

Исследование поведения ядерного реактора при изменении реактивности

Цель: Изучение переходных процессов при скачкообразном и линейном изменении реактивности.

Содержание: моделирование переходных процессов в ядерном реакторе с помощью программы EXCEL при скачкообразном и линейном изменении реактивности.

Модель: Ядерный реактор в точечном приближении без обратных нейтронно-физических и теплофизических связей по реактивности.

Исходное состояние: критическое.

Введение

Ядерный энергетический реактор основное время работает в стационарном режиме на номинальном уровне мощности. Вместе с тем неотъемлемой частью его работы является реализация переходных процессов, связанных с изменением мощности, например при пуске, остановке, перехода с одного уровня мощности на другой. Реализация переходных процессов является наиболее ядерно-опасной процедурой и требует безусловного выполнения регламента. Например, основные извлечения из правил ядерной безопасности следующие:

- ядерный реактор должен быть оснащен каналами контроля по уровню мощности и по скорости изменения мощности;
- скорость введения положительной реактивности не должна превышать $0,07 \beta/\text{с}$.
- если эффективность органа регулирования превышает $0,3\beta$, то введение положительной реактивности должно быть пошаговым с «весом» шага не более $0,3\beta$.
- введение отрицательной реактивности по сигналу аварийной защиты желательно осуществлять исполнительными органами СУЗ с наиболее высокой скоростью.

Этими проблемами занимается раздел физики реактора называемой «Кинетика». Под кинетикой подразумевается изменение плотности потока нейтронов (мощности реактора) как реакция на внешнее воздействие, приводящее к изменению баланса нейтронов (например, перемещение регулирующих органов), при условии, что внутренние физические свойства активной зоны реактора, потенциально способные повлиять на баланс нейтронов, и спектр нейтронов в реакторе остаются неизменными.

(Под динамикой подразумеваются нестационарные процессы, обусловленные как внешними воздействиями, так и изменением физических свойств активной зоны, с учетом их взаимного и совокупного влияния на спектр и баланс нейтронов). Если задача о пространственно-временном поведении плотности нейтронов в реакторе допускает разделение пространственных и временной переменных, то для описания временной зависимости плотности нейтронов может быть использована «точечная» модель. В «точечной» модели предполагается, что во всех точках активной зоны изменение плотности нейтронов во времени происходит по одному и тому же закону.

Простейшей математической моделью точечной кинетики является одnogрупповая модель. В рамках этой модели считается, что все запаздывающие нейтроны появляются из осколков одновременно. Модель состоит из двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \lambda c \\ \frac{dc}{dt} = \frac{\beta n}{l} - \lambda c \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия: $n(0) = n_0, c(0) = c_0$ (2)

Где ρ – реактивность (обычно задается в долях β);

n – концентрация нейтронов, м^{-3} ;

β – доля запаздывающих нейтронов;

l – время жизни мгновенных нейтронов (в реакторах на тепловых нейтронах $l \cong 10^{-3} \div 10^{-4} \text{с}$);

c – концентрация осколков деления, м^{-3} ;

λ – постоянная распада осколков деления ($\lambda = 0,0773 \text{с}^{-1}$).

Скачкообразное введение реактивности

Уравнение (1) с начальными условиями (2) при $\rho = \text{Const}$ (скачкообразное изменение реактивности) может быть решено аналитически:

$$\frac{n(t)}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\lambda \rho}{\beta - \rho} t\right) - \frac{\rho}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\beta - \rho}{l} t\right) \quad (3)$$

Решение уравнения справедливо когда $\rho < \beta$.

Поведение концентрации нейтронов при положительном скачке реактивности $\rho = 0,5\beta$ показано рис.1.

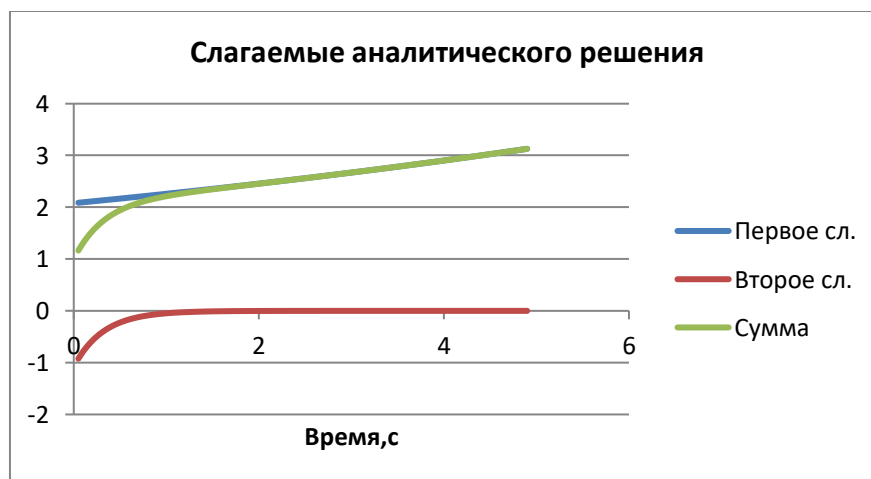


Рис.1. Изменение концентрации нейтронов при положительном скачке реактивности.

На рисунке показаны также слагаемые формулы (1). Из рисунка видно, что, если нас интересует поведение концентрации нейтронов спустя несколько секунд после скачка, оно описывается первым слагаемым. Первое слагаемое при внесении реактивности скачком меняется от 0 до 2. Такое описание носит название «приближение

мгновенного скачка». Нетрудно убедиться, что если положить в уравнении (1) $\frac{dn}{dt} = 0$, то решением системы:

$$\begin{cases} 0 = \frac{\rho - \beta}{l} n + \lambda c \\ \frac{dc}{dt} = \frac{\beta n}{l} - \lambda c \end{cases} \quad (4)$$

$$n(0) = n_0, c(0) = c_0$$

Будет как раз $\frac{n(t)}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\lambda \rho}{\beta - \rho} t\right)$, то есть первое слагаемое. Физически это означает, что поведение концентрации нейтронов будет определяться временем образования запаздывающих нейтронов из осколков.

Порядок подготовки и выполнения работы

1. Изучить теоретический материал
2. Получить уравнения математической модели после нормировки концентрации нейтронов и осколков деления на начальные значения, соответственно, на n_0 и c_0 .
3. Изучить алгоритм решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты.

Моделирование в Excel переходных процессов при заданных скачках

4. При скачкообразном изменении реактивности провести расчеты и построить зависимости плотности нейтронов от времени для заданного варианта (Таблица 1);

Таблица 1.

Вариант	Реактивность в долях β					
1	-3	-0,03	-0,003	0,003	0,03	0,3
2	-3,1	-0,031	-0,0031	0,0031	0,031	0,31
3	-3,2	-0,032	-0,0032	0,0032	0,032	0,32
4	-3,3	-0,033	-0,0033	0,0033	0,033	0,33
5	-3,4	-0,034	-0,0034	0,0034	0,034	0,34
6	-3,5	-0,035	-0,0035	0,0035	0,035	0,35
7	-3,6	-0,036	-0,0036	0,0036	0,036	0,36
8	-3,7	-0,037	-0,0037	0,0037	0,036	0,36
9	-3,8	-0,038	-0,0038	0,0038	0,036	0,36
10	-3,9	-0,039	-0,0039	0,0039	0,036	0,36
11	-4	-0,04	-0,004	0,004	0,036	0,36
12	-4,1	-0,041	-0,0041	0,0041	0,036	0,36
13	-4,2	-0,042	-0,0042	0,0042	0,036	0,36
14	-4,3	-0,043	-0,0043	0,0043	0,036	0,36
15	-4,4	-0,044	-0,0044	0,0044	0,036	0,36

Время наблюдения 50с. Расчеты провести для времени жизни мгновенных нейтронов $l = 10^{-3}\text{с}$ и 10^{-4}с

5. Исследовать точность решения в зависимости от выбранного шага интегрирования путем сравнения с аналитическим решением. Построить зависимость относительной ошибки $\frac{n^{\text{ан}} - n^{\text{чис}}}{n^{\text{ан}}} \%$ от шага.

6. Построить на одном графике результаты аналитического и численного решения.

7. Сопоставить рисунки переходных процессов, полученных при выполнении п. 4, и выявить тенденции изменения изображаемых процессов с изменением величины скачка реактивности ρ .

8. В отчете дать ответы на вопросы, являющиеся целью исследования.

Вопросы для самопроверки

1. Написать уравнение для изменения концентрации нейтронов без учета запаздывающих нейтронов. Оценить во сколько раз увеличится мощность реактора за 1 секунду при внесении реактивности $0,5\beta$. Считать время жизни поколения нейтронов $l = 10^{-3}\text{с}$.

2. Написать уравнение точечной кинетики и объяснить физический смысл членов уравнения.

3. Сравнить скорость роста концентрации нейтронов с учетом запаздывающих нейтронов при тех же условиях, что в п.1.

4. При каких временах наблюдения можно ограничиться приближением «мгновенного скачка»?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов В.И., Смирнов В.Е. Моделирование нестационарных и аварийных процессов в ядерных энергетических установках: Лабораторный практикум. М.: МИФИ, 2007. – 104 с.

2. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1975.

3. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.

4. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС – 89 (Официальный документ). М.: Госатомнадзор.

5. Наумов В.И. Физические основы безопасности ядерных реакторов. М.: МИФИ, 2003.

Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. Сб. статей под ред. проф. Орлова В.В. и д.ф.-м.н. Стумбура Э.А. М.: Атомиздат, 1972.

