



УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.120.2.001

© 2026. Все права защищены.

## ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ТВЭЛАМИ И ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИМИ СБОРКАМИ

Самохвалов Р. В.\* (samohvalov-94@mail.ru), Акимов А. В.\*,\*\* (Aleksandr\_ak93@mail.ru),  
Латышев Е. Н.\* (Latysheven@mail.ru), Малков А. П.\*,\*\* (malkovap@mail.ru),  
Фрааз Е. С.\* (fraazes@mail.ru), Шакурова А. И.\* (mubinova99@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2026 г.

### Аннотация

В статье приведены методические особенности анализа ядерной безопасности при обращении (хранение, транспортирование, размещение во время исследований) с экспериментальными твэлами и тепловыделяющими сборками (ТВС) различных типов реакторных установок.

Представлены примеры анализа обеспечения требований ядерной безопасности для отдельных изделий (ТВС, кассы с твэлами) и совместных систем, образуемых в ходе выполнения исследовательских работ с использованием результатов расчетов эффективного коэффициента размножения нейтронов в программах семейства MCU.

Показана возможность снижения трудозатрат при выполнении расчетного анализа ядерной безопасности без потери в уровне консерватизма при установлении ограничений по параметрам ядерной безопасности для всего многообразия ТВС и твэлов, поступающих на исследования.

При выполнении расчетного анализа применялись консервативные допущения, которые заведомо приводят к завышенным значениям эффективного коэффициента размножения нейтронов рассматриваемых систем. В частности, предполагали, что:

- в расчетных моделях отсутствуют конструкционные материалы, поглощающие нейтроны;
- все изотопы плутония представлены делящимся изотопом  $^{239}\text{Pu}$ ;
- ядерное топливо, в том числе и облученное, является свежим (без учета выгорания и накопления продуктов деления, поглощающих нейтроны).

Используемый подход позволяет распространить полученные ограничения на новые ТВС и твэлы без проведения дополнительного анализа.

► **Ключевые слова:** ядерная безопасность, анализ, эффективный коэффициент размножения нейтронов, программа MCU-RFFI/A, программа MCU-FR, тепловыделяющая сборка, тепловыделяющий элемент, система, консервативный подход.

\* 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.

## SPECIFIC ASPECTS OF NUCLEAR SAFETY ANALYSIS WHEN HANDLING EXPERIMENTAL FUEL RODS AND FUEL ASSEMBLIES

Samokhvalov R. V.\*,  
Akimov A. V.\*,\*\*,  
Latyshev E. N.\*,  
Malkov A. P.\*,\*\*, D. Sc.,  
Fraaz E. S.\*,  
Shakurova A. I.\*

The article was received by the editors' crew on April 13<sup>th</sup>, 2026.

### *Abstract*

*This paper describes methodical specifics of nuclear safety analysis for handling (storage, transportation, and positioning during examination) of experimental fuel rods and fuel assemblies (FAs) from various reactors.*

*Examples of analysis of ensuring nuclear safety requirements for individual products (FAs, fuel rod assemblies) and joint systems formed during research work using the results of calculations of the effective neutron multiplication factor in the MCU family of programs are presented.*

*It has been demonstrated that it is possible to reduce labor costs when performing computational nuclear safety analysis, without losing the level of conservatism in setting limits for nuclear safety parameters for the whole variety of fuel assemblies and fuel rods that are transported for post-irradiation examinations.*

*Conservative assumptions were used in the computational analysis, which obviously lead to overestimated values of the effective neutron multiplication factor for the systems under consideration. Specifically, the following assumptions were made:*

- *the computational models do not contain neutron-absorbing structural materials;*
- *all plutonium isotopes are the fissile isotope  $^{239}\text{Pu}$ ;*
- *and the nuclear fuel, including irradiated fuel, is fresh (excluding burnup and the accumulation of neutron-absorbing fission products).*

*The approach used allows established limiting parameters to be applied to new FAs and fuel rods without the need for additional analysis.*

► **Keywords:** *nuclear safety, analysis, neutron multiplication factor, MCU-RFFI/A code, MCU-FR code, fuel assembly, fuel rod, system, conservative approach.*

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

\*\* Dimitrovgrad Engineering and Technical Institute, branch of the Federal Autonomous Higher Vocational Educational Institution “National Research Nuclear University “MEPhI”, Dimitrovgrad, Russia.

## Введение

В специализированных научно-производственных организациях (в частности – АО «ГНЦ НИИАР») проводят исследовательские работы с различными облученными и необлученными твэлами и тепловыделяющими сборками (ТВС) ядерных реакторов. Для каждого этапа исследований необходим анализ ядерной безопасности (ЯБ), особенности которого состоят в наличии широкой номенклатуры твэлов и ТВС, поступающих на исследования. Основным критерием обеспечения требований ЯБ является не превышение эффективным коэффициентом размножения нейтронов ( $K_{эфф}$ ) допустимой величины в нормальных условиях хранения и при нарушениях нормальных условий [1, 2]. В качестве обязательных для анализа аварийных ситуаций рассматриваются:

- смещение изделий (ТВС, упаковки с твэлами) со своих штатных позиций;
- затопление водой или иным замедлителем нейтронов различной плотности мест, где проводятся исследовательские работы;
- ошибки персонала с размещением дополнительного изделия в местах временного хранения (стеллаж, приемный колодец, столешница);
- превышение нормы загрузки ядерных делящихся материалов (ЯДМ) в упаковку (например, в кассу с твэлами).

В статье на конкретных примерах показаны особенности анализа ЯБ при обращении с экспериментальными твэлами и ТВС в ходе выполнения исследовательских работ. Представлены методические приемы для определения консервативных по параметрам ЯБ твэлов и ТВС различных типов.

Для иллюстрации применяемых подходов к анализу ЯБ приведены результаты расчетов значений  $K_{эфф}$ , полученные с использованием аттестованных программ серии MCU [3], в частности MCU RFFI/A и MCU-FR. В коде программ реализован алгоритм решения уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло на основе большого количества статистически независимых серий вычислений для систем с произвольной трехмерной геометрией. При проведении анализа ЯБ учитывалась методическая погрешность, определенная аттестационными паспортами программ. В процессе обоснования ЯБ применяли консервативный подход [2] (п. 2.2). Анализ выполнен в соответствии с требованиями государственных и отраслевых нормативных документов по ЯБ [1, 2, 4, 5].

## Определение параметров консервативной тепловыделяющей сборки

На исследования поступают ТВС различных типов и модификаций для реакторных установок с БН, ВВЭР, РБМК, исследовательских и транспортных реакторов. В соответствии с нормативными документами по ЯБ при обращении с ТВС необходимо провести анализ и обоснование ЯБ. В рамках исследовательских программ для существующих реакторов проектируют экспериментальные ТВС с материальным составом, заметно отличающимся от штатных изделий. Данные параметры могут охватывать как топливо (обогащение, тип), так и геометрию (количество и размеры твэлов, шаг их расположения в чехле) ТВС. В связи с этим для каждого нового варианта ТВС требуется выполнять повторный анализ ЯБ всех этапов обращения с ним в ходе исследовательских работ. Для большей рациональности, чтобы уменьшить трудозатраты, было предложено ввести консервативный тип ТВС соответствующего типа реактора, параметры которого по составу топлива и геометрии охватывают все ранее поступавшие на исследования ТВС и предполагаемые будущие разработки. В данной статье были рассмотрены подходы, позволяющие установить параметры консервативной ТВС на примере ТВС реакторной установки (РУ) с БН. Удельная плотность ЯДМ в твэлах реакторов этого типа, как правило, более высокая, по сравнению с твэлами реакторов на тепловых нейтронах.

Для выбора характеристик консервативной ТВС РУ БН требуется проанализировать все поступавшие ранее на исследования варианты экспериментальных и штатных ТВС РУ с БН (БН-350, БН-600, БН-800, БН-1200). Одной из основных характеристик ТВС, влияющих на ЯБ, является масса делящихся нуклидов ( $^{235}\text{U}+\text{Pu}$ ), приходящаяся на один твэл. Исходя из анализа представленных ТВС, выбирается наибольшая масса делящихся нуклидов. Для дальнейших расчетов данный параметр следует взять с запасом, поскольку в будущем не исключена вероятность поступления ТВС, твэлы которых содержат массу ядерных делящихся нуклидов (ЯДН), превышающую ранее рассмотренные варианты. Важно учитывать, что значения  $K_{эфф}$  для одиночной и двух ТВС с выбранной массой, а также для систем, моделирующих временное хранение данных изделий (например, на стеллаже) не должны превышать допустимую величину.

В конкретном рассмотренном случае массу ЯДН на один твэл увеличили не более чем на 15 % от максимального значения, установленного в ходе анализа перечня ТВС РУ БН, что представляется достаточным с учетом физических характеристик данного типа реакторов.

Далее требуется определить типы топлива, которые будут задаваться в твэлах консервативной ТВС РУ БН. Анализируя топливные композиции (оксиды (нитриды) урана и плутония, их смеси в различном массовом соотношении, металлический уран), а также исходя из многолетнего опыта проведения расчетов в области ЯБ, было принято решение осуществлять дальнейший анализ с твэлами, топливо которых представлено оксидом плутония, оксидом урана, а также металлическим ураном. Данные типы топлива являются консервативной оценкой всех топливных композиций, применяемых в твэлах РУ БН. Чтобы не накладывать ограничения на обогащение урана по  $^{235}\text{U}$  в консервативной ТВС РУ БН, в расчетах предполагали, что данная величина составляет 100 %.

Чтобы определить геометрические параметры консервативной ТВС, при которых достигаются наибольшие значения  $K_{эфф}$ , нужно выполнить расчеты одиночной ТВС в зависимости от шага между твэлами, длины твэлов, а также диаметра и числа твэлов в ТВС для различных типов ЯДМ. Габаритный размер «под ключ» шестигранного кожуха ТВС, в котором располагаются твэлы, задавали постоянным, а его толщину минимальной, чтобы уменьшить влияние стальных элементов на  $K_{эфф}$ . В соответствии с методическим подходом, расчетный анализ одиночной консервативной ТВС РУ БН следует проводить для случая, когда внутри и вне ТВС задана вода максимальной плотности – 1,0 г/см<sup>3</sup>, а внутри твэлов – ЯДМ без содержания воды (в предположении, что герметичность оболочки не нарушена), равномерно распределенный по всему внутреннему объему.

Необходимо учитывать возможность поступления на исследования ТВС с различной толщиной дистанционирующей проволоки вокруг твэлов и их количеством в чехле. Для этого следует выполнить расчет ТВС в зависимости от шага между различным количеством твэлов, расположенных внутри чехла. Для расчетной модели выбираются минимальные габаритный диаметр и толщина оболочки твэла исходя из рассмотренного перечня, а их число не превышает максимально возможного (для ТВС РУ БН не более 127 штук). В качестве иллюстрации, на рис. 1 а) приведены результаты расчетов

$K_{эфф}$  в зависимости от шага между твэлами в водяной среде (моделирование аварийной ситуации) для твэлов с ЯДМ в виде  $\text{PuO}_2$ , а также поперечное сечение расчетной модели одного из вариантов ТВС на рис. 1 б). Для остальных выбранных типов ЯДМ ( $\text{UO}_2$ ,  $\text{U}_{мет}$ ) должны быть проведены аналогичные расчеты.

На представленном графике (рис. 1 а) наблюдается монотонное увеличение значений  $K_{эфф}$  с увеличением шага между твэлами в ТВС. Во всех случаях для различного количества твэлов в рассматриваемой консервативной ТВС наибольшие значения достигаются при максимально возможном шаге между 127 твэлами, который ограничивается габаритными размерами чехла в поперечном сечении. Тип топлива в твэлах, для которого достигаются наибольшие значения  $K_{эфф}$ , в рассмотренном случае –  $\text{PuO}_2$ . Исходя из полученных результатов, дальнейшие расчеты по определению параметров консервативной ТВС должны проводиться для случая размещения твэлов внутри чехла с максимально возможным шагом. При этом в данной конфигурации крайние твэлы внутри чехла ТВС соприкасаются с его внутренней поверхностью (рис. 1 б).

ТВС РУ БН, поступающие на исследования, могут иметь различную длину твэлов. Поскольку данный параметр оказывает влияние на нейтронно-физические характеристики, то требуется определение зависимости  $K_{эфф}$  от его величины (рис. 2). Расчеты должны охватывать весь диапазон изменения рассматриваемого параметра, значения которого задаются исходя из проанализированного перечня ТВС. В расчетах консервативно не требуется учитывать газовую полость, стальные концевики, заглушки и хвостовики твэлов. Наибольшую длину твэлов для расчетов определяют как сумму длин топливной части и торцевых экранов, так как только в них присутствуют ЯДМ. Наименьшая длина подбирается таким образом, чтобы в объеме твэла находился ЯДМ заданной массы с максимально возможной (теоретической) плотностью.

Исходя из результатов расчета  $K_{эфф}$  в зависимости от длины твэлов было определено, что наибольшие значения  $K_{эфф}$  достигаются при минимальной длине твэлов для всех типов топлива. Дальнейшее увеличение длины твэлов приводит к уменьшению  $K_{эфф}$ , что связано с уменьшением плотности топлива в объеме твэлов.

На исследования в АО «ГНЦ НИИАР» периодически поступают ТВС РУ БН, имеющие различные диаметры твэлов и их количество внутри чехла. Число твэлов в ТВС может уменьшиться за счет

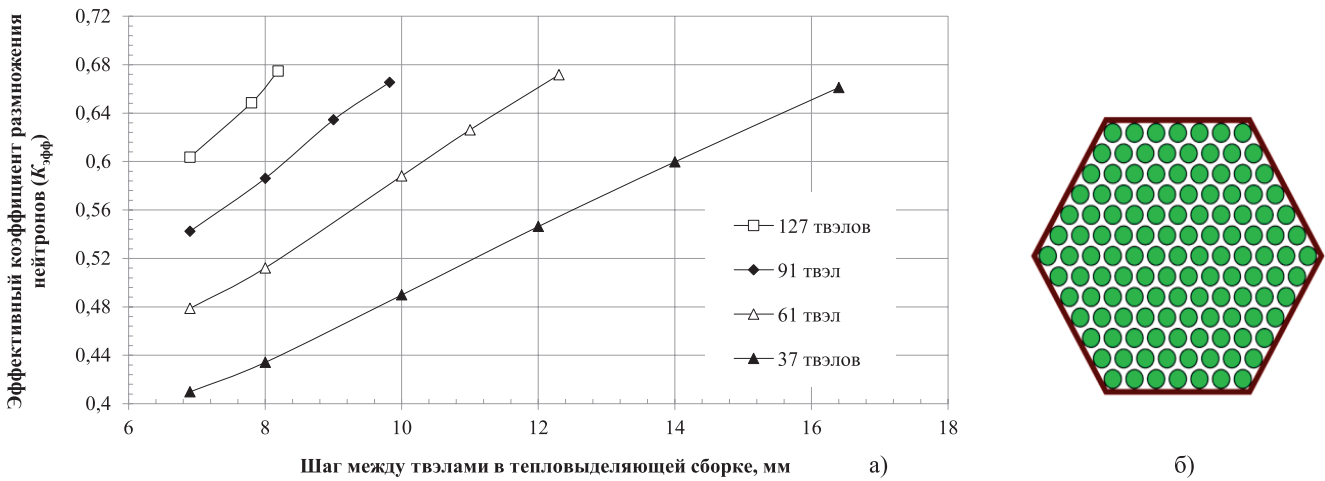


Рис. 1. Зависимость  $K_{эфф}$  от шага расположения твэлов внутри консервативной тепловыделяющей сборки реакторной установки БН для различного количества твэлов с  $PuO_2$  внутри чехла (тепловыделяющая сборка расположена в воде и заполнена водой плотностью  $1,0 \text{ г/см}^3$ ) (а); поперечное сечение расчетной модели тепловыделяющей сборки (б)  
 [Fig. 1.  $K_{эфф}$  in relation to the spacing of fuel rods within the conservative fuel assembly from the BN reactor for different numbers of fuel elements with  $PuO_2$  inside the case (the fuel assembly is placed in water and filled with water at a density of  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ) (a); the cross-sectional area of the computational model for fuel assembly (b)]

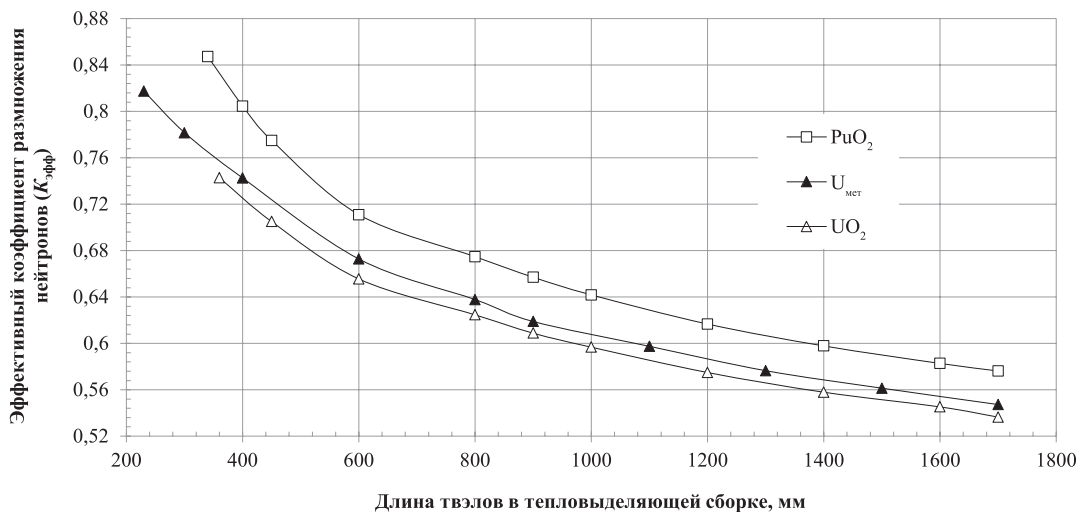


Рис. 2. Зависимость  $K_{эфф}$  от длины твэлов внутри консервативной тепловыделяющей сборки реакторной установки БН для различных типов топлива (тепловыделяющая сборка расположена в воде и заполнена водой плотностью  $1,0 \text{ г/см}^3$ ) [Fig. 2.  $K_{эфф}$  in relation to the length of fuel rods inside the conservative fuel assembly from the BN reactor for various types of nuclear fuel (the fuel assembly is in water and filled with water with a density of  $1.0 \text{ g/cm}^3$ )]

увеличенного диаметра (внутри чехла помещается меньше твэлов) или вследствие замены твэла вытеснителем, не содержащим ЯДМ. Чтобы это учесть, требуется выполнить расчеты в зависимости от диаметра твэлов и определить его влияние на величину  $K_{эфф}$ . Минимальное и максимальное значения диаметра твэла нужно задавать исходя из проанализированного перечня ТВС РУ БН. В ходе выполнения расчетов при увеличении диаметра твэлов параллельно уменьшают их количество в чехле. Расчетный анализ показал аналогичную тенденцию изменения величины  $K_{эфф}$ , что и при увеличении длины твэлов консервативной ТВС (рис. 2) –

чем ниже плотность ЯДМ (за счет увеличения диаметра), тем ниже значения  $K_{эфф}$ .

После определения параметров ТВС, исходя из требований нормативных документов по ЯБ, выполняются расчеты одиночного и двух изделий вплотную друг к другу для различной комбинации среды (воздух, вода плотностью  $1,0 \text{ г/см}^3$ ) внутри и вне изделий. Расчетный анализ системы, состоящей из двух консервативных ТВС РУ БН с рассматриваемыми параметрами, выявил превышение значениями  $K_{эфф}$  допустимой величины  $0,95$  [1]. Исходя из этого, требуются уточняющие расчеты ТВС в системе, состоящей из двух штук, для определения

ограничений на геометрические параметры (минимальные длина и диаметр твэлов).

Реализация этапов методического подхода к определению характеристик консервативной ТВС показала, что при увеличении длины и диаметра твэлов в ТВС значения  $K_{эфф}$  уменьшаются, следовательно, ограничения на максимальную длину и диаметр твэлов не требуются. Однако для твэлов в ТВС могут устанавливаться ограничения на минимальные значения данных параметров, поскольку при максимальной плотности топлива в твэлах достигаются наибольшие значения  $K_{эфф}$ .

Таким образом, были определены параметры расчетной модели консервативной ТВС РУ БН (масса ЯДН, обогащение, а также длина и диаметр твэла). Под данные ограничения подпадают любые типы ТВС РУ БН, параметры которых не выходят за рамки установленных значений для консервативного варианта. Подходы, продемонстрированные в ходе анализа ЯБ ТВС РУ БН, применимы для определения параметров консервативной ТВС любых других типов реакторов: ВВЭР, БОР-60, РБМК, а также новых проектируемых РУ.

### Определение параметров консервативного твэла при размещении в кассах

Для определения изменения характеристик ядерного топлива в процессе облучения проводят исследования с отдельно взятыми твэлами, которые могут быть извлечены из ТВС, облучательного устройства или доставлены в упаковках. Для их временного хранения используют кассы, оснащенные решеткой для обеспечения постоянной геометрии расположения в объеме кассы или без решетки (рис. 3). Исходя из того, что в АО «ГНЦ НИИАР» поступает большое количество твэлов с разнообразными характеристиками, и все они могут быть помещены в кассу, для удобства расчетов устанавливают единый консервативный вариант твэла с заведомо завышенными характеристиками.

Существуют самые различные кассы для размещения твэлов. Они отличаются габаритными размерами, формой, а также количеством и диаметром ячеек дистанционирующей решетки. На примере размещения твэлов внутри касс, выбранных из широкого перечня, были продемонстрированы подходы к определению параметров консервативного твэла. Рассматриваемые кассы имеют идентичные габаритные размеры. Внутренний диаметр отверстий для твэлов в кассе с решеткой составляет 10 мм.

Методика расчетов по определению параметров консервативных твэлов, размещаемых в кассах, во многом схожа с той, что была применена для консервативной ТВС РУ БН. Основное отличие – это более широкое разнообразие твэлов, которое, помимо твэлов РУ БН, включает в себя и твэлы других РУ: ВВЭР, РБМК и пр. Из анализа характеристик твэлов определяется наибольшая масса ЯДН на твэл, которую для расчетов нужно брать с некоторым запасом на случай поступления твэлов с более высокими массовыми характеристиками. Запас на массу ЯДН твэлов, размещаемых в кассах, подбирается аналогичным образом, как и для твэлов РУ БН – с расчетом на то, чтобы значения  $K_{эфф}$  не превышали допустимых величин. В рамках работы, результаты которой приведены в данной статье, запас составил не более 10 % от максимальной массы ЯДН на твэл из всей выборки.

Рассмотрим определение параметров консервативного твэла при размещении в кассе с дистанционирующей решеткой (рис. 3 а). За счет наличия решетки, геометрия расположения твэлов внутри кассы постоянна, следовательно, в расчетах зависимости  $K_{эфф}$  от шага между твэлами нет необходимости. Для кассы с решеткой расчетный анализ следует начинать с установления зависимости  $K_{эфф}$  от диаметра твэлов (рис. 4). Диаметр твэлов изменяют от минимально возможного значения, соответствующего случаю, когда плотность ЯДМ выбранной массы имеет теоретическое значение, до величины диаметра ячейки кассы.

Для системы, моделирующей размещение твэлов в кассе с решеткой, максимальное значение  $K_{эфф}$  достигается не при минимальном диаметре, а в случае его промежуточного значения (рис. 4). Такая тенденция связана с геометрией расположения твэлов в кассе и изменением количества замедлителя между ними в ходе увеличения диаметра.

Завершающим этапом определения параметров консервативного твэла является расчетный анализ в зависимости от его длины, минимальное значение которого задается исходя из теоретической плотности ЯДМ.

Подход к определению параметров консервативного твэла при размещении в кассе без дистанционирующей решетки (рис. 3 б) должен включать в себя дополнительные расчеты в зависимости от количества твэлов внутри кассы (рис. 5). Это связано с тем, что при размещении и заполнении кассы замедлителем нейтронов (водой) максимальное значение  $K_{эфф}$  может достигаться при частичной загрузке кассы [6]. Твэлы в объеме упаковки

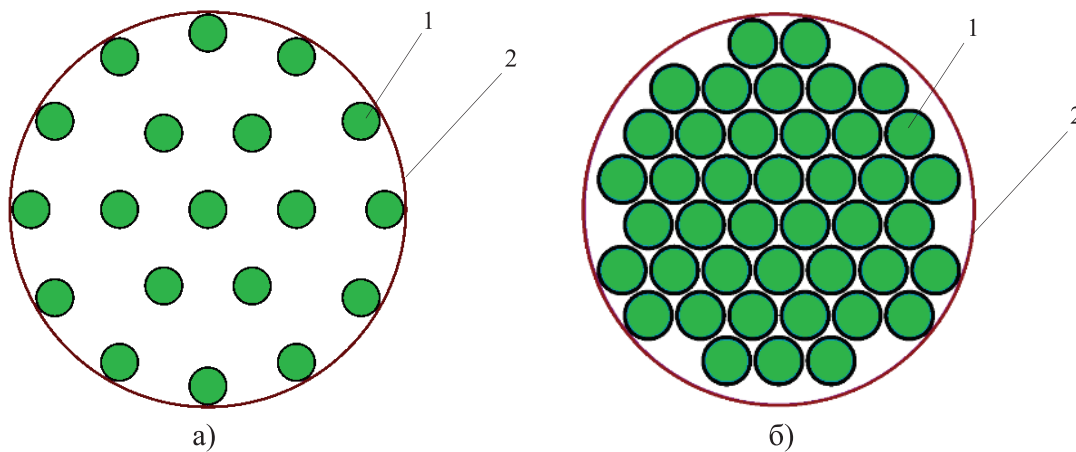


Рис. 3. Поперечное сечение расчетной модели кассы с решеткой (а) и без решетки (б):  
1 – твэл; 2 – корпус кассы

[Fig. 3. Cross section of the computational model of a storage canister with (a) and without a grid (b):  
1 – fuel rod; 2 – storage canister]

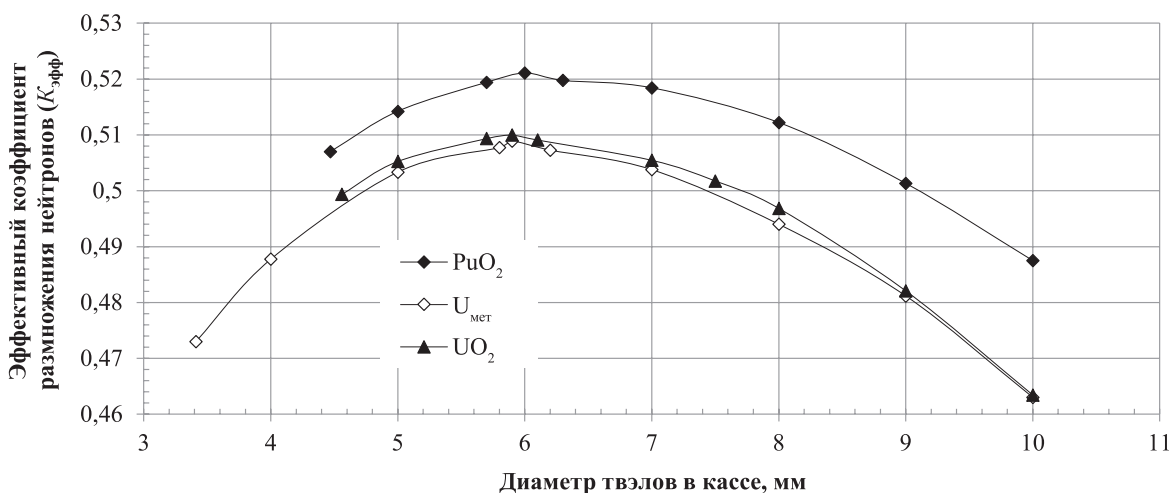


Рис. 4. Зависимость  $K_{эфф}$  для кассы с решеткой от диаметра твэлов для различного типа топлива внутри твэлов (касса расположена в воде и заполнена водой плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup>)

[Fig. 4.  $K_{эфф}$  for the storage canister with a grid in relation to the diameter of fuel rods for various types of nuclear fuel inside the fuel rod (the storage canister is in water and filled with water at a density of 1.0 g/cm<sup>3</sup>)]

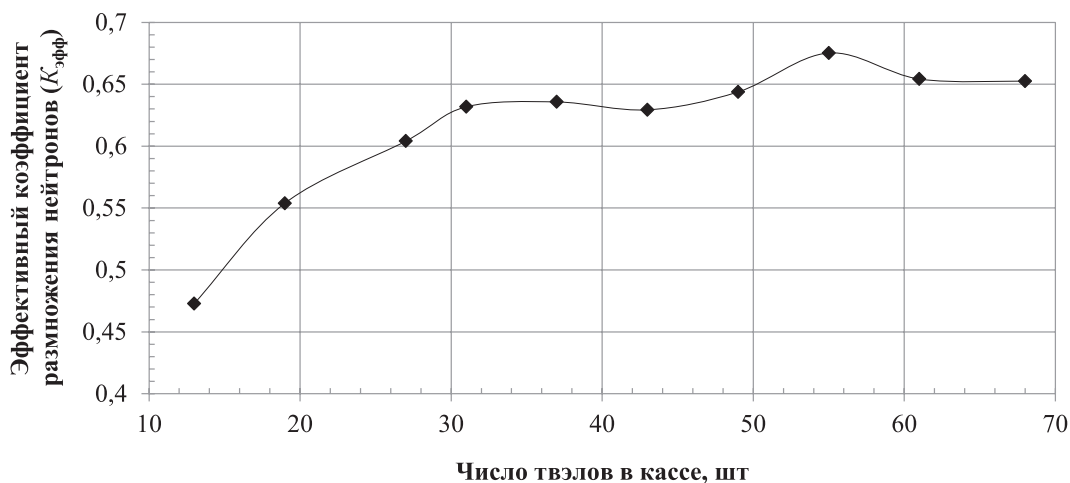


Рис. 5. Зависимость  $K_{эфф}$  для кассы без решетки от числа твэлов в объеме кассы (касса расположена в воде и заполнена водой плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup>)

[Fig. 5.  $K_{эфф}$  for the storage canister without a grid in relation to the number of fuel rods in the storage canister (the storage canister is in water and filled with water at a density of 1.0 g/cm<sup>3</sup>)]

должны располагаться наиболее консервативным образом – в узлах треугольной решетки с максимальным шагом, ограничивающимся ее внутренними размерами. Такой подход учитывает изменение геометрии расположения и смещение твэлов внутри кассы во время ее загрузки, опорожнения или транспортирования.

При выполнении опытных и исследовательских работ ТВС могут подвергаться разборке на твэлы с дальнейшей загрузкой в кассы. Общее количество извлеченных твэлов не всегда помещается в одну или две кассы. Поэтому в обосновании ЯБ необходимо учитывать возможность совместного размещения нескольких заполненных касс (рис. 6 а) в наиболее консервативной геометрии. Для таких систем выполняются расчеты от шага расположения изделий. Максимальные значения  $K_{эфф}$  при этом могут достигаться в случае, когда изделия располагаются с определенным шагом (рис. 6 б).

Если результаты расчетного анализа совместной системы показывают превышение допустимой величины  $K_{эфф}$ , то устанавливаются ограничения на количество одновременно используемых в работе касс, их загрузку твэлами или на минимально допустимое расстояние между ними.

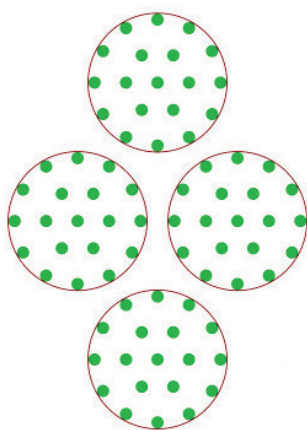
Таким образом, были продемонстрированы подходы, позволяющие определить параметры консервативного твэла. Использование в дальнейшем такой расчетной модели существенно ускоряет обоснование ЯБ при обращении с любыми кассами. Единственное, что для них потребуется – это уточнение допустимого количества твэлов, обеспечивающее

соблюдение требований нормативных документов в области ЯБ.

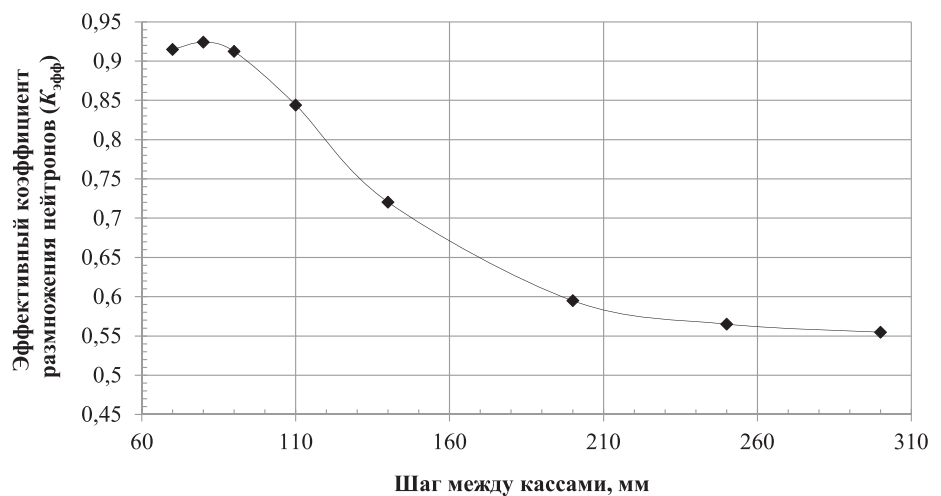
### Методический подход к анализу ядерной безопасности совместных систем с ядерными делящимися материалами в ходе выполнения исследовательских работ

Исследовательские работы с облученными твэлами и ТВС осуществляются в радиационно-защитных камерах, имеющих, как правило, небольшие размеры. Внутри таких камер все оборудование располагается компактно, вследствие этого отдельные единицы оборудования, изделия с ЯДМ и упаковки образуют системы, зависимые по нейтронному взаимодействию. К таким системам можно отнести расположение изделий с ЯДМ на столешнице камеры рядом с изделиями в местах временного хранения (этажерки, стеллажи) или в установках. Следовательно, при проведении анализа ЯБ необходимо рассматривать возможные комбинации различных единиц оборудования и упаковок.

В качестве иллюстрации приведен анализ ЯБ системы (рис. 7), моделирующей размещение упаковок на столешнице совместно с изделиями в приемном колодце, через который они поступают внутрь камеры. Следует рассматривать консервативную расчетную модель, подразумевающую размещение в камере наибольшего количества изделий с ЯДМ (исходя из технологического процесса, размеров камеры или установленных ранее ограничений по ЯБ).



а)



б)

Рис. 6. Поперечное сечение расчетной модели системы из четырех касс (а) и зависимость  $K_{эфф}$  от шага расположения касс (кассы расположены в воде и заполнены водой плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup>) (б)

[Fig. 6. Cross-section of the computational model of a system with four storage canisters (a) and  $K_{эфф}$  in relation to the spacing of the storage canisters (storage canisters are in water and filled with water at a density of 1.0 g/cm<sup>3</sup>) (b)]

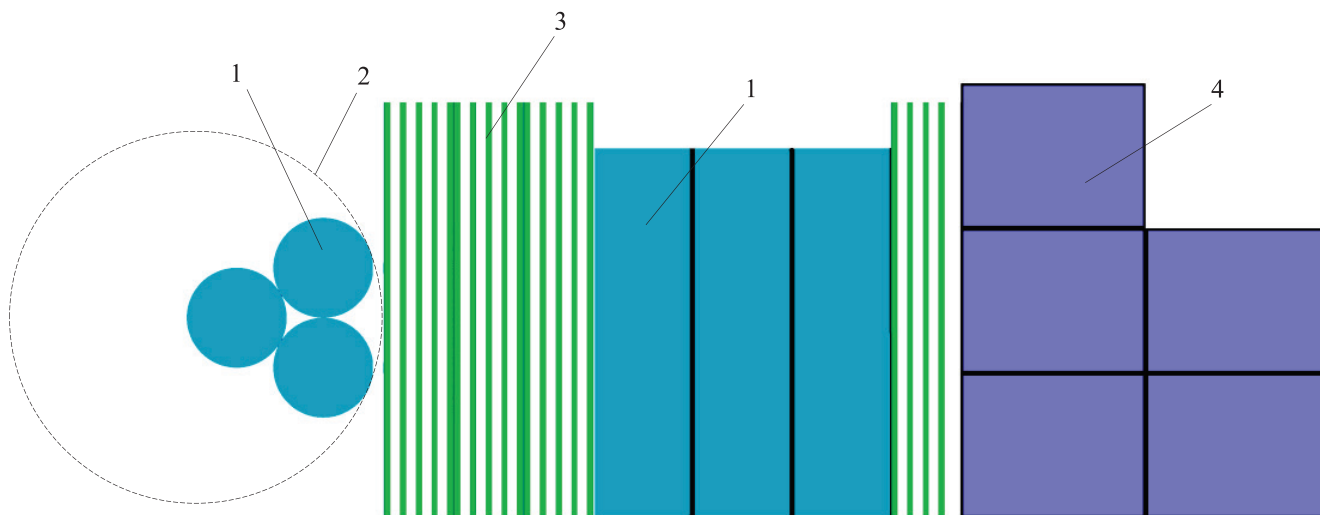


Рис. 7. Вид сверху на расчетную модель системы, моделирующей расположение касс с решеткой, контейнеров с отходами и консервативных касс на столешнице радиационно-защитной камеры вплотную к приемному колодцу: 1 – консервативная касса; 2 – приемный колодец; 3 – касса с решеткой; 4 – контейнер с отходами  
 [Fig. 7. Top view of the computational model of the system simulating the arrangement of storage canisters with a grid, waste storage casks, and conservative storage canisters on the bed plate of a hot cell near a receiving well: 1 – conservative storage canister; 2 – receiving well; 3 – storage canister with grid; 4 – waste storage cask]

Все изделия на столешнице должны располагаться горизонтально в один слой по высоте вплотную друг к другу, а изделия в колодце – вертикально в узлах треугольной решетки. В соответствии с методическим подходом расчеты совместных систем следует проводить для нормальных условий (везде воздушная среда), а также для ситуации, когда внутри и вне изделий с ЯДМ задана вода плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup>. Также в некоторых случаях, если для отдельной единицы оборудования или места хранения расчеты показали достижение максимального значения  $K_{эфф}$  при промежуточной плотности замедлителя нейтронов (ядерной концентрации водорода) [6], нужно выполнять расчет совместной системы и для данного значения плотности замедлителя.

Возможна ситуация, когда при совместном размещении изделий с ЯДМ в камере значения  $K_{эфф}$  превышают допустимую величину. Для обеспечения ЯБ в таких ситуациях дополнительно устанавливаются ограничения, предотвращающие превышение допустимой величины  $K_{эфф}$ . Одним из вариантов является минимально допустимое расстояние между системами с ЯДМ, при котором  $K_{эфф}$  не превышает допустимых значений. На практике данное ограничение может быть реализовано при помощи специальных дистанционирующих устройств (в конструкции камеры или упаковок), предотвращающих сближение систем с ЯДМ в ходе выполнения работ.

### Заключение

В статье представлены особенности анализа обеспечения требований ЯБ при обращении с твэлами и ТВС в ходе выполнения опытных и исследовательских работ. Описана и показана на различных примерах последовательность определения параметров консервативных по параметрам ЯБ ТВС или твэлов. Для визуализации каждый из этапов анализа проиллюстрирован результатами нейтронно-физических расчетов.

Определение и обоснование консервативного варианта твэла или ТВС позволяет установить ограничения по параметрам ЯБ (геометрии твэла, массе делящихся нуклидов и обогащению по <sup>235</sup>U) для широкой номенклатуры исследуемых изделий. Обоснованные ограничения по параметрам ЯБ охватывают широкий круг твэлов и ТВС, материальные и массогабаритные характеристики которых находятся в рамках значений, установленных для консервативных моделей. Такой подход имеет практическую значимость в плане оптимизации расчетных исследований при обосновании ЯБ новых типов ТВС и твэлов.

Выполнение рассмотренных в статье этапов анализа при обосновании ЯБ обеспечивает соблюдение требований нормативных документов по ЯБ как в условиях нормальной эксплуатации, так и при постулируемых аварийных ситуациях.

## 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. 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.
3. Перечень действующих аттестационных паспортов программ для ЭВМ [Электронный ресурс]. – URL: <https://gclnk.com/vtXPL7Yf> (дата обращения: 13.04.2026).
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 12001-2024. Основные правила ядерной безопасности при производстве, использовании, переработке, хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-00-2024). – М.: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 2024. – 33 с.
6. 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.

## References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii "Pravila bezopasnosti pri hranenii i transportirovaniy yadernogo topliva na ob'ektah ispol'zovaniya atomnoj ehnergii" (NP-061-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Safety rules for storage and transportation of nuclear fuel at nuclear facilities" (NP-061-05)]. 2005.
2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii "Pravila yadernoj bezopasnosti dlya ob'ektov yadernogo toplivnogo cikla" (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)]. 2005.
3. Perechen' dejstvuyushchih attestacionnyh pasportov programm dlya EHVM [List of valid electronic certificates of application software]. URL: <https://gclnk.com/vtXPL7Yf> (reference date: 13.04.2026).
4. STO 95 12002-2016 "Pravila yadernoj bezopasnosti pri hranenii i transportirovaniy yadernyh delyashchihsya materialov (PBYa-06-09-2016)" [STO 95-12002-2016 "Nuclear Safety Rules for Storage and Transportation of Nuclear Fissile Materials (PBYa-06-09-2016)"]. 2016.
5. STO 95 12001-2024 "Osnovnye pravila yadernoj bezopasnosti pri proizvodstve, ispol'zovanii, pererabotke, hranenii i transportirovaniy yadernyh delyashchihsya materialov (PBYa-06-00-2024)" [STO-95 12001-24 "Basic Rules for Nuclear Safety in the Production, Use, Processing, Storage, and Transportation of Fissile Materials (PBYa-06-00-2024)"]. 2024.
6. Akimov A. V., Malkov A. P., Samokhvalov R. V., Fraaz E. S. (2024). Metodicheskie osobennosti provedeniya analiza yadernoj bezopasnosti pri hranenii neobluchennyh yadernyh delyashchihsya materialov [Methodical specifics of nuclear safety analysis in storage of non-irradiated nuclear fissile materials]. Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 1 (111), pp. 5–16. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.111.1.001.

## Сведения об авторах

*Самохвалов Роберт Владимирович*, научный сотрудник, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9).

*Акимов Александр Викторович*, 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).

*Латышев Евгений Николаевич*, начальник лаборатории, 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 ш., 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).

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

*Шакурова Аделя Ильдусовна*, младший научный сотрудник, АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное ш., д. 9).

### Authors credentials

*Samokhvalov Robert Vladimirovich*, Researcher, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Nuclear Reactors” (9, Zapadnoye hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: samokhvalov-94@mail.ru.

*Akimov Alexander Viktorovich*, Researcher, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Nuclear Reactors” (9, Zapadnoye hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510); Postgraduate Student, Dimitrovgrad Engineering and Technical Institute, branch of the Federal Autonomous Higher Vocational Educational Institution “National Research Nuclear University “MEPhI” (294, Kuibishev str., Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511), e-mail: Aleksandr\_ak93@mail.ru.

*Latyshev Evgeniy Nikolaevich*, Head of Laboratory, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Nuclear Reactors” (9, Zapadnoye hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: Latysheven@mail.ru.

*Malkov Andrey Pavlovich*, Head of the Nuclear Safety Department, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Nuclear Reactors” (9, Zapadnoye hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510); Professor, Dimitrovgrad Engineering and Technical Institute, branch of the Federal Autonomous Higher Vocational Educational Institution “National Research Nuclear University “MEPhI” (294, Kuibishev str., Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511), e-mail: malkovap@mail.ru.

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

*Shakurova Adela Ildusovna*, Junior Researcher, Joint-Stock Company “State Scientific Center – Research Institute of Nuclear Reactors” (9, Zapadnoye hw, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433510), e-mail: mubinova99@mail.ru.

### Для цитирования

*Самохвалов Р. В., Акимов А. В., Латышев Е. Н., Малков А. П., Фрааз Е. С., Шакурова А. И.* Особенности анализа ядерной безопасности при обращении с экспериментальными твэлами и тепловыделяющими сборками // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 2 (120). С. 5–15. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.120.2.001.

### For citation

*Samokhvalov R. V., Akimov A. V., Latyshev E. N., Malkov A. P., Fraaz E. S., Shakurova A. I.* (2026). Osobennosti analiza yadernoi bezopasnosti pri obrashchenii s ehksperimental'nymi tvehlami i teplovydelyayushchimi sborkami [Specific aspects of nuclear safety analysis when handling experimental fuel rods and fuel assemblies]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2 (120), pp. 5–15. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.120.2.001.