

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В.А. Апсэ*, А.Н. Шмелев*, Г.Г. Куликов, Е.Г. Куликов***

* НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

** Госкорпорация «Росатом»

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



Рассмотрена возможность применения теории малых возмущений для оценки изменения времени жизни мгновенных нейтронов при варьировании изотопного состава отдельных зон быстрого реактора со свинцовым теплоносителем. Получены формулы обобщенной теории малых возмущений для производной времени жизни мгновенных нейтронов, которое рассматривается как дробно-билинейный функционал плотности потока и ценности нейтронов. Предложен численный алгоритм пошагового применения формул теории малых возмущений для оценки изменения времени жизни мгновенных нейтронов, вызванного сильным возмущением изотопного состава реактора, например, полной заменой материала отражателя. Показано преимущество предлагаемого подхода, заключающееся в принципиальной возможности оценки роли и вклада различных процессов, изотопов и энергетических групп в общее изменение времени жизни мгновенных нейтронов при значительном изменении состава реактора.

Ключевые слова: теория малых возмущений, дробно-билинейные функционалы, время жизни мгновенных нейтронов, вклад различных процессов.

Апсэ В.А., Шмелев А.Н., Куликов Г.Г., Куликов Е.Г. Использование теории малых возмущений для оценки изменений времени жизни мгновенных нейтронов в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 33-43. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.03> .

ВВЕДЕНИЕ

При нейтронно-физических и оптимизационных расчетах ядерных реакторов возникает необходимость в сравнении различных вариантов конструкции по многим параметрам, представляющим важность для обеспечения эффективной и безопасной работы реактора. Этими параметрами могут быть эффективный коэффициент размножения нейтронов, коэффициент воспроизводства топлива, температурные и плотностные коэффициенты реактивности, время жизни мгновенных нейтронов, эффективная доля запаздывающих нейтронов и т.д. Некоторые из этих параметров могут быть представлены в

© В.А. Апсэ, А.Н. Шмелев, Г.Г. Куликов, Е.Г. Куликов, 2023

форме дробно-линейных функционалов плотности потока нейтронов типа

$$J = \frac{\{a(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}}{\{b(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}},$$

где $a(r, E)$ и $b(r, E)$ – ядра функционалов; $\varphi(r, E)$ – пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов. Фигурные скобки здесь и далее означают интегрирование по всей области изменения переменных. К дробно-линейным функционалам можно отнести коэффициенты неравномерности поля тепловыделения и коэффициенты воспроизводства топлива.

Некоторые другие параметры можно представить в форме дробно-билинейных функционалов плотности потока и ценности нейтронов типа

$$J = \frac{\{\varphi^+(r, E) \cdot a(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}}{\{\varphi^+(r, E) \cdot b(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}},$$

где $\varphi^+(r, E)$ – пространственно-энергетическое распределение ценности нейтронов. К дробно-билинейным функционалам относятся коэффициенты реактивности, время жизни мгновенных нейтронов и эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Данная работа посвящена изучению возможности применения теории малых возмущений для оценки изменений времени жизни мгновенных нейтронов как одного из дробно-билинейных функционалов плотности потока и ценности нейтронов, при сильных возмущениях изотопного состава реактора. В качестве примера рассмотрена полная замена материала нейтронного отражателя, при которой природный свинец заменен на материал, являющийся очень слабым поглотителем нейтронов. Имеется в виду радиогенный свинец с высоким содержанием изотопа ^{208}Pb .

В ряде публикаций (например, в [2 – 5]) показано, что использование радиогенного свинца с высоким содержанием свинца-208 в качестве теплоносителя и нейтронного отражателя вместо природного свинца приводит к заметному выигрышу в нейтронно-физических и теплофизических показателях быстрого реактора. Кроме того слабое поглощение нейтронов в физически толстом отражателе из радиогенного свинца может значительно удлинить время жизни мгновенных нейтронов и в определенной мере повысить сопротивляемость реактора быстрым разгонам мощности.

В [6] сделана попытка применить обобщенную теорию малых возмущений к оценке чувствительности времени жизни мгновенных нейтронов по отношению к слабому изменению изотопного состава быстрого реактора. Показано, что влияние сравнительно небольшого (~ 10%) изменения концентраций делящегося изотопа и свинцового теплоносителя на время жизни мгновенных нейтронов оценивается обобщенной теорией малых возмущений с достаточно хорошей точностью (0.05 – 0.5%). В данной работе делается попытка применить обобщенную теорию малых возмущений к оценке влияния сильных (до 100%) возмущений изотопного состава реактора на время жизни мгновенных нейтронов.

ФОРМУЛЫ ТЕОРИИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ДРОБНО-БИЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ

Уравнение для распределения плотности потока в реакторе можно записать в следующей операторной форме:

$$L(r, E) \cdot \varphi(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q(r, E) \cdot \varphi(r, E), \quad (1)$$

где $L(r, E)$ – оператор, описывающий перенос, поглощение и замедление нейтронов; $Q(r, E)$ – оператор, описывающий генерацию нейтронов деления; $K_{эфф}$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Для одномерной модели ядерного реактора и многогруппового диффузионного приближения уравнение (1) и его операторы $L(r, E)$ и $Q(r, E)$ могут быть представлены в следующем виде:

$$-\frac{1}{r^\alpha} \cdot \frac{d}{dr} \left(r^\alpha \cdot D_k(r) \cdot \frac{d\varphi_k(r)}{dr} \right) + (\Sigma_{cdf,k}(r) + \omega_z^2 \cdot D_k(r)) \cdot \varphi_k(r) =$$

$$= \frac{\chi_k}{K_{эфф}} \cdot \sum_m \nu \cdot \Sigma_{f,m}(r) \cdot \varphi_m(r) + \sum_{m=1}^{k-1} \Sigma^{m \rightarrow k}(r) \cdot \varphi_m(r),$$

где α – индикатор геометрии; k, m – номера энергетических групп; D – коэффициент диффузии; $\varphi(r)$ – плотность потока нейтронов; Σ_{cdf} – макросечение захвата, деления и замедления нейтронов; ω_z^2 – геометрический параметр; χ – спектр нейтронов деления; $\nu \cdot \Sigma_f$ – макросечение генерации нейтронов деления; $\Sigma^{m \rightarrow k}$ – макросечение межгрупповых переводов нейтронов.

Согласно теории малых возмущений [1], чувствительность эффективного коэффициента размножения нейтронов к изменениям изотопного состава реактора можно представить в виде следующего дробно-билинейного функционала:

$$\frac{\partial(1/K_{эфф})}{\partial \rho_{l,i}} = \frac{\left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi(r, E) \right\} - \frac{1}{K_{эфф}} \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial Q}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi(r, E) \right\}}{\left\{ \varphi^+(r, E) \cdot Q \cdot \varphi(r, E) \right\}}, \quad (2)$$

где $\rho_{l,i}$ – концентрация изотопа l в зоне i .

Уравнение, описывающее пространственно-энергетическое распределение ценности нейтронов, аналогично уравнению (1) и отличается от него использованием сопряженных по Лагранжу операторов, т.е.

$$L^+(r, E) \cdot \varphi^+(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q^+(r, E) \cdot \varphi^+(r, E). \quad (3)$$

Важным достоинством формулы (2) является возможность оценить вклад различных процессов (межзонных и межгрупповых переводов нейтронов, их поглощения, замедления и размножения), различных изотопов и энергетических групп в полное значение производной (чувствительности) по концентрациям изотопов. К сожалению, формулы теории малых возмущений позволяют с хорошей точностью оценивать изменения лишь при сравнительно слабых возмущениях изотопного состава реактора.

Для дробно-линейных и дробно-билинейных функционалов существует обобщенная теория малых возмущений, позволяющая количественно оценить изменения функционалов при сравнительно слабых изменениях изотопного состава.

Краткое изложение основных идей обобщенной теории малых возмущений для дробно-билинейных функционалов [7, 8] приведено ниже.

Общий формализм предполагает построение расширенного функционала (лагранжиана), в котором к искомому функционалу с помощью множителей Лагранжа присоединяются уравнения, описывающие распределения плотности потока и ценности нейтронов.

$$F = J + \left\{ \varphi_j^+(r, E) \cdot \left[L \cdot \varphi(r, E) - \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q \cdot \varphi(r, E) \right] \right\} +$$

$$+ \left\{ \varphi_j(r, E) \cdot \left[L^+ \cdot \varphi^+(r, E) - \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q^+ \cdot \varphi^+(r, E) \right] \right\}.$$

Из условия стационарности лагранжиана можно получить уравнения для множе-

лей Лагранжа и формулы теории малых возмущений. Эти уравнения имеют вид

$$L^+(r, E) \cdot \varphi^+_j(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q^+(r, E) \cdot \varphi^+_j(r, E) - \frac{\partial J}{\partial \varphi}, \quad (4)$$

$$L(r, E) \cdot \varphi_j(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q(r, E) \cdot \varphi_j(r, E) - \frac{\partial J}{\partial \varphi^+}, \quad (5)$$

где функциональные производные в правых частях можно рассчитать так:

$$\frac{\partial J}{\partial \varphi} = J \cdot \left\{ \frac{a(r, E) \cdot \varphi^+(r, E)}{\{\varphi^+(r, E) \cdot a(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}} - \frac{b(r, E) \cdot \varphi^+(r, E)}{\{\varphi^+(r, E) \cdot b(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}} \right\},$$

$$\frac{\partial J}{\partial \varphi^+} = J \cdot \left\{ \frac{a(r, E) \cdot \varphi(r, E)}{\{\varphi^+(r, E) \cdot a(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}} - \frac{b(r, E) \cdot \varphi(r, E)}{\{\varphi^+(r, E) \cdot b(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}} \right\}.$$

Легко показать, что эти функциональные производные ортогональны к решениям соответствующих однородных уравнений, т.е.

$$\left\{ \frac{\partial J}{\partial \varphi(r, E)} \cdot \varphi(r, E) \right\} = 0,$$

$$\left\{ \frac{\partial J}{\partial \varphi^+(r, E)} \cdot \varphi^+(r, E) \right\} = 0.$$

Согласно альтернативе Фредгольма, из этого следует существование решений неоднородных уравнений (4), (5). В итоге получаем следующие две системы однородных и неоднородных уравнений.

Однородные уравнения:

$$L(r, E) \cdot \varphi(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q(r, E) \cdot \varphi(r, E),$$

$$L^+(r, E) \cdot \varphi^+(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q^+(r, E) \cdot \varphi^+(r, E).$$
(6)

Неоднородные уравнения:

$$L(r, E) \cdot \varphi_j(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q(r, E) \cdot \varphi_j(r, E) - \frac{\partial J}{\partial \varphi^+},$$

$$L^+(r, E) \cdot \varphi_j(r, E) = \frac{1}{K_{эфф}} \cdot Q^+(r, E) \cdot \varphi_j(r, E) - \frac{\partial J}{\partial \varphi}.$$
(7)

Эти системы должны решаться последовательно, поскольку, только найдя решения однородных уравнений (6), можно определить функциональные производные в правой части неоднородных уравнений (7).

Если системы однородных и неоднородных уравнений (6), (7) решены, то вариацию лагранжиана, вызванную, например, вариацией концентрации изотопа l в зоне i , можно рассчитать следующим образом:

$$\delta F = J \cdot \left[\frac{\{\varphi^+(r, E) [\partial a(r, E) / \partial \rho_{l,j}] \varphi(r, E)\}}{\{\varphi^+(r, E)\} a(r, E) \varphi(r, E)} - \frac{\{\varphi^+(r, E) [\partial b(r, E) / \partial \rho_{l,j}] \varphi(r, E)\}}{\{\varphi^+(r, E)\} b(r, E) \varphi(r, E)} \right] \cdot \delta \rho_{l,j} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[\left\{ \varphi_J^+(r, E) \cdot \left[\frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \right] \cdot \varphi(r, E) \right\} + \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \left[\frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \right] \cdot \varphi_J(r, E) \right\} \right] \cdot \delta \rho_{l,i} - \\
 & - \left[\left\{ \varphi_J^+(r, E) \cdot \left[\frac{\partial Q}{\partial \rho_{l,i}} \right] \cdot \varphi(r, E) \right\} + \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \left[\frac{\partial Q}{\partial \rho_{l,i}} \right] \cdot \varphi_J(r, E) \right\} \right] \cdot \delta \rho_{l,i} / K_{эфф}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

В теории функционального анализа [7, 8] доказано, что в точке стационарности лагранжиан F равен искомому функционалу J , вариация первого порядка лагранжиана F равна вариации первого порядка функционала J , а погрешность функционала J обладает вторым порядком малости по отношению к погрешностям в определении функций $\varphi(r, E)$, $\varphi^+(r, E)$, $\varphi_J(r, E)$ и $\varphi_J^+(r, E)$.

Таким образом, выражение (8) и есть формула теории малых возмущений для искомого дробно-билинейного функционала.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Описанная методика расчета чувствительности дробно-билинейных функционалов была введена в компьютерную программу TIME26 [9]. Тестовые расчеты проводились для одномерной сферической модели быстрого реактора [10] со свинцовым теплоносителем и отражателем. Геометрическая модель включала в себя три активные зоны с одинаковым содержанием плутониевой фракции в смешанном уран-плутониевом нитридном топливе, но с разными диаметрами твэлов, и свинцовый боковой экран. В качестве дробно-билинейного функционала рассмотрено время жизни мгновенных нейтронов:

$$l_p = \frac{\{\varphi^+(r, E) \cdot \text{diag}(1/V) \cdot \varphi(r, E)\}}{\{\varphi^+(r, E) \cdot Q(r, E) \cdot \varphi(r, E)\}}.$$

Основной целью расчетов была оценка изменения этого функционала при полной замене материала бокового экрана с природного свинца на свинец-208 с помощью формулы теории малых возмущений (8). Особенность времени жизни мгновенных нейтронов как дробно-билинейного функционала заключается в том, что весь вклад в его изменение дают только члены выражения (8), описывающие процессы утечки, поглощения и замедления нейтронов. С помощью формулы теории малых возмущений (8) можно получить производную времени жизни мгновенных нейтронов l_p по $\rho_{l,i}$, т.е. по концентрации изотопа l в зоне i :

$$\frac{\partial l_p}{\partial \rho_{l,i}} = \left[\left\{ \varphi_J^+(r, E) \cdot \frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi(r, E) \right\} + \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi_J(r, E) \right\} \right]. \quad (9)$$

Более детально компоненты выражения (9) можно записать так:

$$\begin{aligned}
 \left\{ \varphi_J^+(r, E) \cdot \frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi(r, E) \right\} &= \left\{ \nabla \varphi_J^+(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \nabla \varphi(r, E) \right\} + \\
 &+ \omega_z^2 \cdot \left\{ \varphi_J^+(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi(r, E) \right\} + \left\{ \varphi_J^+(r, E) \cdot \frac{\partial \Sigma}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi(r, E) \right\}, \\
 \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial L}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi_J(r, E) \right\} &= \left\{ \nabla \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \nabla \varphi_J(r, E) \right\} + \\
 &+ \omega_z^2 \cdot \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi_J(r, E) \right\} + \left\{ \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial \Sigma}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \varphi_J(r, E) \right\}.
 \end{aligned}$$

Суммируя компоненты этих выражений, можно выделить вклады отдельных процессов в производную времени жизни мгновенных нейтронов:

– вклад радиальных межзонных переходов и утечки нейтронов

$$\frac{\partial l_p}{\partial \rho_{l,i}}(j_r) = \left\{ \nabla \varphi^+_{j,r}(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \nabla \varphi(r, E) \right\} + \left\{ \nabla \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \nabla \varphi_j(r, E) \right\};$$

– вклад аксиальной утечки нейтронов

$$\frac{\partial l_p}{\partial \rho_{l,i}}(j_z) = \omega_z^2 \left(\left\{ \nabla \varphi^+_{j,r}(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \nabla \varphi(r, E) \right\} + \left\{ \nabla \varphi^+(r, E) \cdot \frac{\partial D}{\partial \rho_{l,i}} \cdot \nabla \varphi_j(r, E) \right\} \right);$$

– вклад поглощения нейтронов

$$\frac{\partial l_p}{\partial \rho_{l,i}}(\Sigma_c) = \{ \varphi^+_{j,r}(r, E) \cdot \sigma_{c,l}(E) \cdot \varphi(r, E) \} + \{ \varphi^+(r, E) \cdot \sigma_{c,l}(E) \cdot \varphi_j(r, E) \};$$

– вклад замедления нейтронов (спектральный эффект)

$$\frac{\partial l_p}{\partial \rho_{l,i}}(\Sigma_d) = \sum_k \sigma_{d,k,l} \cdot \int_{\Delta R_k} r^\alpha \cdot dr \cdot [\varphi^+_{j,k}(r) \cdot \varphi_k(r) + \varphi^+_k(r) \cdot \varphi_{j,k}(r)] - \sum_{m=1}^{k-1} \sigma_{m \rightarrow k} \cdot \int_{\Delta R_m} r^\alpha \cdot dr \cdot [\varphi^+_{j,k}(r) \cdot \varphi_m(r) + \varphi^+_k(r) \cdot \varphi_{j,m}(r)].$$

При желании можно продолжить детализацию выражения (9) и определить вклады отдельных геометрических зон и энергетических групп в производную времени жизни мгновенных нейтронов.

На рисунке 1 приведены кривые, характеризующие удлинение времени жизни мгновенных нейтронов при постепенной замене природного свинца на свинец-208 в нейтронном отражателе при различной его толщине.

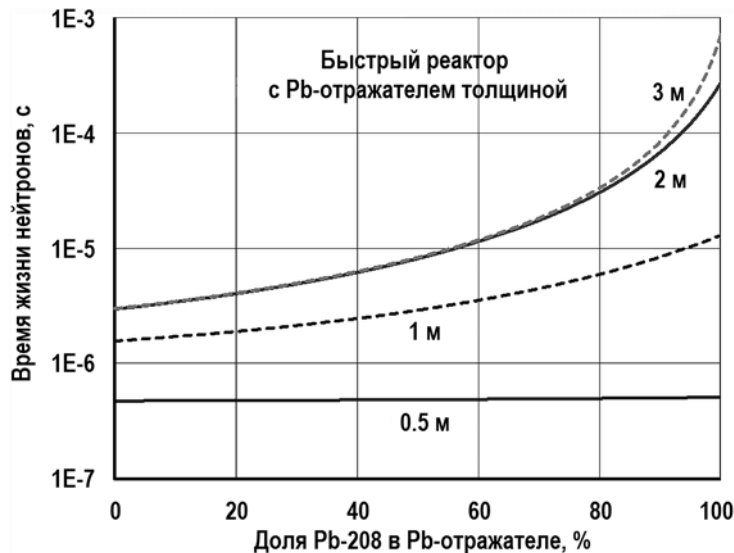


Рис. 1. Время жизни мгновенных нейтронов как функция доли ²⁰⁸Pb в Рb-отражателе

Из этих кривых видно, что наиболее интенсивный рост времени жизни мгновенных нейтронов l_p происходит на заключительном этапе замены, когда последние проценты природного свинца вытесняются свинцом-208. Это особенно ярко выражено в вариан-

те толстого (3 м) отражателя. Если на начальном этапе доля свинца-208 увеличивается с нуля до 20%, то l_p повышается с 3 мкс только до 4 мкс. Если же на заключительном этапе доля свинца-208 растет с 80 до 100%, то l_p повышается с 33 мкс до 705 мкс. На последних пяти процентах время жизни растет почти в четыре раза, со 180 мкс при 95% свинца-208 до 705 мкс при 100% свинца-208.

Это объясняется тем, что природный свинец уже содержит значительную (52.4%) долю свинца-208. Поэтому на начальном этапе замены полное содержание свинца-208 в отражателе увеличивается незначительно. Лишь на заключительном этапе, когда доля свинца-208 стремится к 100%, благодаря его уникальным нейтронно-физическим свойствам (очень слабое поглощение и замедление нейтронов) происходит наибольшее удлинение l_p .

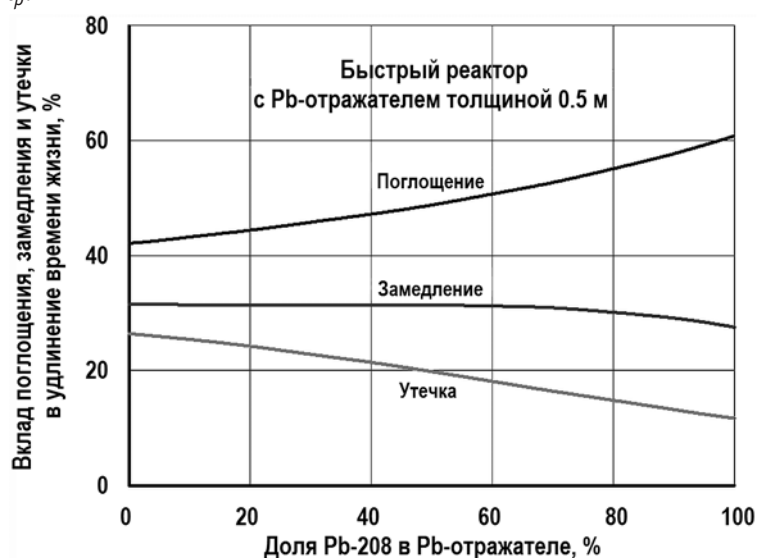


Рис. 2. Вклады поглощения, замедления и утечки нейтронов в удлинение времени жизни (толщина отражателя 0.5 м)

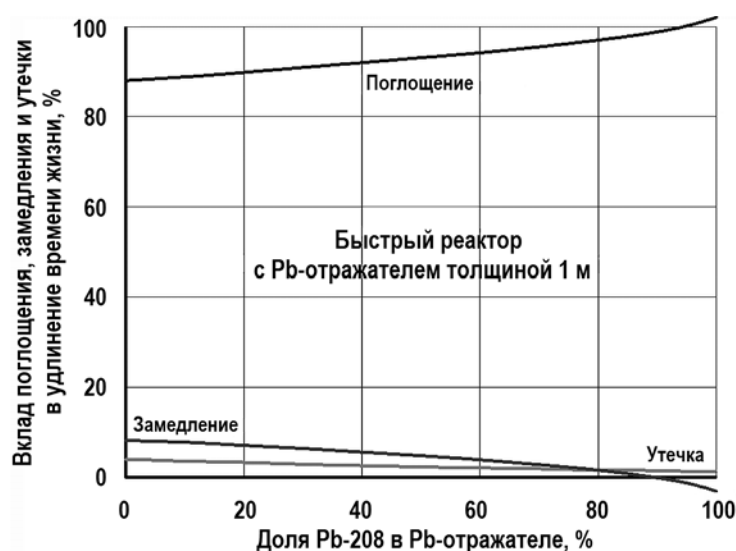


Рис. 3. Вклады поглощения, замедления и утечки нейтронов в удлинение времени жизни (толщина отражателя 1 м)

Применение формул теории малых возмущений (9) позволяет оценить роль, сыгранную межзонными переходами, поглощением и замедлением нейтронов в росте l_p . К со-

жалению, теория малых возмущений потому так и называется, что способна предсказать изменения искомым функционалов и оценить вклады различных процессов в эти изменения лишь при достаточно слабых вариациях управляющих параметров. Полную замену материала отражателя никак нельзя назвать малым возмущением. Действительно, как видно из рис. 1, полная замена природного свинца на свинец-208 в толстом (3 м) отражателе удлиняет время жизни мгновенных нейтронов с 3 до 705 мкс, т.е. более чем в 200 раз.

Существует, однако, возможность преодолеть эту трудность. Процесс замены природного свинца на свинец-208 можно разбить на такое количество этапов, в пределах каждого из которых формулы теории малых возмущений предсказывают изменение l_p и оценивают вклады различных процессов в это изменение с приемлемой точностью. В этом случае открывается возможность шаг за шагом проследить всю эволюцию изменения вкладов различных процессов в рост l_p при постепенной замене природного свинца на свинец-208. Затем, просуммировав эти пошаговые вклады, можно оценить суммарный вклад различных процессов в полное удлинение l_p даже при сильных возмущениях изотопного состава.

На рисунках 2, 3 показана эволюция вкладов межзонных переходов, поглощения и замедления в удлинение времени жизни мгновенных нейтронов при постепенной замене природного свинца на свинец-208 в тонком (0.5 м) и толстом (1 м) отражателе. Видно, что в сравнительно тонком отражателе вклад меньшего поглощения нейтронов играет основную, но не доминирующую роль. При утолщении отражателя с 0.5 до 1 м вклад меньшего поглощения быстро становится доминирующим. На заключительном этапе он превышает 100%, поскольку изменения межзонных переходов и замедления (спектральный эффект) незначительны, но укорачивают время жизни мгновенных нейтронов.

Просуммировав удлинения времени жизни нейтронов по этапам постепенной замены природного свинца на свинец-208, можно оценить вклады процессов радиальных межзонных переходов, поглощения и замедления нейтронов в полное удлинение времени жизни нейтронов. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вклады межзонных переходов, поглощения и замедления нейтронов в полное удлинение времени жизни

Толщина отражателя, см	$\Delta l_p(j_i)$, %	$\Delta l_p(\Sigma_c)$, %	$\Delta l_p(\Sigma_d)$, %
50	17.9	51.6	30.5
100	1.6	97.4	1.0
150	0.09	101.23	-1.32
200	-0.003	100.607	-0.604

Из этих результатов видно, что по мере утолщения отражателя усиливается и быстро становится доминирующей роль очень слабого поглощения нейтронов свинцом-208. Интересно, что суммарное действие межзонных переходов и спектрального эффекта незначительно, но укорачивает время жизни мгновенных нейтронов при утолщении отражателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен пошаговый алгоритм применения формул обобщенной теории малых возмущений для оценки чувствительности времени жизни мгновенных нейтронов к сильным изменениям состава ядерного реактора. Рассмотрена применимость такого подхода к оценке изменения времени жизни мгновенных нейтронов, вызванного полной заменой материала отражателя в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем (при-

родный свинец заменялся радиогенным свинцом с доминирующей долей изотопа свинец-208). Постепенная пошаговая замена материала отражателя показала возможность применения формул обобщенной теории малых возмущений на каждом шаге и получения окончательного результата (при полной замене отражателя) с хорошей точностью. Основным преимуществом предложенного подхода является его способность выявить роль и оценить вклад всех нейтронных процессов, изотопов и энергетических групп в полное изменение времени жизни мгновенных нейтронов.

Благодарность

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

Литература

1. *Стумбур Э.А.* Применение теории возмущений в физике ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1976. – 128 с.
2. *Апсэ В.А., Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Сироткин А.М.* О возможности улучшения нейтронно-физических и тепло-гидравлических параметров быстрых реакторов при использовании радиогенного свинца в качестве теплоносителя. // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2010. – Том 1. – № 5. – С. 387-397.
3. *Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Артисюк В.В.* О возможности использования радиогенного свинца в ядерной энергетике. // *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2010. – № 3. – С. 39-47. Электронный ресурс: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2010/03.pdf> (дата доступа 27.10.2022).
4. *Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., Kulikov E.G.* Application of radiogenic lead with dominant content of ^{208}Pb for long prompt neutron lifetime in fast reactors. // *Nuclear Technology.* – 2013. – Vol. 183. – PP. 409-426. DOI: <https://doi.org/10.13182/nt13-a19429>.
5. *Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Куликов Е.Г., Апсэ В.А., Чубко Н.В.* Роль нейтронов отражателя быстрого реактора в повышении сопротивляемости цепной реакции деления быстрому разгону. // *Атомная энергия.* – 2017. – Том 123. – № 6. – С. 351-352. Электронный ресурс: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t123-6_2017/go,50/ (дата доступа 27.10.2022).
6. *Апсэ В.А., Сироткин А.М., Шмелев А.Н.* Оценка чувствительности времени жизни мгновенных нейтронов к изотопному составу ядерного реактора с помощью теории малых возмущений. // *Современные проблемы науки и образования.* – 2012. – № 6. Электронный ресурс: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7354> (дата доступа 27.10.2020).
7. *Канторович Л.В., Акилов Г.П.* Функциональный анализ. – Санкт-Петербург: Невский Диалект, 2004. – 816 с.
8. *Хромов В.В.* Функции ценности нейтронов, лагранжианы нейтронных полей, формулы теории возмущений. – М.: МИФИ, 1989. – 48 с.
9. *Апсэ В.А., Шмелев А.Н.* Использование программы TИМЕ26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок. – М.: МИФИ, 2008. – 64 с.
10. *Орлов В.В., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г.* Конструкция реакторов БРЕСТ. Экспериментальные работы для обоснования концепции реакторов БРЕСТ. Результаты и планы / Труды Международного семинара «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетике. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение». – Москва, 2000. – Доклад № 13.

Поступила в редакцию 30.10.2022 г.

Авторы

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС

E-mail: apseva@mail.ru

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор

E-mail: shmelan@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

APPLICATION OF SMALL PERTURBATION THEORY FOR ASSESSING VARIATIONS OF PROMPT NEUTRON LIFETIME IN A LEAD-COOLED FAST REACTOR

Apse V.A. *, Shmelev A.N. *, Kulikov G.G. **, Kulikov E.G. *

* MPhI

31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

** ROSATOM State Atomic Energy Corporation

24 Bolshaya Ordynka Str., 119017 Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper considers the applicability of small perturbation theory to assessing the variations of the prompt neutron lifetime caused by variations in the isotope composition of a lead-cooled fast reactor. The generalized small perturbation theory formulas have been developed to calculate derivatives of the prompt neutron lifetime regarded as a bilinear neutron flux and neutron worth ratio. A numerical algorithm has been proposed for the step-by-step application of the small perturbation theory formulas to assess the prompt neutron lifetime variations caused by a major perturbation in the reactor isotope composition, e.g. by the complete change of the material used earlier as the neutron reflector. The advantage of the proposed approach has been shown which consists in that it is basically possible to determine the role of different neutron reactions, isotopes and energy groups in and their contributions to the total prompt neutron lifetime variation caused by major changes in the reactor isotope composition.

Key words: small perturbation theory, bilinear ratios, prompt neutron lifetime, contributions of neutron reactions.

Apse V.A., Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kulikov E.G. Application of Small Perturbation Theory for Assessing Variations of Prompt Neutron Lifetime in a Lead-Cooled Fast Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 1, pp. 33-43; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.03> (in Russian) .

REFERENCES

1. Stumbur E.A. *Application of Perturbation Theory in the Physics of Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1976, 128 p. (in Russian).
2. Apse V.A., Kulikov G.G., Shmelev A.N., Sirotkin A.M. On the Possibility of Improving the Neutron-Physical and Thermal-Hydraulic Parameters of Fast Reactors Using Radiogenic Lead as a Coolant. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2010, v. 1, no. 5, pp. 387-397 (in Russian).

3. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Artisyuk V.V. Principal Physical Advantages from Applying Radiogenic Lead as a Coolant of Nuclear Reactors. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Atomnaya Energtika*. 2010, no. 3, pp. 39-47. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2010/03.pdf> (accessed Oct. 27, 2022) (in Russian).
4. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., Kulikov E.G. Application of Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb for Long Prompt Neutron Lifetime in Fast Reactors. *Nuclear Technology*. 2013, v. 183, pp. 409-426; DOI: <https://doi.org/10.13182/nt13-a19429>.
5. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Kulikov E.G., Apse V.A., Chubko N.V. The Role of Fast Reactor Reflector Neutrons in Increasing the Resistance of a Fission Chain Reaction to Rapid Runaway. *Atomnaya Energiya*. 2017, v. 123, no. 6, pp. 351-352. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t123-6_2017/go,50/ (accessed Oct. 27, 2022) (in Russian).
6. Apse V.A., Sirotkin A.M., Shmelev A.N. Estimation of the Sensitivity of the Lifetime of Prompt Neutrons to the Isotopic Composition of a Nuclear Reactor Using the Theory of Small Perturbations. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2012, no. 6. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7354> (accessed Oct. 27, 2022) (in Russian).
7. Kantorovich L.V., Akilov G.P. *Functional Analysis*. Saint Petersburg. Nevsky Dialekt Publ., 2004, 816 p. (in Russian).
8. Khromov V.V. *Neutron Value Functions, Neutron Field Lagrangians, Perturbation Theory Formulas*. Moscow. MEFHI Publ., 1989, 48 p. (in Russian).
9. Apse V.A., Shmelev A.N. *The Use of the TIME26 Program in Course Design of Fast Reactors and Power Plants*. Moscow. MEFHI Publ., 2008, 64 p. (in Russian).
10. Orlov V.V., Leonov V.N., Sila-Novitskiy A.G. Design of BREST Reactors. Experimental Work to Substantiate the Concept of BREST Reactors. Results and Plans. *Proc. of the International Seminar «Fast Reactor and Natural Safety Fuel Cycle for Large-Scale Energy. Fuel Balance, Economics, Security, Waste, Nonproliferation»*. Moscow, 2000. Report no. 13 (in Russian).

Authors

Apse Vladimir Aleksandrovich, Head of the Scientific and Research Sector

E-mail: apseva@mail.ru

Shmelev Anatoly Nikolaevich, Professor

E-mail: shmelan@mail.ru

Kulikov Gennady Genrikhovich, Chief Expert

E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Kulikov Evgeny Gennad'evich, Assistant Professor

E-mail: egkulikov@mephi.ru