

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УРАВНЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЧАСОВ НА ОСНОВЕ АКТУАЛЬНЫХ БИБЛИОТЕК НУКЛИДОВ

Р.В. Дадашов

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5091*

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, к.пед.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Введение

Нейтронно-физические расчеты ядерных реакторов являются важной частью при проектировании, строительстве и эксплуатации АЭС в целом. В целях безопасной эксплуатации и эффективного управления реактором такие расчеты должны быть максимально точными, поскольку от этого зависит гибкость изменения и пределы мощности установки, загрузка топлива, габариты конструкционных материалов, параметры систем защиты. Все эти аспекты должны соответствовать оптимальным значениям технико-экономического обоснования и высоким требованиям ядерной безопасности.

Важность запаздывающих нейтронов

В результате деления ^{235}U под действие нейтронов происходит образование осколков деления, имеющих разные атомные массы (A) и зарядовые числа (Z). Среди продуктов деления были обнаружены осколки с $A = 72\text{--}161$ и $Z = 30\text{--}65$. Часть из этих осколков являются ядрами-предшественниками запаздывающих нейтронов, которые в дальнейшем претерпевают бета-распад и становятся ядрами-излучателями запаздывающих нейтронов. Именно благодаря запаздывающим нейтронам (ЗН), увеличивающим время жизни одного поколения нейтронов на несколько порядков, возможно безопасно управлять ядерным реактором, и контролировать самоподдерживающуюся цепную реакцию деления.

Суммарная доля выхода ЗН (β) – среднее число запаздывающих нейтронов, приходящееся на один получаемый нейтрон деления в критическом реакторе бесконечных размеров [1]. На данный момент пользуются шестигрупповым приближением (13 родоначальников ЗН) с усредненными свойствами изотопов, при делении ядер ^{235}U на каждые 10000 нейтронов деления лишь 64 нейтрона будут запаздывающими, а остальные 9936 нейтронов – мгновенными (или 0,64 % всех нейтронов – запаздывающие, а остальные 99,36 % нейтронов – мгновенные). В данной работе будет сделана попытка повышения точности приближения, за счет рассмотрения вклада 38 родоначальников ЗН в отдельности.

Расчет доли выхода запаздывающих нейтронов

Расчет будем вести по следующей формуле [1]:

$$\beta_i = \frac{\gamma_i \cdot p_{\beta i}}{\nu_5}, \quad (1)$$

где γ_i – доля выхода i -го родоначальника ЗН [2]; $p_{\beta i}$ – вероятность бета-распада родоначальника ЗН с образованием нейтрона [3]; ν_5 – число нейтронов деления рождающихся в одном акте деления ядра ^{235}U под действием теплового нейтрона ($\nu_5 = 2,416$ [1]).

В ходе выполнения работы были обобщены современные данные из разных источников, включая зарубежные, на основе которых были рассчитаны доли выхода по каждому элементу (табл. 1). Изотопы были отобраны по принципу наибольшей величины произведения γ_i и $p_{\beta i}$.

Таблица 1. Вклад родоначальников в суммарный выход ЗН

Родоначальник	γ_i	$\rho_{\beta_i} \%$	β_i
⁸⁷ Br	2,11E-02	2,531	0,0002211
⁸⁸ Br	1,75E-02	6,723	0,0004872
⁸⁹ Br	1,24E-02	13,77	0,0007070
⁹⁰ Br	3,95E-03	25,62	0,0004190
⁹¹ Br	1,11E-03	30,41	0,0001398
⁹² Br	4,27E-05	33,1	0,0000059
⁹³ Br	1,56E-05	64	0,0000041
⁹² Kr	1,65E-02	0,03323	0,0000023
⁹³ Kr	3,84E-03	1,992	0,0000317
⁹⁴ Kr	1,15E-03	1,118	0,0000053
⁹³ Rb	4,25E-02	1,601	0,0002817
⁹⁴ Rb	1,98E-02	10,392	0,0008520
⁹⁵ Rb	7,84E-03	8,84	0,0002870
⁹⁶ Rb	1,53E-03	14,19	0,0000899
⁹⁷ Sr	1,67E-02	0,032	0,0000022
⁹⁸ Sr	6,89E-03	0,233	0,0000066
⁹⁹ Sr	1,02E-03	0,0962	0,0000004
¹⁰⁰ Sr	1,51E-04	1,112	0,0000007
¹⁰¹ Sr	4,55E-05	2,523	0,0000005
⁹⁷ Y	1,89E-02	0,0581	0,0000045
⁹⁸ Y	2,78E-02	0,33	0,0000380
⁹⁹ Y	2,04E-02	1,973	0,0001667
¹⁰³ Zr	4,10E-03	1	0,0000170
¹⁰⁵ Zr	4,12E-04	2	0,0000034
¹⁰⁵ Nb	1,95E-03	1,8	0,0000145
¹³⁴ Sn	1,07E-04	17	0,0000075
¹³⁵ Sb	9,84E-04	20	0,0000815
¹³⁶ Te	1,20E-02	1,38	0,0000686
¹³⁷ Te	2,62E-03	2,912	0,0000316
¹³⁷ I	3,26E-02	7,631	0,0010301
¹³⁸ I	1,66E-02	5,302	0,0003644
¹³⁹ I	6,84E-03	9,743	0,0002760
¹⁴⁰ I	2,75E-03	7,884	0,0000898
¹⁴¹ I	4,88E-04	21,23	0,0000429
¹⁴² Cs	3,00E-02	0,0916	0,0000114
¹⁴³ Cs	1,26E-02	1,582	0,0000825
¹⁴⁴ Cs	4,34E-03	2,981	0,0000536
¹⁴⁵ Cs	8,16E-04	13,56	0,0000458

Анализ полученных результатов

Для оценки повышения уровня точности нового приближения на основе полученных результатов с 38 родоначальниками и стандартного шестигруппового приближения, выполнен расчет уравнения обратных часов (УОЧ) (см. рис. 1).

Вид самого уравнения [1]:

$$\rho = \frac{l}{T} + \sum_{i=1}^N \frac{\beta_{\beta_i}}{1 + \lambda_i T}, \quad (2)$$

где ρ – сообщенная реактору реактивность; l – среднее время жизни мгновенных нейтронов ($l = 0,0001$ [1]); λ – постоянная распада i -го элемента; T – установившийся период реактора; N – количество рассматриваемых групп или элементов в зависимости от приближения (6 или 38).

С помощью УОЧ оператор реакторной установки может быстро и точно оценить связь реактивности и периода реактора в процессе пуска, изменения мощности, останова и т. д.

График УОЧ по новому приближению отклоняется на 0,015 % – 0,003 % от графика по стандартному приближению (построенному по данным из [1]) только при небольших значениях периода (от 5 до 25 с) реактора, далее расхождение постепенно уменьшается до 0,0005 %.

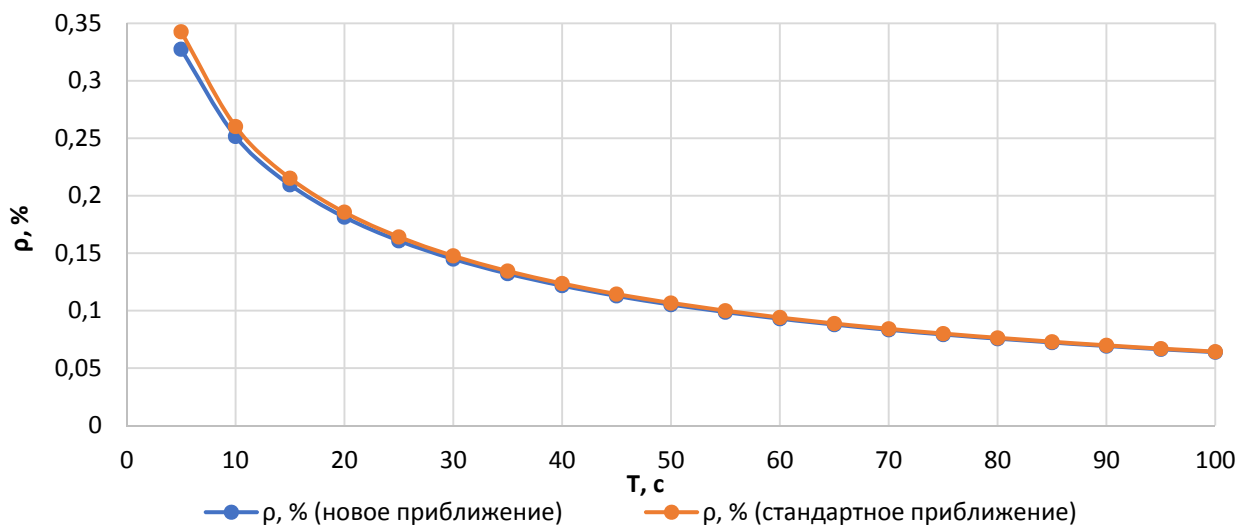


Рис. 1. График УОЧ для двух приближений

Шестигрупповое приближение

Данное приближение используется для упрощения вычислений по УОЧ. Шесть групп родоначальников отобраны по схожим характеристикам (период полураспада, постоянная распада). В разных источниках представлены таблицы с шестигрупповым приближением на основе разных элементов, точность которых составляет соответственно 48 [1], 37 [4] и 78 % [5] от суммарной доли выхода, вычисленной по новому приближению (0,005972). Для повышения уровня точности расчетов и сохранения шестигруппового приближения была составлена уточненная таблица на основе 19 элементов, играющих наибольшее значение в процессе генерации ЗН (табл. 2).

Таблица 2. Уточненная таблица 6 групп родоначальников ЗН

Номер группы	Родоначальник	$T_{1/2}$	Абсолютная доля выхода группы
1	^{87}Br	55,65	0,0002211
2	^{137}I	24,5	0,0010301
3	^{88}Br	16,29	0,0005555
	^{136}Te	17,63	
4	^{89}Br	4,4	0,0010756
	^{138}I	6,23	
	^{97}Y	3,75	
5	^{137}Te	2,49	0,0021285
	^{93}Kr	1,286	
	^{94}Rb	2,702	
	^{105}Nb	2,95	
	^{90}Br	1,91	
	^{99}Y	1,47	
	^{139}I	2,28	
6	^{143}Cs	1,791	0,0005153
	^{95}Rb	0,3775	
	^{91}Br	0,543	
	^{145}Cs	0,587	
	^{141}I	0,43	

Согласно табл. 2, вклад в суммарную долю выхода ЗН составляет 88 % от 0,005972.

Заключение

Благодаря новой графической зависимости (рис. 1), полученной с помощью актуализации расчета суммарной доли ЗН, можно точнее: оценивать зависимость периода реактора от реактивности и наоборот, определять величину перемещения стержней управления и защиты, и т. д. Это позволит точнее и безопаснее управлять ядерным реактором, что в свою очередь позволит увеличить период его эксплуатации. Также была составлена уточненная таблица, которая повышает точность расчёта по стандартному шестигрупповому приближению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзликин Г.Я. Основы теории реакторов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2015. – 452 с.
2. Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Data and Reactor Engineering Division, Nuclear Data Center. – Japan, 2023. – URL: <https://www.ndc.jaea.go.jp>. (дата обращения 28.10.2023).
3. IAEA Nuclear Data Section – Reference Database for Beta-Delayed Neutron Emission Data. – USA, 2022. – URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/delayedn/delayedn.html>. (дата обращения 28.10.2023).
4. Н. Böck, М. Villa. Physics and Kinetics of Triga Reactor, Atomic Institute of the Austrian Universities, 2007. – 36 с.
5. Impact of delayed neutron constants on reactivity effects measured in a fast reactor / A. Krása et al. – Belgian Nuclear Research Centre, 2019. – 9 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА БОРА

А.А. Кузнецова¹, Ю.З. Васильева², П.В. Поваляев³

*Томский политехнический университет,
ЛПМЭО ИШЭ ТПУ, инженер¹; научный сотрудник²; младший научный сотрудник³*

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Карбид бора является уникальным материалом, характеризующимся высокой твердостью, высокой температурой плавления (более 2500 °С), низкой плотностью (около 2,5 г/см³), термостабильностью, хорошими электрическими и ядерными характеристиками [1]. Вышеперечисленные свойства позволяют использовать карбид бора для производства сверхтвердой керамики, износостойких покрытий, абразивных порошков, а также поглотителя нейтронного излучения [2–4].

Основным методом получения карбида бора является карботермическое восстановление из оксида бора. Синтез карбида бора проводится в среде инертного газа в течение нескольких часов при температуре 1500–2300 °С [5]. Также для синтеза карбида бора используется самораспространяющийся высокотемпературный синтез, механический синтез в шаровых мельницах путем размолла исходных материалов в течение длительного времени, плазменное распыление, кристаллизация из расплава [6]. Данные методы характеризуются низкой производительностью, высокими энергетическими затратами на получение карбида бора, что вносит существенный вклад в стоимость получаемого продукта.

Перспективным для синтеза карбида бора является использование электродугового плазменного метода. Такой метод обеспечивает высокие скорости нагрева и позволяет достичь