

УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2024.111.1.001

© 2024. Все права защищены.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ХРАНЕНИИ НЕОБЛУЧЕННЫХ ЯДЕРНЫХ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

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

Статья поступила в редакцию 24 января 2024 г.

Аннотация

В научно-исследовательских организациях, деятельность которых связана с большим количеством исследований и опытных работ, необходимо осуществлять временное хранение разных типов ядерного топлива и ядерных делящихся материалов. При этом важной задачей является обеспечение ядерной безопасности. Ядерное топливо может быть представлено в виде штатных и экспериментальных тепловыделяющих сборок и элементов. Экспериментальные тепловыделяющие сборки, в отличие от штатных, могут быть очень разнообразными. Различия могут быть как по количеству и конструкции тепловыделяющих элементов, так и по составу топлива и его обогащению. Приведены примеры моделирования безопасных условий хранения штатных и экспериментальных тепловыделяющих сборок. Разнообразие ядерных делящихся материалов может заключаться как в составе и характеристиках самих ядерных делящихся материалов, так и в параметрах упаковки (геометрическая форма, размер, объем), в которой они хранятся. Стеллажи для хранения ядерного топлива имеют жестко фиксированные ячейки, а стеллажи для хранения упаковок с ядерными делящимися материалами из-за разнообразия их размеров и форм могут не иметь ячеек, а упаковки располагаться в соответствии с разметкой, которая нанесена на полки стеллажа. Приведены основные методические особенности проведения анализа ядерной безопасности при хранении необлученного ядерного топлива и упаковок с ядерными делящимися материалами. Приведено обоснование необходимости анализа орошения или заполнения хранилища водой, учитывая возможность образования в нем пароводяной смеси. Указана необходимость учета строительных конструкций, вблизи которых расположены стеллажи.

В качестве иллюстрации применяемых методических подходов к анализу и обоснованию ядерной безопасности приведены некоторые результаты расчетов эффективного коэффициента размножения нейтронов, выполненные с помощью аттестованной Ростехнадзором программы MCU-RFFI/A.

► **Ключевые слова:** ядерная безопасность, хранение, необлученное ядерное топливо, упаковки с ядерными делящимися материалами, эффективный коэффициент размножения нейтронов, программа MCU-RFFI/A.

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

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

METHODOLOGICAL FEATURES OF NUCLEAR SAFETY ANALYSIS DURING STORAGE OF NON-IRRADIATED NUCLEAR FISSILE MATERIALS

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

The article was received by the editors' crew on January 24, 2024.

Abstract

Research institutions whose activities are associated with a large number of research and experimental work should perform temporary storage of nuclear fuel and nuclear fissile materials of various types. In this case, an important task is to ensure nuclear safety. Nuclear fuel can be presented in the form of standard and experimental fuel assemblies and components. Experimental fuel assemblies can be of all kinds unlike standard ones. The difference can be in the number and design features of fuel elements as well as in the fuel composition and enrichment. The examples of modeling of the safe storage conditions for standard and experimental fuel assemblies are presented. The diversity of the nuclear fissile materials lies in the composition and characteristics of these materials as well as in the parameters of the package they are stored in (geometry, size, volume). The racks for storing nuclear fuel have rigidly fixed cells. The racks for storing packages with nuclear fissile materials may not have cells due to the variety of their sizes and shapes and packages are placed in accordance with the marks applied to the shelves of the rack. The paper describes main methodological features of nuclear safety analysis during storage of non-irradiated nuclear fuel and packages with nuclear fissile materials. The need to analyze the storage irrigation or filling with water is presented considering the possibility of generation of a steam-water mixture in it. The paper also indicates the need for accounting of building constructions near which the racks are located.

Some results of the effective neutron multiplication factor calculations performed with the use of the MCU-RFFI/A software certified by Rostekhnadzor are presented as an illustration of the methodological approaches used for the nuclear safety analysis and justification.

► **Keywords:** nuclear safety, storage, non-irradiated nuclear fuel, packages with nuclear fissile materials, effective neutron multiplication factor, MCU-RFFI/A software.

* Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors”, Dimitrovgrad, Russia.

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

Введение

При проектировании и эксплуатации хранилищ необлученного ядерного топлива (ЯТ) и ядерных делящихся материалов (ЯДМ) одной из важных задач является обеспечение ядерной безопасности (ЯБ) в нормальных условиях хранения и аварийных ситуациях. Ядерная безопасность хранилищ обеспечивается в основном дистанционированным размещением материалов с применением стеллажей, конструкция которых обеспечивает размещение ТВС или упаковок с ЯДМ с определенным шагом. Наилучший способ обеспечения шага расположения ТВС или упаковок с ЯДМ на стеллажах – применение ячеек (ложементов), которые жестко зафиксированы на полках стеллажа. При проектировании стеллажей шаг выбирается таким, чтобы значение эффективного коэффициента размножения нейтронов ($K_{эфф}$) не превышало допустимой величины в нормальных условиях хранения и при нарушениях нормальных условий [1]. Стеллажи должны быть устойчивы к внутренним и внешним воздействиям природного и техногенного характера [1, 2].

Хранение необлученного ЯТ и ЯДМ осуществляется при отсутствии воды, поэтому еще одним важным моментом обеспечения ЯБ является предотвращение поступления воды в хранилище. Для этого в зависимости от класса хранилища применяются следующие условия:

- расположение хранилища в незатопляемой зоне;
- отсутствие соседних помещений, из которых вода может попасть в хранилище;
- отсутствие трубопроводов с водой в хранилище;
- наличие дренажа;
- наличие сигнализаторов обнаружения воды и др. [2].

Однако при проведении анализа ЯБ необходимо рассматривать возможность появления воды в хранилищах вне зависимости от их класса. Особенно важно учитывать не только полное заполнение хранилища водой, но и образование в нем пароводяной смеси или орошение хранилища. Вода в хранилище может появиться в результате разрыва трубопровода с водой, протекания крыши, повышения влажности воздуха, применения водяного пожаротушения и т. п. Плотность воды в этих случаях может быть различной и является важным параметром, влияющим на значение $K_{эфф}$ [1], поскольку в некоторых случаях максимальное значение $K_{эфф}$ достигается не при максимальной

плотности воды, а при ее промежуточных значениях [3] (стр. 83–84).

Значение $K_{эфф}$ при хранении ЯТ не должно превышать 0,95 в нормальных условиях хранения и при нарушении нормальных условий, включая проектные аварии [1]. При хранении упаковок с ЯДМ значение $K_{эфф}$ не должно превышать 0,95 в нормальных условиях и 0,98 при нарушении нормальных условий (единичном отказе или ошибке работников) [4].

Особенность проведения анализа ЯБ хранилищ в научно-исследовательском институте заключается в том, что деятельность такой организации связана с большим количеством исследований и опытных работ, что предполагает хранение разнообразных ЯДМ и экспериментальных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) и ТВС. Это определяет методические особенности проведения анализа ЯБ таких хранилищ, представленные в статье.

Анализ ЯБ проводится на основании требований нормативных документов и значений эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$, полученных с использованием аттестованных расчетных кодов. В статье приведены значения $K_{эфф}$, полученные с использованием аттестованной программы MCU-RFFI/A [5]. В программе реализован алгоритм решения уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло на основе большого количества серий вычислений для систем с произвольной трехмерной геометрией. Значения $K_{эфф}$, приведенные в данной статье, учитывают статистическую и методическую неопределенность. Статистическая неопределенность не превышала 0,002 и зависит от количества поколений нейтронов, заданных при расчетах. Она не должна превышать величину удвоенного среднеквадратичного отклонения σ , что обеспечивает отклонение расчетного значения $K_{эфф}$ на величину не более 2σ с вероятностью 95 % для нормального распределения расчетных значений $K_{эфф}$. Методическая неопределенность указана в аттестационном паспорте программы MCU-RFFI/A и для разного типа ЯДМ различна. Применение консервативного подхода [2, 4] к обоснованию ЯБ, приводящего к заведомо завышенным значениям $K_{эфф}$, позволяет учесть остальные неопределенности при моделировании используемого оборудования и материалов.

Хранение ядерного топлива

На территории АО «ГНЦ НИИАР» расположено шесть исследовательских реакторов, в которых

проводятся эксперименты по различным тематикам. В связи с этим ЯТ, предназначенное для облучения в этих реакторах, представлено как в виде штатных ТВС, так и в виде экспериментальных ТВС. Как правило, штатные ТВС имеют фиксированные параметры, которые отличны для каждого реактора. Среди таких параметров можно выделить диаметр твэлов, количество твэлов и шаг их расположения в ТВС, размер кожуха ТВС, тип топлива в твэлах, массу топлива и его обогащение по ^{235}U , массовый состав других делящихся и пороговых нуклидов. Экспериментальные ТВС (в ряде случаев их называют облучательными устройствами) для одного типа реактора могут быть очень разнообразными. Различие может быть как по количеству и конструкции твэлов, так и по составу топлива и его обогащению.

Для проведения анализа ЯБ хранения ЯТ сначала необходимо составить трехмерную модель ТВС. Модель штатной ТВС, как правило, максимально приближена к ее реальной геометрии. Например, расчетную модель штатной ТВС реактора BOR-60 по длине задают тремя частями: хвостовик, топливная часть, головка. Хвостовик задают полым цилиндром, головку – тремя телами из стали, последовательно расположенными друг за другом: шестигранной призмой, цилиндром и усеченным конусом. Топливную часть ТВС задают в виде полой шестигранной призмы, во внутреннем объеме которой расположены твэлы в узлах треугольной решетки. Твэлы моделируют цилиндром, который по длине разбит на несколько зон: верхний концевик, верхний торцевой экран, топливная зона,

нижний торцевой экран, газовая полость и нижний концевик. Концевики твэла задают полностью стальными, а в газовой полости – воздух. Продольное и поперечное сечения расчетной модели штатной ТВС реактора BOR-60 представлены на рис. 1.

Если штатная ТВС имеет твэлы сложной геометрии, то при их моделировании целесообразно применить консервативный подход, который упрощает геометрию твэла. При этом важным параметром является значение $K_{эфф}$. Значение $K_{эфф}$ консервативной модели твэла (ТВС) не должно быть меньше, чем для модели, геометрия которой максимально приближена к реальной геометрии. Но и не должно быть сильно завышено (степень консерватизма не должна быть избыточной).

Например, твэл реактора СМ-3 (рис. 2, а) представляет собой стержень крестообразного профиля в сечении, спирально закрученный вдоль оси. Чтобы смоделировать твэл такой геометрии понадобится правильное сочетание большого количества простых фигур. Для упрощения модели твэлов было проведено множество расчетов, в результате которых для дальнейших расчетов была выбрана консервативная модель твэла (рис. 2, б), который задают в виде полого цилиндра. При этом внутренний диаметр цилиндра соответствует вписанному диаметру твэла, а внешний диаметр рассчитан исходя из площади твэла. Внутри цилиндра задают гомогенную смесь элементов, составляющих сердечник и оболочку твэлов. При этом значения $K_{эфф}$ для модели ТВС с твэлами, заданными в виде креста и в виде полого цилиндра, в пределах погрешности совпадают.

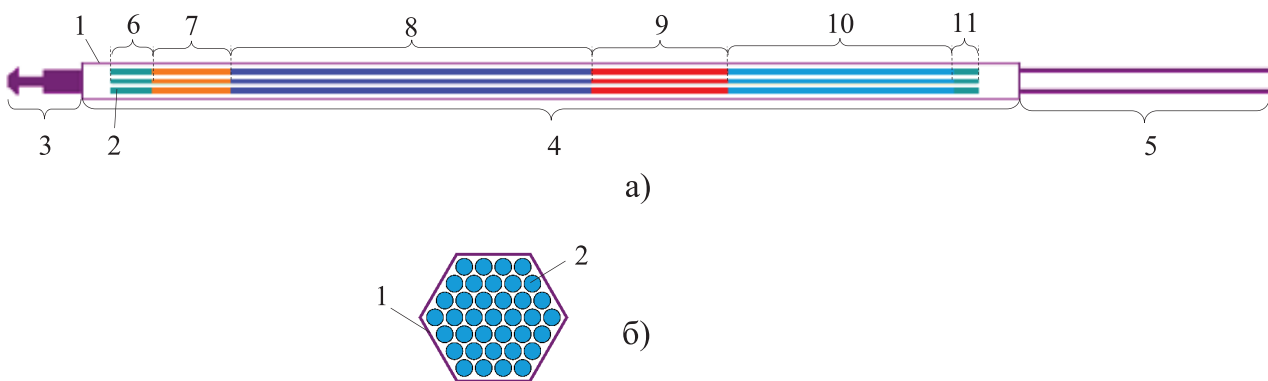


Рис. 1. Продольное (а) и поперечное (б) сечения расчетной модели штатной ТВС реактора BOR-60: 1 – кожух ТВС; 2 – твэл; 3 – головка ТВС; 4 – топливная часть ТВС; 5 – хвостовик ТВС; 6 – верхний концевик твэла; 7 – верхний торцевой экран твэла; 8 – топливная зона твэла; 9 – нижний торцевой экран твэла; 10 – газовая полость твэла; 11 – нижний концевик твэла

[Fig. 1. Longitudinal (a) and transverse (b) sections of the computational model of the BOR-60 standard FA: 1 – FA duct; 2 – fuel rod; 3 – FA head; 4 – FA fuel part; 5 – FA fixture; 6 – fuel rod upper end part; 7 – fuel rod upper blanket; 8 – fuel rod fuel zone; 9 – fuel rod bottom blanket; 10 – fuel rod gas cavity; 11 – fuel rod lower end part]

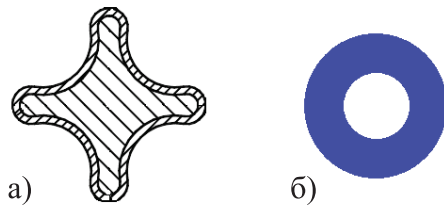


Рис. 2. Поперечное сечение твэла (а) и расчетной модели твэла (б) штатной ТВС реактора СМ-3

[Fig. 2. Cross-section of a fuel rod (a) and a calculation model of a fuel rod (b) of the SM-3 standard FA]

Выбор расчетной модели экспериментальной ТВС (ЭТВС) намного сложнее, чем штатной, поскольку ЭТВС имеют различные геометрические и материальные параметры. Для того чтобы разработать расчетную модель ЭТВС, надо проанализировать ТВС, которые уже облучались в данном реакторе, а также расширить эти параметры для учета тематики проводимых экспериментов в будущем. Выбор консервативной модели ЭТВС осуществляют расчетным путем. Расчеты проводят в зависимости от длины топливной зоны, размеров ТВС в поперечном сечении, диаметра твэла, массы ЯДМ, плотности топлива и других параметров.

Например, экспериментальную ТВС реактора МИРМ1 при проведении анализа ЯБ задают цилиндром. Габаритные размеры цилиндра выбирают исходя из диаметра экспериментального канала, в котором облучается ТВС, и высоты активной

зоны ТВС. При выборе расчетной модели внутри цилиндра задают гомогенную смесь ЯДМ и воды. Цилиндр располагают в воде. При выборе консервативной модели в качестве ЯДМ задают три типа топлива: диоксид урана, смесь оксидов урана и плутония и металлический уран. Диаметр и высоту цилиндра выбирают расчетным путем (рис. 3). В итоге была выбрана модель, представляющая собой цилиндр диаметром 70 мм, высотой 1 000 мм с топливом в виде металлического урана. Геометрические параметры данной модели соответствуют высоте активной зоны реактора МИРМ1 и диаметру его экспериментального канала.

Хранение штатных и экспериментальных ТВС осуществляется, как правило, на разных стеллажах. ТВС на стеллаже располагаются с определенным шагом, который обеспечивается фиксированием ТВС либо наличием ячейки, приваренной к стеллажу, в которую помещается ТВС. Для анализа ЯБ размещения ЯТ на стеллажах необходимо разработать трехмерные расчетные модели. Стеллажи, как правило, изготовлены из стали, которая приводит к уменьшению значения $K_{эфф}$. С позиций консервативного подхода конструктивные элементы стеллажей (полки, каркас, дверцы) обычно не учитываются. Но при расчетах необходимо учитывать расположение стеллажей относительно строительных конструкций (пол, стены хранилища), поскольку бетонный отражатель увеличивает значения $K_{эфф}$ [6].

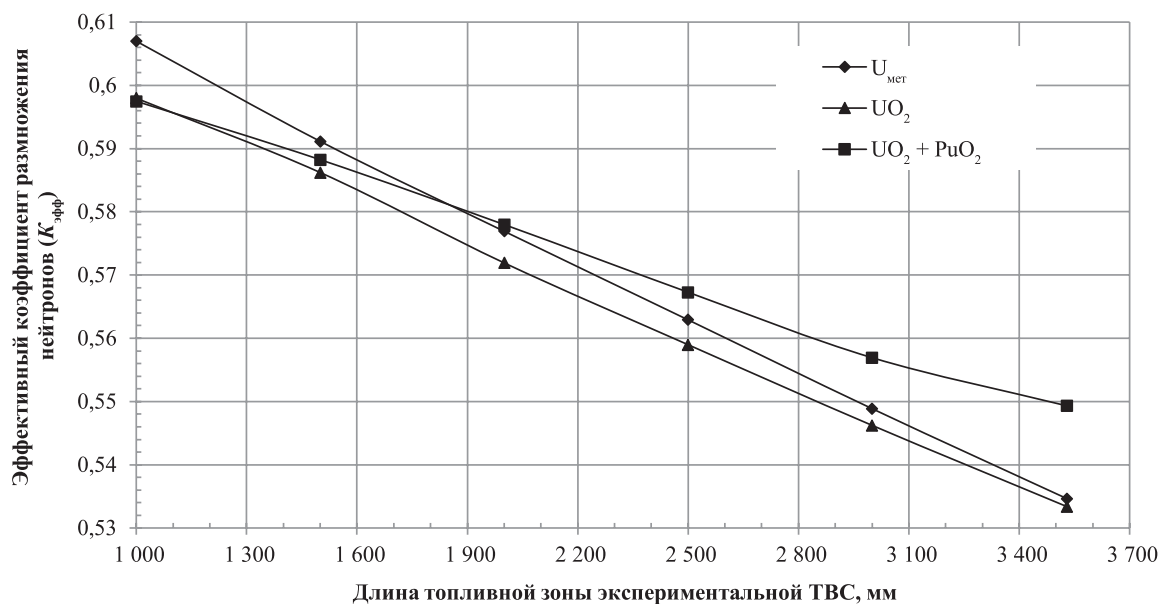


Рис. 3. Зависимость $K_{эфф}$ для одиночной ЭТВС, расположенной в воде и заполненной водой, от длины топливной зоны

[Fig. 3. Dependence of $K_{эфф}$ for a single experimental FA located in water and filled with water on the length of the fuel zone]

В хранилищах необлученного ЯТ применяются технические меры для предотвращения поступления воды. Однако при проведении анализа ЯБ необходимо предполагать возможность появления воды в хранилище в аварийных ситуациях [1].

На примере одного из стеллажей была проанализирована аварийная ситуация, связанная с постепенным заполнением хранилища водой. Стеллаж предназначен для хранения штатных ТВС типа СМ. ТВС на стеллаже расположены вертикально группами по шесть штук. Расчетная модель данного стеллажа (рис. 4) представляет собой бесконечную решетку групп из шести ТВС. В группе ТВС расположены в штатной геометрии. На четырех внешних боковых гранях модели задают условия зеркального отражения. Сверху над ТВС задают условие свободного вылета нейтронов, а снизу задают бетонный пол толщиной 300 мм. Расчеты данного стеллажа проведены в зависимости от уровня воды в хранилище. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

На рис. 5 видно, что при увеличении уровня воды в хранилище в пределах активной зоны ТВС значения $K_{эфф}$ увеличиваются. При заполнении хранилища водой выше активной зоны ТВС достигаются максимальные значения $K_{эфф}$, которые практически не меняются при дальнейшем увеличении уровня воды. Поэтому при проведении анализа ЯБ хранилищ, как правило, необходимо рассматривать их полное заполнение водой, даже если это практически невозможно в реальности.

Важным параметром, влияющим на значение $K_{эфф}$, является плотность воды, которая присутствует или может попасть между твэлами, ТВС. Причиной появления воды разной плотности могут служить повышение влажности воздуха, образование конденсата, течь с потолка (крыши), ошибочное применение водяного или пенного пожаротушения и, как следствие, орошение хранилища водой. На примере стеллажа, предназначенного для хранения штатных ТВС реактора БОР-60, рассмотрено

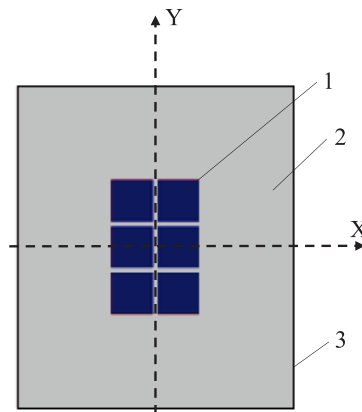


Рис. 4. Поперечное сечение расчетной модели стеллажа для хранения ТВС критического стенда СМ:
1 – ТВС; 2 – среда вне ТВС; 3 – боковая грань модели с условием зеркального отражения
[Fig. 4. Cross-section of the calculation model of the FA storage of the SM critical stand:
1 – FAs; 2 – medium outside the FA, 3 – side face of the model with the mirror reflection condition]

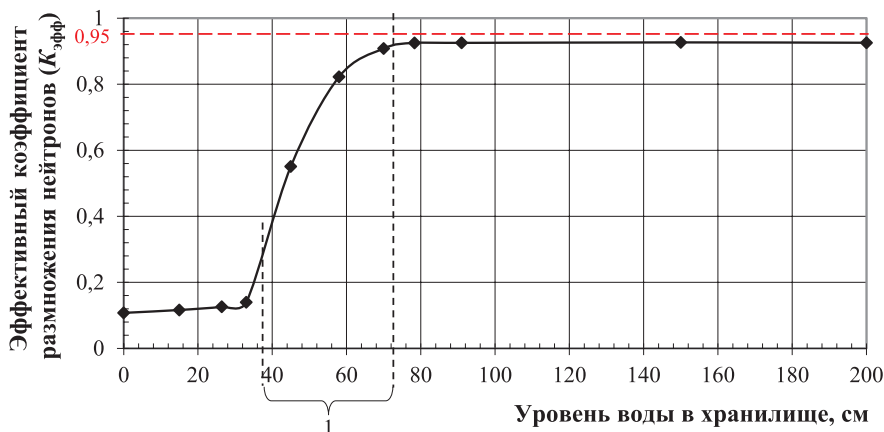


Рис. 5. Зависимость $K_{эфф}$ для стеллажа, моделирующего размещение ТВС критического стенда СМ, от уровня воды в хранилище (1 – активная зона ТВС)
[Fig. 5. Dependence of $K_{эфф}$ for the rack simulating the placement of the SM critical stand FAs on the water level in the storage (1 – FA active part)]

изменение значения $K_{эфф}$ при изменении плотности воды в хранилище. На стеллаже ТВС расположены вертикально в узлах прямоугольной решетки. Расчетная модель такого стеллажа (рис. 6) представляет собой систему ТВС, которые расположены в штатных позициях. При моделировании стеллажа задан бетонный пол хранилища, а вокруг стеллажа в форме прямоугольного параллелепипеда задан отражатель из воды плотностью 1 г/см³. Расчеты данного стеллажа проведены в зависимости от плотности воды внутри и между ТВС. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

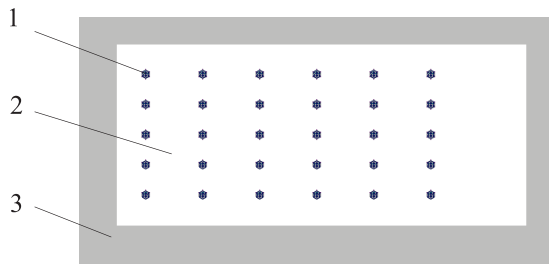


Рис. 6. Поперечное сечение расчетной модели стеллажа, моделирующего размещение штатных ТВС реактора БОР-60: 1 – ТВС; 2 – среда между ТВС; 3 – отражатель из воды

[Fig. 6. Cross-section of the calculation model of the rack simulating the placement of BOR-60 standard FAs: 1 – FAs; 2 – medium between FAs; 3 – water reflector]

Из рис. 7 видно, что максимальные значения $K_{эфф}$ достигаются при плотности воды в интервале от 0,2 до 0,3 г/см³. Это связано с тем, что при определенных параметрах размещения ЯДМ и в зависимости от плотности воды соотношение харак-

теристик замедления и поглощения нейтронов в воде меняется. Физический смысл этого явления описан в [7] (стр. 59–65).

На стеллажах, предназначенных для хранения экспериментальных изделий, могут храниться как ЭТВС, так и твэлы, предназначенные для дальнейшей сборки ЭТВС. Для анализа ЯБ таких стеллажей сначала надо определиться, как моделировать содержимое ячеек, а затем провести сравнительные расчеты для обоих вариантов наполнения ячеек: твэлы и ТВС. При проведении расчетов каждая ячейка стеллажа сначала заполняется одним, а затем другим типом изделий. Для примера возьмем стеллаж для хранения экспериментальных изделий реактора МИРМ1. Данный стеллаж представляет собой систему цилиндрических ячеек, которые расположены в узлах прямоугольной решетки. Диаметр ячеек составляет 120 мм, длина – 1 500 мм. О том, как выбирают модель ЭТВС, уже было сказано. В данном случае модель ЭТВС представляет собой цилиндр диаметром 70 мм и длиной 1 000 мм. При расчете стеллажа в каждой ячейке задают по одному такому цилиндру. При размещении на стеллаже твэлов в каждой ячейке выделяют слой толщиной 1 000 мм (длина твэлов). В поперечном сечении данный слой заполнял весь внутренний объем ячейки. Внутри слоя задают гомогенную смесь ЯДМ определенной массы и воды. Такая модель ячейки стеллажа с твэлами была выбрана в связи с тем, что геометрия твэлов может быть различной. Продольные сечения расчетной модели стеллажа при размещении в них ЭТВС и твэлов представлены на рис. 8.

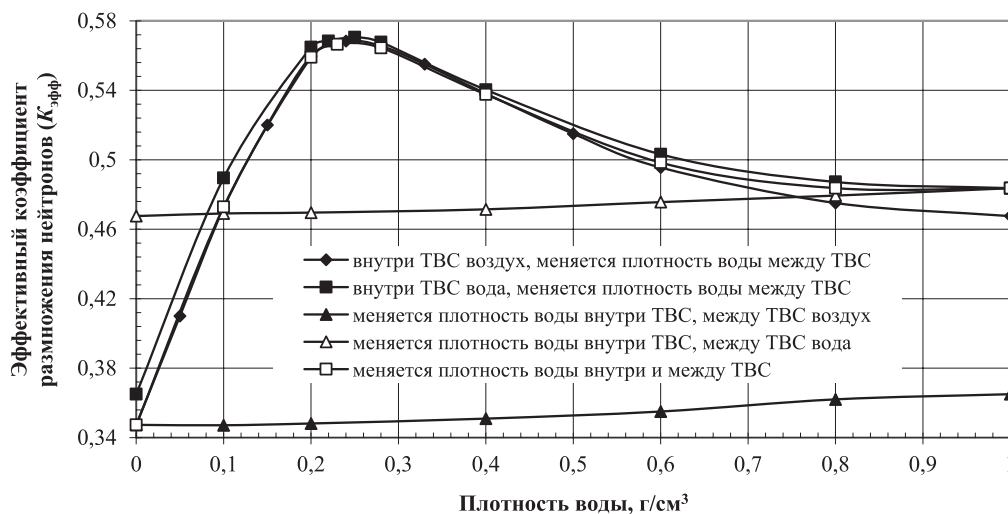


Рис. 7. Зависимость $K_{эфф}$ для стеллажа, моделирующего размещение штатных ТВС реактора БОР-60, от плотности воды внутри и между ТВС

[Fig. 7. Dependence of $K_{эфф}$ for a rack simulating the placement of BOR-60 standard FAs on the water density inside and between FAs]

В случае если в ячейках стеллажа хранятся твэлы известной геометрии, то надо определить, при каком количестве твэлов достигаются максимальные значения $K_{эфф}$. Исходя из многолетнего опыта проведения расчетов в области ЯБ в нормальных условиях (внутри и вне ячейки стеллажа воздух) всегда максимальное значение $K_{эфф}$ достигается при полном заполнении ячейки твэлами и расположении твэлов вплотную друг к другу в узлах треугольной решетки. При заполнении стеллажа или ячейки водой максимальные значения $K_{эфф}$ могут достигаться не при полном заполнении ячейки твэлами. Чтобы определить, при каком количестве твэлов достигаются максимальные значения $K_{эфф}$, надо провести расчеты стеллажа или отдельной ячейки от количества твэлов в ней. Такие расчеты проводятся при заполнении ячеек водой и расположении их в воде. При проведении расчетов твэлы в ячейке располагаются в узлах треугольной решетки

с максимально возможным шагом. На рис. 9 для примера приведены результаты расчетов одной ячейки стеллажа, в которой могут быть расположены твэлы штатной ТВС БОР-60 или СМ-3.

Как видно из рис. 9, при расположении в ячейке твэлов штатной ТВС БОР-60 максимальное значение $K_{эфф}$ достигается при полном заполнении ячейки твэлами (187 штук). При заполнении ячейки твэлами штатной ТВС СМ-3 максимальное значение $K_{эфф}$ достигается в случае, когда внутри ячейки расположено 150 твэлов. При том, что в ячейку помещается 451 твэл штатной ТВС СМ-3.

Хранение упаковок с ядерными делящимися материалами

Основная сложность анализа ЯБ стеллажей, на которых хранятся упаковки с ЯДМ, заключается в большом многообразии упаковок, которые могут

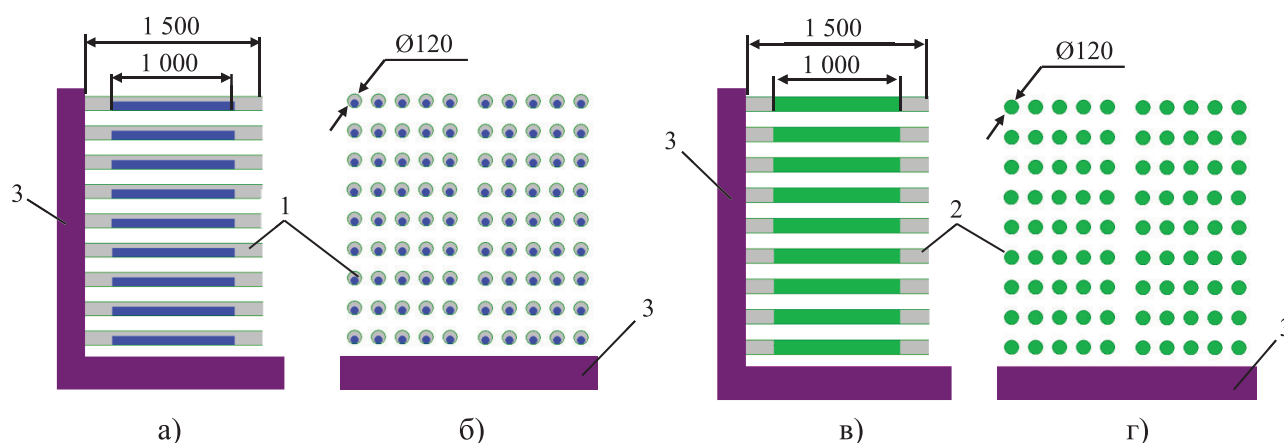


Рис. 8. Продольные сечения расчетной модели стеллажа, моделирующей размещение ЭТВС (а, б) и твэлов (в, г) в ячейках стеллажа

[Fig. 8. Longitudinal sections of the calculation model of the rack simulating the placement of experimental FAs (a, b) and fuel rods (c, d) in the rack cells]

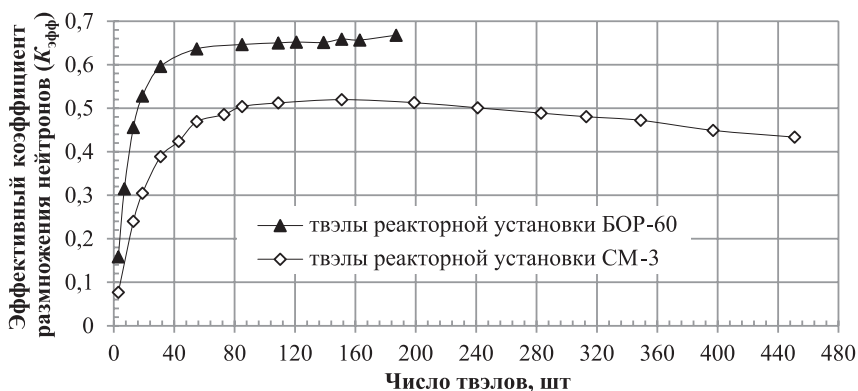


Рис. 9. Зависимость $K_{эфф}$ для одиночной ячейки стеллажа, заполненной твэлами штатной ТВС БОР-60 или СМ-3, от числа твэлов (ячейка расположена в воде и заполнена водой плотностью 1 г/см³)

[Fig. 9. Dependence of $K_{эфф}$ for a single rack cell filled with fuel rods of the BOR-60 or SM-3 standard FA on the number of fuel rods (the cell is located in water and filled with water with a density of 1 g/cm³)]

содержать различные типы ЯДМ. При хранении ЯДМ в расчетах необходимо учитывать проникновение воды в емкости и различное ее распределение по внутреннему объему [2, 4], даже если она герметичная, так как при наличии воды значение $K_{эфф}$, как правило, достигает максимума.

В отличие от стеллажей для хранения ЯТ, на которых все изделия расположены с фиксированным шагом, стеллажи для хранения упаковок с ЯДМ из-за разнообразия их размеров и форм могут не иметь ячеек (ложементов), а упаковки располагаться в соответствии с разметкой, которая нанесена на полки стеллажа. Такое расположение упаковок не предотвращает их смещение в случае аварийных ситуаций, поэтому надо рассматривать смещение упаковок со штатных позиций [2] и расположение всех упаковок на одной полке вплотную друг к другу.

Прежде чем проводить расчеты стеллажа, необходимо определиться с расчетной моделью упаковок, которые на нем могут быть размещены. Каждую упаковку необходимо просчитать в зависимости от параметров ЯДМ (масса, плотность, обогащение и др.) и определить, когда достигаются максимальные значения $K_{эфф}$ в нормальных условиях и в аварийной ситуации, связанной с заполнением водой контейнера или помещения, в котором он будет храниться. Затем весь стеллаж заполняют тем типом контейнера, который приводит к максимальным значениям $K_{эфф}$.

Если разнообразие упаковок небольшое, то расчетная модель упаковки приближается к реальной геометрии данной упаковки. В нормальных условиях упаковку полностью заполняют ЯДМ. Если есть ограничения по массе, то ЯДМ задают слоем на дне упаковки. Высота слоя в этом случае рассчитывается исходя из массы ЯДМ и его теоретической плотности. При заполнении упаковки водой

внутри нее задают гомогенную смесь ЯДМ и воды, равномерно распределенную по всему объему упаковки. При этом обязательно надо провести расчет от плотности ЯДМ в упаковке или от его массы. Как правило, максимальное значение $K_{эфф}$ достигается при максимальной плотности (массе) материала. Но бывают случаи, когда максимальное значение $K_{эфф}$ достигается при промежуточных значениях плотности (массы). В качестве примера на рис. 10 приведена зависимость $K_{эфф}$ для одиночного контейнера, внутри которого находится закись-окись урана, от его плотности. Обогащение урана по ^{235}U в этом случае составило 20 %.

Если разнообразие упаковок большое, возможен вариант их задания в виде сферы. Такая форма упаковки является оптимальной, поскольку утечка нейтронов в этом случае будет минимальной, что приводит к наибольшим значениям $K_{эфф}$, чем реальная геометрия упаковки. Для такой упаковки также необходимо определить условия, при которых значение $K_{эфф}$ достигает максимума. Расчеты проводятся от объема упаковки, массы ЯДМ внутри нее, при заполнении упаковки водой и расположении ее в воде. Результаты расчетов одиночной сферы с различными типами ЯДМ в качестве примера приведены на рис. 11.

После того, как определились с моделью упаковки, ее объемом и заполнением, проводят моделирование стеллажа, на котором располагают данные упаковки. Все ячейки стеллажа заполняют одним типом упаковки, тем, который приводит к максимальным значениям $K_{эфф}$. При моделировании стеллажа учитывают отражатель из воды, бетонные конструкции помещения (пол, стены хранилища). Для примера рассмотрим один стеллаж, на котором могут храниться самые разнообразные упаковки. На полках стеллажа отсутствуют ячейки, которые жестко

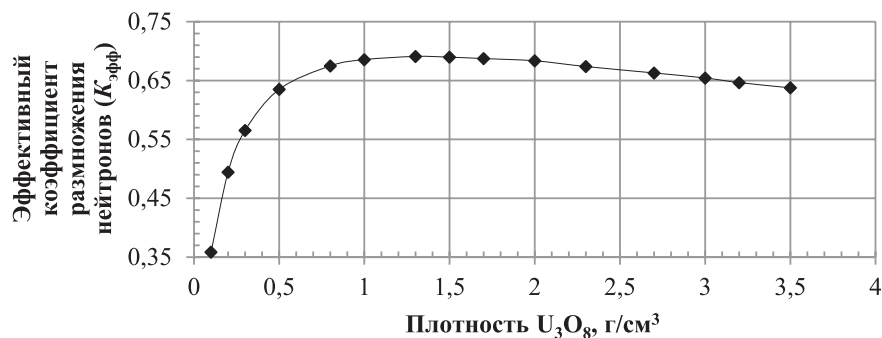


Рис. 10. Зависимость $K_{эфф}$ для одиночного контейнера, расположенного в воде и заполненного гомогенной смесью U_3O_8 и воды, от плотности U_3O_8 [Fig. 10. Dependence of $K_{эфф}$ for a single container located in water and filled with a homogeneous mixture of U_3O_8 and water on the density of U_3O_8]

фиксируют упаковки, поскольку размеры упаковок могут быть различны. Но их дистанционирование достигается применением технических средств: перегородки из листовой стали, которые приварены к полкам стеллажа. Поэтому упаковки, которые моделируют в виде сферы, в расчетной модели были сдвинуты к центру стеллажа (рис. 12). Продольное и поперечное сечения расчетной модели такого стеллажа представлены на рис. 13.

Далее проводят расчеты стеллажа в зависимости от среды (воздух, вода различной плотности) внутри упаковок, вне упаковок, рассматривают различную комбинацию сред внутри и вне упаковок. Для стеллажа, который представлен на рис. 13, максимальное значение $K_{эфф}$ достигается в случае, когда упаковки заполнены водой плотностью 1 г/см³, а между упаковками – воздушная среда.

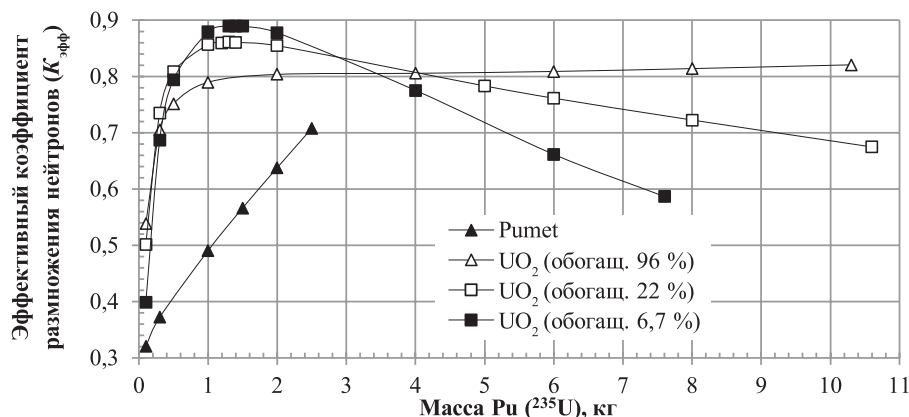


Рис. 11. Зависимость $K_{эфф}$ для одиночной упаковки в виде сферы, заполненной различными типами ЯДМ от массы Pu (²³⁵U) в составе ЯДМ, упаковка расположена в воде и заполнена водой плотностью 1 г/см³
 [Fig. 11. Dependence of $K_{эфф}$ for a single sphere-shaped package filled with various types of NFM on the mass of Pu (²³⁵U) in NFM, the package is located in water and filled with water with a density of 1 g/cm³]

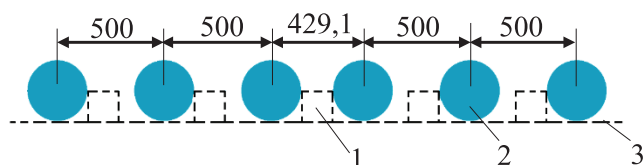


Рис. 12. Схематичное изображение модели полки стеллажа:
 1 – дистанционирующая перегородка; 2 – упаковка с ЯДМ; 3 – полка
 [Fig. 12. Schematic representation of the rack shelf model:
 1 – spacer partition; 2 – package with NFM; 3 – shelf]

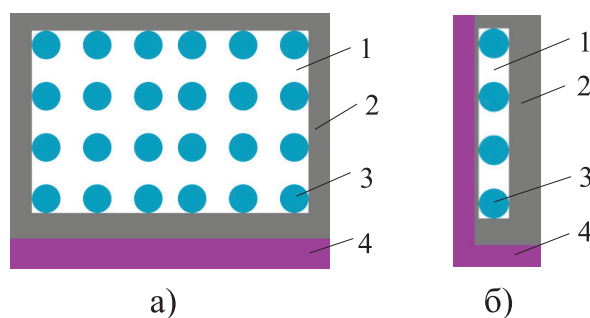


Рис. 13. Продольное (а) и поперечное (б) сечения расчетной модели стеллажа:
 1 – среда вне упаковок с ЯДМ; 2 – отражатель из воды; 3 – упаковка с ЯДМ; 4 – бетон
 [Fig. 13. Longitudinal (a) and transverse (b) sections of the rack calculation model:
 1 – medium outside packages with NFM; 2 – water reflector; 3 – package with NFM; 4 – concrete]

Заключение

В статье рассмотрены методические особенности анализа ЯБ хранения ЯТ и упаковок с ЯДМ, которые могут иметь различные геометрические размеры и материальный состав. Показана важность учета появления воды в хранилище любого класса, заполнения упаковок с ЯДМ водой, даже если они герметичны, изменения плотности воды в хранилище. Указана необходимость учета при

расчетах строительных конструкций, вблизи которых размещаются стеллажи. Приведены примеры моделирования экспериментальных ТВС, упаковок с ЯДМ в нормальных и аварийных ситуациях. По результатам анализа ЯБ при реализации описанного методического подхода устанавливаются ограничения по параметрам ЯБ (шаг расположения ТВС или упаковок с ЯДМ, материальный состав, масса ЯДМ, объем упаковок и другие параметры).

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Внуков В. С. Безопасность ядерного топливного цикла: учебное пособие / В. С. Внуков. – Обнинск, 2014, с. 103.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Внуков В. С. Обеспечение ядерной безопасности при хранении отработавшего ядерного топлива АЭС: учебно-методическое пособие / В. С. Внуков. – Обнинск, 2019, с. 230.

References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Pravila bezopasnosti pri khraneni i transportirovani 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.
2. STO 95 12002-2016 "Pravila yadernoi bezopasnosti pri khraneni i transportirovani yadernykh delyashchikhsya materialov (PBYA-06-09-2016)" [STO 95 12002-2016 "Nuclear safety rules for the storage and transportation of nuclear fissile materials (PBYA-06-09-2016)"]. 2016.
3. Vnukov V. S. (2014). Bezopasnost' yadernogo toplivnogo tsikla [Safety of the nuclear fuel cycle]. Obninsk. [in Russian].
4. 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.
5. 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].
6. Akimov A. V., Malkov A. P., Samokhvalov R. V., Fraaz E. S. (2022). Metodicheskie osobennosti obosnovaniya yadernoi bezopasnosti pri vremennom razmeshchenii obluchennykh tvehlov v radiatsionno-zashchitnykh

kamerakh [Methodological features to justify nuclear safety for irradiated fuel rods temporary placement in hot cells]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (105), pp. 28–37. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.105.3.003.

7. Vnukov V. S. (2019). Obespechenie yadernoi bezopasnosti pri khranении otrabotavshogo yadernogo topliva AEHS [Ensuring nuclear safety in the storage of spent nuclear fuel from nuclear power plants]. Obninsk. [in Russian].

Сведения об авторах

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

Малков Андрей Павлович, начальник службы ядерной безопасности, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., 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 обл., Димитровград, ул. Куйбышева, д. 294).

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

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

Authors credentials

Akimov Alexander Viktorovich, Researcher, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: Aleksandr_ak93@mail.ru.

Malkov Andrey Pavlovich, Head of the Nuclear Safety Department, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510); Professor, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (294, Kuibysheva str., Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511), e-mail: malkovap@mail.ru.

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

Fraaz Elena Sergeevna, Senior Researcher, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors” (9, Zapadnoe hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: fraazes@mail.ru.

Для цитирования

Акимов А. В., Малков А. П., Самохвалов Р. В., Фрааз Е. С. Методические особенности проведения анализа ядерной безопасности при хранении необлученных ядерных делящихся материалов // Ядерная и радиационная безопасность. 2024. № 1 (111). С. 5–16. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.111.1.001.

For citation

Akimov A. V., Malkov A. P., Samokhvalov R. V., Fraaz E. S. Methodological features of nuclear safety analysis during storage of non-irradiated nuclear fissile materials. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2024, No. 1 (111), pp. 5–16. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.111.1.001.