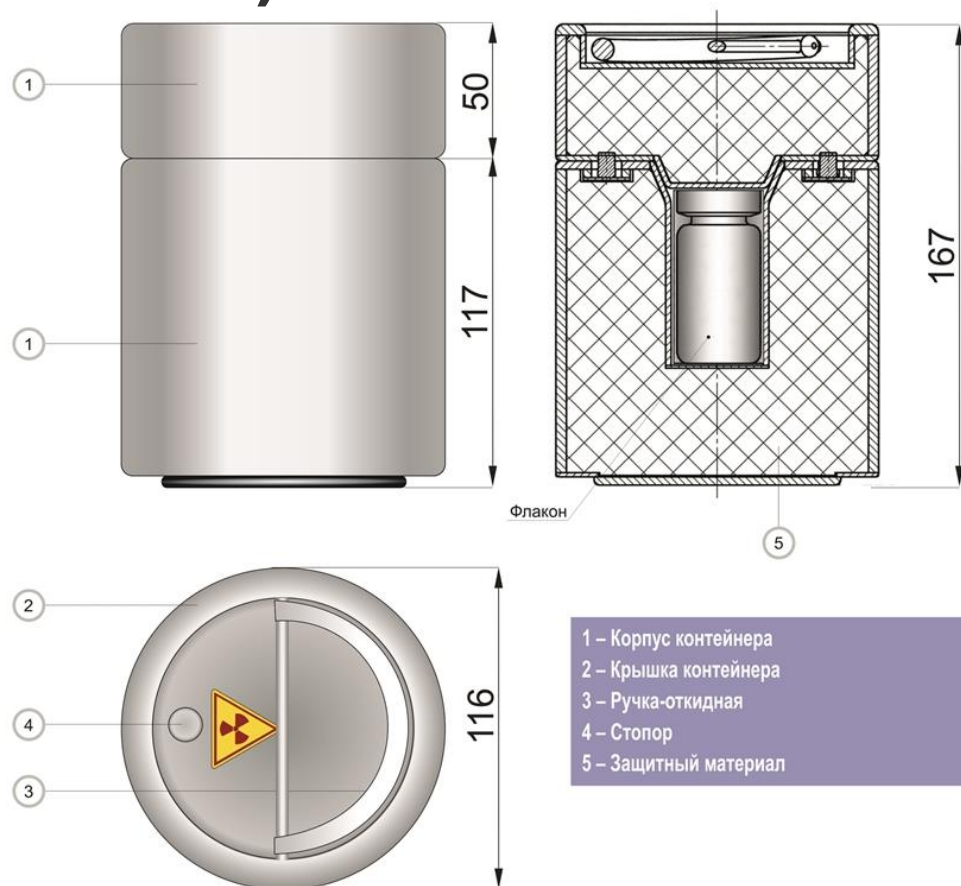
Упаковки (упаковочные комплекты)



Упаковки (упаковочные комплекты)



Упаковки (упаковочные комплекты)



Группа и штабель упаковок

Группа упаковок – это совокупность упаковок, которые разрешается хранить и транспортировать без ограничения взаимного размещения или с ограничением взаимного размещения, которое должно обеспечиваться техническими средствами, входящими в состав упаковочного комплекта.

Штабель упаковок или тепловыделяющих сборок - совокупность упаковок или тепловыделяющих сборок, которые разрешается хранить при условии соблюдения установленных ограничений на взаимное размещение упаковок или ТВС с помощью технических средств, не входящих в состав упаковочного комплекта (стеллажи, фиксаторы, разметка и т.п.).

Группа и штабель упаковок



Группа и штабель упаковок



Группа и штабель упаковок



Группа и штабель упаковок



Группа и штабель упаковок



СХК
РОСАТОМ



Группа и штабель упаковок



Упаковки с ЯДМ

Конструкция и загрузка отдельной упаковки должна обеспечивать значение **Кэф не более 0,95** в условиях нормальной эксплуатации и **0,98** при единичном исходном событии.

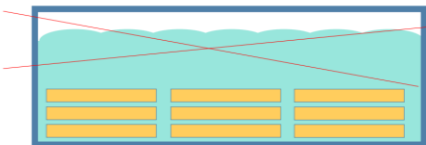
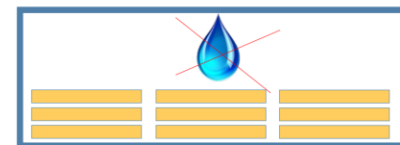
Упаковочные комплекты для хранения и внутриобъектового транспортирования ЯДМ следует проектировать как безопасное оборудование

Допускается использование опасных упаковочных комплектов только в том случае, если их ядерная безопасность обеспечивается дополнительными конструктивными решениями и организационными мерами (например, использованием вытеснителей, исключением попадания воды внутрь упаковочных комплектов в нормальных и аварийных условиях).

Хранение ЯДМ

Безопасная геометрия - геометрические параметры оборудования для хранения и транспортирования ЯТ, исключающие возможность возникновения СЦР при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии.

Хранилище класса 1 - хранилище свежего ЯТ, возможность попадания воды или другого замедлителя в которое исключена.



Хранилище класса 2 - хранилище свежего ЯТ, возможность затопления водой или другим замедлителем которого исключается, в том числе с помощью технических средств.

Хранилище класса 3 - хранилище свежего ЯТ, для которого не выполняются требования, предъявляемые к хранилищам классов 1 и 2. Плавающие хранилища относятся к классу 3

Хранение ЯДМ



Место временного хранения – это площадка, стеллаж, иное устройство, предназначенные для хранения ЯДМ в цехах, на производственных участках.

Постоянное хранилище ЯДМ - помещение для хранения ЯДМ в специальном здании или отдельных частях специального здания: склады сырья, готовой продукции, отходов, содержащих ЯДМ.

Временное хранилище - помещение, предназначенное для хранения ЯДМ в цехах, на производственных участках.

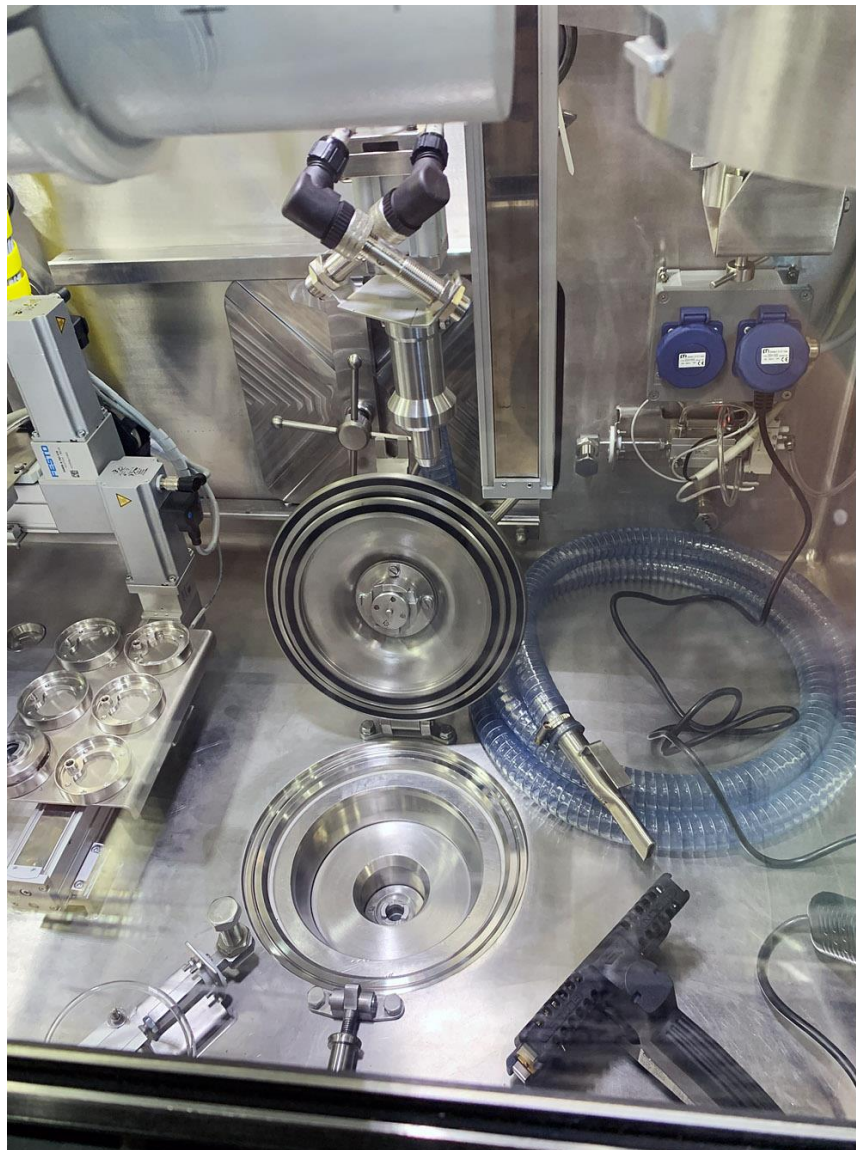
Хранение ЯДМ



Хранение ЯДМ



Хранение ЯДМ



Хранение ЯДМ



Хранение ядерного топлива - определенное проектом содержание ЯТ в условиях, которые обеспечивают его изоляцию, с намерением его последующего извлечения.

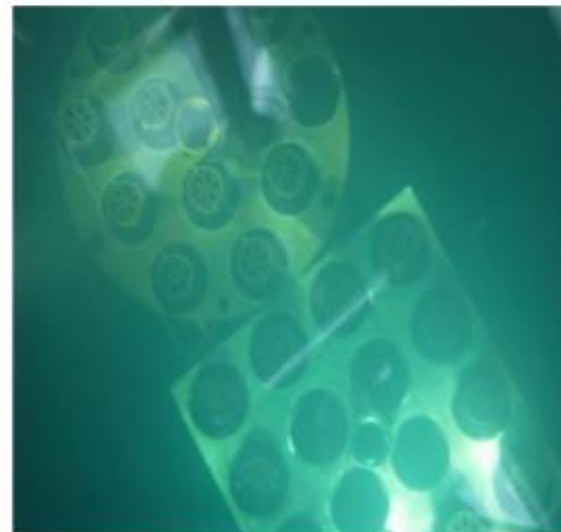
Хранилище ядерного топлива - пункт хранения ядерных материалов или сооружение, входящее в состав ядерной установки, предназначенное для хранения свежего или отработавшего ЯТ.



Сухое хранилище отработавшего ядерного топлива - хранилище, предназначенное для хранения ОЯТ в газовой среде (воздух или инертный газ).

Норма хранения (транспортирования) ядерного топлива - количество ЯТ, которое разрешается хранить (транспортировать) с учетом ограничений на его расположение.

Водоохлаждаемые (мокрые) хранилища



Характеристики хранилища:

Вместимость – более 8000 т по ОЯТ ВВЭР-1000;

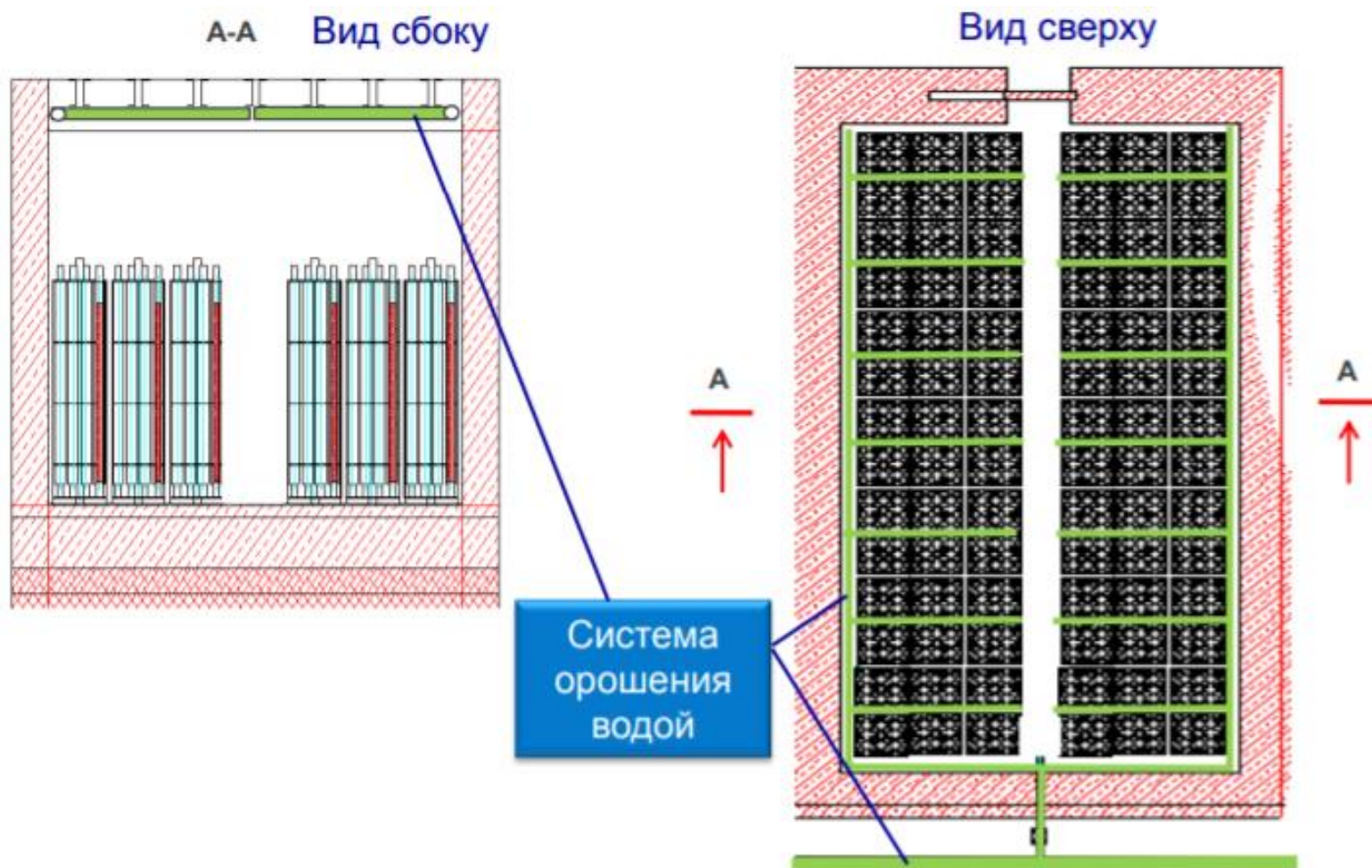
Общее количество воды в системе охлаждения – 40000 м³ ;

Температура воды в отсеках – max 50 °С;

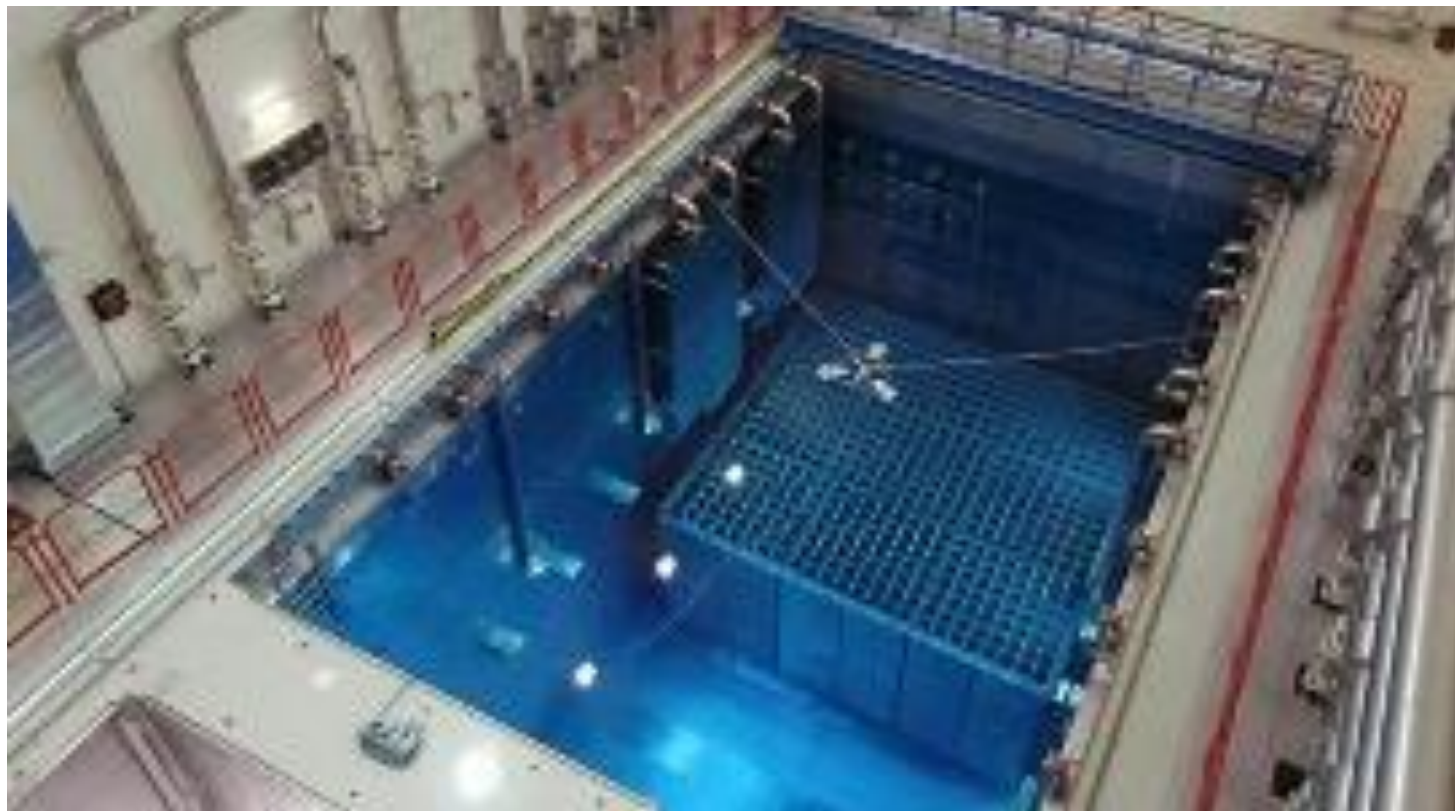
Наличие грузоподъемных механизмов;

Система резервных резервуаров для подачи охлаждающей воды

Водоохлаждаемые (мокрые) хранилища



Бассейн выдержки ОЯТ



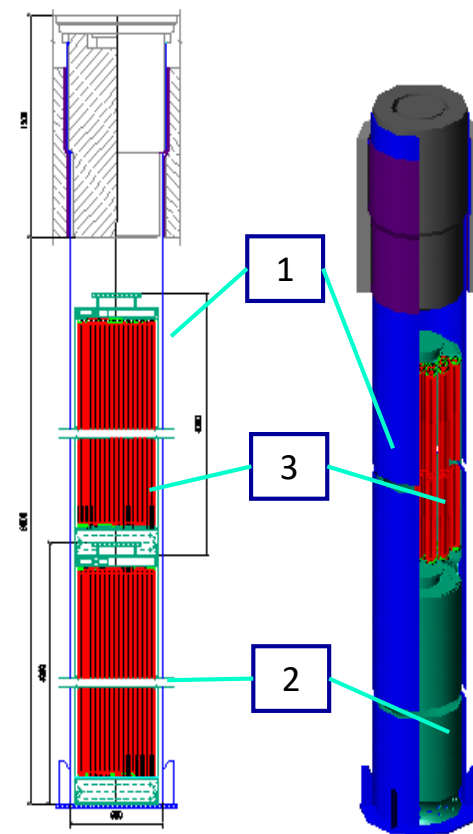
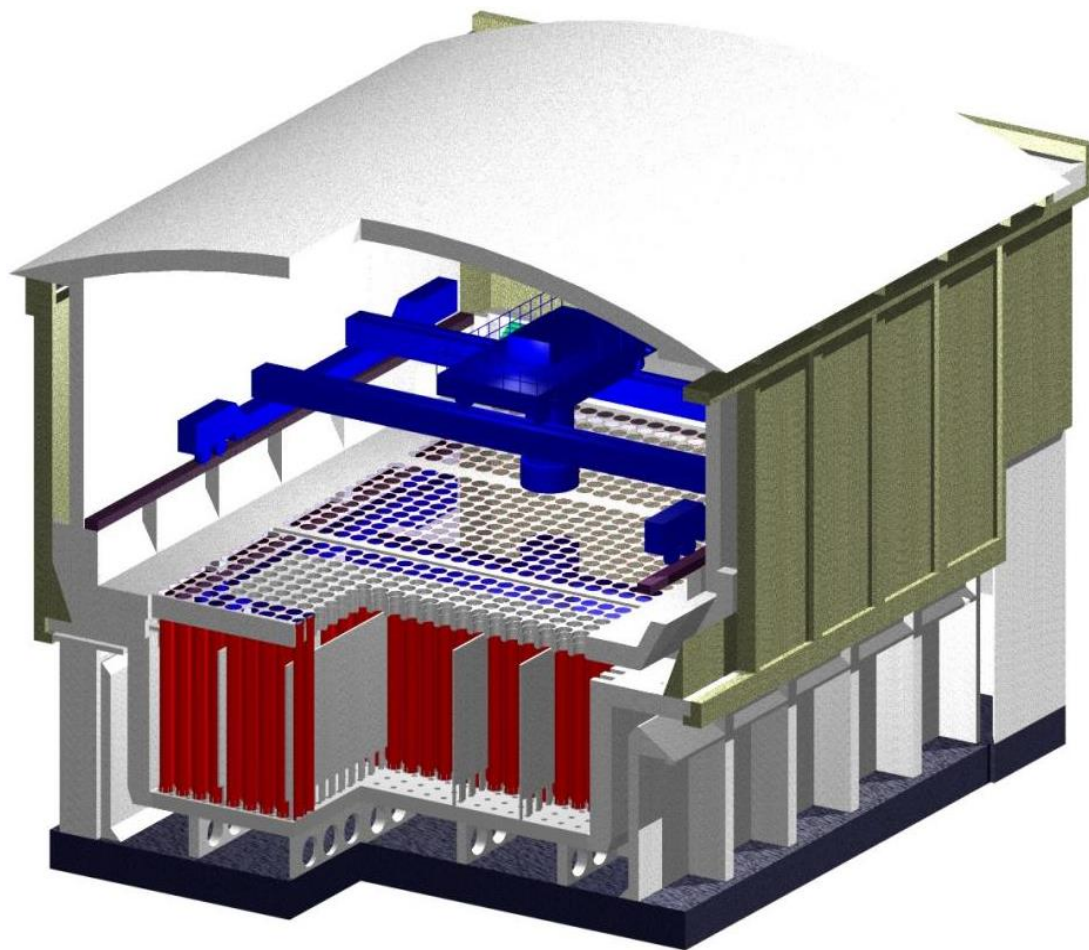
Бассейн выдержки отработавшего ядерного топлива - сооружение, входящее в состав ядерной установки или пункта хранения ядерных материалов, предназначенное для временного хранения отработавшего ядерного топлива в воде или другой жидкой среде.

Водоохлаждаемые (мокрые) хранилища

К достоинствам «мокрого» хранения ОЯТ относят:

- возможность **обеспечения высокого теплоотвода** от ОТВС;
- возможность **применения борного поглотителя** для обеспечения подкритичности хранимого ОЯТ;
- возможность **визуального контроля** состояния и наличия ОТВС;
- **обеспечение водой** необходимой биологической защиты при хранении и обращении с ОЯТ.

Воздухоохлаждаемые (сухие) хранилища



- 1 – ячейка хранения;
2 – пенал заполнен газом (азотно-гелиевая смесь);
3 – пучок ТВЭЛОВ сборки.

Воздухоохлаждаемые (сухие) хранилища



Воздухоохлаждаемые (сухие) хранилища



Достоинствами «сухого» хранения ОЯТ являются:

- гораздо **меньшее коррозионное воздействие** внешней (газовой) среды на оболочки ТВЭЛОВ;
- **меньшее** количество вторичных **радиоактивных отходов**;
- **упрощение систем** обслуживания «сухих» хранилищ, особенно в варианте охлаждения с помощью естественной конвекции;
- **уменьшение сроков** сооружения и затрат на эксплуатацию;
- **упрощение** процедуры **вывода из эксплуатации**;
- **возможность модульного наращивания мощностей** «сухого» хранилища и, соответственно, снижение единовременных затрат на его сооружение

Потенциальные опасности при хранении ОЯТ определяются:



Большим **количеством делящихся материалов**, которое находится в ХОЯТ (до десятков активных зон в одном хранилище), что представляет потенциальную опасность возникновения СЦР в аварийных условиях

Значительным **остаточным тепловыделением** ОЯТ в процессе хранения

Большой **радиоактивностью** ОТВС в хранилище в течение многих лет, накопленной в процессе работы в реакторе, которая может выделяться при аварии в ХОЯТ

Радиолизом воды в ХОЯТ, под действием ионизирующего излучения, в результате которого происходит накопление газообразного водорода и кислорода, которые при определённых концентрациях могут образовать взрывоопасную смесь

Возможностью уменьшения плотности воды вплоть до кипения воды в ХОЯТ в аварийных ситуациях, что может привести к увеличению значения $K_{эф}$

Возможностью уменьшения уровня воды в ХОЯТ или осушения водных хранилищ в аварийных ситуациях (разрыв подключённого трубопровода) или в результате сифонного эффекта, что потенциально может привести к перегреву, разгерметизации и даже к расплавлению ОТВС

Возможностью перераспределения уровня воды в ТВС и между ними при заполнении или опорожнении ХОЯТ водой, что может привести к увеличению значения $K_{эф}$

Процессы, которые нужно учитывать при хранении ОЯТ

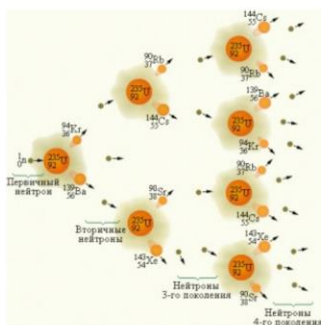
Остаточное
тепловыделение



Выделение
водорода



Изменение
изотопного
состава
ядерного
топлива

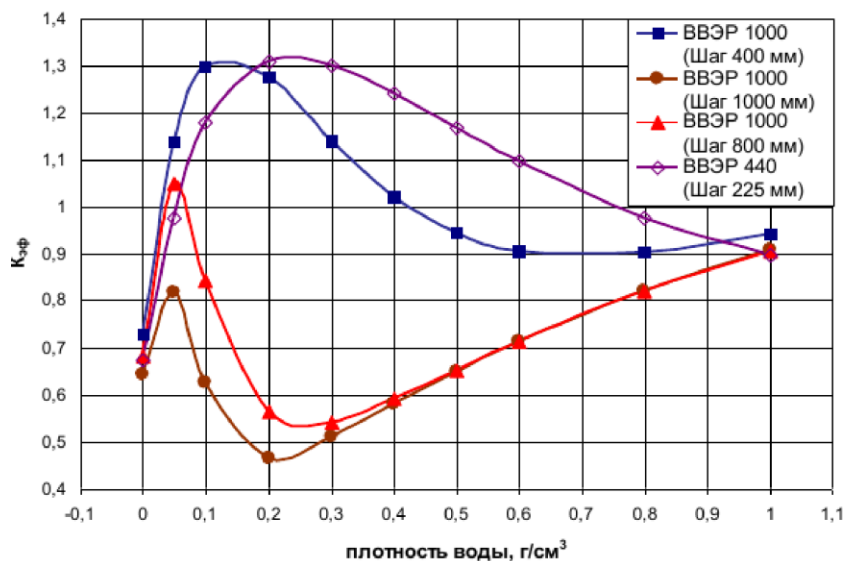


Меры, позволяющие увеличить вместимость хранилищ при соблюдении ядерной безопасности:

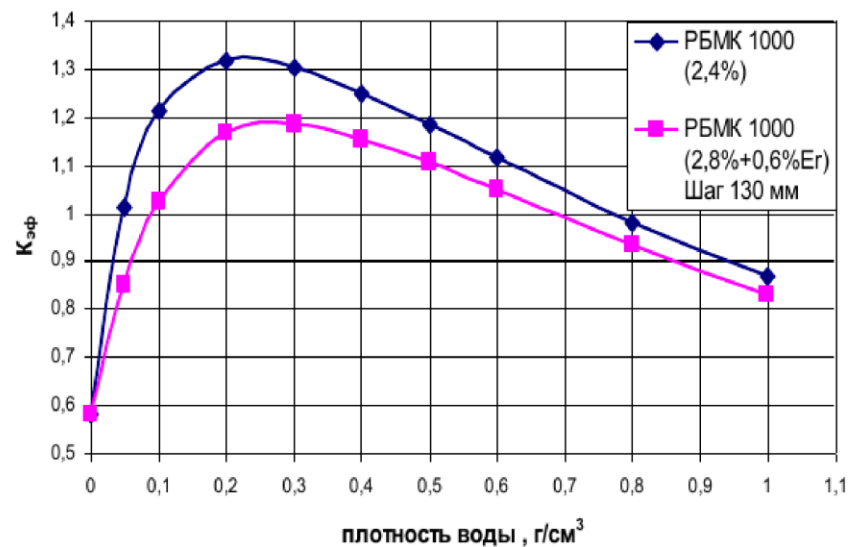
- **использование поглотителей нейтронов** (бористой стали для ВВЭР-1000, борированного алюминия для PWR, BWR, других поглотителей);
- **уменьшение шага** расположения ТВС с помощью **учёта «глубины выгорания»** при анализе ядерной безопасности вместо концепции, при которой предполагается, что всё топливо «свежее» (PWR, BWR);
- **двухъярусное расположение** ТВС, если это позволяла высота хранилищ (ПУ с ВВЭР-440, РБМК-1500, PWR, BWR);
- **использование пустых площадей** хранилища (РБМК-1500, РБМК-1000).

Источник: Внуков В.С., Соловьев А.А. «Обеспечение ядерной безопасности при хранении отработавшего ядерного топлива АЭС». - Обнинск: Техническая академия Росатома. 2023. - 260 с.

Процессы, которые нужно учитывать при хранении ОЯТ



Значение $K_{эф}$ в зависимости от плотности воды внутри и вне ТВС ВВЭР

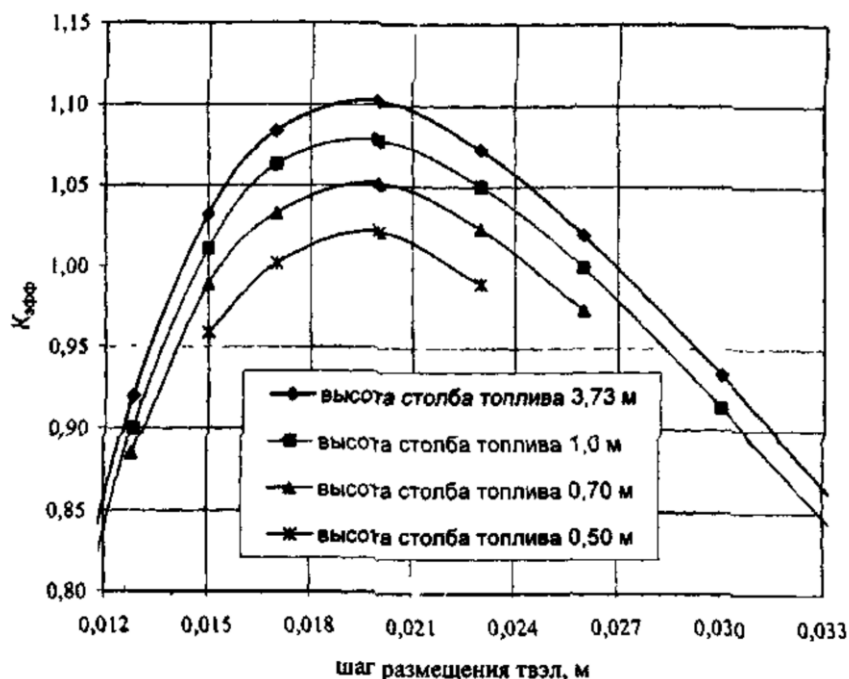


Значение $K_{эф}$ в зависимости от плотности воды внутри и вне ТВС РБМК

В большинстве случаев $K_{эф}$ максимально, когда внутри ТВС вода с нормальной плотностью, а вне ТВС вода отсутствует.

Процессы, которые нужно учитывать при хранении ОЯТ

Влияние изменения геометрии расположение твэлов в ТВС на критичность



Зависимость $K_{эф}$ от шага размещения твэлов в одной ТВС реактора ВВЭР-1200 обогащением урана 5% по ^{235}U

Оценки значений $K_{эф}$ при деформациях ОТВС различного типа необходимы для учёта исходных событий проектных и запроектных аварий в результате:

- падений ОТВС при транспортно-технологических операциях;
- падений тяжёлого оборудования на места хранения ОТВС.

При торцевом падении ТВС реактора типа ВВЭР возможна деформация, приводящая к уменьшению шага твэлов на нижнем торце ТВС.

Процессы, которые нужно учитывать при хранении ОЯТ

Основным способом обеспечения ЯБ в хранилищах ОЯТ, заполненных водой, является использование безопасного шага

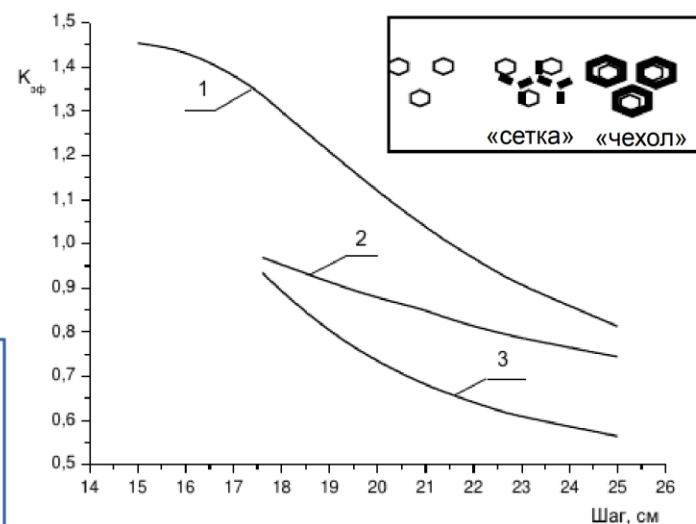
расположения ТВС, т.е. такого, который обеспечивает значение $K_{эф}$ не более 0,95 в нормальных и аварийных ситуациях.

Чтобы уменьшить допустимый шаг расположения ТВС, т. е. сделать хранилище более вместительным или компактным, используют твёрдые поглотители нейтронов.

Основные параметры конструкций с гетерогенными поглотителями, которые оказывают существенное влияние на значение $K_{эф}$:

- место расположения поглотителей;
- толщина поглотителей;
- весовое содержание поглотителей в конструкционных материалах;
- допуски на изготовление.

Результаты расчётов $K_{эф}$ для варианта «сетки» и «чехла» для ТВС ВВЭР-440 обогащением 4,25%.



Значения $K_{эф}$ при различном расположении поглотителя

Процессы, которые нужно учитывать при хранении ОЯТ

Основным способом обеспечения ЯБ в хранилищах ОЯТ, заполненных водой, является использование безопасного шага

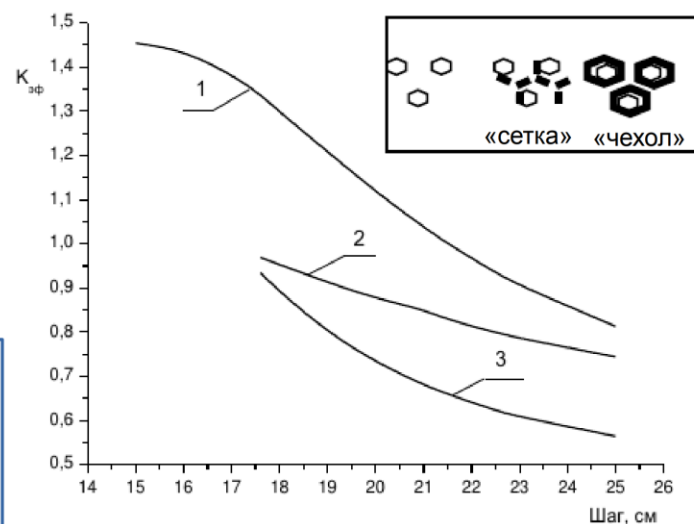
расположения ТВС, т.е. такого, который обеспечивает значение $K_{эф}$ не более 0,95 в нормальных и аварийных ситуациях.

Чтобы уменьшить допустимый шаг расположения ТВС, т. е. сделать хранилище более вместительным или компактным, используют твёрдые поглотители нейтронов.

Основные параметры конструкций с гетерогенными поглотителями, которые оказывают существенное влияние на значение $K_{эф}$:

- место расположения поглотителей;
- толщина поглотителей;
- весовое содержание поглотителей в конструкционных материалах;
- допуски на изготовление.

Результаты расчётов $K_{эф}$ для варианта «сетки» и «чехла» для ТВС ВВЭР-440 обогащением 4,25%.



Значения $K_{эф}$ при различном расположении поглотителя

Хранение ЯДМ



СХК
РОСАТОМ

НП-061-05

3.1. Ядерная безопасность при хранении и транспортировании свежего и отработавшего ЯТ **должна обеспечиваться**, в том числе:

- **ограничениями на размещение** ЯТ в чехлах, стеллажах, штабелях, барабанах свежих и отработавших сборок, ВТУК;
- **ограничением числа твэлов и ТВС** в чехлах, стеллажах, барабанах свежих и отработавших сборок, ВТУК;
- **ограничением числа упаковок, чехлов** в группе, числа упаковок в штабеле;
- **ограничениями на размещение групп** чехлов, штабелей, стеллажей, барабанов свежих и отработавших сборок, ВТУК;
- **применением** гетерогенных или гомогенных **поглотителей**;
- **контролем расположения** твэлов и ТВС, гетерогенных поглотителей, упаковок, чехлов, стеллажей, штабелей;
- **контролем** наличия и/или появления **замедлителей** в хранилищах свежего ЯТ;
- **контролем** наличия, состояния и состава **охлаждающей среды** и появления замедлителя в сухих хранилищах отработавшего ЯТ;
- **соблюдением технологических параметров** системы хранения и транспортирования ЯТ.

ПБЯ-06-09-2016

4.1 Ядерная безопасность при хранении и транспортировании ЯДМ обеспечивается:

- а) **соответствием проектов хранилищ**, упаковок, транспортных средств **требованиям нормативных документов** по ЯБ;
- б) **контролем за состоянием** хранилищ, упаковок, оборудования, транспортных средств;
- в) **организацией и выполнением работ** в хранилищах, транспортирования в соответствии **с требованиями эксплуатационной документации и стандартов** Госкорпорации «Росатом» по ЯБ;
- г) **конструкцией хранилищ**;
- д) конструкцией упаковочного комплекта и его фиксацией на транспортном средстве;
- е) конструкцией стеллажей, оборудования для ТТО;
- ж) **ограничением массы, концентрации** ЯДМ, массовой **доли замедлителей** нейтронов в отдельной упаковке;
- з) **ограничениями на размещение** ТВС, упаковок;
- и) **ограничениями количества** упаковок в штабелях, группах, на транспортном средстве;
- к) **ограничениями на размещение** штабелей, групп упаковок;
- л) **применением гетерогенных поглотителей** нейтронов;
- м) **контролем за расположением** упаковок, групп, стеллажей, поглотителей нейтронов, ТВС;
- н) **контролем за наличием и количеством замедлителей** и целостностью поглотителей в процессе хранения;
- о) **применением консервативного подхода** при обосновании ЯБ.

ПБЯ-06-00-2024

5.1 Ядерная безопасность при хранении ЯДМ должна обеспечиваться за счёт конструкции хранилища и

упаковочных комплектов, оборудования, а также **ограничений по количеству, размещению** упаковок и по используемым средствам пожаротушения.

Размещение упаковок определяется проектной и/или эксплуатационной **документацией** и должно обеспечивать возможность проведения регулярного контроля состояния упаковок. **Упаковки**, устойчивые по своей конструкции, **допускается размещать на полу**, горизонтальных площадках регламентированным разметками способом, **если в результате исходных событий не происходит их сближение, приводящее к значению Кэф больше 0,98.**

Хранение ЯДМ



СХК
РОСАТОМ

5.2.2.7 Допускается временное хранение упаковок с ЯДМ на открытых специально оборудованных площадках **при наличии заключений** по ядерной безопасности.

ПБЯ-06-09-2016

НП-061-05

2.2.8. В хранилищах ЯТ **допускается хранение компонентов активной зоны, не содержащих делящийся материал.** Тип компонентов и места их расположения должны быть регламентированы в проекте АС, РУ.

5.2.2.5 В хранилищах **допускается хранение технологического оборудования, оснастки, комплектующих, не содержащих ЯДМ.** При этом места их расположения должны быть регламентированы в проекте или инструкциях по ядерной безопасности. Хранение между или внутри групп, штабелей упаковок материалов, являющихся эффективными замедлителями нейтронов (дерево, графит, бериллий, водородосодержащие материалы) не допускается.

ПБЯ-06-09-2016

5.2 ... **Хранение упаковок должно осуществляться отдельно от упаковочных комплектов** (пустой тары). **Допускается совместное хранение** упаковок и упаковочных комплектов (пустой тары), **если иное не установлено заключением по ядерной безопасности**, на местах временного хранения **при выполнении следующих условий:**

- способ размещения упаковочных комплектов (пустой тары) должен быть установлен таким же, как для упаковок;
- упаковочные комплекты (пустая тара) должны иметь отличительную маркировку, в виде таблички «Пустая тара» или другую, позволяющую легко отличить упаковочные комплекты (пустую тару) от упаковок.

ПБЯ-06-00-2024

Хранение ЯДМ

НП-061-05

2.2.2. Хранилища ЯТ должны быть оснащены средствами пожаротушения. При тушении пожаров **запрещается использовать средства**, применение которых может **повысить значение эффективного коэффициента размножения нейтронов.**



5.2.6.1 Должны быть предусмотрены **меры, исключаящие СЦР при возникновении и ликвидации пожаров.** Эти меры должны быть направлены на предотвращение пожара, обнаружение пожара, быстрое и эффективное тушение пожара.

5.2.6.3 Хранилища должны быть оснащены средствами пожаротушения. **Запрещается тушение пожаров водой или пеной в хранилищах.** Номенклатура используемых средств пожаротушения должна быть определена в проектной или в эксплуатационной документации.

ПБЯ-06-09-2011

5.2.6.5 Постоянные хранилища **должны быть оборудованы сигнализацией** о возникновения пожара.

ПБЯ-06-00-2024

5.8 Должны быть предусмотрены **меры, исключаящие СЦР** при возникновении и ликвидации пожаров. Эти меры должны быть направлены на предотвращение пожара, обнаружение пожара, быстрое и эффективное тушение пожара.

5.9 Хранилища должны быть оснащены **средствами пожаротушения**, номенклатура которых должна быть определена в проектной или эксплуатационной документации.

5.1.1 При анализе ядерной безопасности постоянных хранилищ ЯДМ и транспортно-технологических операциях в постоянном хранилище **рассматриваются исходные события**, перечень которых приведён ниже.

Перечень исходных событий проектных аварий **для конкретных постоянных хранилищ может быть расширен или сокращён** в обоснованных случаях.

Перечень исходных событий проектных аварий:

- **сейсмические и другие природные явления**, свойственные данному району (наводнения, ураганы и т.д.). При анализе сейсмических явлений необходимо рассматривать МРЗ;
- **воздействие воздушной ударной волны** в результате взрыва на соседнем объекте или на транспорте. Параметры ударной волны следует принимать на основании анализа конкретных условий размещения постоянного хранилища;
- **пожар**;
- **прекращение подачи внешнего электроснабжения**;

- **затопление или попадание воды** в постоянные хранилища класса 2 или 3;
- **падение отдельных упаковок** при транспортно-технологических операциях в постоянном хранилище, в том числе и на места расположения ЯДМ;
- **нарушение герметичности** отдельной упаковки;
- **отказы оборудования** для транспортно-технологических операций в постоянном хранилище;
- **утечка растворов** из упаковок при хранении ЯДМ в жидкой фазе;
- **ошибки персонала**.

5.1.3 Конструкция вновь проектируемых постоянных хранилищ должна **учитывать возможность облучения населения и радиоактивного загрязнения** окр. среды выше допустимых уровней, установленных НД, при следующих **исходных событиях запроектных аварий**:

- 
- **СЦР**;
 - **падение самолёта**;
 - **падение транспортно-технологического оборудования** (например, крана) на упаковки.

Хранение ЯДМ

Анализ ЯБ хранилища **должен быть** выполнен в следующей последовательности **для:**

- отдельной упаковки с учетом требований стандарта;
- двух упаковок, расположенных вплотную с учетом требований стандарта;
- отдельной группы или штабеля с учетом требований стандарта;
- системы групп или штабелей с учетом требований стандарта.

Загрузка ЯДМ в отдельную упаковку определяется как наименьшая из полученных в результате расчета на каждом этапе.

Хранение ЯДМ

- для хранилищ $K_{эф} \leq 0,95$ при НЭ, ННЭ, включая проектные аварии, **с учётом всех неопределёностей** в программах расчёта **и допусков** при изготовлении ЯТ;
- хранилище **загружено ЯТ до максимальной проектной ёмкости**;
- при наличии ЯТ с различным обогащением урана необходимо предполагать, что **всё ядерное топливо имеет максимальное обогащение**;
- при наличии ЯТ с различным нуклидным составом необходимо предполагать, что **всё топливо имеет состав, соответствующий максимальному значению $K_{эф}$** ;
- при НЭ в ХОЯТ с гомогенными поглотителями (например, борированной водой) необходимо **предполагать, что поглотители отсутствуют**;
- должны быть **учтены отражатели** нейтронов в хранилище;
- **использование глубины выгорания** ядерного топлива в качестве параметра ЯБ **должно быть обосновано** в проекте.
- необходимо **учитывать любую деформацию** топлива и оборудования, которые могут возникнуть в постулируемых исходных событиях;
- необходимо **ввести поправку на возможное увеличение реактивности за счёт накопления делящегося изотопов** или распада изотопов, поглощающих нейтроны;
- необходимо **ввести поправку на присутствие выгорающих** поглощающих **поглотителей**;
- если нельзя обеспечить подкритичность ОЯТ только за счёт шага или конфигурации, то в проекте следует указать **дополнительные средства для обеспечения подкритичности**.

Требования при транспортировании ЯДМ

ЯДМ должен транспортироваться таким образом, чтобы было исключено достижение критической массы при нормальных условиях и аварийных ситуациях перевозки.

Как и при хранении Значение Кэф системы упаковок на транспортном средстве не должно превышать 0,95 в нормальных и 0,98 в аварийных условиях транспортирования.

В качестве аварийных ситуаций при внутриобъектовом транспортировании рассматриваются:

- попадание упаковок под дождь;
- падение упаковок при транспортно-технологических операциях с максимально возможной высоты;
- пожар на транспортном средстве.

Требования при транспортировании ЯДМ

При определении норм ядерной безопасности при внутриобъектовом транспортировании необходимо учитывать возможность следующих событий, которые могут увеличить значение $K_{эф}$:

- протечки воды в упаковку или из неё;
- снижение эффективности вмонтированных в упаковку поглотителей или замедлителей нейтронов;
- перераспределение ЯДМ либо внутри упаковок, либо в результате выпадения его из упаковки;
- уменьшение расстояний между упаковками.

Требования при транспортировании ЯДМ

Конструкцией упаковки для внутриобъектового транспортирования должно быть обеспечено, чтобы при нормальных условиях перевозки вода не проникала в какую-либо часть упаковки, за исключением случаев, когда возможность проникновения воды в таком количестве, которое приводит к наибольшему значению Кэф, предусматривалась при анализе обеспечения ядерной безопасности.

Требования к упаковкам и упаковочным комплектам

Зависят от количества и степени опасности перевозимого радиоактивного материала с учетом следующих условий перевозки:

- а) обычные условия перевозки (без аварий и происшествий);
- б) нормальные условия перевозки (незначительные происшествия), имитируемые испытаниями;
- в) аварийные условия, имитируемые испытаниями.



Классификация типов упаковок

Освобожденная упаковка

Промышленная упаковка типа IP-1

Промышленная упаковка типа IP-2

Промышленная упаковка типа IP-3

Упаковка типа А

Упаковка типа В

Упаковка типа С

Примеры упаковок

Масса – от 100 г до 150 тонн.
Габариты - от 10 см до 6 м.
Активность - от 10^3 Бк до 10^{16} Бк.



Освобожденная упаковка

Освобожденная упаковка (упаковка не попадающая под действие правил НП-053-16) - упаковочный комплект, содержащий радиоактивный материал с активностью, не превышающей значений.

Радиоактивное содержимое промышленной упаковки	Тип промышленной упаковки	
	исключительное использование	неисключительное использование
НУА-I:		
твердое вещество	IP-1	IP-1
жидкость	IP-1	IP-2
НУА-II:		
твердое вещество	IP-2	IP-2
жидкость и газ	IP-2	IP-3
НУА-III	IP-2	IP-3
ОПРЗ-I	IP-1	IP-1
ОПРЗ-II	IP-2	IP-2

Промышленные упаковки

Промышленные упаковки IP-1, IP-2, IP-3 - с разрешенным внешним уровнем излучения на расстоянии 3 м от незащищенного материала, не более 10 мЗв/ч.

Радиоактивное содержимое промышленной упаковки	Тип промышленной упаковки	
	исключительное использование	неисключительное использование
НУА-I:		
твердое вещество	IP-1	IP-1
жидкость	IP-1	IP-2
НУА-II:		
твердое вещество	IP-2	IP-2
жидкость и газ	IP-2	IP-3
НУА-III	IP-2	IP-3
ОПРЗ-I	IP-1	IP-1
ОПРЗ-II	IP-2	IP-2

Упаковки типа А

Упаковка типа А - упаковочный комплект, содержащий радиоактивный материал с активностью, не превышающей:

- А1 для радиоактивного материала особого вида;
- А2 для всех других радиоактивных материалов;
- в отношении смесей радионуклидов применяется следующее условие:

$$\sum_i \frac{B(i)}{A_1(i)} + \sum_j \frac{C(j)}{A_2(j)} \leq 1$$

где:

$B(i)$ - активность i -го радионуклида в качестве радиоактивного материала особого вида;

$A_1(i)$ - значение А1 для i -го радионуклида;

$C(j)$ - активность j -го радионуклида в качестве радиоактивного материала, иного, чем радиоактивный материал особого вида;

$A_2(j)$ - значение А2 для j -го радионуклида.

Упаковки типа В

В упаковках типа В транспортируются радиоактивные вещества неограниченной активности, например, отработавшее ядерное топливо или высокоактивные радионуклиды.

В случае перевозки воздушным транспортом упаковки типа В(U) и типа В(M) не должны содержать материалы, активность которых превышает следующие значения:

- 3000A1 или 100000A2 в зависимости от того, какое значение является более низким, - для радиоактивного материала особого вида;
- 3000A2 - для всех других радиоактивных материалов

Упаковки типа С

Упаковка типа С - упаковочный комплект, содержащий радиоактивный материал с активностью, не превышающей:

- РМ, активность которых превышает значение, разрешенное для упаковки данной конструкции;
- РМ, форма, физическое состояние, химическая форма или радионуклидный состав которых отличаются от тех, которые разрешены для упаковки данной конструкции и указываются в сертификатах - разрешениях на конструкцию упаковки .



Общие требования к освобожденным упаковкам

- Простота и безопасность упаковки и добавляемых устройств;
- Надежность элементов крепления;
- Эргономичность;
- Противостояние ускорению, вибрации или резонанса.

Вид транспорта	Максимальные ускорения, g				
	продольные		боковые	вертикальные	
	вперед	назад		вверх	вниз
Автомобильный	2		1	+ 3; - 2	
Железнодорожный	5		2	2	
Морской	2		2	2	
Внутренний водный	1,6		2	1	
Воздушный	+ 9; - 1,5		1,5	+ 6; - 2	

Общие требования к освобожденным упаковкам

- Физическая и химическая совместимость содержимого и упаковки;
- Защита от несанкционированного воздействия на клапаны;
- Учет температур и давления во внешней среде;
- Защита упаковки от излучения;
- Для перевозки воздушным транспортом :
 - температура поверхности не более 50 °С;
 - целостность системы герметизации при от -40 до +55 °С;
 - отсутствие утечки при давлении до 5 кПа или перепаде давления, 95 кПа.

Требования к упаковкам типа А



- Мин габаритный размер упаковки - 0,1 м;
- Наличие пломбы;
- Диапазон температур упаковочного комплекта от -40 до +70 °С;
- Наличие системы герметизации (до 60 кПа);
- Наличие системы радиационной защиты;
- Наличие заполняемого объема;
- Достаточное количество абсорбирующего материала для поглощения удвоенного объема ЖРО;
- Предотвращение потери или рассеяние радиоактивных газов (кроме трития и БГ) при испытании на удар.

Требования к упаковкам типа В



СХК
РОСАТОМ

- Сохранение защитных функций при тепловом воздействии радиоактивного содержимого упаковки в течение одной недели;
- При нормальных условиях перевозки утечка радиоактивного содержимого ограничивается величиной не более $10^{-6} A_2$ в час;
- При аварийных условиях перевозки суммарная утечка радиоактивного содержимого в течение одной недели не превышает $10A_2$ для криптона-85 и A_2 для всех других радионуклидов;
- Максимальное нормальное рабочее давление в упаковке не должно превышать 700 кПа.
- Температура поверхности упаковки не должна превышать 50 °С, а в условиях исключительного использования, не должна превышать 85 °С.
- Упаковка должна быть сконструирована в расчете на диапазон температур окружающей среды от -40 до +38 °С ;
- Для упаковки активность содержимого которой превышает $10^5 A_2$, не разрушение система герметизации при испытании на глубоководное погружение.

Требования к упаковкам типа С



- Общие требования;
- Требования к упаковкам типа А;
- Требования к упаковкам типа В(У), В(М);
- При испытаниях, имитирующих нормальные условия перевозки, утечка радиоактивного содержимого из упаковки не должна превышать 10^{-6} А2 в час;
- При испытаниях на прокол, усиленное тепловое и столкновение, упаковка :
- сохраняла достаточные защитные свойства, обеспечивающие на расстоянии 1 м от поверхности упаковки уровень излучения не выше 10 мЗв/ч;
- обеспечивала активность общей утечки радиоактивного содержимого за одну неделю не более 10А2 для криптона-85 и А2 для всех других радионуклидов.
- При испытании на глубоководное погружение не разрушалась система герметизации.

Требования к упаковкам, содержащим ЯДМ

Делящийся материал должен упаковываться и перевозиться таким образом, чтобы сохранялась подкритичность при обычных, нормальных и аварийных условиях перевозки.

Необходимо учитывать, что при перевозке упаковок, содержащих делящийся материал, существует возможность:

- протечки воды в упаковку или из нее;
- снижения эффективности вмонтированных в упаковку поглотителей или замедлителей нейтронов;
- перераспределения содержимого либо внутри упаковки, либо в результате его выхода из упаковки;
- уменьшения расстояний внутри упаковки или между упаковками;
- попадания упаковок в воду или в снег;
- эффектов от изменения температуры.

Требования к упаковкам, содержащим ЯДМ

При анализе ядерной безопасности отдельной изолированной упаковки и системы упаковок необходимо выполнять требования, приведенные ниже:

1. Все упаковки на перевозочном средстве необходимо рассматривать расположенными вплотную друг к другу настолько близко, насколько позволяет их конструкция с учетом деформации в нормальных и аварийных условиях перевозки и насколько это приводит к максимальному Кэфф.
2. Для отдельной изолированной упаковки необходимо учитывать, что вода может полностью вытечь из упаковки или наоборот проникнуть во все свободное пространство, включая пространство внутри системы герметизации.
3. Необходимо учитывать такие количество, распределение и плотность замедлителя нейтронов (в частности, воды), находящегося в упаковке и между упаковками в аварийных условиях, которые приводят к максимальному Кэфф.

Требования к упаковкам, содержащим ЯДМ

4. Необходимо предполагать для отдельной изолированной упаковки или группы упаковок наличие вокруг них полного отражателя из воды (или присутствующего в анализируемой системе наиболее эффективного отражающего материала) толщиной не менее 20 см дополнительно к отражающей способности конструктивных элементов упаковки.
5. В случае, если химическая или физическая форма, изотопный состав, масса или концентрация, степень замедления нейтронов или плотность либо геометрическая конфигурация неизвестны, необходимо предполагать, что каждый неизвестный параметр имеет такое значение, при котором размножение нейтронов достигает максимального уровня, соответствующего известным условиям и параметрам этих оценок.
6. Облученное ядерное топливо необходимо рассматривать как свежее, если Кэфф при выгорании уменьшается, и как облученное до величины, соответствующей максимальному Кэфф, если Кэфф при выгорании увеличивается.

Требования к упаковкам, содержащим ЯДМ

7. Необходимо учитывать повреждения упаковки при моделировании нормальных и аварийных условий перевозки, приводящие к увеличению Кэфф, и предполагать, что эти повреждения распространяются на все упаковки группы.

8. Если в целях ядерной безопасности упаковочный комплект включает поглотители нейтронов, то должны быть предусмотрены проверка эффективности поглотителей в процессе изготовления и периодические проверки их наличия в процессе эксплуатации при необходимости.

Индекс безопасности по критичности

Число, которое используется для контроля за общим количеством упаковок, содержащих делящийся материал, в транспорте.

ИБК = $50/N$, N определяется следующим образом:

- в нормальных условиях - пятикратное число упаковок N ;
- в аварийных условиях - двукратное число упаковок N .

Испытания ТУК

Объект	Вид испытаний
ТУК и упаковки	обрызгивание водой; удар при свободном падении; штабелирование; глубина разрушения.
упаковки, содержащие делящийся материал	механическое повреждение; тепловое, водонепроницаемость.
упаковки типа А для ЖРО	глубина разрушения
упаковки типа С	прокол (разрыв), усиленное тепловое, столкновение.

Испытания ТУК

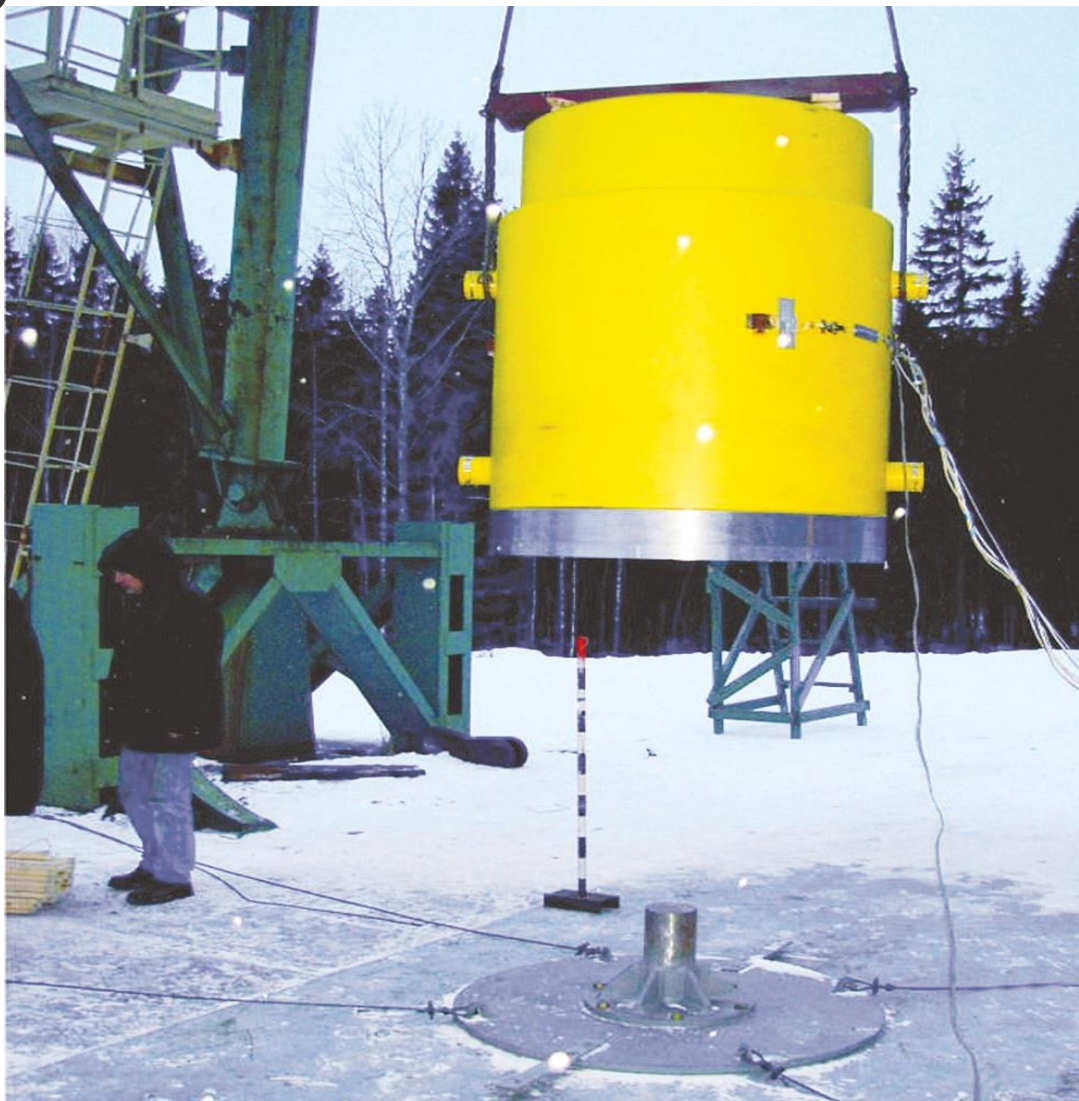
Объект	Вид испытаний
ТУК и упаковки	обрызгивание водой; удар при свободном падении; штабелирование; глубина разрушения.
упаковки, содержащие делящийся материал	механическое повреждение; тепловое, водонепроницаемость.
упаковки типа А для ЖРО	глубина разрушения
упаковки типа С	прокол (разрыв), усиленное тепловое, столкновение.

Испытание на глубину разрушения

Образец ставят на жесткую горизонтальную плоскую поверхность, не смещающуюся при проведении испытаний. Стержень диаметром 3,2 см с полусферическим концом и массой 6 кг сбрасывают вертикально в направлении центра наименее прочной части образца так, чтобы он, если пробьет упаковку достаточно глубоко, задел систему герметизации. Стержень не должен значительно деформироваться при проведении испытаний. Высота падения стержня до намеченной точки попадания на верхней поверхности упаковки должна составлять 1 м.



Испытание на глубину разрушения



Испытание на удар при свободном падении

Образец должен падать на мишень так, чтобы причинялся максимальный ущерб испытываемым элементам, высота свободного падения должна быть не меньше расстояния, указанного в таблице;

Масса упаковки, кг	Высота свободного падения, м
0 - 5000	1,2
5000 - 10000	0,9
10000 - 15000	0,6
15000 - более	0,3



Тепловое испытание

Образец помещают полностью, за исключением простой поддерживающей конструкции, в очаг горения углеводородного топлива в воздушной среде, который имеет достаточные размеры и в котором существуют условия для обеспечения среднего коэффициента эмиссии (пламени) не менее 0,9 при средней температуре пламени не менее 800 °С в течение 30 минут.



Испытание на столкновение

Образец должен быть подвергнут столкновению с мишенью при скорости не менее 90 м/с, причем в таком положении, при котором ему будет нанесено максимальное повреждение.



Спасибо за внимание

Чередов Вячеслав Михайлович

Моб. тел.: +7 (952) 899 99 37
E-mail: vmcheredov@rosatom.ru

18.04.2022