

Использование аксиального профиля распределения выгорания при анализе ядерной безопасности систем хранения отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР в Украине

Предложен метод консервативного учета аксиального профиля распределения выгорания по длине ТВС, основанный на результатах анализа реальных профилей распределения выгорания отработавших ТВС. Метод может использоваться при обосновании ядерной безопасности систем обращения и хранения отработавшего топлива, что позволит избежать избыточного занижения глубины выгорания, которое возникает при использовании равномерного распределения выгорания по длине ТВС.

Ключевые слова: ВВЭР, ТВС, учет выгорания, burnup credit, аксиальная неравномерность, СХОЯТ, ядерная безопасность, отработавшее топливо.

О. О. Дудка, Ю. П. Ковбасенко, Е. І. Білодід

Використання аксіального профілю розподілу вигорання при аналізі ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР в Україні

Запропоновано метод консервативного врахування аксіального профілю розподілу вигорання по довжині ТВЗ, заснований на результатах аналізу реальних профілів розподілу вигорання відпрацьованих ТВЗ. Метод може використовуватися в обґрунтуванні ядерної безпеки систем поводження й зберігання відпрацьованого палива, що допоможе уникнути надлишкового заниження глибини вигорання при використанні рівномірного розподілу вигорання по довжині ТВЗ.

Ключові слова: ВВЕР, ТВЗ, врахування вигорання, burnup credit, аксіальна нерівномірність, ССВЯП, ядерна безпека, відпрацьоване паливо.

© Е. А. Дудка, Ю. П. Ковбасенко, Е. И. Белодед, 2012

В соответствии с требованиями нормативных документов Украины [1, 2], при хранении ядерного топлива (свежего и отработавшего) эффективный коэффициент размножения нейтронов не должен превышать 0,95 в условиях нормальной эксплуатации и при проектных авариях.

В настоящее время сухое хранилище отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ) Запорожской АЭС (ЗАЭС) является единственным действующим хранилищем отработавшего ядерного топлива на территории Украины, для которого все расчеты в обоснование ядерной безопасности контейнеров проводятся с учетом выгорания топлива, т. е. с использованием методологии «burnup credit» [3].

Если при проведении таких расчетов выгорание каждой тепловыделяющей сборки (ТВС) принимать равным средней глубине выгорания, то, как показано в [4], во многих случаях эффективный расчетный коэффициент размножения нейтронов может оказаться выше реального. Это означает, что такой подход не является консервативным.

Поэтому, в качестве начальных условий при проведении расчетов коэффициента размножения нейтронов, консервативно, выгорание каждой ТВС принимается равным среднему выгоранию на концевых, наименее выгоревших, участках при разбиении топливной части ТВС на 10 слоев по высоте. Такой подход наиболее прост. Однако, вследствие значительной неравномерности распределения выгорания по высоте ТВС, величина выгорания оказывается меньше в 1,5–2,5 раза по сравнению со средней из-за того, что центральная часть ТВС имеет значительно большую глубину выгорания по сравнению с концевыми участками. В свою очередь, это приводит к необходимости загрузки в контейнеры большего количества стержней системы управления и защиты (СУЗ) и стержней выгорающего поглотителя (СВП), которые используются как дополнительные поглотители, необходимые для обеспечения требуемой нормативным документом [1] подкритичности 0,05. Со временем на ЗАЭС стала ощущаться нехватка отработавших стержней СУЗ и было принято решение об изготовлении специальных поглощающих стержней — поглощающих вставок, аналогичных стержням СУЗ по размерам и поглощающим свойствам, что приводит к дополнительным затратам на хранение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). Таким образом, снижение консерватизма учета выгорания поможет снизить и дополнительные затраты на формирование загрузки каждого контейнера СХОЯТ.

Во многих промышленно развитых странах, таких как США, Германия, Франция и др., исследуются различные возможности анализа ядерной безопасности систем хранения и обращения с отработавшим ядерным топливом кипящих водо-водяных реакторов (ВВР) и реакторов с водой под давлением (РВР) с учетом аксиального профиля глубины выгорания выгружаемых ТВС. Это позволяет более полно учитывать реальную глубину выгорания топлива без снижения существующего уровня ядерной безопасности.

В данной статье рассмотрена возможность распространения этого опыта на отработавшее топливо водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1000.

Необходимость определения консервативного профиля распределения выгорания. Переход от использования «плоского» профиля выгорания к неравномерному аксиальному может приводить к нарушению принципа консерватизма при анализе ядерной безопасности. Как показано, в частности, в [4], при некорректном учете аксиального профиля

выгорания эффективный расчетный коэффициент размножения нейтронов может оказаться выше реального. Во избежание такой ситуации предлагается использовать консервативный профиль распределения выгорания, что для рассматриваемых типов топлива и энергоблоков АЭС дает наибольший эффективный коэффициент размножения нейтронов по сравнению со всеми реально возможными значениями. Кроме того, запас, закладываемый в расчеты при использовании консервативного профиля выгорания (safety margin), позволяет скомпенсировать возможные ошибки и погрешности определения глубины выгорания ОТВС.

Исходные данные для определения консервативного профиля распределения выгорания. Для анализа аксиального профиля глубины выгорания были собраны данные по ТВС, находившимся в бассейнах выдержки всех энергоблоков ЗАЭС по состоянию на 29.11.2006 г. [5]:

№ энергоблока	1	2	3	4	5	6
Количество ТВС, находящихся в БВ	271	318	269	270	299	353

Расчет выгорания и энерговыделения для каждой ТВС выполнялся специалистами ЗАЭС в ходе плановых работ при перегрузках топлива с помощью программ моделирования топливной кампании активной зоны реактора ПИР-А и БИПР7-А [6].

Выгорание рассчитывалось в 10 слоях по высоте ТВС путем моделирования топливной кампании с учетом следующих эксплуатационных данных: графика нагрузки энергоблока, положения органов регулирования, температуры теплоносителя на входе в активную зону, расхода теплоносителя и концентрации борной кислоты. Значения выгорания приведены в [5]. На основе этих данных проведен анализ профилей выгорания по всем ТВС, находящимся в бассейне выдержки (БВ) энергоблоков ЗАЭС.

Определение консервативного профиля выгорания. Для определения профиля выгорания каждой ТВС определялись коэффициенты неравномерности распределения выгорания в каждом из 10 слоев по высоте топлива:

$$\tilde{P}(z) = \frac{B(z)}{\bar{B}}, \quad (1)$$

где $B(z)$ — глубина выгорания в слое z по длине ТВС, отсчитываемой от низа активной зоны; $\bar{B} = \frac{\int_0^{H_{AZ}} B(z) dz}{H_{AZ}}$ —

средняя глубина выгорания топлива по высоте ТВС.

Таким образом, выгорание в каждом слое нормируется на среднюю величину выгорания по всей ТВС, и сумма полученных значений $\tilde{P}(z)$ по 10 слоям для любой ТВС в этом случае равна 10.

В качестве профиля распределения выгорания по высоте кассеты принимается распределение значений $\tilde{P}(z)$. Типичные профили распределения выгорания для трех ТВС из числа находящихся в БВ энергоблоков ЗАЭС приведены в качестве примера на рис. 1. Как видно из рисунка, профили выгорания слабо зависят от типа ТВС, начального обогащения и среднего значения глубины выгорания топлива, что позволяет обобщить их для всех типов ТВС

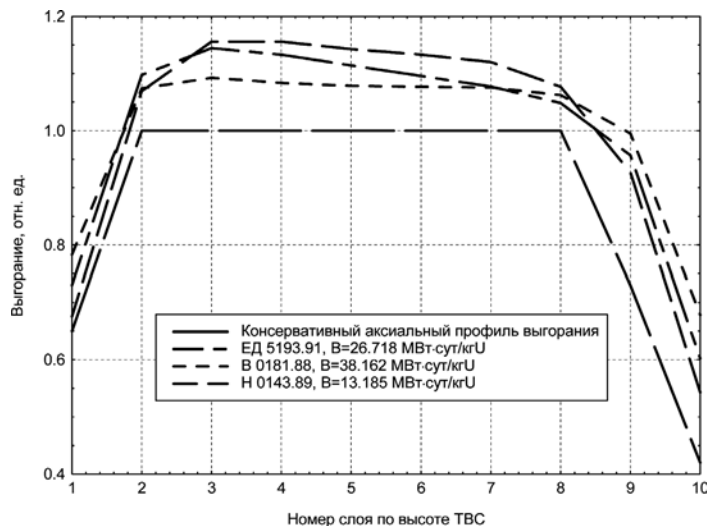


Рис. 1. Относительные профили выгорания для различных ТВС

независимо от их начального обогащения и глубины выгорания.

Для всех ТВС, находящихся в БВ энергоблоков ЗАЭС, были построены профили распределения выгорания. Затем для каждого из 10 слоев по высоте всех ТВС выбирались минимальные значения коэффициентов неравномерности выгорания $\tilde{P}(z)$, которые и представляют собой консервативный аксиальный профиль распределения глубины выгорания для всех рассмотренных ТВС (рис. 1). Такой сформированный консервативный аксиальный профиль отличается от профиля, определенного выражением (1), тем, что сумма его значений $\tilde{P}_i^{conservativ}$ по 10 слоям будет меньше 10.

Коэффициенты $\tilde{P}_i^{conservativ}$ консервативного аксиального профиля выгорания по 10 слоям ТВС ЗАЭС приведены ниже:

Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Выгорание, отн. ед.	0,65	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,73	0,42

Как видим, для консервативного аксиального профиля выгорания сумма коэффициентов неравномерности значений выгорания $\tilde{P}_i^{conservativ}$ по 10 слоям равна 8,8. Таким образом, переход от реального профиля распределения выгорания к консервативному приводит к занижению средней величины выгорания в ТВС на 12 % относительно ее реального значения (для сравнения при равномерном профиле глубины выгорания средняя глубина выгорания занижается в 1,5–2,5 раза).

Оценка консерватизма расчета $K_{эфф}$. С использованием полученных выше минимальных значений коэффициентов неравномерности выгорания, консервативно глубину выгорания топлива в каждом слое ТВС со средней глубиной выгорания \bar{B} можно определить следующим образом:

$$B_i^{conservativ} = \tilde{P}_i^{conservativ} \cdot \bar{B}; \quad (2)$$

где \bar{B} — среднее значение глубины выгорания топлива в ОТВС.

Применив формулу (2) к среднему выгоранию любой ТВС из находящихся в БВ ЗАЭС, можно сформировать ее консервативный профиль распределения выгорания по 10 слоям, т. е. такой профиль распределения выгорания,

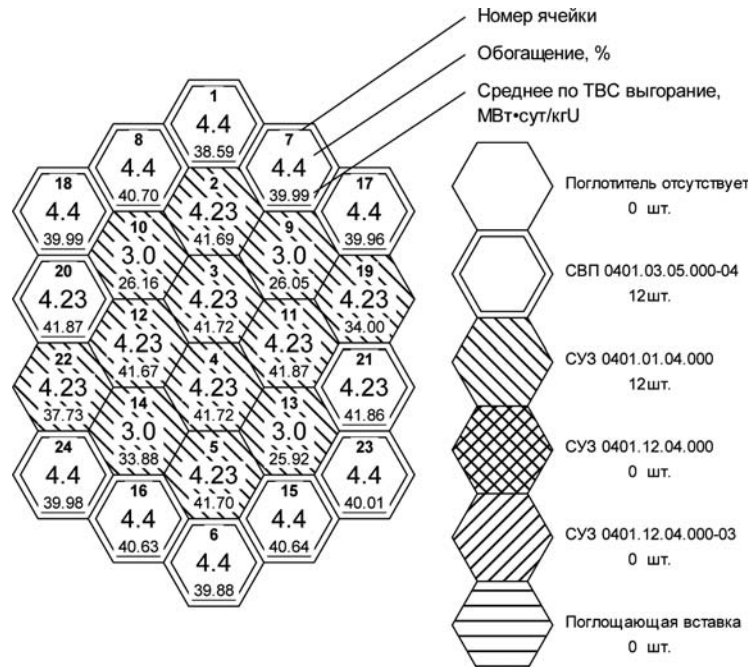


Рис. 2. Схема загрузки контейнера 1 при использовании «плоского» профиля выгорания

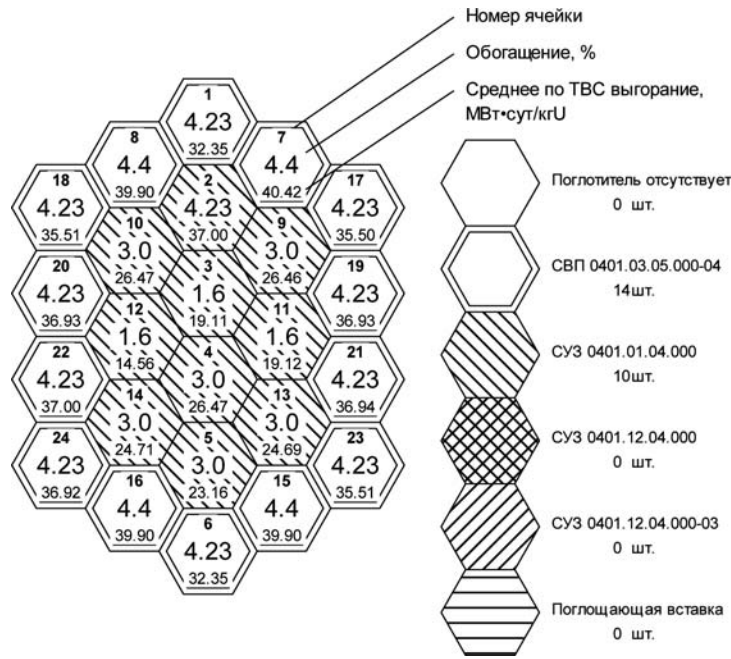


Рис. 3. Схема загрузки контейнера 2 при использовании «плоского» профиля выгорания

который приводит к максимальному коэффициенту размножения нейтронов среди всех возможных профилей выгорания ТВС, находящихся в БВ ЗАЭС.

При учете аксиального распределения глубины выгорания топлива в соответствии с данной методологией консервативный запас в 12 % компенсирует возможные погрешности определения глубины выгорания в слое, которые согласно паспортным данным используемого на АЭС программного обеспечения составляют 7—10 % [6].

Применение консервативного профиля выгорания. Одно из основных требований анализа ядерной безопасности с учетом выгорания топлива заключается в том, что необходимо учитывать только те изотопы, количество которых

может быть определено с достаточной точностью, а время жизни значительно превышает промежуток времени, рассматриваемый в обосновании ядерной безопасности.

Количество учитываемых изотопов определяет тот уровень консерватизма, который закладывается в результаты анализа ядерной безопасности:

наибольший консерватизм будет заложен в результаты анализа ядерной безопасности при учете в составе ТВС только пяти делящихся изотопов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) без учета актинидов и продуктов деления;

учет в составе ТВС десяти изотопов (^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{149}Sm , ^{151}Sm) дает более реалистичные результаты;

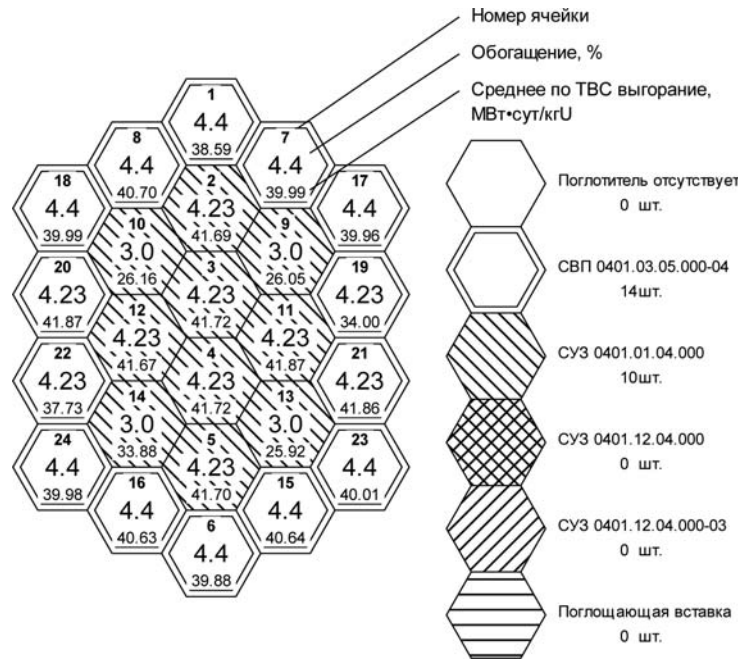


Рис. 4. Схема загрузки контейнера 1 при использовании аксиального профиля выгорания

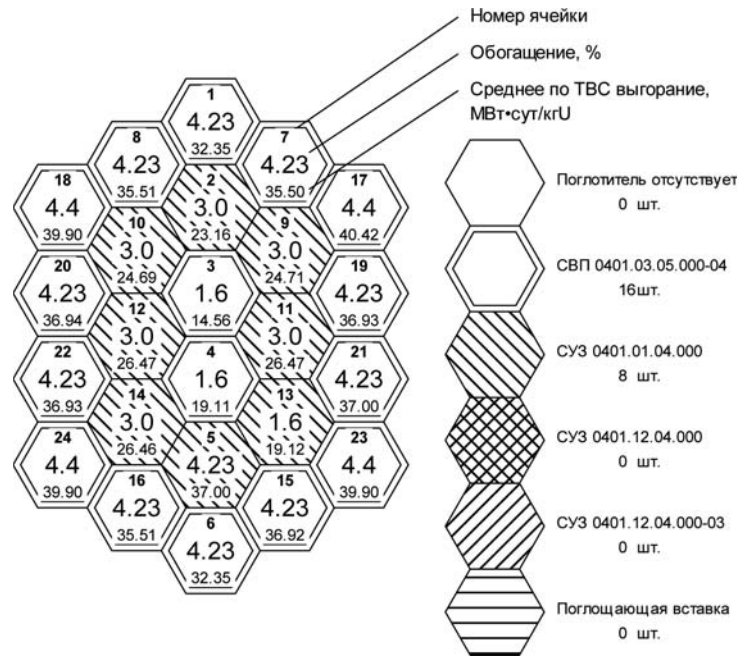


Рис. 5. Схема загрузки контейнера 2 при использовании аксиального профиля выгорания

учет концентрации большинства стабильных изотопов (делящихся изотопов, актинидов и продуктов деления) соответствует еще более реалистичным результатам с наиболее низким избыточным консерватизмом.

Согласно [3, 5], при анализе ядерной безопасности загрузок контейнеров СХОЯТ с учетом глубины выгорания топлива в настоящее время используется «плоский» профиль распределения выгорания на основе учета только пяти изотопов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu). Использование в расчетах данных по концентрации пяти изотопов приводит к значению $K_{эфф}$ в среднем на 14 % большему, чем при учете всех изотопов [3, прил. А].

Для сопоставления имеющихся результатов и результатов консервативного учета аксиального профиля рас-

пределения глубины выгорания отработавшего топлива в анализе ядерной безопасности загрузок контейнеров СХОЯТ ЗАЭС проанализированы загрузки двух контейнеров (в дальнейшем будем обозначать их как контейнер 1 и контейнер 2) из числа находящихся на площадке СХОЯТ ЗАЭС. Обоснование ядерной безопасности загрузок этих контейнеров ранее было выполнено с учетом выгорания топлива, которое принималось постоянным по длине ТВС и равным среднему выгоранию на концевых участках («плоский» профиль распределения выгорания). При этом, согласно требованиям [1], учитывались условия оптимального замедления нейтронов, которые моделируются как заполнение контейнеров неборированной водой плотностью 1 г/см^3 .

Загрузка контейнера 1 сформирована 24 ТВС из числа находившихся в БВ блока № 2 ЗАЭС. При этом в качестве поглотителей, необходимых для выполнения условий ядерной безопасности, в загрузке используется 12 стержней СВП типа 0401.03.05.000-04 и 12 стержней СУЗ типа 0401.01.04.000 из числа находившихся в БВ блока № 2 (рис. 2).

Загрузка контейнера 2 сформирована 24 ТВС с использованием 14 стержней СВП и 10 стержней СУЗ из числа находившихся в БВ блока № 3 (рис. 3).

Согласно [3], при анализе ядерной безопасности отработавшего топлива рассматривались только концентрации делящихся изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu .

Наибольшее значение эффективного коэффициента размножения нейтронов наблюдается при анализе аварийной ситуации, связанной с ошибочной загрузкой свежей ТВС максимального обогащения (4,4 %) в контейнеры. С использованием «плоского» профиля выгорания наибольшее значение эффективного коэффициента размножения нейтронов для контейнера 1 $K_{\text{эфф}} \pm \sigma = 0,9460 \pm 0,0008$, для контейнера 2 — $K_{\text{эфф}} \pm \sigma = 0,9487 \pm 0,0008$.

Для обоснованных ранее с использованием «плоского» профиля распределения выгорания загрузок контейнеров 1 и 2 (рис. 2 и 3) была рассмотрена возможность уменьшения количества загружаемых стержней СУЗ без нарушения требований ядерной безопасности. В результате анализа, проведенного с учетом аксиального распределения выгорания, получены новые схемы загрузок контейнеров 1 и 2 (рис. 4 и 5). При этом схема расстановки в контейнере 1 ТВС не изменилась, а в контейнере 2 изменилась схема расстановки ТВС и поглотителей.

Как и ранее (с использованием «плоского» профиля распределения выгорания), наибольшее значение эффективного коэффициента размножения нейтронов наблюдалось при анализе аварийной ситуации, связанной с ошибочной загрузкой свежей ТВС максимального обогащения (4,4 %) в контейнеры. При использовании консервативного аксиального профиля выгорания для контейнера 1 наибольший эффективный коэффициент размножения нейтронов составил $K_{\text{эфф}} \pm \sigma = 0,9433 \pm 0,0008$, для контейнера 2 — $K_{\text{эфф}} \pm \sigma = 0,9473 \pm 0,0008$.

Таким образом, при использовании в обосновании ядерной безопасности загрузок контейнеров 1 и 2 предложенного подхода к определению консервативного аксиального профиля распределения выгорания получены следующие результаты:

загрузка контейнера 1 удовлетворяет требованиям ядерной безопасности при загрузке в контейнер 14 стержней СВП и 10 стержней СУЗ (вместо обоснованных ранее 12 стержней СВП и 12 стержней СУЗ) (рис. 4);

загрузка контейнера 2 удовлетворяет требованиям ядерной безопасности при загрузке в контейнер 16 стержней СВП и 8 стержней СУЗ (вместо обоснованных ранее 14 стержней СВП и 10 стержней СУЗ) (рис. 5).

Использование консервативного аксиального профиля распределения выгорания топлива в ТВС позволило обосновать загрузку каждого контейнера без нарушения требований ядерной безопасности с экономией в два стержня СУЗ в каждом контейнере. Таким образом, изменение подхода к определению профиля распределения выгорания с «плоского» на консервативный при анализе загрузок контейнеров СХОЯТ отработавшим топливом позволит уменьшить количество стержней СУЗ (или поглощающих вставок), загружаемых в контейнеры, что

позволяет улучшить экономические показатели системы хранения ОТВС.

Выводы

Используемый в настоящее время подход к учету выгорания ТВС для обоснования ядерной безопасности контейнеров СХОЯТ, при котором выгорание каждой ТВС принимается равным ее среднему выгоранию на концевых участках, является избыточно консервативным. Он приводит к занижению величины выгорания ТВС в 1,5–2,5 раза по сравнению со средним значением, так как центральная часть ТВС выгорает значительно больше концевых участков. Это, в свою очередь, приводит к перерасходу количества загружаемых в контейнеры дополнительных поглотителей в виде отработавших кластерных сборок стержней СУЗ, необходимых для обеспечения ядерной безопасности контейнеров.

Приведенные в статье результаты анализа профилей энерговыработки ТВС, находящихся в бассейнах выдержки энергоблоков ЗАЭС, позволяют обоснованно снизить консерватизм, закладываемый в результаты расчетов, до приемлемого уровня. Для снятия избыточного консерватизма предлагается использовать при анализе ядерной безопасности контейнеров СХОЯТ аксиальный консервативный профиль распределения выгорания, что приведет к занижению средней глубины выгорания ТВС на 12 % относительно ее реального среднего значения.

Расчеты, проведенные на примере двух контейнеров СХОЯТ, подтверждают, что учет в обосновании ядерной безопасности системы хранения ТВС аксиального профиля распределения выгорания топлива позволяет уменьшить количество загружаемых в контейнеры стержней СУЗ или поглощающих вставок как минимум на два кластера без нарушения требований ядерной безопасности и, тем самым, снизить дополнительные затраты на формирование загрузки контейнера СХОЯТ.

Список использованной литературы

1. ПНАЭ Г-14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики.
2. НП 306.2.105-2004. Основные положения обеспечения безопасности промежуточных хранилищ отработавшего ядерного топлива сухого типа.
3. 00.ОБ.УУ.МУ.09. Методические указания по выполнению обоснования ядерной безопасности топливной загрузки ВКХ СХОЯТ с учетом глубины выгорания отработавшего ядерного топлива.
4. Анализ критериев безопасности с целью использования принципа «burnup credit» для систем сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Этап 1. Разработка порядка определения выгорания топлива и изотопного состава отработавшего топлива: Отчет о научно-исследовательской работе. № 0110U005935 / ГНТЦ ЯРБ. — К., 2010. — 34 с.
5. Анализ безопасности сухих хранилищ отработавшего ядерного топлива с учетом аксиального профиля распределения выгорания ТВС: Научно-технический отчет /ФИЗАР. — К., 2006. — 69 с.
6. Программа БИПР-7А. Описание алгоритма. Описание применения / Сулов А. А., Шишков Л. К., Большагин С. Н. Отчет РНЦ КИ, инв. № 32/1-9-102 от 20.02.2002

Получено 26.03.2012.