

МНОГОСЛОЙНЫЕ ОТРАЖАТЕЛИ НЕЙТРОНОВ

Шмелев А.Н.¹, Ансэ В.А.¹, Куликов Г.Г.², Куликов Е.Г.¹

¹ НИЯУ МИФИ,

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

² Госкорпорация «Росатом»,

119017, г. Москва, ул. Большая Ордынка, 24



Рассматривается использование многослойных отражателей нейтронов для замедления кинетики быстрого реактора. Отражатель представляется в виде трех слоев: транспортный, замедляющий и отражающий. Первый слой должен состоять из материала с тяжелым атомным весом для сохранения быстрого спектра в активной зоне и глубокого проникновения нейтронов в отражатель. Последующие слои отражателя должны содержать материалы со все более легким атомным весом, чтобы эффективно замедлять и отражать нейтроны, что позволит сократить общую толщину отражателя. При этом все материалы должны обладать экстремально низким сечением поглощения нейтронов, чтобы уменьшить их неизбежные потери в физически толстых отражателях. С учетом выдвинутых требований предлагаются конкретные материалы (^{208}Pb , ^{208}PbO , $^{208}\text{Pb}_3\text{O}_4$, $^{208}\text{PbO}_2$, $^{208}\text{Pb}^{(15)\text{NO}_3}_2$, $^{208}\text{Pb}^{13}\text{CO}_3$, $^{208}\text{PbCO}_3$, ^{13}C , ^{12}C , D_2O) для использования в качестве отражателя нейтронов в быстром реакторе для замедления его кинетики и повышения ядерной безопасности. Выполненные исследования говорят о том, что при разработке новых быстрых реакторов целесообразно поставить задачу о формировании желательных характеристик нейтронов отражателя (как по их доле и времени запаздывания, так и по спектру энергии), которые влияют на характер развития процессов кинетики. Эта ситуация радикальным образом отличается от традиционных эмиттерных запаздывающих нейтронов, влияние на которые крайне ограничено или вовсе отсутствует.

Ключевые слова: быстрый реактор, отражатель нейтронов, запаздывающие нейтроны, ^{208}Pb , графит.

Для цитирования: Шмелев А.Н., Ансэ В.А., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г. Многослойные отражатели нейтронов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.03>

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ

Для достижения максимальной временной задержки нейтронов в отражателе необходимо, чтобы они как можно глубже проникли в отражатель, замедлились в нем, отразились в сторону активной зоны и вернулись в нее. Только будучи замедленными, они будут долго возвращаться. Таким образом, этот процесс можно условно разделить на четыре этапа: глубокое проникновение, замедление, отражение и возвращение. Разумеется, в действительности все эти процессы идут одновременно в любом материале. В соответствии с этими этапами отражатель логично представить в виде трех слоев: транспортный, замедляющий и отражающий.

Первый слой (транспортный) должен обеспечить глубокое проникновение нейтронов, а также их последующее возвращение через него. Известно, что чем больше атомный вес материала, тем меньше доля энергии, которую теряет нейтрон при упругом рассеянии и тем большее число рассеяний ему потребуется для замедления, а значит, тем глубже он сможет проникнуть в отражатель. Так, например, ступенька замедления (максимальная доля потери энергии) нейтронов при упругом рассеянии в свинце более чем на порядок меньше, чем на легких нуклидах (табл. 1).

Таблица 1

Нейтронные характеристики ядер

Нуклид, атомный вес (A)	Макс. доля потери энергии при упругом рассеянии, %	Тепловое сечение захвата σ_c^{th} , мб	Резонансный интеграл $I_r + 1/V$ захвата, мб	Сечение упругого рассеяния σ_s , (б) при энергии нейтронов	
				0.5 эВ	0.1 МэВ
2D	88.9	0.550	0.251	3.43	3.19
^{12}C	28.4	3.861	1.766	4.75	4.41
^{13}C	26.5	1.369	0.628	4.20	3.90
^{15}N	23.4	0.024	0.029	4.60	4.27
^{16}O	22.1	0.190	0.159	3.85	3.65
^{208}Pb	1.9	0.230	0.771	11.4	9.82

Кроме того средний угол упругого рассеяния тем меньше, чем выше энергия нейтронов и чем больше атомный вес среды [1], т.е. высокоэнергетичные нейтроны утечки в результате рассеяния на тяжелых ядрах отражателя будут преимущественно рассеиваться вперед, т.е. углубляться в отражатель. Все это означает, что в качестве первого слоя отражателя целесообразно использовать материалы с большим атомным весом. Кроме того активную зону быстрого реактора нельзя окружать отражателем с малым атомным весом, так как это превратит его по спектру нейтронов в тепловой реактор.

Функцию второго слоя (замедляющего), как известно, хорошо выполняют материалы с легким атомным весом. Если эти материалы характеризуются еще и малым поглощением нейтронов, то они успешно совмещают в себе и функцию отражающего слоя.

Таким образом, отражатель можно представить в виде двух слоев: транспортного и замедляюще-отражающего. Причем, чтобы вернуть по возможности наибольшее число нейтронов все слои отражателя должны характеризоваться малым сечением поглощения нейтронов. Согласно изложенным требованиям для первого (транспортного) слоя отражателя, наиболее подходящим материалом представляется изотоп ^{208}Pb с большим атомным весом и малым поглощением нейтронов. Чтобы улучшить свойства такого отражателя, его второй слой должен обладать малым атомным весом и еще меньшим

сечением поглощения. К сожалению, выбор невелик. К таким нуклидам относятся только кислород, ^{15}N и дейтерий. Рассмотрен также углерод, следующий после кислорода нуклид по малости сечения поглощения, хотя его сечение в тепловой точке примерно в 17 раз больше, чем у ^{208}Pb .

В таблице 1 приведены нейтронные характеристики этих нуклидов [1]. Видно, что у них чрезвычайно малое сечение захвата не только в тепловой точке, но также и резонансный интеграл поглощения (доли миллибарн), в то время как их сечения упругого рассеяния составляют величины в несколько барн. Это означает, что нейтроны в материалах из этих нуклидов будут преимущественно замедляться в результате рассеяния, а не поглощаться (бесполезные потери).

В таблице 2 приведены нейтронные характеристики материалов [1], которые состоят из нуклидов, представленных в предыдущей таблице, т.е. с экстремально низким сечением поглощения. Показана основная характеристика отражателей – величина альбеда (в %) тепловых нейтронов в плоской геометрии. Видно, что при толщине отражателя всего 40 см уже около 90% нейтронов возвращаются обратно, причем независимо от того, является ли материал легким по атомному весу или тяжелым. Это означает, что хорошим отражателем нейтронов является любой материал с малым сечением поглощения.

Таблица 2

Нейтронные характеристики материалов

Материал	Альbedo (%) тепловых нейтронов в плоской геометрии при толщине отражателя 40 см	Коэффициент замедления	Смещение замедляющихся нейтронов (0.1 МэВ→0.5 эВ) $\sqrt{b \cdot \tau}$, см	Смещение тепловых нейтронов $\sqrt{b \cdot L}$, см	Температура фазового перехода, °C
D ₂ O	89.7	4171	22	378	101 (кип.)
Графит	90.0	194	34	131	4200 (субл.)
^{208}Pb	91.5	476	134	834	327 (пл.)
^{208}PbO	90.9	1357	66	692	886 (пл.)
$^{208}\text{Pb}(^{15}\text{N}_2\text{O}_3)_2$	91.8	2852	46	699	270 (разл.)

Судя по коэффициенту замедления, который характеризует эффективность замедления нейтронов по отношению к поглощению, наилучшим кандидатом для второго слоя отражателя были бы тяжелая вода, а также оксид и нитрат свинца. Действительно, средняя величина смещения замедляющихся нейтронов в этих материалах, а также в графите, существенно меньше, чем в ^{208}Pb . Значит, малые толщины этих материалов способны эффективно замедлить нейтроны и тем самым сократить толщину отражателя. Это говорит за их использование в качестве второго слоя отражателя. К сожалению, у графита и тяжелой воды меньше средняя величина смещения тепловых нейтронов при их диффузии, т.е. меньше глубина, с которой могут вернуться замедленные нейтроны. Это вызвано большими сечениями поглощения графита и дейтерия по сравнению с ^{208}Pb .

Отметим, что у всех рассмотренных материалов среднее смещение тепловых нейтронов многократно превосходит среднее смещение нейтронов при их замедлении от 0.1 МэВ до 0.5 эВ. Это очень важно, поскольку означает, что быстрые нейтроны, углубившиеся в эти материалы и ставшие тепловыми, способны с большой вероятностью вернуться обратно, а не быть бесполезно потерянными в результате их захвата отражателем. Указанные значения энергий нейтронов при замедлении соответствуют средней энергии утечки

нейтронов из активной зоны быстрого реактора и эпитепловым значениям. В этих пределах сечения рассеяния рассматриваемых нуклидов почти постоянны (см. табл. 1), что позволяет существенно упростить методику оценки возраста нейтронов. Приведенные в табл. 2 величины близки, хотя и не совпадают с известными данными [2, 3]. Ценность такой оценки состоит в том, что отражает физическую суть возраста нейтронов и позволяет получить его на единой методике для оксида и нитрата свинца, данные о которых отсутствуют в литературе.

Учитывая, что $\Sigma_c \ll \Sigma_s$ (справедливо для всех нуклидов табл. 1) и средний косинус угла упругого рассеяния $\mu \approx 2/(3 \cdot A) \ll 1$ (не вполне справедливо только для дейтерия), имеем $\Sigma_{tr} = \Sigma_c + \Sigma_s \cdot (1 - \mu) \approx \Sigma_s$. При этом возраст нейтронов, замедляющихся от 0.1 МэВ до 0.5 эВ, для данных материалов можно с хорошей точностью оценить по простой формуле:

$$\tau(E_0 \rightarrow E_{rp}) = \int_{E_{rp}}^{E_0} \frac{dE}{3 \cdot \xi \cdot \Sigma_s(E) \cdot \Sigma_{tr}(E) \cdot E} \approx \frac{1}{3 \cdot \xi \cdot \Sigma_s \cdot \Sigma_{tr}} \cdot \int_{0.5 \text{ эВ}}^{0.1 \text{ МэВ}} \frac{dE}{E} \sim \frac{1}{\xi \cdot \Sigma_s^2}.$$

Учитывая, что сечение упругого рассеяния в тепловой точке слабо отличается от средней величины в интервале энергий 0.5 эВ–0.1 МэВ, длину диффузии также можно оценить по упрощенной формуле:

$$L = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot \Sigma_c^{th} \cdot \Sigma_{tr}^{th}}} \approx \frac{1}{\sqrt{3 \cdot \Sigma_c^{th} \cdot \Sigma_s^{th}}} \approx \frac{1}{\sqrt{3 \cdot \Sigma_c^{th} \cdot \Sigma_s}}.$$

Наконец, используя приближенное выражение для средней логарифмической потери энергии нейтрона при упругом рассеянии $\xi \approx 2/A$ (A – атомный вес нуклида), которое хорошо работает для углерода и более тяжелых атомов, получим следующие качественные выводы. Требование максимального проникновения нейтронов в отражатель, т.е. максимума возраста нейтронов при их замедлении, означает требование максимума их возраста:

$$\max\{\tau(E_0 \rightarrow E_{rp})\} \sim \max\left\{\frac{A}{\Sigma_s^2}\right\},$$

а требование малых потерь углубившихся замедленных нейтронов при их прохождении в результате диффузии сквозь толщу отражателя обратно к активной зоне означает максимум отношения длины диффузии к квадратному корню из возраста нейтронов:

$$\max\left\{\frac{L}{\tau}\right\} \sim \max\left\{\frac{1}{\sqrt{\Sigma_c^{th} \cdot \Sigma_s}} \frac{\Sigma_s}{\sqrt{A}}\right\} = \max\left\{\sqrt{\frac{\Sigma_s}{A \cdot \Sigma_c^{th}}}\right\} \sim \max\left\{\frac{\Sigma_s}{A \cdot \Sigma_c^{th}}\right\}.$$

Видно, что в одновременном выполнении этих двух требований заключается противоречие. Для увеличения глубины проникновения нейтронов в отражатель материал отражателя должен характеризоваться большим атомным весом и малым сечением упругого рассеяния, а для увеличения вероятности возвращения нейтронов – наоборот. Это противоречие разрешается следующим образом. Сечение упругого рассеяния увеличивается с ростом атомного веса, но существенно медленнее атомного веса (см. табл. 1). Поэтому необходимо выбирать материал с большим атомным весом. При этом второе условие можно выполнить, соблюдая первое условие, за счет выбора нуклидов с экстремально низким сечением захвата нейтронов, поскольку сечения захвата у разных

нуклидов могут отличаться на несколько порядков. Эти выводы относятся прежде всего к самому важному первому (транспортному) слою отражателя, который при физически больших толщинах способен успешно выполнять роль и второго (замедляюще-отражающего) слоя отражателя. Разумеется, желательно, чтобы и второй слой отражателя тоже отвечал этим требованиям.

СРАВНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСЛОЙНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Согласно предыдущим общим соображениям, отражатель должен состоять из материалов с малым сечением поглощения нейтронов, причем его первый слой – из материала с большим атомным весом, а второй слой должен включать в себя материалы с легким атомным весом. Тяжелая вода кипит при температуре 101°C , поэтому ее использование в качестве второго слоя отражателя быстрого реактора проблематично. Температура жидкометаллического теплоносителя в быстром реакторе на входе и выходе из активной зоны составляет примерно 420 и 540°C . Горячий теплоноситель омывает часть отражателя, прилегающего к активной зоне (первый слой отражателя). В интегральной компоновке реактора холодный теплоноситель омывает внешнюю часть отражателя (второй слой отражателя). Это означает, что с учетом некоторого запаса, температура фазового перехода второго слоя отражателя должна быть не ниже $\sim 500^{\circ}\text{C}$. Поэтому в качестве второго слоя для быстрого реактора с интегральной компоновкой из рассматриваемых материалов подходят только графит с температурой сублимации 4200°C и оксид свинца с температурой плавления 886°C . При петлевой компоновке реактора можно организовать отвод тепла от внешнего слоя отражателя. Это позволит рассматривать также и нитрат свинца с температурой разложения 270°C . В исследовательских и экспериментальных реакторах со специальной компоновкой круг таких материалов может стать еще шире.

Таким образом, для демонстрации принципиальных физических возможностей рассмотрим в качестве первого (транспортного) слоя отражателя ^{208}Pb , а в качестве второго (замедляющего и отражающего) слоя – графит, а также оксид и нитрат ^{208}Pb . Причем в качестве азота рассматривается мало поглощающий изотоп ^{15}N . Для удобства сравнения толщина всех отражателей одинакова и равна четырем метрам. Второй слой отражателя будет стоять после 1, 2 и 3 метров ^{208}Pb и иметь, соответственно, толщину 3, 2 и 1 м. Для полноты картины рассмотрены также отражатели, состоящие только из ^{208}Pb , графита, а также оксида и нитрата ^{208}Pb .

Расчеты выполнены в рамках сферической модели реактора типа БРЕСТ с помощью программы TIME26 [4] в рамках 26-группового диффузионного приближения. В качестве константного обеспечения использовалась библиотека ядерных данных БНАБ-78 с помощью программного комплекса подготовки сечений АРАМАКО-С1.

На рисунке 1 показано изменение реактивности реактора по мере утолщения различных одно- и двухслойных отражателей. Видно, что по сравнению с отражателем из ^{208}Pb уже первый метр графитового отражателя резко увеличивает реактивность, которая при дальнейшем утолщении отражателя растет слабо. Рост реактивности для оксида и нитрата ^{208}Pb носит более плавный и продолжительный характер. Это объясняется тем, что графит состоит только из легких атомов, которые быстро замедляют нейтроны, не позволяя им глубоко проникнуть в отражатель в отличие от оксида и нитрата, в котором присутствует

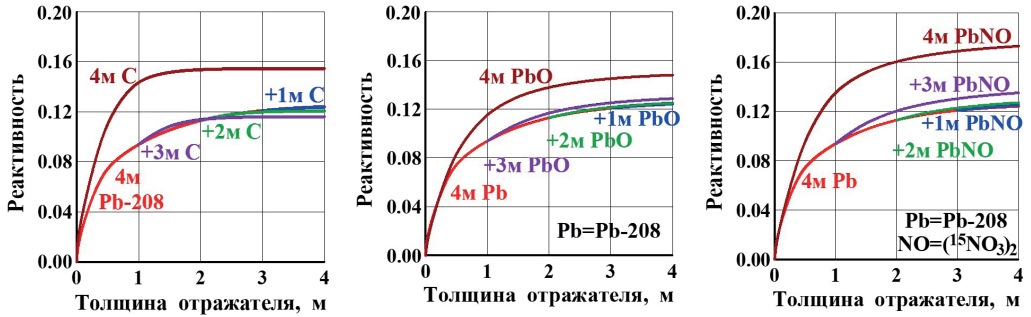


Рис. 1. Реактивность реактора в зависимости от толщины отражателя

²⁰⁸Pb. Кроме того, сечение поглощения у углерода больше, чем у ²⁰⁸Pb, поэтому толстые слои графита поглощают нейтроны, не позволяя им вернуться в активную зону и тем самым увеличить реактивность реактора. Графит в качестве второго слоя отражателя крайне незначительно увеличивает реактивность по сравнению со ²⁰⁸Pb, причем это происходит только на первом метре графита (см. рис. 1). При большей толщине и при использовании графита после двух и трех метров ²⁰⁸Pb реактивность даже меньше, чем в случае ²⁰⁸Pb. Использование же соединений ²⁰⁸Pb вторым слоем повышает реактивность: для оксида в меньшей степени, а для нитрата в большей. Это объясняется наличием в молекуле нитрата большего числа легких атомов, чем в оксиде, на один атом ²⁰⁸Pb. Причем их сечение поглощения нейтронов меньше, чем у ²⁰⁸Pb.

На рисунке 2 показано изменение среднего времени жизни нейтронов в реакторе в зависимости от толщины отражателей. В целом характер зависимостей аналогичен изменению реактивности. Отметим только, что использование графита в качестве всего отражателя уменьшает время жизни нейтронов по сравнению со ²⁰⁸Pb при толщинах более трех метров. Это объясняется теми же причинами: на такие глубины графита нейтроны не способны проникнуть из-за быстрого замедления в первых метрах, а проникнувшие нейтроны поглощаются графитом.

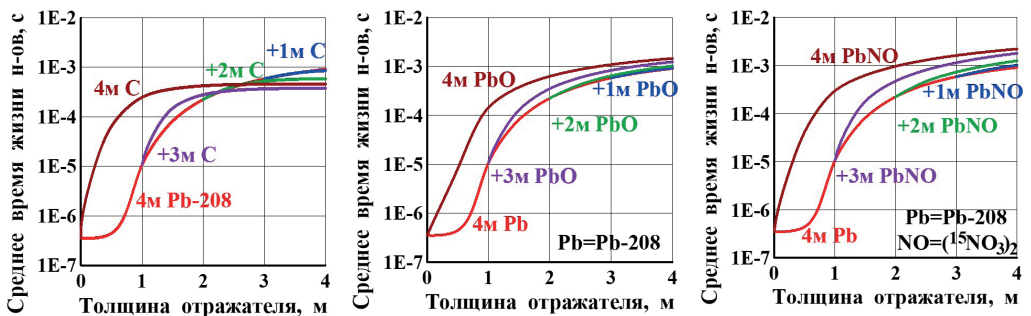


Рис. 2. Зависимость среднего времени жизни нейтронов в реакторе от толщины отражателя

Таким образом, из анализа таких интегральных характеристик как реактивность и время жизни нейтронов реактора можно предположить, что графит в качестве отражателя уступает соединениям ²⁰⁸Pb с точки зрения увеличения времени задержки нейтронов в отражателе, а нитрат имеет преимущество перед оксидом ²⁰⁸Pb.

Перейдем к рассмотрению более детальных характеристик отражателей. Выполнен расчет вклада в реактивность реактора нейтронов, возвращающихся из полуметровых слоев отражателя по его толщине. Результаты расчета показали, что по сравнению со

^{208}Pb использование графита как в качестве всего отражателя, так и в качестве его второго слоя позволяет увеличить реактивность лишь первого полуметрового слоя, а реактивность последующих (самых ценных) слоев радикально уменьшается. Соединения ^{208}Pb несколько увеличивают реактивность последующих слоев отражателя по сравнению со ^{208}Pb : оксид в меньшей степени, а нитрат ^{208}Pb в большей.

Поскольку важно как время задержки нейтронов в отражателе, так и их количество, то необходимо рассмотреть обе эти величины одновременно. На рисунке 3 показано произведение реактивности и среднего времени жизни нейтронов из полуметровых слоев отражателя по его толщине. С точки зрения увеличения среднего времени жизни нейтронов во всем реакторе, включая и отражатель, интерес представляет интеграл от произведения по толщине отражателя. Видно, что по сравнению со ^{208}Pb графит проигрывает, а соединения ^{208}Pb выигрывают в любом случае – как в качестве всего отражателя, так и в качестве его второго слоя.

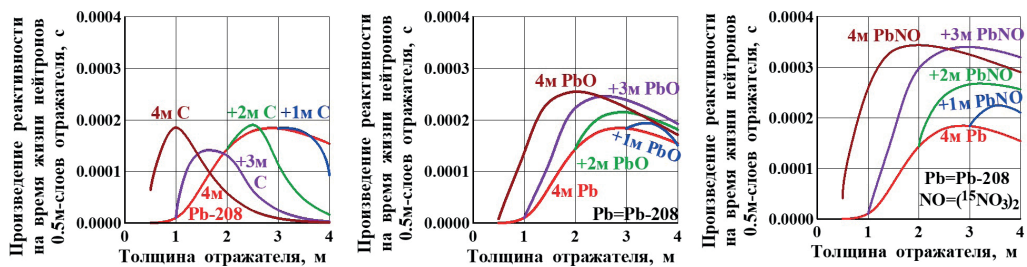


Рис. 3. Произведение реактивности на среднее время жизни нейтронов полуметровых слоев отражателя по его толщине

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Рассмотрим, к чему приводят с точки зрения безопасности реактора предыдущие качественные физические рассуждения.

Графит – сравнительно дешевый и хорошо освоенный материал, который широко применяется в ядерных реакторах, например, в РБМК в качестве замедлителя нейтронов, не требует предварительного изотопного обогащения и характеризуется высокой температурой сублимации 4200°C . Однако во избежание превращения быстрого реактора в тепловой, нельзя окружать активную зону быстрого реактора отражателем с легким атомным весом. Поэтому в дальнейшем из графитовых рассмотрен отражатель, в котором первый метр состоит из ^{208}Pb , а последующие три метра – из графита. Такой выбор объясняется еще и тем, что, как видно из рис.3а, использование графита после двух и трех метров ^{208}Pb явно уступает отражателю из ^{208}Pb .

Из соединений ^{208}Pb далее рассмотрим только нитрат, так как его характеристики лучше, чем у оксида. Промышленно нитрат свинца получается растворением в разбавленной азотной кислоте свинца, его оксида или гидроксида. Нитрат свинца хорошо растворяется в воде с поглощением тепла. Однако кроме кубической разновидности нитрата свинца имеется моноклинная форма, которая плохо растворима в воде даже при нагревании. Учтем, что при нагревании свыше 270°C нитрат начинает разлагаться на оксид свинца (PbO), кислород и диоксид азота, что недопустимо. К тому же под воздействием нейтронов высоких энергий молекулы нитрата свинца могут распадаться на свинец и остаток азотной кислоты (NO_3), что может привести к образованию опять же кислорода и диоксида азота.

Чтобы избежать этого, далее рассмотрен отражатель, в котором первый метр состоит из ^{208}Pb , а последующие три метра – из нитрата ^{208}Pb . Как видно из табл. 2, ^{208}Pb толщиной около 134 см позволяет замедлить нейтроны с энергией 0.1 МэВ до 0.5 электронвольт. Энергия химической связи атомов в молекуле составляет порядка нескольких эВ [5]. А нейтроны, замедляясь в результате упругого рассеяния на ядрах свинца, азота и кислорода, будут передавать им не более 2 и 22-23% своей энергии соответственно (табл. 1). Таким образом, можно рассчитывать, что размещение после одного метра ^{208}Pb нитрата свинца не приведет к его нагреванию свыше 270°C и разложению под действием нейтронного поля.

На рисунке 4 показано изменение требуемой реактивности в зависимости от асимптотического периода разгона быстрого реактора с двухслойными отражателями, состоящими из одного метра ^{208}Pb и трех метров графита или нитрата ^{208}Pb . Для сравнения приведены также случаи с однослойными отражателями из природного свинца толщиной полметра, а также из ^{208}Pb толщиной 4 м.

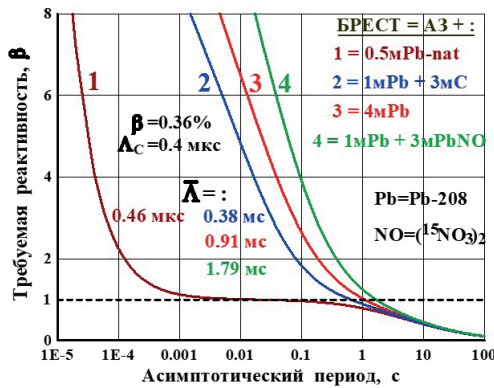


Рис. 4. Требуемая реактивность в зависимости от асимптотического периода разгона быстрого реактора с различными одно- и двухслойными отражателями

Видно, что с точки зрения безопасности все двухслойные отражатели и отражатель из ^{208}Pb радикально отличаются в лучшую сторону от отражателя из природного свинца. Так, если для разгона реактора с асимптотическим периодом, равным 0.1 с, традиционным отражателем из природного свинца требуется ввести реактивность менее доли запаздывающих нейтронов ($0.96 \cdot \beta$), то в случае отражателей, содержащих графит, только ^{208}Pb и нитрат ^{208}Pb – существенно превышающую долю запаздывающих нейтронов: 1.8, 2.6 и 3.9· β соответственно. Двухслойный графитовый отражатель уступает, а двухслойный нитратный превосходит однослойный отражатель из ^{208}Pb .

Рассмотрим поведение быстрого реактора с различными отражателями до его выхода на асимптотический режим разгона. На рисунках 5, 6 показано изменение мощности реактора при вводе положительной реактивности как меньше, так и больше доли запаздывающих нейтронов: 0.5 и 1.1· β соответственно.

В целом картина аналогична асимптотическому режиму разгона реактора: традиционный отражатель из природного свинца явно проигрывает по безопасности другим отражателям, двухслойный графитовый отражатель немного уступает, а двухслойный нитратный несколько превосходит однослойный отражатель из ^{208}Pb . Отметим, что после ввода этих

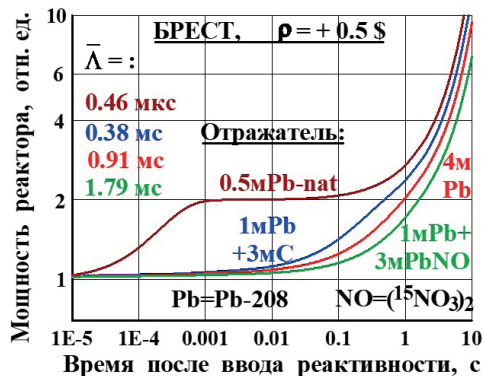


Рис. 5. Изменение мощности быстрого реактора с различными одно- и двухслойными отражателями со временем после ввода положительной реактивности 0.5\$

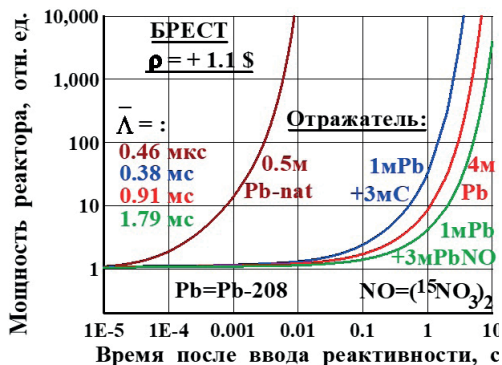


Рис. 6. Изменение мощности быстрого реактора с различными одно- и двухслойными отражателями со временем после ввода положительной реактивности 1.1\$

положительных реактивностей мощность реактора с традиционным отражателем из природного свинца возрастает примерно в два раза и примерно в 10 раз уже через ~1 мс (практически мгновенно), а с другими отражателями – лишь спустя ~1 с.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ДВУХСЛОЙНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Показано, что использование двухслойного отражателя из ^{208}Pb и графита приводит лишь к незначительному ухудшению характеристик безопасности быстрого реактора по сравнению с отражателем только из ^{208}Pb . При этом можно существенно сократить необходимое количество свинца, обогащенного по ^{208}Pb . Какой толщины должен быть первый слой из ^{208}Pb , чтобы последующий слой графита не превратил быстрый реактор по спектру нейтронов в тепловой, – это предмет отдельного исследования. Отметим, что увеличение толщины первого слоя приведет к увеличению необходимого количества ^{208}Pb , но одновременно и к улучшению характеристик отражателя с точки зрения безопасности реактора.

Использование двухслойного отражателя из ^{208}Pb и его нитрата несколько улучшает характеристики безопасности быстрого реактора по сравнению с отражателем только из ^{208}Pb . Кроме того, замена металлического свинца на его нитрат позволит существенно сократить потребности в обогащенном свинце, так как содержание свинца в единице объема его нитрата примерно в 4 раза меньше, чем в металлическом свинце. Однако необходимо учесть, что в нитрате свинца предполагается использование не природного азота, а азота, обогащенного по изотопу ^{15}N . Природная смесь азота состоит на 99.634% из ^{14}N и 0.366% ^{15}N [2]. Сечение поглощения нейтронов в тепловой точке (0.0253 эВ) ^{14}N в ~3100 раз больше, чем ^{15}N , а тепловое сечение поглощения кислорода примерно в 8 раз больше, чем ^{15}N . Это означает, что для того, чтобы неизбежная примесь ^{14}N привела к такому же сечению поглощения азота, как у трех ядер кислорода в молекуле нитрата, содержание ^{15}N должно быть не менее 99.3 %. Такая степень обогащения представляется достижимой, так как в СССР, согласно ГОСТ 236444-79 от 1979 г., атомная доля изотопа ^{15}N наивысшей марки А составляла 98.0–99.5% [6]. Кроме того, в реакторе БРЕСТ исходно предполагалось использование нитридного топлива с обогащенным азотом.

Если по каким-либо причинам использование нитрата свинца окажется невозможным, то в качестве второго слоя отражателя можно рассмотреть использование оксидов

свинца. Так, например, как было показано выше, характеристики ^{208}PbO не уступают металлическому свинцу-208 (см. табл. 1–2 и рис. 1–3), температура плавления довольно высока (860°C). При этом содержание свинца в единице объема на 23% ниже, чем в металлическом свинце. Если потребуется увеличить число легких атомов кислорода на атом тяжелого свинца, т.е. повысить замедляющую способность материала, то стоит рассмотреть использование $^{208}\text{Pb}_3\text{O}_4$ и $^{208}\text{PbO}_2$ с температурами плавления и разложения 830 и 290°C соответственно. Исходя из предыдущего рассмотрения, очевидно, что эти материалы будут обладать характеристиками не хуже, чем у металлического ^{208}Pb . При этом также можно уменьшить потребность в ^{208}Pb на 31 и 27% соответственно.

Может представлять интерес карбонат свинца ($^{208}\text{PbCO}_3$) с температурой разложения 315°C . Его использование позволит уменьшить потребность в ^{208}Pb на 54%, еще больше увеличить число легких атомов на один тяжелый, и, возможно, даже улучшить характеристики второго слоя отражателя, так как сечение поглощения кислородом меньше, чем у ^{208}Pb , а содержание сравнительно сильно поглощающего углерода в два раза меньше, чем в графите.

Сечение захвата нейтронов углеродом можно уменьшить в ~ 2.8 раза, если обогатить по изотопу ^{13}C . Действительно, ПО ЭХЗ производит ^{13}C с содержанием всего 0.1% ^{12}C . Это позволит улучшить характеристики как графита (^{13}C), так и карбоната свинца ($^{208}\text{Pb}^{13}\text{CO}_3$).

Тяжелая вода не рассматривалась в качестве второго слоя отражателя из-за низкой температуры кипения (101°C). Однако она привлекательна, так как обладает наибольшим коэффициентом замедления (см. табл. 1), поэтому не следует забывать о возможности ее использования вдали от активной зоны на периферии отражателя, если там возможно обеспечение температур ниже, чем температура ее кипения или ее содержание под давлением.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КРИТИЧНОСТИ РЕАКТОРА С ПОМОЩЬЮ МАЛОПОГЛОЩАЮЩИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Физически большие отражатели с малым поглощением нейтронов открывают новые возможности по регулированию критичности быстрого реактора. Для этого необходимо предусмотреть возможность ввода, например, графитовых стержней в первый слой многослойного отражателя, состоящего из жидкого ^{208}Pb . Введение таких стержней приведет к увеличению критичности реактора. Важно, что при этом критичность на мгновенных нейтронах активной зоны не меняется ни при каких обстоятельствах, а регулирование реактора будет происходить за счет управления нейтронами, задержанными в отражателе, т.е. реактор всегда будет разгоняться только на нейтронах отражателя, что, безусловно, повысит его безопасность. Это является более мягким методом управления критичностью реактора, который будет осуществляться тем медленнее, чем большую задержку будут иметь нейтроны отражателя.

Конкретное месторасположение кольца из графитовых стержней – предмет отдельного исследования. Отметим, что в проекте быстрого реактора БРЕСТ регулирующие стержни расположены вне активной зоны у самого ее края. Расположить их в отражателе не представляется возможным, так как ценность нейтронов утечки мала и вес стержней окажется недостаточным. В нашем случае имеется достаточно много нейтронов, возвращающихся с больших глубин отражателя, поэтому, влияя на них, можно регулировать критичность реактора.

С точки зрения технологии важен вопрос о растворении графитовых стержней в расплавленном свинце. Чтобы не допустить этого, стержни придется поместить в стальные чехлы. Однако у стали большое сечение поглощения тепловых, т.е. наиболее ценных, нейтронов, которые возвращаются из отражателя в активную зону. Велика вероятность, что покрытия для графитовых стержней не потребуются, т.к. известно, что из графита делают формы для выплавки свинца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом многослойные отражатели для замедления кинетики быстрого реактора должны соответствовать следующим принципам. Во-первых, первый слой должен состоять из материала с тяжелым атомным весом для сохранения быстрого спектра в активной зоне и глубокого проникновения нейтронов в отражатель. Во-вторых, последующие слои отражателя должны содержать материалы со все более легким атомным весом, чтобы эффективно замедлять и отражать нейтроны, что позволит сократить общую толщину отражателя. В-третьих, все материалы должны обладать экстремально низким сечением поглощения нейтронов, чтобы уменьшить их неизбежные потери в физически толстых отражателях.

С учетом выполненного анализа предлагается следующая последовательность использования материалов. Первый слой – ^{208}Pb . Второй и последующие слои: ^{208}PbO , $^{208}\text{Pb}_3\text{O}_4$, $^{208}\text{PbO}_2$, $^{208}\text{Pb}(\text{}^{15}\text{NO}_3)_2$, $^{208}\text{Pb}^{13}\text{CO}_3$, $^{208}\text{PbCO}_3$, ^{13}C , ^{12}C , D_2O . Выбор конкретных материалов, толщин слоев и порядка их расположения – предмет отдельных оптимизационных исследований.

Выполненные исследования говорят о том, что при разработке новых быстрых реакторов целесообразно поставить задачу о формировании желательных характеристик нейтронов отражателя (как по их доле и времени запаздывания, так и по спектру энергии), которые влияют на характер развития процессов кинетики. Эта ситуация радикальным образом отличается от традиционных эмиттерных запаздывающих нейтронов, влияние на которые крайне ограничено или вовсе отсутствует.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Государственного задания (проект FSWU-2022-0016) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

1. K. Shibata et al. JENDL-4.0: a New Library for Nuclear Science and Engineering. // Nuclear Science and Technology. – 2011. – Vol. 48. – No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711675>.
2. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. (под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З.). Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. ISBN 5-283-04013-5.
3. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 536 с. ISBN 5-283-03858-0.
4. Апсэ В.А., Шмелев А.Н. Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок. Учебно-методическое пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 64 с. ISBN 978-5-7262-1059-9.

5. Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А., Медведев В.А., Потапов В.К., Ходяев Ю.С. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник. – М.: Наука, 1974. – 351 с.

6. ГОСТ 23644-79. Азот газообразный, обогащенный стабильным изотопом АЗОТ-15. Технические условия. Электронный ресурс: <http://www.gosthelp.ru/text/gost2364479azotgazoobrazn.html> (дата доступа 26.10.2023).

Поступила в редакцию 14.11.2023

Авторы

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор,

E-mail: shmelan@mail.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС,

E-mail: apseva@mail.ru

Куликов Геннадий Генрихович, главный эксперт,

E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент,

E-mail: egkulikov@mephi.ru

UDC 621.039.5

Multilayer Neutron Reflectors

Shmelev A.N.¹, Apse V.A.¹, Kulikov G.G.², Kulikov E.G.¹

¹MEPhI,

31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

²State Atomic Energy Corporation ROSATOM,

24 Bolshaya Ordynka St., 119017 Moscow, Russia

Abstract

The paper considers the use of multilayer neutron reflectors to slow down the kinetics of a fast reactor. The reflector is represented in the form of three layers: a transport layer, a moderating layer and a reflecting layer. The first layer should consist of a material with a heavy atomic weight for maintaining a fast spectrum in the core and for deep penetration of neutrons into the reflector. Subsequent layers of the reflector should contain materials with increasingly lighter atomic weights to effectively slow down and reflect neutrons to reduce so the overall reflector thickness. Moreover, all materials should have an extremely low neutron absorption cross-section in order to reduce their inevitable loss in physically thick reflectors.

Taking into account the specified requirements, particular materials (^{208}Pb , ^{208}PbO , $^{208}\text{Pb}_3\text{O}_4$, $^{208}\text{PbO}_2$, $^{208}\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $^{208}\text{Pb}^{13}\text{CO}_3$, $^{208}\text{PbCO}_3$, ^{13}C , ^{12}C , D_2O) are proposed for use as the fast reactor neutron reflector to slow down the reactor kinetics and improve nuclear safety.

The studies performed indicate that the development of new fast reactors should advisably include the formation of desired reflector neutron characteristics (both in terms of neutron fraction and delay time, and in terms of energy spectrum) which affect the nature of the evolution of kinetic processes. This situation is radically different from traditional emitter delayed neutrons, which have very limited or no effect.

Keywords: fast reactor, neutron reflector, delayed neutrons, ^{208}Pb , graphite.

For citation: Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov G.G., Kulikov E.G. Multilayer Neutron Reflectors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.03> (in Russian).

References

1. K. Shibata et al. JENDL-4.0: a New Library for Nuclear Science and Engineering. *Nuclear Science and Technology*. 2011, vol. 48, no. 1, pp. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711675>.
2. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. (under ed. Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z.). *Physical quantities: Handbook*. Moscow. Energoatomizdat, 1991, 1232 p. ISBN 5-283-04013-5 (in Russian).
3. Galanin A.D. *Introduction to theory of thermal nuclear reactors*. Moscow. Energoatomizdat, 1990, 536 p. ISBN 5-283-03858-0 (in Russian).
4. Apse V.A., Shmelev A.N. *Using the TIME26 program in the course design of fast reactors and electronuclear plants. Educational and methodological manual*. Moscow, MEPhI Publ., 2008, 64 p. ISBN 978-5-7262-1059-9 (in Russian).
5. Gurvich L.V., Karachevtsev G.V., Kondratiev V.N., Lebedev Yu.A., Medvedev V.A., Potapov V.K., Khodeev Yu.S. *Energy of breaking chemical bonds. Ionization potentials and electron affinities. Directory*. Moscow, Nauka Publ., 1974, 351 p. (in Russian).
6. GOST 23644-79 Nitrogen gas, enriched with the stable isotope AZOT-15. Technical conditions. Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/gost2364479azotgazoobrazn.html> (accessed Oct. 26, 2023) (in Russian).

Authors

Anatoly N. Shmelev, professor,

E-mail: shmelan@mail.ru

Vladimir A. Apse, head of the scientific and research sector,

E-mail: apseva@mail.ru

Gennady G. Kulikov, chief expert,

E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Evgeny G. Kulikov, assistant professor,

E-mail: egkulikov@mephi.ru