АНАЛИЗ КРИТИЧНОСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ЗОНЫ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА В МАЛОМ МОДУЛЬНОМ РЕАКТОРЕ

THE CRITICALITY SAFETY ANALYSIS OF THE SPENT FUEL STORAGE POOL AREA I IN SMALL MODULAR REACTOR

УДК 629.039.58

Беляков Андрей Александрович, Студент магистратуры 2 курс, факультет «Энергомашиностроение», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г.Москва, Россия

Belyakov Andrey Aleksandrovich, borisburdathegreat@gmail.com

Аннотация: На основе метода расчета Монте-Карло создана геометрическая модель зоны I бассейна хранения отработавшего топлива малого модульного реактора, предполагающая бесконечные стеллажи для хранения типа 6×6. Результаты расчетов показывают, что реакционная способность максимальна при плотности воды 1,0 г/см3. Значение keff составляет 0,8729 в нормальном состоянии хранения. Расстояние между стеллажами для хранения в бассейне с отработавшим топливом изменится в случае аварии при землетрясении. Также рассчитаны значения реактивности пула отработавшего топлива в предполагаемом аварийном состоянии при землетрясении. Значения keff находятся в диапазоне от 0,872 до 0,876. Как в нормальном состоянии, так и в предполагаемом аварийном состоянии при землетрясении значения keff составляют менее 0,95, что соответствует нормативным требованиям ядерной безопасности.

Annotation: Based on the Monte Carlo calculation method, geometric model of

spent fuel storage pool Area I of small modular reactor is established, assuming infinite 6×6 type storage racks. Calculation results show that the reactivity is maximal when the water density is 1.0g/cm3. The value of keff is 0.8729 in normal storage condition. The spacing of storage racks in spent fuel pool would change in an earthquake accident condition. The values of reactivity of spent fuel pool in the assumed earthquake accident condition are also calculated. The values of keff are between 0.872 and 0.876. Both in normal condition and assumed earthquake accident condition, the values of keff are less than 0.95, to meet nuclear safety regulatory requirements.

Ключевые слова: Безопасность по критичности; бассейн отработавшего топлива; стеллаж для хранения

Keywords: Criticality Safety; Spent Fuel Pool; Storage Rack

Вступление

Поддержание субкритичности топлива должно постоянно выполняться в системах обработки и хранения топлива. Это 24 - месячная программа управления топливом в небольшом модульном реакторе. Бассейн для хранения отработавшего топлива малого модульного реактора предназначен для размещения перегородок, которые разделены на зону хранения I и зону хранения II. Зона I используется для хранения новых тепловыделяющих сборок перед загрузкой в реактор, сборок, которые выгружаются из активной зоны во время незапланированной остановки, и отработавших тепловыделяющих сборок, которые не соответствуют пределу выгорания и не допускаются к хранению в Зоне II. При проектировании стеллажей для хранения в зоне II используется кредит на выгорание. Зона II используется для хранения отработавших тепловыделяющих сборок, которые достигают заданного предела выгорания. Кредит на выгорание означает учет снижения реактивности облученного топлива при анализе безопасности по критичности пула хранения отработавшего топлива. Это может увеличить количество хранилищ отработавших тепловыделяющих сборок и экономию хранения отработавшего топлива. В данной работе мы изучаем анализ безопасности критичности пула хранения

отработавшего топлива в малом модульном реакторе.

Расчетный код

Код, используемый в нашем исследовании, -MCNP, который является универсальным кодом N–частиц Монте-Карло, который может использоваться для переноса нейтронов, фотонов, электронов или связанных нейтронов/фотонов/электронов, включая возможность вычисления собственных значений для критических систем. Код обрабатывает произвольную трехмерную конфигурацию материалов в геометрических ячейках, ограниченных поверхностями первой и второй степени и эллиптическими торами четвертой степени. В MCNP используются данные точечного поперечного сечения. Для нейтронов учитываются все реакции, приведенные в конкретной оценке поперечного сечения (например, ENDF/B-VI). Тепловые нейтроны описываются как моделями свободного газа, так и моделями S (α, β). Важные стандартные функции, которые делают MCNP очень универсальным и простым в использовании, включают мощный общий источник, источник критичности и источник поверхности; как геометрические, так и выходные плоттеры подсчета; богатую коллекцию методов уменьшения дисперсии; гибкую структуру подсчета; и обширную коллекцию данных поперечного сечения. Код MCNP широко используется при оценке безопасности по критичности для ядерных установок [1].

Критические стандарты безопасности

При анализе безопасности по критичности зоны I бассейна хранения отработавшего топлива малого модульного реактора обогащение отработавших тепловыделяющих сборок рассматривается как новое с максимальным ожидаемым обогащением. Это означает, что обогащение отработавших тепловыделяющих сборок принимается на 4,2%. Конструкция стеллажей зоны I бассейна хранения отработавшего топлива должна быть такой, чтобы: При максимальной проектной мощности бассейна хранения отработавшего топлива и максимально допустимом новом обогащении топлива в топливных пробах, учитывая различные неопределенности, нормальные и вероятные аварийные

условия, значение keff не должно превышать 0,95.

Геометрическая модель тепловыделяющих сборок

Каждая тепловыделяющая сборка содержит матрицу стержней 17×17, состоящую номинально из 264 топливных стержней, 24 стержней наперстки управления кластером и наперсток встроенного оборудования. На рис. 1 показан вид поперечного сечения тепловыделяющей сборки 17×17 и соответствующих мест расположения, направляющих наперстка для управления кластером стержней. Топливные стержни изготовлены из цилиндрических трубок, изготовленных из сплава(ов) на основе циркония, содержащих топливные гранулы из диоксида урана. Зона I пула хранения отработавшего топлива используется для хранения новых тепловыделяющих сборок и отработавших тепловыделяющих сборок, не достигших предела выгорания. При расчете безопасности по критичности пула хранения отработавшего топлива обогащение тепловыделяющих сборок принимается равным 4,2% для консервативного учета.

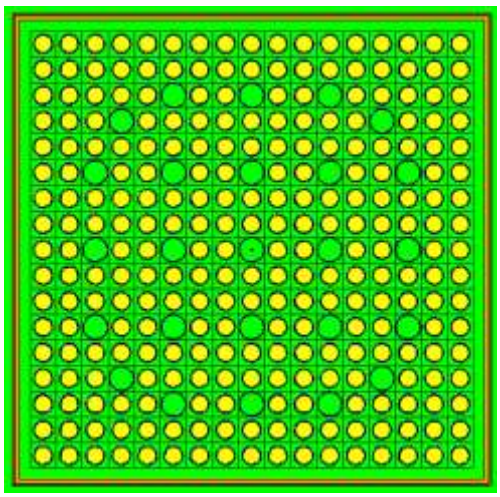


Рис.1. Схема тепловыделяющей сборки

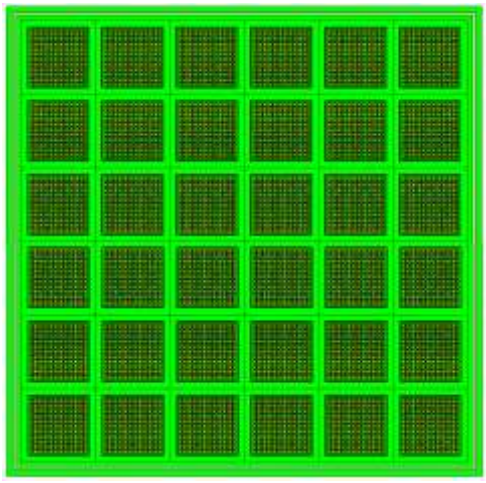


Рис.2. Схема модели стеллажа для хранения

Стеллажи для хранения

Новое топливо хранится в стеллаже высокой плотности, который включает в себя интегральный поглощающий нейтроны материал, который является кадмием для поддержания требуемой степени субкритичности. Стеллаж предназначен для хранения топлива максимального расчетного обогащения. Каждая тепловыделяющая сборка хранится в гильзе из нержавеющей стали в которые вставляются кадмиевые панели. (Рис. 1) Расстояние от центра до центра

стеллажной решетки 28 см обеспечивает минимальное расстояние между соседними тепловыделяющими сборками, достаточное для поглощения нейтронов материалом для поддержания докритической решетки.

Граничные условия

В ходе анализа безопасности по критичности зоны I бассейна хранения отработавшего топлива мы анализируем относительно стеллажей для хранения отработавшего топлива типа 6×6, которые плотно хранятся в бассейне. Новый топливный стеллаж включает в себя места для хранения 36 топливных сборок. Расположение стойки и расстояние между центрами массива показаны на рис. 2. На стойке установлен слой отражения воды толщиной 30 см. И еще один слой отражения воды установлен под стойкой. Для рассмотрения консервативного граничного условия, окружающего стойку расчетной модели, предполагается зеркальное отражение. Физический смысл модели-бесконечный стеллаж для хранения типа 6×6. Предполагается, что вода в бассейне для хранения отработавшего топлива является чистой, без учета эффектов поглощения нейтронов бором.

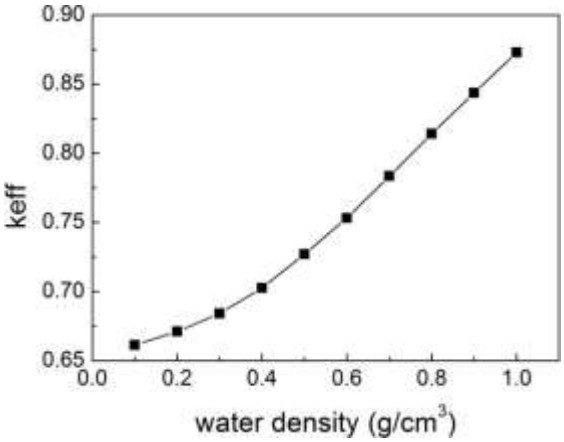
Рассчитанные результаты

Создана расчетная модель бесконечных стеллажей для хранения, расположенных в пространстве, для расчета реактивности в нормальных условиях хранения. Это консервативно для анализа безопасности критичности в нормальном состоянии. Чтобы определить влияние реакционной способности бассейна на плотность воды, вызванную изменением температуры воды, мы анализируем keff бассейна на влияние температуры воды. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Очевидно, что значение keff ниже при уменьшении плотности воды в бассейне, которое выполняется при 4,2% - ном обогащении тепловыделяющих сборок. Согласно рисунку 3, рассчитанный предполагаемый 1,0 г/см3 в качестве плотности воды сохраняется как в условиях нормального хранения, так и при анализе безопасности критичности.

Данные в таблице 1 показывают, что keff пула отработавшего топлива

составляет максимум 0,8729, когда плотность воды принимается равной 1,0 г/см3 при нормальных условиях хранения. При 95% доверительном уровне значения keff находятся в диапазоне от 0,87209 до 0,87372, которые все меньше 0,95 и соответствуют нормативным требованиям ядерной безопасности.



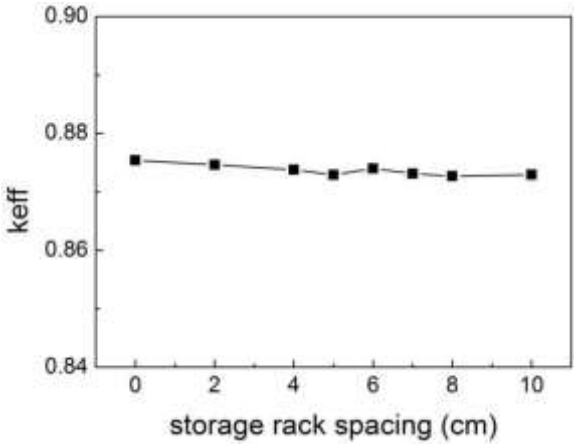


Рис.3. Функция keff от плотности воды Рис.4.Функция keff с расстоянием между стойками

Анализ аварий

В данной работе мы анализируем безопасность аварий при землетрясении и изучаем влияние безопасности критичности пула хранения отработавшего топлива на расстояние между стеллажами, вызванное землетрясением. На рис. 4 показаны результаты анализа аварии при землетрясении. Расстояние между соседними стеллажами для хранения в нормальных условиях составляет 5 см. Расчетная модель имитирует эффект реактивности, когда стойки находятся близко или далеко друг от друга. На рис. 4 показано, что изменение реактивности не очевидно при изменении расстояния между стеллажами для хранения. Это связано с тем, что расстояние между тепловыделяющими сборками, которые находятся в соседних стеллажах, поддерживается на определенном расстоянии, когда стеллажи для хранения находятся близко друг к другу. Таким образом, вставка реактивности не очевидна при изменении расстояния между стеллажами для хранения, и значение keff почти равно расчетному значению keff нормального состояния.

Вывод

На основе метода расчета Монте-Карло создана геометрическая модель

зоны I бассейна хранения отработавшего топлива малого модульного реактора, предполагающая бесконечные стеллажи для хранения типа 6×6. Поскольку температура бассейна будет влиять на плотность замедлителя, реактивность бассейна с отработавшим топливом рассчитывается с различной плотностью воды. Результаты расчетов показывают, что реакционная способность максимальна при плотности воды 1,0 г/см3. Для консервативного рассмотрения значение плотности замедлителя в бассейне принимается равным 1,0 г/см3. Значение keff составляет 0,8729 в нормальном состоянии хранения. Расстояние между стеллажами для хранения в бассейне с отработавшим топливом изменится в случае аварии при землетрясении. Также рассчитаны значения реактивности пула отработавшего топлива в предполагаемом аварийном состоянии при землетрясении. Значения keff находятся в диапазоне от 0,872 до 0,876. Как в нормальном состоянии, так и в предполагаемом аварийном состоянии при землетрясении значения keff составляют менее 0,95, что соответствует нормативным требованиям ядерной безопасности.

Список литературных источников

1. Los Alamos National Laboratory, “MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code”.
2. HAF102 "Nuclear Power Plant Design and Safety Requirements," 2004.
3. HAD102/15 "Nuclear Power Plant Fuel Handling and Storage Systems," 2007.
4. GB15146-2008 Nuclear Criticality Safety of Fissile Materials Outside Reactors, 2008.
5. RCC-P "Design and Construction Rules for System Design of 900 MW PWR Nuclear Power Plants", 1991 (amended in 1995)