

В. И. Борисенко^{1,2}, В. В. Горанчук¹,
Ю. Ф. Пионтковский², Н. Н. Сапон²

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Киев

² Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченко, г. Киев

Выбор консервативных допущений при обосновании ядерной безопасности систем хранения отработанного ядерного топлива

Представлены описание расчетной модели системы хранения отработанных тепловыделяющих сборок в кодах SCALE и MCNP, а также процедура и результаты выбора консервативных допущений, принятых для обоснования ядерной безопасности технологических операций по перемещению, перевозке и хранению отработанного ядерного топлива (ОЯТ) реакторов ВВЭР-1000 в проектируемом централизованном хранилище ОЯТ. При обосновании ядерной безопасности необходимо подтвердить, что максимальное значение эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ в системах хранения ОЯТ меньше установленного нормативного предела 0,95 в условиях нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и при проектных авариях. Приведены результаты расчетов и их анализ по выбору наиболее консервативных условий размножения, приводящих к наибольшему значению $K_{эфф}$.

Ключевые слова: ядерная безопасность, эффективный коэффициент размножения, отработанное ядерное топливо, корзина хранения отработанного ядерного топлива, твэл, тепловыделяющая сборка, ВВЭР-1000.

В. І. Борисенко, В. В. Горанчук, Ю. Ф. Піонтковський, М. М. Сапон

Вибір консервативних припущень в обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива

Наведено описання розрахункової моделі системи зберігання відпрацьованих тепловидільних збірок у кодах SCALE та MCNP, а також процедура та результати вибору консервативних припущень в обґрунтуванні ядерної безпеки технологічних операцій з переміщення, перевезення та зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) реакторів ВВЕР-1000 в проектуваному централізованому сховищі ВЯП. Для обґрунтування ядерної безпеки треба підтвердити, що ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів $K_{эфф}$ в системі зберігання ВЯП менше встановленої нормативної межі 0,95 в умовах нормальної експлуатації, порушення нормальної експлуатації та проектних аварій. Представлено результати розрахунків та їх аналізу щодо вибору найбільш консервативних умов розмноження, що призводять до найбільшого значення $K_{эфф}$.

Ключові слова: ядерна безпека, ефективний коефіцієнт розмноження, відпрацьоване ядерне паливо, корзина зберігання відпрацьованого ядерного палива, твєл, тепловидільна збірка, ВВЕР-1000.

© В. И. Борисенко, В. В. Горанчук, Ю. Ф. Пионтковский, Н. Н. Сапон, 2017

Выполнение технологических операций с отработанными тепловыделяющими сборками (ОТВС) реакторов ВВЭР-1000 (ВВЭР-440) на разных этапах обращения с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) в проектируемом централизованном хранилище ОЯТ (ЦХОЯТ) предусматривает применение контейнеров различного назначения: перегрузочных, транспортных и контейнеров хранения.

Основным элементом системы хранения являются модификации многоцелевого контейнера (МЦК, корзина хранения), который применяется во всех вышеперечисленных контейнерах: перегрузочных, транспортных и контейнерах хранения, а также для хранения ОТВС:

МЦК-31 — с 31 ячейкой хранения для ОТВС ВВЭР-1000 с максимальным обогащением по ^{235}U 4,45 %;

МЦК-85 — с 85 ячейками хранения для ОТВС ВВЭР-440 с максимальным обогащением по ^{235}U 4,65 %.

Задача обоснования безопасности технологических операций по перемещению, перевозке и хранению отработанного ядерного топлива в ЦХОЯТ многогранна, она состоит из многих подзадач, среди которых анализ прочности, анализ теплового состояния, анализ радиационной безопасности, анализ ядерной безопасности.

Цель статьи — рассмотреть выбор консервативных допущений в анализе *ядерной безопасности*, в котором необходимо подтвердить выполнение требований документов [1, 2, 3] по обеспечению подкритичности ОЯТ при его нахождении в транспортном и перегрузочном контейнерах, а также в контейнере хранения.

В статье представлены результаты выбора консервативных допущений в анализе ядерной безопасности ОТВС ВВЭР-1000 (МЦК-31), для которых по сравнению с ОТВС ВВЭР-440 (МЦК-85) достигаются наибольшие значения эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$. Выбор консервативных допущений в анализе ядерной безопасности ОТВС реакторов ВВЭР-440 (МЦК-85) выполнялся по аналогичной процедуре.

Для обоснования ядерной безопасности выбрана наиболее консервативная модель анализа ядерной безопасности систем хранения размножающей системы МЦК-ОТВС. Необходимо доказать, что даже при загрузке в многоцелевой контейнер ОТВС с наиболее возможными размножающими свойствами, приводящими к наиболее возможному значению эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ (например, принята ошибочная загрузка свежих ТВС максимального обогащения по ^{235}U), в условиях нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и при проектных авариях значение $K_{эфф}$ не превышает 0,95.

Для определения наиболее консервативных условий влияния на значение $K_{эфф}$ параметров корзины и топлива выполнены:

анализ чувствительности для определения влияния того или иного параметра (геометрического или материального) МЦК и ОТВС;

анализ влияния условий замедления нейтронов в корзине на $K_{эфф}$.

Эффективный коэффициент размножения нейтронов в рассматриваемой размножающей системе МЦК-ОТВС зависит от целого ряда параметров, в частности, от размеров и допусков на топливные таблетки, оболочку твэлов, конструкционные элементы ТВС, пластины ячеек хранения в МЦК. В случае отклонения от проектных значений указанных параметров определено изменение (увеличение или уменьшение) $K_{эфф}$. Для расчетов принималось наихудшее сочетание допусков и переменных величин,

т. е. такое их сочетание, которое приводит к увеличению размножающих свойств системы.

МЦК в нормальных условиях транспортировки и хранения заполнен гелием, а следовательно, из-за отсутствия эффективного замедлителя нейтронов выполнение требований по подкритичности обеспечивается с большим запасом: например, для проектного состояния МЦК-31, заполненного свежими ТВС и гелием, $K_{эфф} \leq 0,4$. Однако при операциях по загрузке и выгрузке ОЯТ на атомной станции МЦК заполняется водой. Кроме того, при некоторых аварийных условиях наихудшие условия по обеспечению ядерной безопасности будут достигаться в случае, если МЦК будет заполнен водой. Соответственно, в качестве основной модели для консервативного анализа безопасности выбрана модель с заполнением МЦК водой.

Программные коды. Расчеты проводились с применением кодов MCNP4 [4] и SCALE-4 [5].

Выбор MCNP — трехмерного кода общего назначения, построенного на основе метода Монте-Карло и разработанного Лос-Аламосской национальной лабораторией США, — основывается на том, что он широко применяется для расчетов критичности и обладает всеми функциями, необходимыми для анализа ядерной безопасности систем хранения размножающей системы МЦК-ОТВС. При расчетах MCNP использовалась непрерывная по энергии библиотека нейтронно-физических констант, созданная на основе ENDF/B-VII и распространяемая в комплекте с кодом.

Программный комплекс SCALE разработан в Ок-Риджской национальной лаборатории США по заказу Комиссии по ядерному регулированию США. Первая версия комплекса SCALE была выпущена в 1980 году и с тех пор он широко используется как в США, так и за его пределами для выполнения анализов критичности, радиационной безопасности, теплопередачи, выгорания [6]. Во многих странах (Болгария, Германия, Венгрия, Словакия, Швеция, США, Япония) SCALE используется для обоснования ядерной безопасности систем хранения ОЯТ [6].

Этот программный комплекс применялся для обоснования ядерной безопасности ХОЯТ Запорожской АЭС, а также ХОЯТ-2 Чернобыльской АЭС.

Расчётные схемы. Для обоснованного выбора консервативных допущений на геометрические параметры и материальный состав размножающей системы МЦК-ОТВС достаточно использовать упрощенную расчетную схему, включающую только объем МЦК с отражателем, или расчетную схему, включающую один расчетный элемент — ТВС, окруженную стенками ячейки хранения МЦК, на внешних границах которой помещено «нейтронное зеркало». В расчетной модели «зеркало» моделирует условия полного отражения нейтронов, что эквивалентно рассмотрению бесконечной размножающей среды, состоящей из одинаковых расчетных элементов.

Для моделирования использовались трехмерные расчетные схемы. Расчетная ячейка МЦК-31 с «нейтронным зеркалом» представлена на рис. 1, полная расчетная схема МЦК-31 — на рис. 2.

Основные и дополнительно принятые консервативные условия:

предполагается загрузка в МЦК свежих ТВС, тогда как в действительности загружаться будут выгоревшие ТВС, обладающие существенно меньшими размножающими свойствами, что обеспечивает значительный запас по ядерной безопасности (основное консервативное допущение);

не учитывается поглощение нейтронов материалом нейтронной защиты МЦК, который заменяется водой;

в модели высота ячеек корзины, выполненных из нейтронного поглотителя, соответствует только высоте топливосодержащей зоны, тогда как фактически она равна высоте всей корзины, снизу и сверху превышая высоту топливосодержащей зоны;

для ТВС, имеющих в своем составе концевые бланкеты или профилирование по высоте с более низким

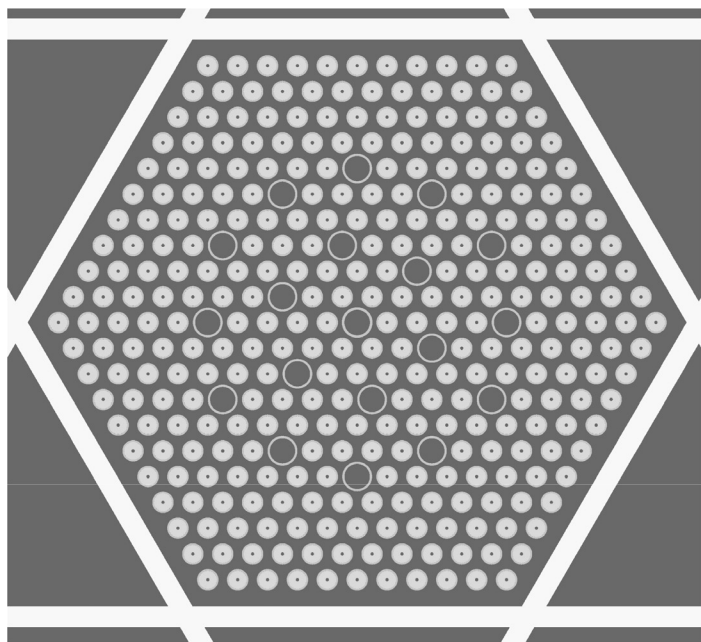


Рис. 1. Вид типичной ячейки в расчётной схеме МЦК-31 (поперечное сечение) с репрезентативной ТВС ВВЭР-1000

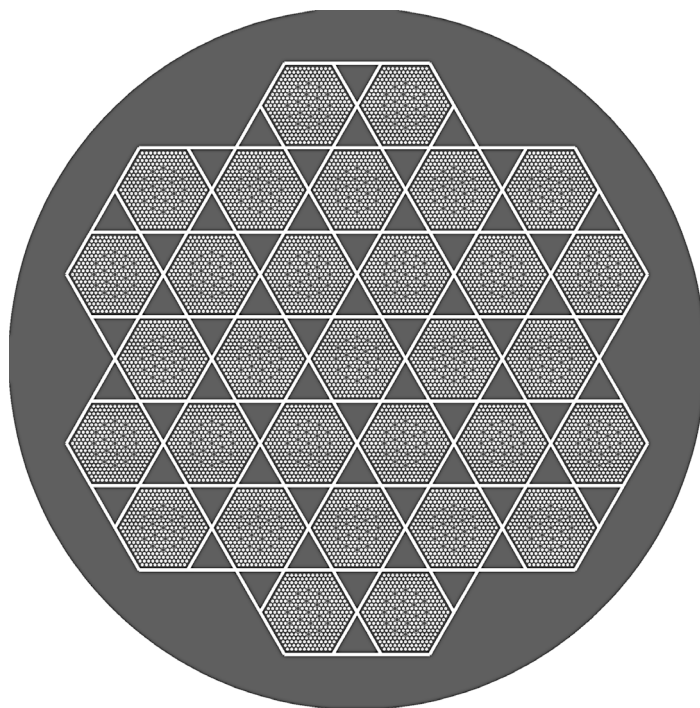


Рис. 2. Расчётная схема МЦК-31 (поперечное сечение) с ТВС ВВЭР-1000

обогащением, а также низкообогащенные ТВЭЛЫ с выгорающим поглотителем или профилирование по сечению ТВС, все ТВЭЛЫ ТВС моделируются как ТВЭЛЫ с максимальным обогащением.

В расчетной схеме явным образом представлены ТВЭЛЫ и их оболочка, направляющие и измерительные каналы, стенки ячеек корзины, выполненные из нейтропоглощающего материала.

При всех расчетных условиях зазор между таблетками и оболочкой ТВЭЛА, а также центральное отверстие топливных таблеток принимаются заполненными чистой водой.

Результаты расчетных исследований. Выполненные расчетные исследования показали, что наиболее консервативные условия при анализе ядерной безопасности системы хранения ОЯТ достигаются при:

- максимальной высоте топливосодержащей зоны;
- максимальном обогащении топлива;
- максимальной плотности топливного материала;
- максимальном шаге расположения ТВЭЛОВ;
- минимальном наружном диаметре топливной таблетки;
- максимальном внутреннем диаметре оболочки;
- минимальной толщине направляющих каналов;
- минимальной толщине измерительного канала.

Основными характеристиками ТВС, влияющими на его размножающие свойства, являются количество уранового топлива и соотношение между количеством урана и воды (замедлителя). В части соотношения вода/уран важно заметить, что решетки ТВЭЛОВ ТВС энергетических реакторов ВВЭР относятся к «недозамедленным», т. е.

в решетках ТВЭЛОВ не содержится достаточного количества воды для достижения максимально возможных размножающих свойств ТВС.

Поскольку имеет место «недозамедление» нейтронов в ТВС, любые изменения геометрии ТВС, при которых увеличивается количество воды с сохранением того же количества топливного материала, вызывают рост размножающих свойств. Именно поэтому уменьшение толщины оболочки ТВЭЛА или направляющего (либо измерительного) канала, увеличение шага ТВЭЛОВ приводят к росту размножающих свойств.

Увеличение высоты топливосодержащей зоны увеличивает количество ядерного топлива с сохранением того же соотношения топливо/вода, что также приводит к росту размножающих свойств.

Поскольку все ТВС конструктивно относятся к одному виду, состоят из пучков ТВЭЛОВ в оболочке со встроенными направляющими и измерительными каналами, сделанные заключения распространяются на все типы ТВС ВВЭР-1000; таким образом, наиболее консервативная геометрия является общей для всех рассматриваемых ТВС. Данные о влиянии на $K_{эфф}$ изменения параметров ТВС ВВЭР-1000 представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что изменение внутреннего и внешнего диаметров топливной таблетки в указанных диапазонах не позволяет однозначно определить наиболее консервативные условия по этим параметрам, так как приращение изменения $K_{эфф}$ имеет одинаковый знак при увеличении и уменьшении указанных геометрических

Таблица 1. Влияние на размножающие свойства изменения параметров ТВС ВВЭР-1000

Изменение параметров ТВС	Отклонение $K_{эфф}$	
	абс.ед.	%
Увеличение внутреннего диаметра таблетки (+0,1 мм)	-0,0041	-0,37
Уменьшение внутреннего диаметра таблетки (-0,1 мм)	-0,0011	-0,10
Увеличение наружного диаметра таблетки (+0,1 мм)	0,001	0,09
Уменьшение наружного диаметра таблетки (-0,1 мм)	0,0021	0,19
Увеличение внутреннего диаметра оболочки (+0,1 мм)	0,0036	0,32
Уменьшение внутреннего диаметра оболочки (-0,1 мм)	-0,0024	-0,22
Увеличение наружного диаметра оболочки (+0,1 мм)	-0,0083	-0,75
Уменьшение наружного диаметра оболочки (-0,1 мм)	0,0073	0,66
Увеличение толщины направляющих и измерительных каналов (+0,1 мм)	-0,0024	-0,22
Уменьшение толщины направляющих и измерительных каналов (-0,1 мм)	0,0019	0,17
Отсутствие направляющих и измерительных каналов (заменяются водой)	0,0103	0,93
Увеличение шага ТВЭЛОВ (+0,1 мм)	0,0064	0,58
Уменьшение шага ТВЭЛОВ (-0,1 мм)	-0,01	-0,90
Уменьшение плотности топливного материала (-0,2 г/см ³)	-0,0037	-0,33
Увеличение плотности топливного материала (+0,2 г/см ³)	0,0013	0,12
Уменьшение обогащения топлива (-0,05 масс. % ²³⁵ U)	-0,003	-0,27
Увеличение обогащения топлива (+0,05 масс. % ²³⁵ U)	0,0004	0,04

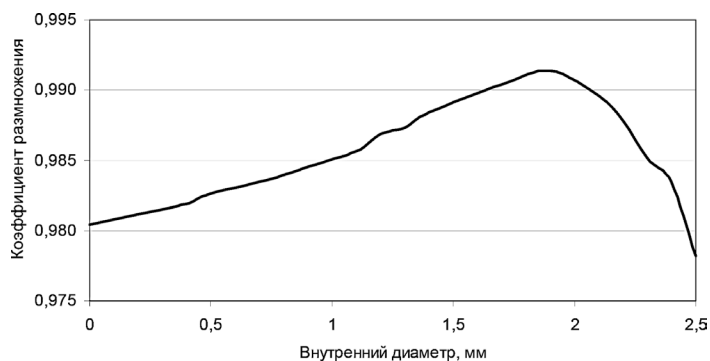


Рис. 3. Изменение $K_{эфф}$ в зависимости от диаметра внутреннего отверстия топливной таблетки

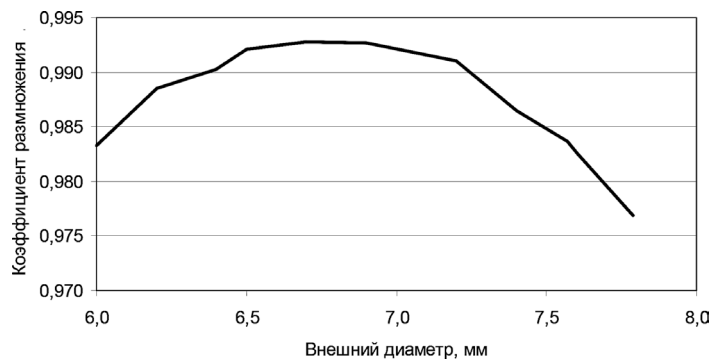


Рис. 4. Изменение $K_{эфф}$ в зависимости от внешнего диаметра топливной таблетки

параметров топливной таблетки. Физическая причина этого состоит в том, что:

с одной стороны, увеличение (уменьшение) внутреннего (внешнего) диаметра топливной таблетки приводит к увеличению количества воды в расчетной ячейке, а для «недозамедленных» водо-урановых систем это должно приводить к увеличению $K_{эфф}$;

с другой стороны, увеличение (уменьшение) внутреннего (внешнего) диаметра топливной таблетки приводит

к уменьшению количества ядерного топлива в расчетной ячейке, что должно приводить к уменьшению $K_{эфф}$.

Поэтому для определения наиболее консервативных размеров топливной таблетки (внутренний и внешний диаметры) проведены дополнительные расчетные исследования по изменению $K_{эфф}$ с шагом 0,01 мм изменения размеров топливной таблетки. Результаты изменения $K_{эфф}$ в зависимости от изменения диаметра внутреннего отверстия и внешнего диаметра топливной таблетки представлены на рис. 3 и 4.

Результаты проведенного исследования позволяют заключить, что в пределах проектных допусков на размеры топливной таблетки наиболее консервативные условия по достижению максимального значения $K_{эфф}$ будут при максимально допустимом отклонении внутреннего диаметра топливной таблетки в большую сторону, а внешнего диаметра топливной таблетки — в меньшую сторону. За пределами проектных допусков на геометрические размеры топливной таблетки максимальные значения $K_{эфф}$ будут достигаться при $D_{внутр} = 1,9$ мм, $D_{внешн} = 6,9$ мм.

Выбранные консервативные параметры ТВС ВВЭР соответствуют по количеству твэлов проектной конфигурации ТВС. Ввиду того, что ТВС ВВЭР являются «недозамедленными», может наблюдаться эффект увеличения размножающих свойств ТВС в случае отсутствия нескольких твэлов (табл. 2).

Данные об изменении $K_{эфф}$ в случае повреждения ВВЭР-1000 оболочек твэлов различных типов ТВС, заполнения водой центрального отверстия (при его наличии), а также зазора между оболочкой твэла и топливной таблеткой приведены в табл. 3.

Анализ ядерной безопасности при возможном повреждении топлива. Контейнеры хранения и перевозки ОЯТ должны обеспечивать гелиевую (сухую) внутреннюю среду во всех нормальных и аварийных условиях. В этом случае любое изменение конфигурации топлива практически не влияет на показатели ядерной безопасности. Для всех конфигураций затопления принимается, что зазор между таблетками и оболочкой и центральное отверстие таблеток (если имеется) заполнены водой, что консервативно соответствует повреждению оболочек всех твэлов в нормальных и аварийных условиях.

Обоснование ядерной безопасности для случая хранения в МЦК поврежденных ОТВС, с геометрическими параметрами ОТВС, превышающими рассмотренные пределы проектных значений в основном за счет увеличения шага расположения твэлов в случае поврежденных

Таблица 2. Влияние на размножающие свойства ТВС ВВЭР-1000 и МЦК-31 в случае отсутствия нескольких твэлов в ТВС

Конфигурация ТВС		$K_{эфф}$	
		одиночная ТВС	31 ТВС в МЦК
Проектная		0,7477 ± 0,0021	0,9141 ± 0,0019
Ряд 1	Без 1 твэла	0,7497 ± 0,0019	Нет данных
	Без 3 твэлов	0,7515 ± 0,00217	0,9161 ± 0,0019
Ряд 4	Без 3 твэлов	0,7544 ± 0,0019	0,9195 ± 0,0017
	Без 6 твэлов	0,7552 ± 0,0023	Нет данных
Ряд 8	Без 3 твэлов	0,7514 ± 0,0018	Нет данных
	Без 6 твэлов	0,7521 ± 0,0017	Нет данных
Ряд 4, ряд 8	Без 3 + 6 твэлов	0,7553 ± 0,0017	0,9208 ± 0,0019

Таблица 3. Увеличение $K_{эфф}$ при заполнении водой зазора между таблетками и оболочкой, а также центрального отверстия (если оно есть)

Тип ТВС	Обогащение, масс. % ^{235}U	Увеличение $K_{эфф}$
ТВС-М	4,45	0,0255
ТВС-А	4,45	0,0194
ТВС-W	4,25	0,0114
ТВС-W (LTA)	4,45	0,0095

или смещенных дистанционирующих решеток, требует дополнительных проектных решений: увеличения концентрации поглотителя в материале Metamic-НТ, применения неполной загрузки МЦК, использования кредита выгорания и др.

Выводы

Результаты анализа ядерной безопасности систем хранения ОЯТ с представленными консервативными допущениями подтверждают неперевышение значения эффективного коэффициента размножения нейтронов 0,95 с учётом всех расчетных погрешностей и неопределенностей с доверительной вероятностью 95 %, при всех условиях нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях.

Список использованной литературы

1. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах ядерной энергетики : ПНАЭ Г-14-029-91. М. : ЦНИИАтоминформ, 1992. 22 с.
2. Правила ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіоактивних матеріалів : НП 306.2006.124–2006. *Офіційний вісник України*. 2001. № 29.
3. Основні положення забезпечення безпеки проміжних сховищ відпрацьованого ядерного палива сухого типу : НП 306.2.105–2004. *Офіційний вісник України*. 2005. № 3.
4. LA-13709-M. Manual. MCNPTM—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C Judith F. Briesmeister, Editor. 2000. 790 p.
5. SCALE-4.4a: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NUREG-CR-0200, Rev.6, Oak Ridge National Laboratory, September, 1998. 847 p.
6. Солдатов С. А., Черницкий С. В., Леонов С. Н. Определение систематической ошибки и дисперсии расчетной последовательности CSAS26 пакета программ SCALE-5. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2011. № 3 (51). С. 47–52.

References

1. PNAE G-14-029-91, Safety Rules for Storage and Transport of Nuclear Fuel at Nuclear Installations [Pravila bezopasnosti pri khranenni i transportirovanii yadernogo topliva na ob'ekтах yadernoi energetiki: PMAE G-14-029-91], Moscow, Atominform, 1992, 22 p. (Rus)
2. NP 306.6.124–2006 (PBPRM-2006). Nuclear and Radiation Safety Rules for Shipment of Radioactive Materials [Pravyla yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky pry perevezenni radioaktyvnykh materialiv: NP 306.2006.124–2006], Official Bulletin of Ukraine, 2001, No. 29, 332 p. (Ukr)
3. NP 306.2.105–2004. Basic Safety Provisions for Interim Dry Storage Facilities [Osnovni polozhennia zabezpechennia bezpeky promizhnykh skhovyshch vidpratsiovanoho yadernoho palyva suchoho typu: NP 306.2.105–2004], Official Bulletin of Ukraine, 2005. No. 3, 202 p. (Ukr)
4. MCNP, A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, Manual, Edited by Judith F. Briesmeister, LA-13709-M, 2000, 790 p.
5. SCALE-4.4a, A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, NUREG-CR-0200, Rev. 6, Oak Ridge National Laboratory, September, 1998, 847 p.
6. Soldatov, S.A., Chernitskii, S.V., Leonov, S.N. (2011), "Determination of Systematic Error and Dispersion of Estimated Sequence CSAS26 of the SCALE-5 Software Package for Hexagonal Geometry" [Opredeleniie sistematischeoskoi oshibki i dispersii raschiotnoi posledovatelnosti CSAS26 paketa program SCALE-5], Nuclear and Radiation Safety, 3 (51), 2011, pp. 47–52. (Ukr)

Получено 27.01.2017.