

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА ПО ВЫСОТЕ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000

И.А. Варламов, М.С. Кузнецов
Томский политехнический университет
ivanvarlamov199742@gmail.com

Введение

На сегодняшний день одно из приоритетных направлений развития энергетики – атомная энергетика. Данная отрасль требует большого количества экспериментальных данных и исследований.

Для проведения экспериментов в области реакторной физики зачастую необходимы большие временные ресурсы и финансовые затраты. Избежать высоких затрат как времени, так и других ресурсов представляется возможным с помощью современных методов моделирования.

Метод Монте-Карло, реализуемый, например, в пакете программ MCU, является одним из наиболее распространенных методов моделирования, с помощью которого представляется возможным проведение нейтронно-физического расчета ядерной установки.

К основным задачам нейтронно-физического расчета ядерного реактора относятся определение зависимости плотности потока нейтронов от таких переменных, как энергия, координата и время, а также запаса реактивности на протяжении всей кампании топлива.

Большое влияние на нейтронно-физические характеристики ядерного реактора оказывает неравномерность выгорания ядерного топлива и наработка нуклидов. Поэтому целью данной работы является нейтронно-физический расчет ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом неравномерности выгорания ядерного топлива по высоте тепловыделяющего элемента.

Расчетная модель

В качестве элементарной ячейки был выбран шестигранник, в центре которого находится тепловыделяющий элемент. На рисунке 1 представлено горизонтальное сечение элементарной ячейки, а в таблице 1 параметры, используемые для расчета.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Величина	Значение
Радиус отверстия в центре твэл, см	0,0700
Внешний радиус топлива, см	0,3765
Внутренний радиус оболочки твэл, см	0,3900
Внешний радиус оболочки твэл, см	0,4550
Величина	Значение
Размер ячейки под ключ, см	1,275
Высота твэл, см	353
Обогащение, %	4,3
Количество зон по высоте	11
Температура топлива, К	773
Температура замедлителя, К	579

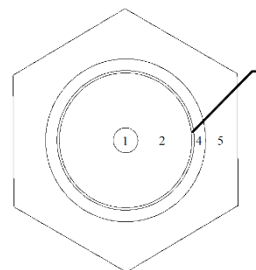


Рис. 1. Горизонтальное сечение элементарной ячейки: 1 – центральное отверстие, 2 – топливо, 3 – прослойка между топливом и оболочкой, 4 – оболочка, 5 – замедлитель.

Расчет кампании топлива

Оценку примерного времени кампании топлива ЯР дает функция зависимости избыточного коэффициента размножения нейтронов $\delta k_3 = f(t)$ от времени. В таблице 2 представлены рассчитанные значения избыточного коэффициента размножения нейтронов от глубины выгорания топлива при эксплуатации реактора на 100% мощности.

Таблица 2. Результаты расчета избыточного коэффициента размножения нейтронов в зависимости от глубины выгорания

Выгорание, ГВт·сут·тU ⁻¹	δk_3
0	0,3716
2,01	0,2918
4,01	0,2687
6,02	0,2310
8,02	0,2086
10,03	0,1904
12,03	0,1668
14,04	0,1456
16,05	0,1312
18,05	0,1141
20,06	0,0953
22,06	0,0749
24,07	0,0597
26,07	0,0446
Выгорание, ГВт·сут·тU ⁻¹	δk_3
28,08	0,0271
30,08	0,0136
32,09	-0,0052

Из представленных результатов видно, что максимальная глубина выгорания топлива лежит в интервале от 30,08 ГВт·сут·тU⁻¹ до 32,09

ГВт·сут·тU⁻¹. Проектная глубина выгорания составляет 56 ГВт·сут·тU⁻¹ [1]. Заниженное значение максимальной глубины выгорания объясняется отсутствием возможности в расчетной модели твэла учесть перегрузку топлива во время его кампании.

Определение неравномерности плотности потока нейтронов по высоте

Расчет плотности потока нейтронов с помощью 69 группового приближения дает возможность построения трехмерного графика зависимости плотности потока от энергии нейтронов и высоты в твэле. На рисунке 3 представлена зависимость плотности потока нейтронов в топливе.

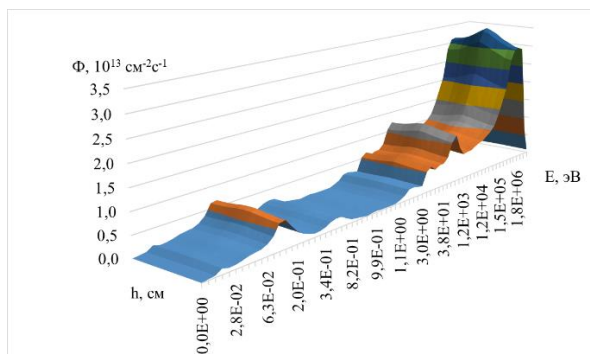


Рис. 3. Зависимость плотности потока нейтронов в топливе от высоты и энергии

Определение неравномерности выгорания U²³⁵ и наработки Pu²³⁹ по высоте

Характер зависимости плотности потока нейтронов от высоты в твэле и энергии нейтронов, представленный на рисунке 3, определяет характер выгорания U²³⁵ и наработки нуклидов, например, Pu²³⁹. Чем больше плотность потока тепловых нейтронов в топливе, тем больше выгорание U²³⁵ и скорость наработки нуклида Pu²³⁹.

Так же стоит отметить, что тепловыделение в тепловыделяющем элементе прямо пропорционально скорости реакции деления. Отсюда следует, что характер плотности потока нейтронов в тепловыделяющем элементе определяет не только выгорание топлива, но и зависимость тепловыделения в тепловыделяющем элементе от высоты.

На рисунке 4 представлена полученная зависимость выгорания U²³⁵ от высоты при различной глубине выгорания ядерного топлива, а на рисунке 5 зависимость концентрации Pu²³⁹ от высоты при этих же глубинах выгорания.

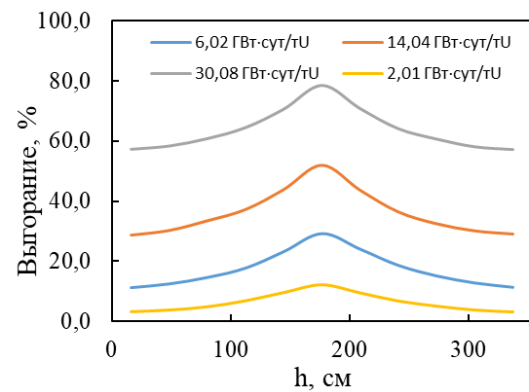


Рис. 4. Зависимость выгорания U²³⁵ от высоты при различной средней глубине выгорания топлива

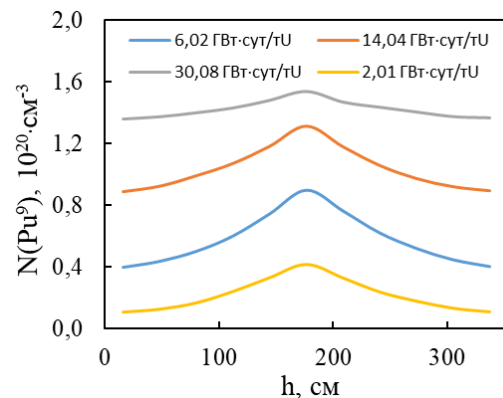


Рис. 5. Зависимость концентрации Pu²³⁹ от высоты при различной глубине выгорания топлива

Заключение

По результатам проделанной работы был получен спектр плотности потока нейтронов в зависимости от высоты в твэле.

Полученная зависимость определила характер выгорания ядерного топлива и тепловыделения по высоте в твэле.

Полученные результаты помогут при дальнейшей оптимизации и модернизации топливных композиций.

Список использованных источников

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии: РБ-093-14. Радиационные и теплофизические свойства характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных [Текст]: нормативно-технический материал. – Москва: [б.и.], 2014. – 69 с.
2. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карла по программе MCU: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ. – 154