

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-214-223>

УДК 621.039.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ EPR ПРИ РАБОТЕ НА МОЩНОСТИ

А. К. Мухамедиев*, И. В. Прозорова, А. А. Прозоров, Ю. А. Попов

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатову Казахстан

** E-mail для контактов: mukhamediev@nnc.kz*

Актуальность работы связана с анализом активной зоны реактора типа EPR (European Pressurized Reactor) и описанию механизмов управления реактивностью на всех стадиях топливной кампании. Актуальность работы подчеркивается важностью верификации и валидации моделей, описывающих поведение активной зоны в динамике, для обоснования безопасности реакторов нового поколения. Отличительной особенностью работы является моделирование процессов, происходящих в активной зоне реактора поколения III+ с использованием расчетов методом Монте-Карло в программе MCNP. В ходе исследований рассмотрены как активные (регулируемые) параметры реактивности – глубина ввода управляющих стержней и концентрация борной кислоты, так и пассивные – выгорание поглотителей (гадолиния) и накопление продуктов деления. Рассмотрена группа продуктов деления, которая описывает эффекты отравления и шлакования АЗ. Выполнена сравнительная оценка параметров, влияющих на реактивность.

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность комплексной системы управления реактивностью в реакторах EPR и демонстрируют необходимость интегрированного подхода к анализу нейтронно-физических характеристик активной зоны, учитывающего как активные, так и пассивные механизмы изменения реактивности. Результаты также будут полезны для анализа и улучшения топливных кампаний как российских ВВЭР, так и зарубежных PWR-реакторов.

Ключевые слова: реактор EPR, реактивность, поглотители, продукты деления, k_{eff} .

ВВЕДЕНИЕ

Европейский реактор с водой под давлением EPR [1], рассчитанный на проектное выгорание порядка 65 ГВт·сут./тU, характеризуется конструктивными решениями, направленными на обеспечение необходимого запаса реактивности, устойчивости оболочечных материалов и управляемости температурных коэффициентов. В процессе длительной эксплуатации происходит постепенное выгорание ядерного топлива, сопровождающееся изменением его изотопного состава, нейтронного спектра и реактивности. Эти изменения оказывают существенное влияние на нейтронно-физические характеристики активной зоны, а следовательно – на показатели безопасности и эффективности реактора.

Выгорание топлива носит пространственно-неравномерный характер: различия наблюдаются между топливными сборками, расположенными вблизи отражателей, регулирующих стержней и на периферии активной зоны. В результате формируются выраженные радиальные и аксиальные градиенты плотности потока нейтронов $\Phi(r, E)$, а также неоднородности нейтронного потока. Совокупность этих факторов приводит к изменению запаса реактивности и требует учета при анализе безопасности и оптимизации топливного цикла [2].

Мировая практика эксплуатации реакторов типа EPR подтверждает их высокие эксплуатационные характеристики и востребованность в современных атомных энергетических программах. Так, на АЭС «Тайшань» (Китай) функционируют два энергоблока

с реакторами французского проекта EPR-1750, которые на сегодняшний день являются самыми мощными действующими энергетическими реакторами в мире [3].

Помимо введенных в эксплуатацию блоков в Китае, строительство аналогичных реакторов продолжается на ряде зарубежных площадок. В частности, один энергоблок возводится на АЭС «Фламанвилль» во Франции, а два – на АЭС «Hinkley Point C» в Великобритании. Кроме того, в 2021 году в Финляндии был введен в промышленную эксплуатацию реактор типа EPR на энергоблоке OL3, что стало первым вводом нового энергоблока в стране за последние сорок лет. Этот энергоблок обеспечивает около 14% национального производства электроэнергии, что подчеркивает стратегическое значение технологий EPR для устойчивого развития энергетического сектора Европы [4].

Целью исследования являлась динамика параметров активной зоны EPR при работе на мощности с использованием программного комплекса MCNP6. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить сравнительную оценку параметров, влияющих на реактивность;
2. Оценить влияние температурных изменений на эффективность нейтронных поглотителей, в частности – растворенного бора и управляющих стержней;
3. Оценить влияние нерегулируемых (пассивных) факторов на реактивность.

Полученные результаты могут быть использованы для обоснования проектных решений, оптимизации топливной кампании, а также в инженерных исследованиях, направленных на повышение эффективности и надежности эксплуатации ядерных энергетических установок.

В ходе исследований используется детализированная геометрическая модель реактора EPR. Можно было ограничиться сектором симметрии, не моделируя всю активную зону, но решено было учесть наличие несимметричных возмущающих систему факторов, влияющих на реактивность, и другие нейтронные функционалы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Реактор EPR (*European Pressurized Reactor*) – это современный энергетический реактор поколения III+, разработанный французской компанией *Framatome* (ранее *Areva*) и немецкой *Siemens*. Он представляет собой усовершенствованный тип *водо-водяного реактора под давлением (PWR)* с повышенными требованиями к безопасности, экономичности и длительности топливной кампании. В связи с тем, что EPR рассчитан на *длительную эксплуатацию между перезагрузками топлива (до 18–24 месяцев)*, это требует значительного начального запаса реактивности, чтобы обеспечить критичность реактора в течение всего цикла.

Ключевые факторы, которые обеспечивают высокий запас реактивности [5], а также меры по компенсации избыточной реактивности:

- высокая плотность загрузки топлива;
- в EPR используют топливо с относительно высоким обогащением урана (до 3,25% по U-235), т.е. изначально в АЗ больше делящегося материала, что приводит к избытку реактивности в начале кампании, который необходимо компенсировать;
- для контроля высокого начального запаса реактивности, в топливо добавляют *выгорающие поглотители (гадолиний Gd_2O_3 в составе топливных таблеток)*, которые корректируют нейтронный баланс в активной зоне и частично компенсируют падение реактивности из-за выгорания топлива;
- в EPR применяется *химическое регулирование реактивности* с помощью борной кислоты, растворенной в воде первичного контура. В начале цикла концентрация бора высокая, и по мере выгорания топлива ее постепенно уменьшают.
- непосредственно управление реактором осуществляется с помощью *регулирующих стержней*, расположенных по всей активной зоне реактора.

В модели MCNP реактора использованы стандартные характеристики активной зоны и ТВС: 241 сборка типа 17×17 , высота активной зоны 420 см, эквивалентный диаметр 376,7 см, водяной отражатель по пе-

риметру, а также топливные сборки типов А, В и С с обогащением 2,0–3,25% по U-235. В расчетах учтено до 28 твэлов с Gd_2O_3 (2–8 % масс.) в соответствии с проектными ограничениями, а также конструкция управляющих стержней на основе сплава Ag–In–Cd.

Все эксплуатационные параметры заданы в соответствии с типичными проектными характеристиками EPR: номинальная тепловая мощность 4590 МВт, давление в первом контуре около 155 бар, температура теплоносителя на входе в активную зону ~290 °С и на выходе ~330 °С, а также стандартные температурные зависимости T_{avg} и рабочий диапазон концентрации борной кислоты. Эти условия используются как граничные параметры при моделировании нейтронно-физических характеристик и выгорания топлива.

В расчетной методике использованы 2 характеристики активной зоны: реактивность ρ (и её изменение $\Delta\rho$) и концентрация борной кислоты.

Реактивность, как интегральная характеристика состояния активной зоны, может быть приближенно представлена в виде обобщенной зависимости по формуле (1) [6]:

$$\rho = \rho(l, c, g, w_p) \quad (1)$$

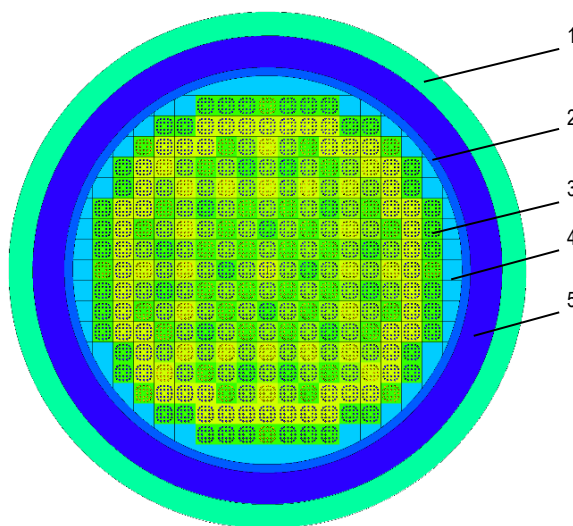
где: ρ – реактивность активной зоны; l – глубина ввода управляющих стержней; c – концентрация борной кислоты в теплоносителе; g – массовая доля гадолиния в топливе; w_p – выгорание топлива или доля накопленных продуктов деления.

Среди переменных в уравнении (1) можно выделить две принципиально разные группы. Параметры l (глубина ввода регулирующих стержней) и c (концентрация борной кислоты) напрямую регулируются в ходе оперативного управления реактором. Напротив, g (массовая доля гадолиния) и w_p (доля выгорания топлива) – это параметры, которые изменяются пассивно в ходе кампании и не регулируются в реальном времени. В таблице 1 дана сводная оценка всех 4 параметров по восьми критериям, от степени управляемости и скорости изменения до влияния на реактивность и роли в обеспечении безопасности.

Изменения таких параметров, как концентрация бора или глубина ввода стержней, оказывают значительное влияние на реактивность, особенно при первой загрузке свежего топлива. Влияние продуктов деления, таких как ксенон, имеет сложную, нелинейную динамику. Для оценки этих эффектов были выполнены расчеты с использованием метода Монте-Карло в программе MCNP [7, 8] (рисунок 1), что позволило учесть все особенности изменения реактивности в различных условиях эксплуатации. Эти процессы играют важную роль в управлении реактивностью и критичностью реактора.

Таблица 1. Сравнительная оценка параметров, влияющих на реактивность

Критерий	Управляющие стержни	Борная вода	Гадолиний	Продукты деления
Регулируемость	полностью регулируемые	регулируется концентрацией раствора	не регулируется после загрузки	не регулируются
Скорость воздействия	высокая, секунды	средняя, минуты	низкая, недели-месяцы	зависит от режима, не поддается управлению
Продолжительность действия	пока стержни находятся в активной зоне	пока поддерживается концентрация	до полного выгорания поглотителя	до распада или выгорания продуктов деления
Обратимость действия	полностью обратимо	обратно изменением концентрации	необратимо	необратимо
Механизм действия	механический ввод/вывод поглотителя	химическое изменение нейтронного поглощения теплоносителя	поглощение нейтронов в топливе	поглощение нейтронов накопившимися продуктами деления
Тип поглотителя	выгораемый, подлежит замене	растворимый в теплоносителе	выгораемый, встроенный в топливо	выгораемый, накапливаемый в топливе
Влияние на распределение мощности	локальное, по зонам	равномерное по активной зоне	локальное, вблизи таблеток с Gd	локальное, по распределению делений
Тип воздействия на реактивность	регулируемое	активное	пассивное	пассивное



1 – корпус реактора, 2 – шахта реактора, 3 – активная зона, 4 – отражатель, 5 – замедлитель

Рисунок 1. Геометрическая модель активной зоны реактора EPR

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Контроль реактивности реактора. Поглотители нейтронов

Все параметры реактора были рассчитаны при установленном температурном режиме, соответствующем номинальной мощности, что обеспечивает эффективность модели и точность анализа в условиях стабильного горячего состояния. Это состояние принято в качестве базового для дальнейших исследований.

В рамках дальнейшего анализа будет уделено некоторое внимание влиянию температурных изменений на эффективность нейтронных поглотителей, в частности – растворенного бора и управляющих стержней. Куда более интересным представляют собой динамические изменения реактивности в процессе эксплуатации реактора, особенно влияние выгорания топлива и накопление продуктов деления.

Кампания реактора начинается с загрузки свежего топлива, при этом для компенсации начального избытка реактивности используется раствор борной кислоты. В качестве рабочего ориентира принято значение 1200 ppm, характерное для PWR-типов с выгорающими добавками [9]. При полностью извлеченных регулирующих стержнях, значение k_{eff} для холодного реактора составляет 1,01918, однако с повышением температуры топливных элементов k_{eff} падает до 1,01647 при разогреве до 600 K (рисунок 2). Тем не менее, нельзя не отметить влияние повышения температуры замедлителя – максимальное влияние на повышение реактивности достигается при 550 K, а при 525 K значение k_{eff} достигает максимума 1,01921. При выходе реактора на горячее состояние k_{eff} снижается вплоть до 1,00871 ($T = 900$ K) и при критическом состоянии 1,00199 и ниже ($T > 1200$ K), что вполне соответствует прогнозируемым значениям реактивности данного типа реактора.

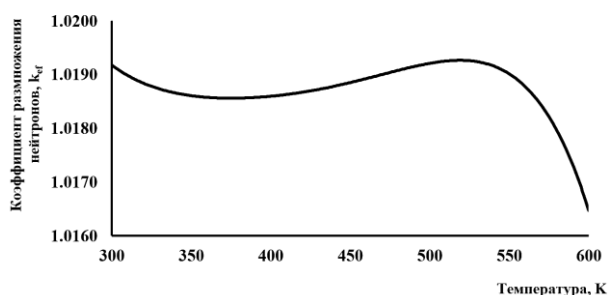
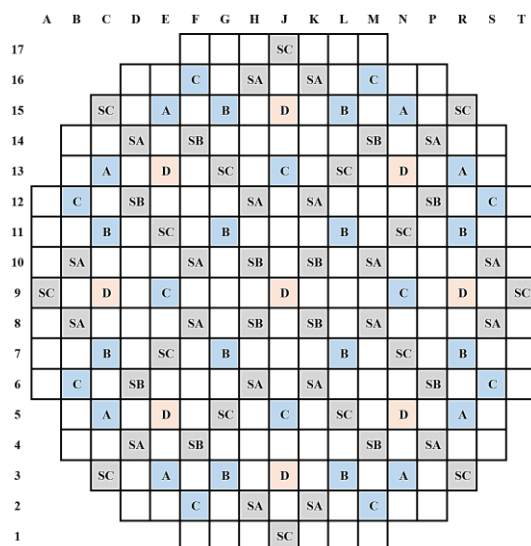


Рисунок 2. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от температуры

Регулируемые средства управления реактивностью

Стержни управления. Рассмотренная выше, избыточная реактивность была получена без учета стержней регулирования и стержней аварийной защиты. Однако для более точного управления реактивностью и обеспечения стабильной работы реактора, особенно с учетом изменения характеристик топлива и потребностей в регулировке мощности, важно учитывать роль регулирующих стержней [10].



A, B, C, D – регулирующие стержни;
SA, SB, SC – стержни аварийной защиты

Рисунок 3. Схема расположения управляющих стержней

В действительности, в реакторе (рисунок 3) используются две группы управляющих стержней: регулирующие (A, B, C и D) и аварийные (SA, SB и SC), отличающиеся способом и целью ввода, но обе группы предназначены для контроля реактивности. Из 241 ТВС в 89 расположены управляющие стержни (по 24 шт.), при этом такие ТВС объединены в группы: A B C D – регулирующие стержни и SA SB SC – стержни аварийной защиты. Группа D регулирующего типа может быть использована для специфических задач, например для контроля распределения плотности потока и/или энерговыделения в АЗ реактора.

Расчеты k_{eff} и ρ для управляющих стержней выполнены для состояния реактора, при котором тепловая мощность составляет 4590 МВт, концентрация борной кислоты в воде составляет 1200 ppm, т.е. уравнение (1) примет следующий вид:

$$\rho = \rho(l, c, t) = \rho_{c,g,t}(l_r, l_s). \quad (2)$$

Для расчета стержней регулирования стержни аварийной защиты учитываться не должны (извлечены):

$$\rho_r = \rho_{c,g,t}(l_r), \quad (3)$$

где: l_r – стержни регулирования, l_s – стержни аварийной защиты.

Стержни аварийной защиты принимаются в качестве базового средства обеспечения безопасности, предназначены для мгновенного сброса реактивности в любой момент работы реактора и зачастую не регулируются по высоте (глубине ввода). В таблице 2 отображены ключевые значения k_{eff} и изменения реактивности $\Delta\rho$, как интегральные характеристики при работе реактора на полной мощности, обеспечивающие безопасную работу, где:

$$\Delta\rho = \frac{k_2 - k_1}{k_1 k_2}. \quad (4)$$

Таблица 2. Влияние стержней аварийной защиты на реактивность

Стержни аварийной защиты	Регулировочные стержни					
	извлечены, 1200 ppm			вставлены, 1200 ppm		
	k_{eff}	$\Delta\rho$, pcm	$\Delta\rho_i$, pcm	k_{eff}	$\Delta\rho$, pcm	$\Delta\rho_i$, pcm
–	1,00199	–	–	0,95750	–	–
SA (20)	0,97560	2700	5,9	0,92365	3827	8,3
SB (12)	0,99036	1172	4,2	0,94397	1497	5,4
SC (16)	0,98985	1224	3,3	0,94517	1362	3,7
SABC (48)	0,95063	5392	4,9	0,88221	8913	8,1
Итоговое значение $\Delta\rho$	13550					

Расчеты эффективности систем управления реактивностью показали, что полный ввод всех аварийных стержней (группы SA, SB, SC) приводит к снижению реактивности на величину порядка 5400 pcm при полностью извлеченных регулирующих стержнях. В случае предварительного ввода регулирующих стержней (группы A–D), вклад аварийных стержней возрастает до 8900 pcm.

В нашем анализе система управления реактивностью обеспечивает $SDM > 5000$ pcm, что превышает минимальную подкритичность, установленную для условий работы реактора на мощности, вплоть до перегрузки топлива [11], и подтверждает высокий уровень безопасности.

Для штатного регулирования мощности используются стержни групп A–D, позволяющие плавно управлять реактором в рабочих режимах. Ниже пред-

ставлена таблица 3, где учтено влияние управляющих стержней, а на рисунке 4 представлены соответствующие значения для отдельных стержней управления.

Таблица 3. Влияние управляющих стержней на реактивность

Глубина погружения, см	Группа				
	A	B	C	D	ABCD
0	1,00202				
30	1,00165	1,00109	1,00132	1,00128	1,00050
60	1,00120	1,00039	1,00071	1,00077	0,99988
90	1,00096	1,00002	1,00017	1,00035	0,99963
120	1,00061	0,99963	0,99990	0,99999	0,99928
150	1,00035	0,99924	0,99951	0,99975	0,99887
180	1,00003	0,99874	0,99901	0,99927	0,99838
210	0,99974	0,99806	0,99843	0,99878	0,99746
240	0,99941	0,99729	0,99778	0,99818	0,99643
270	0,99892	0,99612	0,99678	0,99736	0,99477
300	0,99853	0,99459	0,99553	0,99649	0,99202
330	0,99809	0,99254	0,99406	0,99545	0,98741
360	0,99792	0,98973	0,99265	0,99444	0,97841
390	0,99766	0,98774	0,99155	0,99338	0,96211
420	0,99754	0,98714	0,99119	0,99314	0,95712

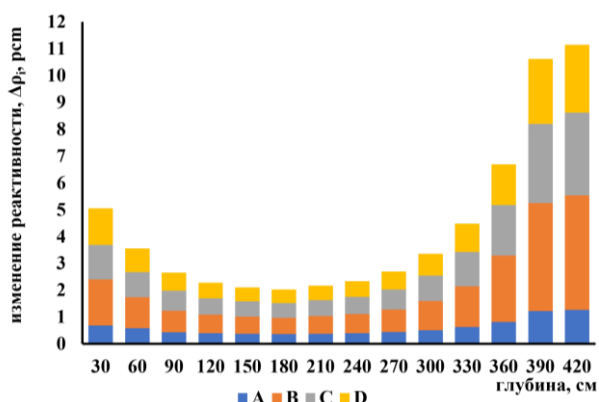


Рисунок 4. Влияние отдельных стержней управления на изменение реактивности

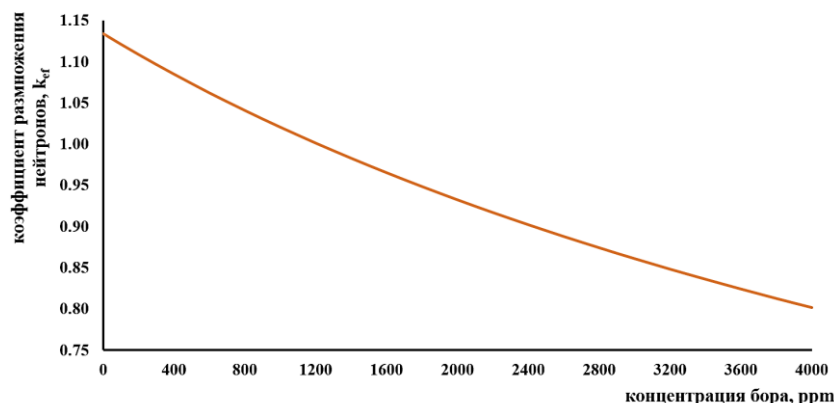


Рисунок 5. Влияние концентрации бора на реактивность

Борное регулирование. Концентрация бора определяет базовый уровень реактивности на старте кампании и последовательно снижается в процессе выгорания топлива. В отличие от стержней, бор распределен по объему и действует мягко, однако его эффективность убывает с ростом концентрации из-за насыщения нейтронного поля и сдвига спектра (рисунок 5). Несмотря на это, растворенный бор остается основным инструментом для долгосрочного регулирования и компенсации выгорания.

Для количественного анализа зависимости реактивности от борирования были вычислены значения $\Delta\rho$ и представлены в единицах pcm, такие как абсолютные значения $\Delta\rho_{abs}$ и $\Delta\rho_{rel}$ отражают величину отрицательной реактивности.

Действительно, для достижения критического состояния реактора достаточно повысить содержание бора до 1200 ppm. При таком насыщении, отрицательная реактивность $\Delta\rho$ составляет 11718, что не превышает заложенного ресурса регулирующих стержней.

Отметим, поскольку бор вводится в виде раствора в теплоносителе, т.е. в воде, его эффективность зависит от плотности воды. При повышении температуры и снижении плотности уменьшается не только замедление нейтронов, но и поглощение бора.

В дальнейшем, с точки зрения ядерной безопасности, анализ осуществляется не в терминах реактивности (ρ , $\Delta\rho$), а через концентрацию борной кислоты, что обеспечивает более удобную сопоставимость результатов и упрощает интерпретацию данных.

Нерегулируемые (пассивные) факторы влияния на реактивность

После рассмотрения внешних механизмов управления реактивностью обратимся к внутренним источникам ее изменения. Эти процессы связаны с необратимым изменением нуклидного состава топлива: выгоранием введенных поглотителей (например, гадолиния) и накоплением продуктов деления с высокими сечениями захвата.

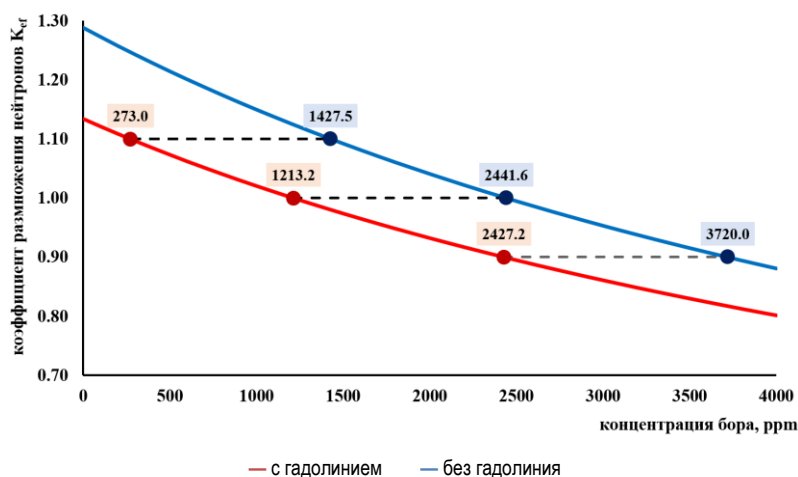


Рисунок 6. Влияние гадолиния на реактивность

Нерегулируемые поглотители нейтронов присутствуют в топливе с начала кампании либо нарабатываются в процессе его работы. К первой группе относятся заложенные изотопы, такие как гадолиний, ко второй – поглотители среди продуктов деления. Их динамика противоположна: гадолиний выгорает, уменьшая поглощение тепловых нейтронов, а продукты деления накапливаются, усиливая его. Несмотря на эти различия, их воздействие на нейтронный баланс подчиняется одному и тому же физическому механизму.

Вклад таких поглотителей в нейтронный баланс определяется их микроскопическими сечениями захвата и изменением концентрации во времени, что, в свою очередь, зависит от режима работы реактора на протяжении всей кампании. Для количественной оценки этих процессов были выполнены расчеты в MCNP, где заложенные изотопы и продукты деления учитываются в рамках одной реализации модели – через изменение макроскопических сечений поглощения в соответствующих зонах активной зоны, без разделения по происхождению нуклидов.

Дальнейшее моделирование в MCNP опирается на ранее заданный режим работы реактора. Стандартные (активные) инструменты управления, такие как стержни и бор, демонстрируют предсказуемую динамику, тогда как гадолиний и накопленные продукты деления формируют основу долгосрочной эволюции состава топлива и требуют более детального анализа.

Гадолиний. Если бор и стержни предназначены для гибкого управления реактивностью, то гадолиний, прежде всего, для компенсации избытка начальной реактивности [12, 13]. Он не регулирует реактор и его поведение по ходу кампании напрямую. Гадолиний необходим для безопасного старта кампании и корректной регулировки реактивности на ее начальном этапе (рисунок 6).

Локализация гадолиния внутри отдельных твэлов и его выгорание по мере кампании делают невозможным установление простой линейной зависимости между массой гадолиния и высвобождаемой реактивностью. Его эффект изменяется во времени и определяется динамикой накопления отдельных радионуклидов, поэтому корректное аналитическое прогнозирование крайне затруднено. В практических расчетах было принято оценивать влияние гадолиния эквивалентной концентрацией борной кислоты в теплоносителе.

На основе расчетов выведено квадратичное уравнение интерполяции (5), позволяющее в дальнейшем использовать его для количественной оценки вклада гадолиния при рассмотрении продуктов деления:

$$\Delta c_k = -475k^2 + 258,5k + 1444,9. \quad (5)$$

Поскольку гадолиний вводится в топливные таблетки в виде Gd_2O_3 , распределенного по всей длине твэла в отдельных ТВС, для корректного прогнозирования нейтронного баланса и радионуклидного состава и учета его нелинейного выгорания необходимо рассчитать динамику изменения масс (рисунок 7) всех его стабильных и радиоактивных изотопов [14] в течение топливной кампании.

Среди всех изотопов гадолиния наибольший вклад в поглощение тепловых нейтронов дают ^{156}Gd и ^{158}Gd . На протяжении большей части кампании их суммарный вклад составляет 100% → 91% от общего содержания гадолиния в топливе. Минимальное значение наблюдается на 10-м месяце работы и достигает 85%, что связано с разной скоростью выгорания этих изотопов по сравнению с остальными (что видно на графике выше). Заметим, что после 2-летней кампании незначительный прирост ^{155}Gd и ^{157}Gd обусловлен радиоактивным распадом ^{155}Eu и ^{157}Eu [15].

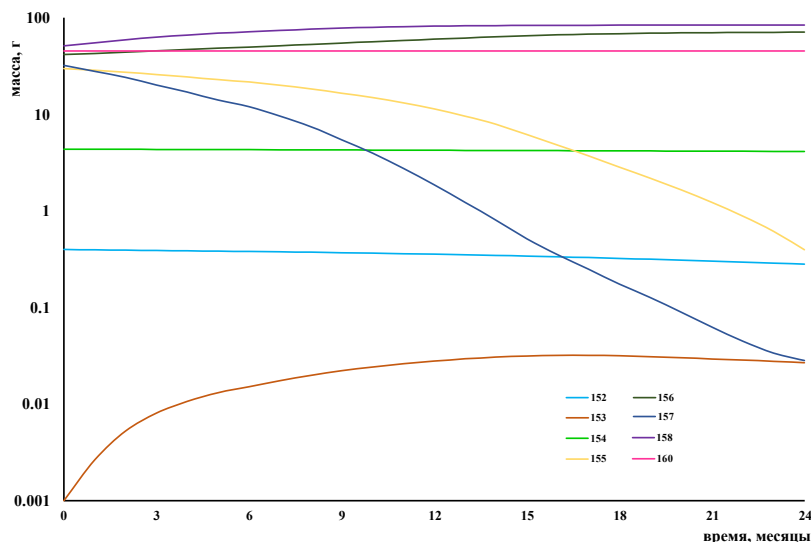


Рисунок 7. Выгорание изотопов гадолиния в активной зоне

Продукты деления. Определяющим фактором, влияющим как на снижение реактивности, так и на продолжительность топливной кампании, является процесс выгорания (деление и радиационный захват) топлива. Но т.к. в процессе выгорания происходит накопление продуктов деления (ПД), оно и определяет долговременную динамику, на фоне которой действуют все остальные средства управления. Начальные условия кампании соответствовали стандартной годовой загрузке топлива, однако моделирование выполнено на двухлетнем интервале (рисунок 8), что обеспечило реалистичную оценку долгосрочного влияния ПД.

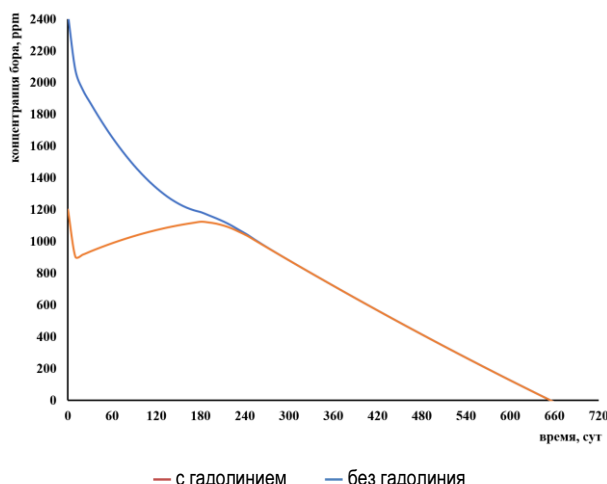


Рисунок 8. Влияние ПД на концентрацию бора

Разница между кривыми эквивалентна эффекту растворенного бора с повышением концентрации примерно на 1200 ppm на начальном этапе, что позволяет напрямую сопоставить действие гадолиния с традиционными средствами управления. Спустя три месяца

его влияние снижается примерно втрое, а еще через три месяца становится сопоставимым с эффектом порядка 60 ppm. Такая динамика наглядно подчеркивает критическую роль выгорающего поглотителя на ранних стадиях кампании и необходимость учета его вклада при анализе управляемости реактора.

ПД являются главным фактором долговременного снижения реактивности активной зоны. Их накопление определяет не только глубину выработки топлива, но и фактическую продолжительность кампании, накладывая прямые ограничения на эксплуатацию реактора. В отличие от активных инструментов регулирования (стержней, бора или выгорающих поглотителей), эффект ПД не поддается физическому управлению, а может быть лишь компенсирован.

С начала кампании реактивность падает практически в первые дни, к концу второй недели наблюдается значительный провал реактивности, связанный с быстрым накоплением наиболее эффективных нейтронных поглотителей среди продуктов деления. На этом этапе падение компенсируется преимущественно стержнями управления, что позволяет удерживать реактор в штатном режиме.

Далее, к шестому месяцу, динамика снижения реактивности стабилизируется и переходит в близкую к линейной зависимость. Этот тренд формирует базовый фон кампании, на котором действуют все остальные инструменты регулирования. К концу первого года запас реактивности сокращается до уровня чуть выше 600 ppm. Этот момент совпадает с плановой частичной перегрузкой топлива, что наглядно подтверждает определяющую роль продуктов деления в установлении эксплуатационных границ. Одновременно становится заметным истощение части ресурса стержней, активно задействованных на начальных стадиях кампании.

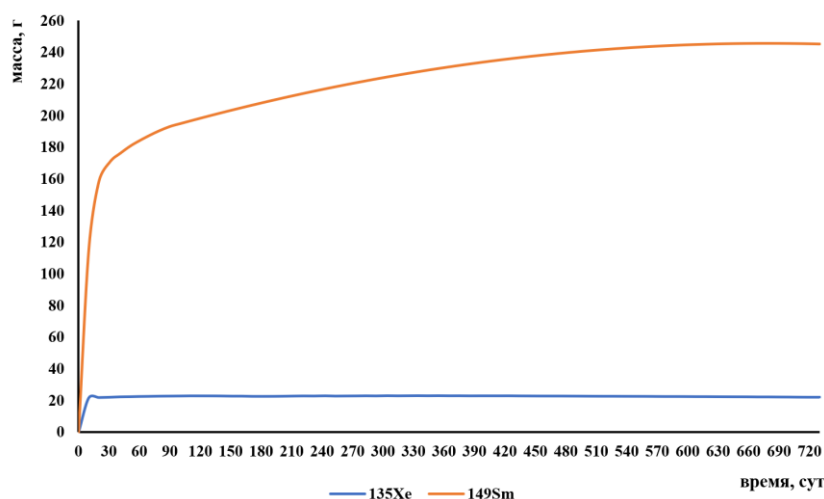


Рисунок 9. Динамика накопления основных «нейтронных поглотителей»

Таким образом, именно продукты деления задают предельные условия для длительности кампании. Они формируют долговременную динамику, на фоне которой действуют все остальные средства управления, и определяют как пределы безопасной эксплуатации, так и требования к планированию топливных загрузок. Масса образованных продуктов деления практически пропорциональна массе выгоревшего топлива и составляет $\sim 4,76$ кг/сут.

Совокупный эффект ПД определяется сравнительно узкой группой изотопов с аномально большими сечениями поглощения. Прежде всего это ^{135}Xe и ^{149}Sm [16], при выгорании порядка 4590 МВт·сут. их суммарное количество составляет около 10% от общего количества продуктов деления. Однако за счет высоких значений сечений захвата $\sigma \sim 2,6 \cdot 10^6$ барн для ^{135}Xe и $\sigma \sim 4 \cdot 10^4$ барн для ^{149}Sm , они формируют $\sim 70\%$ падения реактивности. Характерная динамика накопления показана на рисунке 9.

На представленном графике выделяются два принципиально различных участка, соответствующих действию разных нейтронных поглотителей.

^{135}Xe формирует краткосрочную фазу. Его концентрация возрастает в течение первых суток и стабилизируется на уровне, создающем заметное падение реактивности. Равновесное содержание ^{135}Xe зависит от режима мощности, при работе на номинальной мощности масса фиксируется на значении 22,5 г ко второй неделе. Именно этим объясняется глубокое «ксеноновое дно» на ранних этапах кампании.

^{149}Sm проявляет себя на более длительных временах. Он образуется через цепочку распадов ^{149}Pm и не выгорает в заметной степени в нейтронном поле. Поэтому его концентрация растет равномернее с шестого месяца, к этому моменту влияние ^{149}Sm сопоставимо с запасом борной воды, а к концу кампании именно он становится определяющим фактором долговременного снижения реактивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования показано, что управление реактивностью реактора EPR требует комплексного учета как регулируемых, так и пассивных факторов [10, 17]. К регулируемым параметрам относятся положение управляющих стержней и концентрация борной кислоты, которые обеспечивают оперативное и гибкое регулирование реактивности в течение топливной кампании. Пассивные факторы, включая выгорание встроенных поглотителей (гадолиния) и накопление ПД с высокими сечениями захвата нейтронов (прежде всего ^{135}Xe и ^{149}Sm), определяют долговременную динамику снижения реактивности и задают эксплуатационные ограничения по длительности кампании.

Расчеты показали, что полный ввод всех аварийных и регулирующих стержней способен снизить реактивность на 13550 pcm, что демонстрирует высокую эффективность системы управления. В частности, полный ввод только регулирующих стержней снижает реактивность на 5400 pcm, что также превышает минимальное требование по shutdown margin (≥ 5000 pcm), обеспечивая значительный запас безопасности при управлении реактором.

Борное регулирование обеспечивает плавное и равномерное управление реактивностью на протяжении всего топливного цикла. Концентрация борной кислоты в теплоносителе задает базовый уровень отрицательной реактивности, на старте кампании для компенсации избытка начальной реактивности применяется значение около 1200 ppm, что позволяет безопасно достичь критического состояния реактора при полностью извлеченных регулирующих стержнях. По мере выгорания топлива концентрация бора постепенно снижается, компенсируя падение реактивности и обеспечивая устойчивую работу реактора. Начального запаса борной кислоты хватает более чем на 20 месяцев работы, что превышает полуторный цикл перегрузки топлива.

Особое внимание уделено роли гадолиния и ПД. Гадолиний, как выгорающий поглотитель, обеспечивает компенсацию начального избытка реактивности, балансируя накопление продуктов деления, в частности ^{135}Xe и ^{149}Sm формирующих долгосрочное снижение реактивности. Учет этих эффектов является критически важным для точного прогнозирования поведения реактора и планирования топливных загрузок.

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность комплексной системы управления реактивностью в реакторах EPR и демонстрируют необходимость интегрированного подхода к анализу нейтронно-физических характеристик активной зоны, учитывающего как активные, так и пассивные механизмы изменения реактивности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. U.S. EPR Fuel Assembly Mechanical Design, AREVA NP Inc., May 2013.
2. Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses, Oak Ridge National Laboratory, MARCII 2003.
3. АЭС «Тайшань» с самыми мощными в мире реакторами EPR-1750 возобновила свою работу // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». [AES "Tayshan" s samymi moshchnymi v mire reaktorami EPR-1750 vozobnovila svoyu rabotu // Nauchno-delovoy portal "Atomnaya energiya 2.0". (In Russ.)] – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/06/15/114775>
4. <https://leg.co.ua/stati/pervyy-v-evrope-epr-dostig-pervoy-kritichnosti.html>
5. Serge Marguet, The Physics of Nuclear Reactors. – 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59560-3>
6. Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. – 75 p. – (IAEA Safety Standards Series; No. SSG-52).
7. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Volume I. II. III. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos. New Mexico 2003.
8. D. B. Pelowitz and et. MCNP6 User's Manual. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-CP-13-00634. Los Alamos, NM, USA. May 2013.
9. U.S. EPR FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT. – P. 4.3.1–4.3.94.
10. Heba K. Louis, Riham M. Refeat, Mohga I. Hassan, Control rod shadowing effect in PWR core utilizing Urania-Gadolinia fuel // Progress in Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 142. – Art. 103993. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103993>
11. Safety margins of operating reactors, IAEA, January 2003.
12. Structure of Nuclear Power Plant Design Characteristics in the IAEA Power Reactor Information System (PRIS) // International Atomic Energy Agency, March 2007.
13. F. Rocchi, A. Guglielmelli, S. Lo Meo, Implementation of a Cross Section Evaluation Methodology for Safety Margin Analysis: Application to Gadolinium Odd Isotopes // Report Ricerca di Sistema Elettrico, Sep 2016.
14. <https://www.ndc.jaea.go.jp/cgi-bin/Tab80WWW.cgi?iso=Gd153&lib=J40>
15. Bolukbasi Mustafa, Middleburgh Simon, Dahlfors Marcus, Lee Bill, Performance and economic assessment of enriched gadolinia burnable absorber // Progress in Nuclear Energy. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103752>
16. S. Dawahra, K. Khattab, G. Saba, Calculation and comparison of xenon and samarium reactivities of the HEU, LEU core in the low power research reactor // Applied Radiation and Isotopes. –2015. –Vol. 101. – P. 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.03.015>
17. Fuel and Core Design Assessment of the EDF and AREVA UK EPR™ Reactor, Office for Nuclear Regulation An agency of HSE, 10 November 2011.

ҚҰАТТА ЖҰМЫС ІСТЕУ КЕЗІНДЕ EPR АКТИВТІ АЙМАҒЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ДИНАМИКАСЫН ЗЕРТТЕУ

А. К. Мұхамедиев*, И. В. Прозорова, А. А. Прозоров, Ю. А. Попов

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы», Курчатов, Қазақстан

* Байланыстар үшін E-mail: mukhamediev@nnc.kz

Жұмыстың өзектілігі EPR (European Pressurized Reactor) типті реактордың активті аймағын талдаумен және отын науқанының барлық кезеңдеріндегі реактивтілікті басқару механизмдерін сипаттаумен байланысты. Зерттеу барысында реактивтіліктің белсенді (реттелетін) параметрлерін қарастырады – басқару біліктерін енгізу тереңдігі және бор қышқылының концентрациясы, сонымен қатар пассивті – жанып кететін жұтқыштардың күйіп кетуі (гадолиний) және бөліну өнімдерінің жинақталуы. Реактивтілікке әсер ететін параметрлерді салыстырмалы бағалау жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері EPR реакторларындағы реактивтілікті басқарудың кешенді жүйесінің жоғары тиімділігін растайды және реактивтіліктің өзгеруінің белсенді және пассивті механизмдерін ескере отырып активті аймақтың нейтрондық-физикалық сипаттамаларын талдауға интеграцияланған тәсілдің қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: EPR реакторы, реактивтілік, жұтқыштар, бөлу өнімдері, k_{ef} , MCNP.

ANALYSIS OF CORE PARAMETER DYNAMICS IN EPR DURING POWER OPERATION

A. K. Mukhamediev*, I. V. Prozorova, A. A. Prozorov, Yu. A. Popov

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: mukhamediev@nnc.kz*

The relevance of this study is associated with the analysis of the reactor core of the EPR (European Pressurized Reactor) and the description of reactivity control mechanisms at all stages of the fuel cycle. The research considers both active (controllable) reactivity parameters such as control rod insertion depth and boric acid concentration, and passive parameters, including the burnup of burnable absorbers (gadolinium) and the accumulation of fission products. A comparative assessment of the parameters affecting reactivity has been performed.

The results of the study confirm the high efficiency of the comprehensive reactivity control system in EPRs and demonstrate the necessity of an integrated approach to the analysis of the neutronic characteristics of the reactor core, taking into account both active and passive mechanisms of reactivity change.

Keywords: *EPR reactor, reactivity, absorbers, fission products, k_{ef} , MCNP.*