



УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2022.105.3.003

© 2022. Все права защищены.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБОСНОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВРЕМЕННОМ РАЗМЕЩЕНИИ ОБЛУЧЕННЫХ ТВЭЛОВ В РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ КАМЕРАХ

Акимов А. В.* (Aleksandr_ak93@mail.ru),
Малков А. П.**, д-р техн. наук (ork-map@pub.niiar.ru),
Самохвалов Р. В.** (samohvalov-94@mail.ru),
Фрааз Е. С.* (fraazes@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 5 августа 2022 г.

Аннотация

Представлены методические особенности анализа ядерной безопасности при обращении с тепловыделяющими элементами, их фрагментами, а также отходами после работ с ними (стружка, порошок, обрезки) внутри радиационно-защитных камер. Тепловыделяющие элементы, их фрагменты и отходы после работ с ними могут располагаться в различных упаковках (пеналы, контейнеры) на специально отведенных для этого местах (стеллажи, этажерки и столешницы камер). Анализ ядерной безопасности выполнялся в соответствии с требованиями основных нормативных документов в области ядерной безопасности. Для определения значений эффективного коэффициента размножения нейтронов использовались результаты расчетов, полученные при помощи программы MCU-RFFI/A. Рассматривались ситуации как для нормальных условий хранения упаковок с тепловыделяющими элементами (внутри и вне упаковок воздушная среда), так и возможные аварийные ситуации (заполнение упаковок водой, превышение нормы загрузки, смещение упаковок со своих штатных позиций, просыпание содержимого упаковок). По результатам расчетного анализа показана важность учета отражения нейтронов от строительных конструкций (стены, пол, потолок) из бетона. Была определена зависимость изменения эффективного коэффициента размножения нейтронов в случае попадания в камеры и оборудование воды различной плотности. По результатам нейтронно-физических расчетов были определены ограничения при обращении с упаковками, загруженными тепловыделяющими элементами, внутри радиационно-защитных камер (допустимое количество, геометрия размещения и норма загрузки по делящимся нуклидам).

► **Ключевые слова:** ядерная безопасность, хранение облученного ядерного топлива, ядерные делящиеся материалы, тепловыделяющий элемент, эффективный коэффициент размножения нейтронов, программа MCU-RFFI/A, радиационно-защитные камеры, нейтронно-физические расчеты.

* АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», Димитровград, Россия.

** Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Димитровград, Россия.

METHODOLOGICAL FEATURES TO JUSTIFY NUCLEAR SAFETY FOR IRRADIATED FUEL RODS TEMPORARY PLACEMENT IN HOT CELLS

Akimov A. V.*,
Malkov A. P.***, D. Sc.,
Samokhvalov R. V.***,
Frazz E. S.*

Article is received on August 5, 2022

Abstract

The article presents methodological features of nuclear safety analysis in the handling of fuel elements, their fragments, as well as waste after work with them (chips, powder, trimmings) inside radiation-protective chambers. Fuel elements, their fragments and waste after work with them can be placed in various packages (canisters, containers) in specially designated places (racks, whatnots and countertops of chambers). Nuclear safety analysis was carried out in accordance with the requirements of the main regulatory documents in the field of nuclear safety. To determine the values of the effective neutron multiplication factor, the results of calculations obtained using the MCU-RFFI/A program were used. Situations were considered both for normal storage conditions for packages with fuel elements (air environment inside and outside the packages), and possible emergency situations (filling the packages with water, exceeding the load rate, displacement of packages from their regular positions, spilling the contents of the packages). Based on the results of the computational analysis, the importance of taking into account the reflection of neutrons from concrete building structures (walls, floors, ceilings) is shown. The dependence of the change in the effective neutron multiplication factor in the case of water entering the chambers and equipment of different densities was determined. Based on the results of neutron-physical calculations, restrictions were determined when handling packages loaded with fuel elements inside radiation-protective chambers (permissible quantity, placement geometry and loading rate for fissile nuclides).

► **Keywords:** nuclear safety, storage of irradiated nuclear fuel, nuclear fissile materials, fuel rod, effective neutron multiplication factor, MCU-RFFI/A software, hot cells, neutronic calculations.

* Joint-Stock Company, State Scientific Centre, Research Institute of Nuclear Reactors, Dimitrovgrad, Russia.

** Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPHI, Dimitrovgrad, Russia.

Введение

АО «ГНЦ НИИАР» – крупнейший в Европе материаловедческий комплекс, который позволяет проводить исследования облученных теплоделяющих элементов (ТВЭЛ) и теплоделяющих сборок (ТВС) всех типов ядерных реакторов [1]. Во время исследований ТВЭЛ подвергаются различным механическим воздействиям: прокол оболочки, резка, разделка на фрагменты. Одним из этапов при обращении с ТВЭЛ является их временное хранение в местах, которые отведены под эти цели (хранилища, боксы, радиационно-защитные камеры и др.). Чтобы доказать безопасность размещения различных типов ТВЭЛ в местах хранения требуется проведение детального анализа и обоснования ядерной безопасности (ЯБ). Согласно документу [2], в ходе анализа ЯБ необходимо определить такое количество упаковок с ТВЭЛ или их фрагментами, при котором значение эффективного коэффициента размножения нейтронов ($K_{эфф}$) не будет превышать допустимую величину (0,95) как при нормальных условиях эксплуатации, так и в случае постулируемых аварийных ситуаций. К таковым относятся: смещение упаковок со своих штатных позиций, затопление мест хранения водой, ошибочное размещение упаковок в местах, где их хранение не предусмотрено. При этом надо рассматривать такие количество, распределение и плотность замедлителя нейтронов (в частности, воды), которые в результате исходных событий проектных аварий при хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ЯДМ) приводят к максимальному значению $K_{эфф}$ [2]. Также при проведении анализа ЯБ необходимо учитывать наличие плотно-прилегающего отражателя нейтронов из воды вокруг систем, моделирующих хранение упаковок в местах хранения. Еще одним немаловажным фактором, который существенно влияет на $K_{эфф}$, является учет строительных конструкций радиационно-защитных камер (стены, пол) из бетона, поскольку данный материал обладает свойствами отражателя нейтронов.

Одной из основных сложностей анализа ЯБ является то, что среди большого количества ТВЭЛ, которые поступали на исследования в институт, необходимо выбрать такие, которые приводят к наибольшим значениям $K_{эфф}$. Выбранные типы ТВЭЛ можно считать консервативным типом, в том числе и для тех ТВЭЛ, которые будут поступать на исследования в будущем.

При анализе ЯБ расчет $K_{эфф}$ производится с использованием аттестованных расчетных кодов, в частности программы MCU-RFFI/A [3]. В данной программе реализован алгоритм решения уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло на основе большого количества серий вычислений для систем с произвольной трехмерной геометрией. В рамках описываемых в статье расчетов использовалось такое количество поколений нейтронов, чтобы статистическая погрешность определения $K_{эфф}$ при помощи программного кода MCU-RFFI/A не превышала 0,002. В ходе моделирования был применен консервативный подход к обоснованию ЯБ, заведомо приводящий к завышенным значениям $K_{эфф}$. Все расчеты проведены как для нормальных условий (внутри и вне упаковок воздушная среда), так и для аварийной ситуации, когда радиационно-защитная камера (РЗК) и упаковки в ней заполнены замедлителем нейтронов (водой) различной плотности. Консервативно, в соответствии с требованиями [2], отработавшее ядерное топливо рассматривали как «свежее», то есть выгорание не учитывалось. Также предполагали, что плутоний состоит только из изотопа ^{239}Pu .

Анализ выполнялся в полном соответствии с требованиями государственных нормативных документов по ЯБ при хранении, переработке и транспортировании ЯДМ [2, 4–6].

Анализ ТВЭЛ и упаковок с ядерными делящимися материалами

Исследуемые в институте ТВЭЛ различаются между собой по типу ЯДМ, суммарной массе $^{235}\text{U}+\text{Pu}$, геометрии, а также по наличию или отсутствию торцевых экранов. Временное хранение исследуемых ТВЭЛ и их фрагментов осуществляется внутри РЗК на специально отведенных для этого местах.

Исследования проводились с ТВЭЛ штатных и экспериментальных ТВС следующих типов реакторов: ВВЭР, РБМК, БН, БОР и др. Поскольку перечень исследуемых ТВЭЛ и их модификаций обширный, для анализа ЯБ первоначально было необходимо уменьшить количество рассматриваемых типов ТВЭЛ. Для этого требовалось отобрать из исследуемого перечня несколько ТВЭЛ, которые будут консервативными вариантами для всех типов ТВЭЛ. Консервативные варианты ТВЭЛ должны по критериям отбора (наибольшее значение $K_{эфф}$ при технологических и исследовательских операциях с ними) превосходить все прочие типы

твэлов. Стоит учитывать также то, что со временем создаются новые модификации твэлов, и в случае если они по своим характеристикам превосходят консервативные варианты, потребуется дополнительный анализ ЯБ. Для упрощения возможен отбор одного консервативного варианта из перечня твэлов одного реактора. Возможен вариант не выбора твэлов, а создания консервативной модели твэла с завышенными характеристиками, отличного от имеющихся.

Одними из основных критериев отбора твэлов в ходе анализа были тип топлива ($UN + PuN$, $UO_2 + PuO_2$, UO_2 , $U_{мет}$), масса делящихся нуклидов и их соотношение в активной зоне твэла. Другие ключевые характеристики рассматриваемых твэлов находятся в следующем диапазоне значений:

- внешний диаметр: $5,8 \div 9,7$ мм;
- длина активной зоны: $450 \div 1100$ мм;
- длина торцевого экрана не более 340 мм;
- масса Pu в твэле: $15,6 \div 70,4$ г;
- обогащение урана по ^{235}U в активной зоне до 100 %.

Выбор наиболее «эффективного» содержимого отдельных упаковок с твэлами позволит в дальнейшем достичь наибольшего значения $K_{эфф}$ при моделировании сложных систем, состоящих из совокупности упаковок и других изделий.

Всего было выбрано шесть вариантов твэлов, содержащих наибольшее количество ЯДМ. Хранение твэлов и их фрагментов после исследований осуществляется в различных по геометрическим размерам упаковках: пеналы и контейнеры. Пеналы в рамках данной статьи условно разделены на два типа: «тип 1» (для твэлов) и «тип 2» (для отходов после исследований). Фрагменты твэлов внутри упаковок моделировали в виде двузонных цилиндров, в которых выделена стальная оболочка и внутренняя зона с ЯДМ. Длину фрагментов задавали равной внутренней длине упаковки. Консервативно считали, что весь фрагмент твэла представляет собой часть активной зоны, поскольку в ней содержится наибольшее количество делящихся нуклидов.

Далее нужно определить, какой тип твэлов или их фрагментов при загрузке в упаковку приведет к наибольшим значениям $K_{эфф}$. Для этого в упаковку при расчетном моделировании поочередно «загружался» каждый тип твэлов и проводился расчет значений $K_{эфф}$ в зависимости от их количества в упаковке до ее полного заполнения. Консервативно твэлы внутри упаковки располагали в узлах треугольной решетки с максимально

возможным шагом, чтобы крайние твэлы пучка соприкасались с внутренней поверхностью упаковки. Таким образом, в расчетах учитывалось возможное смещение твэлов в упаковке относительно друг друга. В качестве примера на рис. 1 приведен график зависимости $K_{эфф}$ от числа фрагментов твэлов различных типов внутри контейнера.

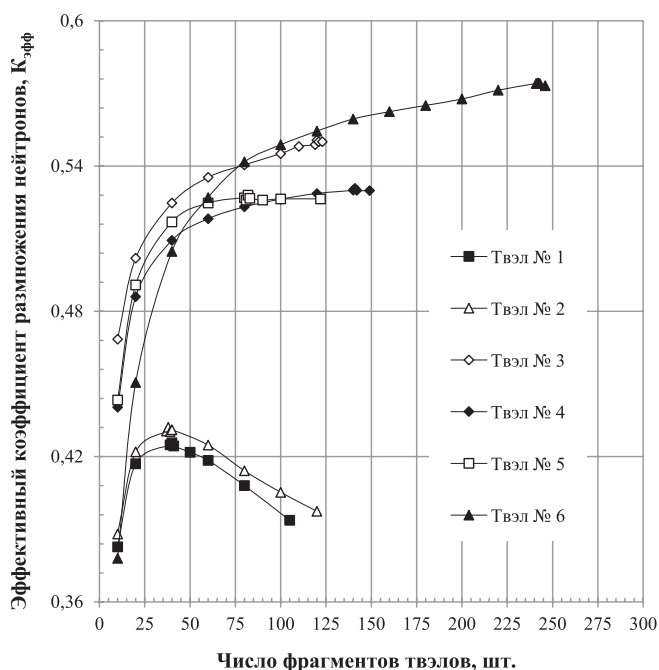


Рис. 1. Зависимость $K_{эфф}$ для одиночного контейнера от числа фрагментов твэлов внутри контейнера (контейнер расположен в воде и заполнен водой плотностью 1 г/см^3) [Fig. 1. Dependence of $K_{эфф}$ for a single container on the fuel rod fragments number inside the container (the container is located in water and filled with water with a density of 1 г/см^3)]

Из графика видно, что для некоторых типов твэлов максимальные значения $K_{эфф}$ достигаются при неполной загрузке контейнера фрагментами твэлов. Из этого следует вывод о том, что если твэлы (фрагменты твэлов) внутри упаковки располагаются россыпью (упаковка не оснащена дистанционирующими решетками), то необходимо проводить расчеты в зависимости от количества твэлов (фрагментов твэлов) в упаковке.

Аналогичные расчеты проводятся для всех упаковок, которые будут размещаться в камерах. По результатам расчетов для каждой упаковки определяется содержимое, которое приводит к наибольшему значению $K_{эфф}$ (но не более 0,95). В дальнейших расчетах, при рассмотрении мест хранения упаковок (этажерки, стеллажи, столешницы), в случае превышения системой величины $K_{эфф}$ 0,95 будут устанавливаться ограничения на такие параметры, как шаг размещения упаковок или количество упаковок в рассматриваемом месте хранения, чтобы $K_{эфф}$ не превышал допустимую величину.

Размещение упаковок с ядерными делящимися материалами в камере

Радиационно-защитная камера представляет собой стационарное сооружение из бетона, облицованное материалами, малосорбирующими радиоактивные вещества. Работы с облученными твэлами проводятся дистанционно с помощью манипуляторов, которыми снабжены РЗК. Также в камерах наряду с работами по исследованию твэлов осуществляют их временное хранение в специально отведенных местах (хранилища, этажерки, стеллажи). В процессе работы с упаковками их могут временно разместить на столешнице камеры или в приемном (перегрузочном) колодце, приемке и т. д.

В расчетах каждое место хранения рассматривается при полной загрузке упаковками одного типа. В случае, когда значение $K_{эфф}$ такой системы превышает допустимую величину (0,95), устанавливаются ограничения на количество и геометрию расположения упаковок в местах хранения.

Важной особенностью таких камер является ограниченное внутреннее пространство и компактное расположение оборудования. Вследствие этого отдельные единицы оборудования и упаковки в процессе работ могут образовывать системы, зависящие по нейтронному взаимодействию. Таким образом, при проведении анализа ЯБ необходимо анализировать все возможные варианты взаимодействия различных единиц оборудования и упаковок в ходе технологического процесса.

В качестве примера при анализе ЯБ одной из камер рассматривались хранилища, которые снабжены поднимаемой этажеркой. Если рядом с таким хранилищем расположены упаковки с ЯДМ, то в момент поднятия этажерки может произойти нейтронное взаимодействие. Были рассмотрены следующие варианты систем с ЯДМ:

- контейнеры с фрагментами твэлов расположены на этажерке шахтного хранилища (рис. 2 а);
- контейнеры с фрагментами твэлов расположены на стеллаже совместно с пеналом «тип 2» с ЯДМ на столешнице (рис. 2 б);
- совместная система, состоящая из пенала «тип 2» с ЯДМ, расположенного на столешнице камеры между поднятой этажеркой шахтного хранилища и стеллажом с контейнерами с фрагментами твэлов (рис. 2 в).

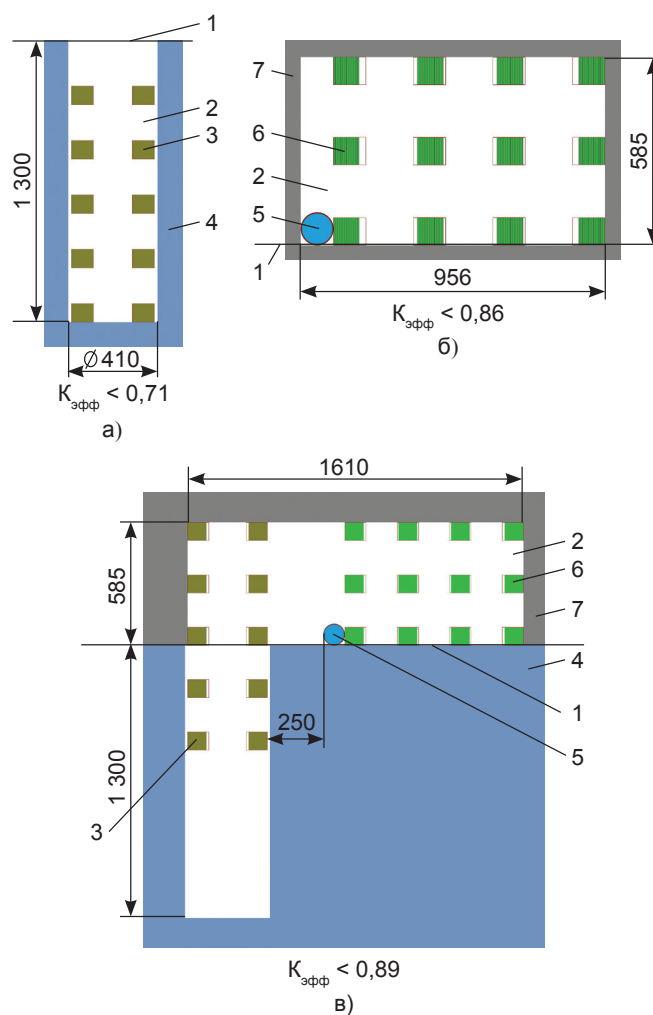


Рис. 2. Расчетные модели этажерки шахтного хранилища (а), совместного размещения пенала «тип 2» с ядерными делящимися материалами и стеллажа с контейнерами с фрагментами твэлов (б) и совместного размещения пенала «тип 2» с ядерными делящимися материалами между выдвинутой этажеркой шахтного хранилища и стеллажом с контейнерами с фрагментами твэлов (в): 1 – уровень столешницы; 2 – среда вне упаковок; 3 – контейнер с фрагментами твэлов в шахтном хранилище; 4 – бетон; 5 – пенал «тип 2» с ядерными делящимися материалами; 6 – контейнер с фрагментами твэлов на стеллаже; 7 – отражатель из воды.

Все размеры указаны в мм

[Fig. 2. Calculation models of the storage vault racks (a), joint placement of the «type 2» case with nuclear fissile materials and the shelves holding containers with fuel rod fragments (b) and joint placement of the «type 2» case with nuclear fissile materials between the moved forward storage vault rack and the shelves holding containers with fuel rod fragments (c): 1 – tabletop level; 2 – packages exterior medium; 3 – container with fuel rods fragments in the storage vault racks; 4 – concrete; 5 – «type 2» case with nuclear fissile materials; 6 – shelves holding containers with fuel rod fragments; 7 – water reflector.

All dimensions are in mm]

Из результатов расчетов видно, что при совместном размещении оборудования, содержащего ЯДМ, $K_{эфф}$ оказывается больше, чем в случае рассмотрения каждой системы по отдельности. В приведенном примере $K_{эфф}$ не превысило допустимую величину (0,95) [2]. Из этого следует, что каких-либо ограничений при работах с ЯДМ в данной камере накладывать не нужно.

Однако возможна такая ситуация, когда при совместном размещении изделий с ЯДМ в камере значение $K_{эфф}$ превысит допустимую величину и окажется больше 0,95. В качестве примера рассматривали размещение ТВС ВВЭР-1000 ($K_{эфф} < 0,94$), работы с которой проводят в одной из камер, вплотную к выдвинутой этажерке шахтного хранилища твэлов ($K_{эфф} < 0,89$). Данная ситуация возможна в случае, когда осуществляется подготовка ТВС к разборке на твэлы и она располагается на столешнице камеры. Расчетная модель данной системы приведена на рис. 3.

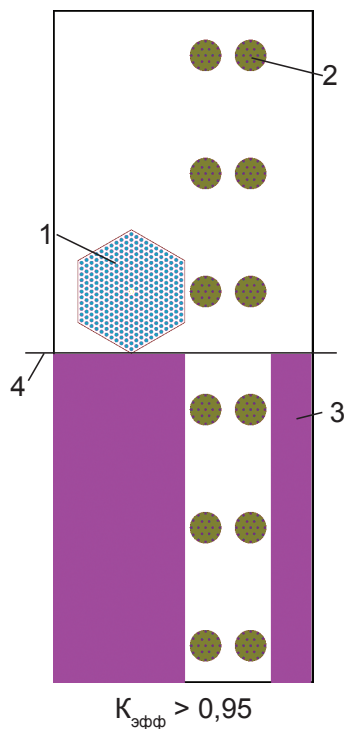


Рис. 3. Расчетная модель совместного размещения тепловыделяющей сборки ВВЭР-1000 и выдвинутой этажерки шахтного хранилища твэлов:

- 1 – тепловыделяющая сборка ВВЭР-1000;
- 2 – пенал «тип 1» с твэлами;
- 3 – бетон; 4 – уровень столешницы

[Fig. 3. Calculation model for the joint placement of fuel assembly VVER-1000 and fuel rods' moved forward storage vault rack:

- 1 – fuel assembly VVER-1000;
- 2 – «type 1» case with fuel rods;
- 3 – concrete; 4 – tabletop level]

Расчетный анализ показал, что, в случае размещения ТВС вплотную к выдвинутой этажерке шахтного хранилища твэлов, величина $K_{эфф}$ превышает 0,95. В этом случае для обеспечения ЯБ требуется наложить ограничения, предотвращающие превышение допустимой величины $K_{эфф}$. В качестве ограничения в данном случае необходимо определить такое расстояние между системами с ЯДМ, при котором значение $K_{эфф}$ не превысит допустимую величину. На рис. 4 приведена зависимость значений $K_{эфф}$ от расстояния «в свету» между ТВС и выдвинутой этажеркой шахтного хранилища твэлов.

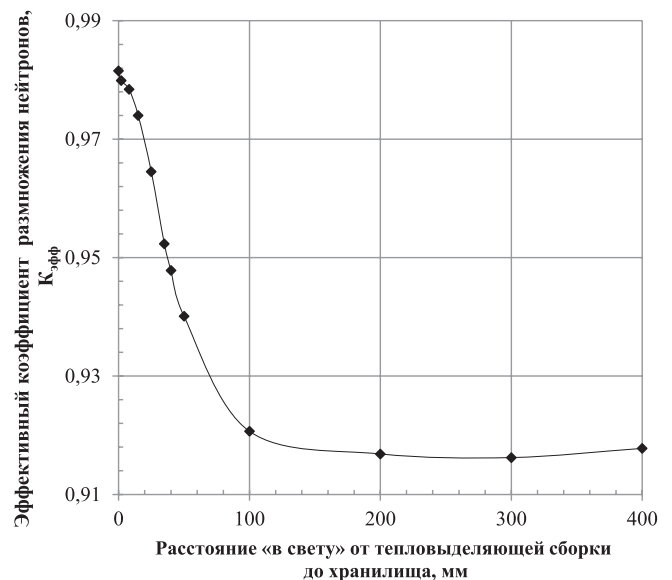


Рис. 4. Зависимость $K_{эфф}$ для системы, моделирующей размещение тепловыделяющей сборки около выдвинутой этажерки шахтного хранилища твэлов, от расстояния «в свету» между ними [Fig. 4. Dependence of $K_{эфф}$ for a system simulating the fuel assembly placement near the fuel rods' moved forward storage vault rack on the clear distance between them]

На графике видно, что при размещении ТВС на расстоянии «в свету» не менее 50 мм от хранилища будут соблюдаться требования ЯБ. Данное ограничение обеспечивается установкой специальных дистанционирующих устройств, предотвращающих сближение систем с ЯДМ при выполнении работ.

Таким образом, при анализе ЯБ достаточно компактных помещений, где может находиться много различного оборудования с ЯДМ, необходимо учитывать возможность их совместного размещения во время выполнения работ, а также в случае смещения упаковок со своих штатных позиций или падения упаковки во время транспортирования. По результатам анализа выбирается безопасная геометрия размещения систем с ЯДМ, обеспечивающая непревышение $K_{эфф}$ допустимой величины.

Влияние бетонных конструкций на результаты расчетов

Основным конструкционным материалом, из которого состоит камера, является бетон. Из него могут быть выполнены стены, пол и потолок. Поскольку бетон обладает свойствами отражателя нейтронов, то при анализе ЯБ было учтено влияние отражения нейтронов от бетона на значения $K_{эфф}$ моделируемых систем.

Влияние отражения нейтронов от бетона на значение $K_{эфф}$ было проверено на примере системы, моделирующей размещение упаковок на столешнице камеры. Проведены расчеты $K_{эфф}$ системы из двух пеналов «тип 2» с ЯДМ в зависимости от шага между ними с учетом и без учета отражения нейтронов от бетонной столешницы камеры (рис. 5).

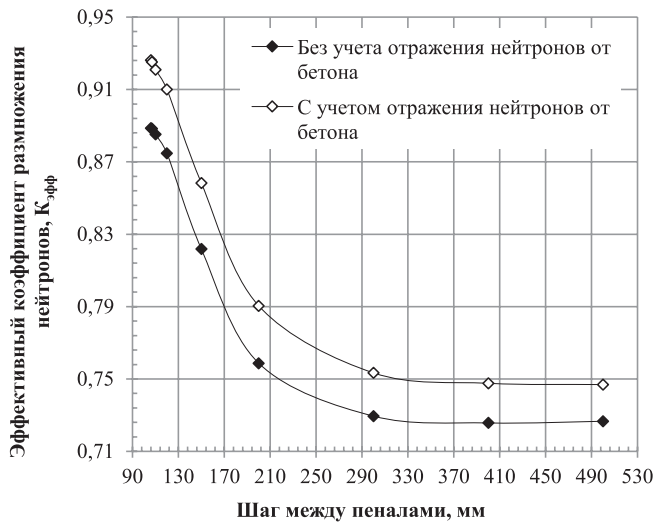


Рис. 5. Зависимость $K_{эфф}$ от шага для системы из двух пеналов «тип 2» с ядерными делящимися материалами с учетом и без учета отражения нейтронов от бетонной столешницы камеры

[Fig. 5. Dependence of $K_{эфф}$ on the spacing for a system of two «type 2» case with nuclear fissile materials with and without taking into account the neutrons reflection from the cell's concrete tabletop]

Из графика видно, что в случае учета отражения нейтронов от бетонной поверхности значения $K_{эфф}$ оказываются существенно выше.

Еще одним примером служат расчеты перегрузочного колодца цилиндрической формы, расположенного в бетонном массиве. В ходе расчетов было рассмотрено два варианта размещения пенала с твэлами: по центру колодца или вплотную к его внутренней бетонной стенке. Для данной системы максимальное значение $K_{эфф}$ составило 0,73 при размещении пенала по центру колодца и 0,75 при размещении пенала вплотную к внутренней стенке колодца.

Результаты сравнительного анализа показали, что строительные конструкции из бетона существ-

венным образом влияют на значение $K_{эфф}$ и приводят к его увеличению. Таким образом, при разработке расчетной модели для анализа ЯБ помещений или хранилищ, в которых осуществляется хранение ЯДМ, необходимо учитывать строительные конструкции (пол, стены), из которых они состоят.

Влияние замедлителя нейтронов различной плотности на результаты расчетов

В соответствии с [2], для всех рассматриваемых систем необходимо выполнять расчеты в зависимости от плотности замедлителя нейтронов, в частности воды, внутри и вне упаковок с ЯДМ. Данное требование основано на том, что при обращении с ЯДМ возможны следующие ситуации:

- образование водяного конденсата внутри упаковок с ЯДМ во время их хранения;
- при хранении облученных ТВС в водной среде, вследствие остаточного энерговыделения, происходит повышение температуры и снижение плотности слоя воды, соприкасающегося с ТВС;
- прорыв трубопровода с технологическими жидкостями и заполнение (полное или частичное) этими жидкостями мест хранения изделий и упаковок с ЯДМ;
- попадание упаковок с ЯДМ под дождь при их транспортировании или протечки воды через перекрытия или стены.

Различная плотность замедлителя нейтронов может существенным образом повлиять на $K_{эфф}$, особенно при рассмотрении бассейнов выдержки или хранилищ с большим количеством упаковок, заполненных ЯДМ.

В качестве примера того, как различная плотность замедлителя нейтронов может повлиять на $K_{эфф}$, приведены результаты расчетов системы, моделирующей расположение пеналов с твэлами на стеллаже РЗК, в зависимости от плотности воды внутри и вне пеналов. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Из графика (рис. 6) видно, что максимальные значения $K_{эфф}$ достигаются при промежуточной плотности воды внутри и вне элементов системы. Максимальная величина $K_{эфф}$ не превышает 0,92 и достигается в случае заполнения пеналов водой плотностью 1 г/см³ и размещения их в воде плотностью 0,37 г/см³. Для сравнения, при размещении упаковок в воде и заполнении их водой максимальной плотности (1 г/см³) величина $K_{эфф}$ будет существенно ниже и не превысит 0,77.

Учет влияния различной плотности замедлителя нейтронов при анализе ЯБ является необходимым, поскольку для некоторых систем максимальные значения $K_{эфф}$ могут достигаться при промежуточной плотности замедлителя нейтронов, что подтверждено результатами расчетного анализа.

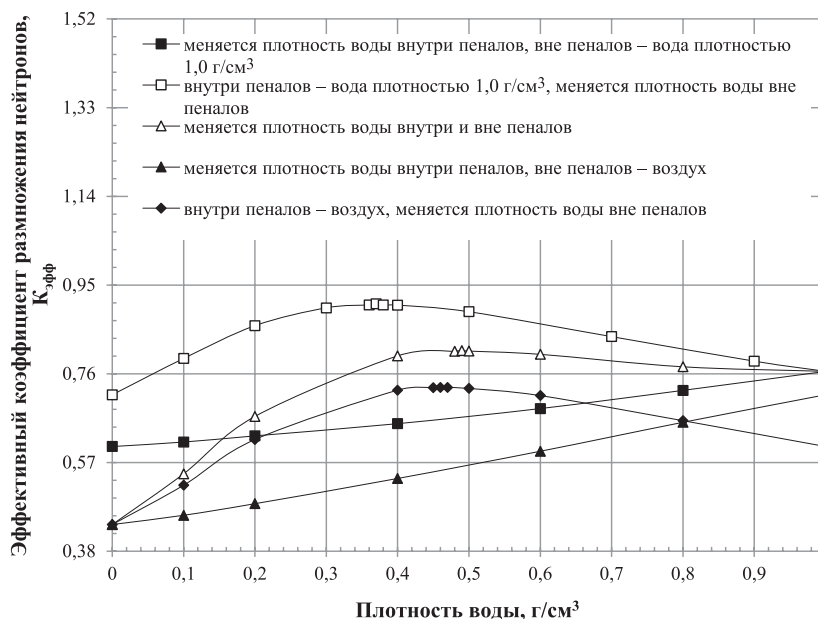


Рис. 6. Зависимость $K_{эфф}$ для системы, моделирующей расположение пеналов с твэлами на стеллаже, от плотности воды внутри и вне пеналов
 [Fig. 6. Dependence of $K_{эфф}$ on the water density inside and outside the cases for a system simulating the arrangement of the cases with fuel rods on a shelves]

Заключение

Рассмотрены методические особенности обоснования ЯБ временного хранения облученных твэлов и их фрагментов в радиационно-защитных камерах. Ключевыми методическими особенностями при выполнении подобных работ являются:

- выбор такого содержимого упаковок (твэлы, фрагменты твэлов), которое приводит к наибольшему значению $K_{эфф}$;
- выбор такой упаковки с ЯДМ, которая для каждого из мест хранения приводит к наибольшему значению $K_{эфф}$;
- учет влияния отражения от строительных конструкций из бетона на значение $K_{эфф}$ моделируемых систем;
- анализ ЯБ при совместном размещении упаковок с ЯДМ;

- учет влияния различной плотности замедлителя нейтронов на параметры ЯБ.

По результатам анализа ЯБ при реализации описанного методического подхода устанавливаются ограничения по параметрам ЯБ (норма загрузки и геометрия размещения ЯДМ) для не превышения допустимой величины $K_{эфф}$.

Исходя из результатов анализа и расчетов следует отметить, что в существующие федеральные нормы и правила в области использования ядерной энергии необходимо добавить пункт, связанный с учетом влияния строительных конструкций из бетона при проведении анализа и обоснования ядерной безопасности. Это связано с тем, что бетон, как показали расчеты, является хорошим отражателем нейтронов, и его наличие существенным образом увеличивает значения $K_{эфф}$.

Литература

1. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2020 г.). – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2021. – С. 86–87.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии (НП-061-05): утв. постановлением Ростехнадзора от 30.12.2005 № 23.
3. Программа MCU-RFFI/A с библиотекой констант DLC/MCU DAT-1.0 // Вопросы атомной науки и техники, сер. «Физика ядерных реакторов». 2001. Вып. 3. С. 50–55.
4. СТО 95 12002-2016. Правила ядерной безопасности при хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-09-2016). – М.: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 2016. – 38 с.

5. СТО 95 12001-2016. Основные правила ядерной безопасности при производстве, использовании, переработке, хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-00-2016). – М.: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 2016. – 59 с.
6. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла (НП-063-05): утв. постановлением Ростехнадзора от 20.12.2005 № 15.

References

1. Nauchnyi godovoi otchet AO "GNTS NIIAR" (otchet ob osnovnykh issledovatel'skikh rabotakh, vypolnennykh v 2020 g.) [Scientific annual report of RIAR JSC (report on the main research work performed in 2020)]. Dimitrovgrad: RIAR JSC, 2021.
2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Pravila bezopasnosti pri khranении i transportirovaniy yadernogo topliva na ob"ektakh ispol'zovaniya atomnoi ehnergii" (NP-061-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Safety rules for the storage and transportation of nuclear fuel at nuclear facilities" (NP-061-05)]. 2005.
3. Programma MCU-RFFI/A s bibliotekoi konstant DLC/MCU DAT-1.0 [Program MCU-RFFI/A with library of constants DLC/MCU DAT-1.0]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki, seriya "Fizika yadernykh reaktorov" – Questions of atomic science and technology, series "Physics of nuclear reactors", 2001, issue 3, pp. 50–55 [in Russian].
4. СТО 95 12002-2016 "Pravila yadernoi bezopasnosti pri khranении i transportirovaniy yadernykh delyashchikhsya materialov (PBYA-06-09-2016)" [СТО 95 12002-2016 "Nuclear Safety Rules for the Storage and Transportation of Nuclear Fissile Materials (PBYA-06-09-2016)"]. 2016.
5. СТО 95 12001-2016 "Osnovnye pravila yadernoi bezopasnosti pri proizvodstve, ispol'zovaniy, pererabotke, khranении i transportirovaniy yadernykh delyashchikhsya materialov (PBYA-06-00-2016)" [СТО 95 12001-2016 "Basic rules for nuclear safety in the production, use, processing, storage and transportation of nuclear fissile materials (PBYA-06-00-2016)"]. 2016.
6. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Pravila yadernoi bezopasnosti dlya ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla" (NP-063-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Nuclear safety rules for nuclear fuel cycle facilities" (NP-063-05)]. 2006.

Сведения об авторах

Акимов Александр Викторович, научный сотрудник, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9).

Малков Андрей Павлович, начальник службы ядерной безопасности, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9); профессор, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ» (433511, Ульяновская область, г. Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294).

Самохвалов Роберт Владимирович, младший научный сотрудник, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9); аспирант, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ» (433511, Ульяновская область, г. Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294).

Фрааз Елена Сергеевна, старший научный сотрудник, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9).

Authors credentials

Akimov Alexander Viktorovich, the Researcher, Joint-Stock Company, State Scientific Centre, Research Institute of Nuclear Reactors (433510, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad, Zapadnoe shosse, 9), e-mail: Aleksandr_ak93@mail.ru.

Malkov Andrey Pavlovich, Head of the Nuclear Safety Department, Joint-Stock Company, State Scientific Centre, Research Institute of Nuclear Reactors (433510, Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad, Zapadnoe shosse, 9); Professor, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (433511, Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad, Kuibysheva str., 294), e-mail: ork-map@pub.niiar.ru.

Samokhvalov Robert Vladimirovich, The Junior Researcher, Joint-Stock Company, State Scientific Centre, Research Institute of Nuclear Reactors (433510, Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad, Zapadnoe shosse, 9); Postgraduate Student, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (433511, Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad, Kuibysheva str., 294), e-mail: samokhvalov-94@mail.ru.

Fraaz Elena Sergeevna, The Senior Researcher, Joint-Stock Company, State Scientific Centre, Research Institute of Nuclear Reactors (433510, Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad, Zapadnoye shosse, 9), e-mail: fraazes@mail.ru.

Для цитирования

Акимов А. В., Малков А. П., Самохвалов Р. В., Фрааз Е. С. Методические особенности обоснования ядерной безопасности при временном размещении облученных твэлов в радиационно-защитных камерах // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 3 (105). С. 28–37. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.105.3.003.

For citation

Akimov A. V., Malkov A. P., Samokhvalov R. V., Fraaz E. S. Methodological features to justify nuclear safety for irradiated fuel rods temporary placement in hot cells. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2022, no. 3 (105), pp. 28–37. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.105.3.003 [in Russian].

