

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**«ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОСТИ МЕТОДОМ АСИМПТОТИЧЕСКОГО
ПЕРИОДА»**

Методические указания к выполнению работы
по курсу «Кинетика ядерных реакторов» для студентов V курса,
направления «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»

Томск 2015

Цели работы

1. Освоить основы применения метода асимптотического периода (метода разгона) для измерения реактивности в реакторе с источником нейтронов.
2. Изучить переходные процессы при переводе реактора из подкритического в надкритическое состояние при наличии внешнего источника.

Основные теоретические положения

Решение уравнения кинетики реактора при $K_{эфф} > 1$ может быть представлено в виде суммы семи экспонент, причем шесть экспонент имеют отрицательные показатели, а одна - положительный:

$$n(t) = \sum_{j=0}^6 A_j * e^{\omega_j t}$$

Поэтому, по прошествии некоторого времени после ввода реактивности в критический реактор рост мощности реактора может быть описан одной экспонентой с показателем

$$\omega_0 = \frac{1}{T}$$

где

T - период реактора, т.е. время, в течение которого мощность реактора изменится в $e = 2.7$ раз.

Реактивность и период реактора связаны между собой *формулой обратных часов*

$$\rho = \frac{l}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{i \text{ эфф}}}{1 + \lambda_i * T} \approx \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{i \text{ эфф}}}{1 + \lambda_i * T}, \quad (1)$$

где

l - время генерации нейтронов, *сек*;

$\beta_{i \text{ эфф}}$ - эффективная доля запаздывающих нейтронов i -й группы;

λ_i - постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i -й группы, *сек⁻¹*;

T - период реактора, *сек*.

Первым членом в правой части можно пренебречь, так как его вклад не превышает 1% при $T > 10 \text{ сек}$.

Таким образом, при известных параметрах запаздывающих нейтронов задача определения реактивности сводится к измерению асимптотического периода реактора.

В реакторах с внутренним источником нейтронов, источник оказывает существенное влияние на точность калибровки по периоду реактора. В этом случае непосредственно измеряемый по скорости увеличения мощности период не соответствует тому значению T , которое входит в формулу (1). Надкритичность, полученная по измеренному периоду, будет завышенной, так как наличие источника нейтронов увеличивает скорость роста мощности. Расхождение особенно существенно на малых уровнях мощности, когда поток от источника сравним с общим потоком в реакторе. Производить калибровку на большой мощности нельзя, так как на скорость изменения мощности будут влиять мощностной, температурный и другие эффекты реактивности.

Можно исключить влияние источника нейтронов на точность калибровки по периоду, используя зависимость

$$\ln y(t) = \ln \frac{W(t) + W_{\text{под}}}{W_{\text{крит}} + W_{\text{под}}} = \frac{1}{T} * t \quad (2)$$

где

T - период реактора, *сек* ;

t - время, *сек*;

$W_{\text{под}}$ - установившаяся мощность реактора в подкритическом состоянии, *Вт*;

$W_{\text{крит}}$ - мощность реактора в момент времени, когда реактор стал критическим, Вт;
 $W(t)$ - измеряемая мощность реактора в надкритическом состоянии, Вт.

Уравнения (1), (2) справедливы для установившегося состояния реактора, в котором закончился переходной процесс, вызванный введением реактивности. Время выдержки от момента изменения состояния реактора до начала измерений зависит как от реактивности, так и от желаемой точности измерения периода. Преждевременные измерения периода дают меньшее его значение по сравнению с асимптотическим, т.е. завышают измеряемую реактивность. Чем меньше реактивность, тем больше период, и тем больше должно быть время выдержки для измерения периода с заданной точностью. В случае, когда подкритический реактор с источником нейтронов переводится в слегка надкритическое состояние, экспоненциальный закон разгона с погрешностью 1% будет иметь место после

$$t \geq T * \left[(1 \div 4.5) - \ln \left(\frac{\rho}{|\rho_0|} \right) \right] \quad (3)$$

где

ρ и ρ_0 - реактивность реактора в надкритическом и подкритическом состояниях соответственно.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	
Мощность реактора, Вт	100
Концентрация борной кислоты, г/кг	13
Входная температура теплоносителя, °С	292
Выходное давление, МПа	15,7
Расход на сборку, кг/сек	92
Отравление	нет
Позиция групп СУЗ, см:	
1÷9	353*
10	0
Шаг моделирования в динамике, сек	1-100
Число итераций в статике	500
Параметр скорость для концентрации бора	0,001

*Полностью погруженный в активную зону стержень находится на отметке 0 см.

Инструкция для обучаемых по запуску задач

При запуске SSL DYNCO LAB SYSTEM выбрать соответствующую лабораторную работу и свой вариант задания.

Пошаговая инструкция по выполнению данной задачи

1. Зависимость внесенной реактивности от концентрации борной кислоты имеет линейный характер (что упрощает задачу), поэтому метод разгона будет использован для определения эффективности борного поглотителя.

2. При запуске варианта задания загружается «нулевое» состояние реактора, относительно которого будут выполняться расчеты. Как правило, реактор находится на очень маленьком уровне мощности, обусловленном источником нейтронов. В этом состоянии обратными связями можно пренебречь. Необходимо зафиксировать в лабораторном журнале следующие параметры (для этого перейти в режим "Статический расчет"): входную и выходную температуры теплоносителя, давление в первом контуре, расход теплоносителя, мощность реактора, положение всех групп органов управления, концентрацию борной кислоты). После выполнения данного пункта вернуться в режим моделирования "Динамический расчет".

3. С рабочей скоростью 0.001 г/кг*сек (при этом установить шаг моделирования 1 сек) уменьшить концентрацию борной кислоты до значения $(C_{\text{крит}} + \Delta C)$ г/кг. Критическая концентрация борного поглотителя $C_{\text{крит}}$ была предварительно определена в задании ВВЭР-02 с

точностью до третьего знака. Рекомендуемое значение величины $\Delta C = 0,02$ г/кг. После завершения переходного процесса в журнале фиксируются значения и установившейся мощности.

4. После измерения $W_{\text{подкрит}}$ с рабочей скоростью $0,001$ г/кг*сек уменьшить концентрацию борной кислоты до значения $(C_{\text{крит}} - \Delta C)$ г/кг. Дождаться завершения переходного процесса и стабилизации мощности за счет обратных связей. В журнале фиксируются значения $C_{\text{крит}}$, $C_{\text{надкрит}}$ и значение мощности $W_{\text{крит}}$.

5. По зависимости $W(t)$ с интервалом $\Delta t \approx 5$ мин определить и занести в журнал значения мощности $W(t_i)$. Достаточно зафиксировать **15 точек**.

6. Построить полулогарифмическую зависимость (2), по которой определить период реактора. В случае асимптотического периода, уравнение (2) есть уравнение прямой, где $1/T$ является тангенсом угла наклона прямой к оси времени. Следовательно

$$T = \frac{1}{\text{tg}\alpha}$$

В виду того, что зависимость эффективности борной кислоты от ее концентрации имеет линейный вид и воздействие оказывается в каждой точке активной зоны, выражение (3) используем в виде

$$t \geq T$$

Таким образом, при определении тангенса угла наклона прямой следует отбросить как минимум первую точку и несколько последних, которые не удовлетворяют уравнению прямой ввиду появившихся в реакторе обратных связей. Тангенс угла наклона следует определять с точностью до шестого знака после запятой.

7. Из выражения (4) определить период реактора и, подставив в (1) параметры запаздывающих нейтронов для реактора ВВЭР, приведенные ниже, рассчитать изменение реактивности $\Delta\rho$, соответствующее изменению концентрации борной кислоты с $C_{\text{крит}}$ до $C_{\text{надкрит}}$.

Требования к оформлению отчетных материалов

Отчет должен содержать: титульный лист, описание работы, графические зависимости поведения реактора, данные, по которым были получены кривые. Также отчет должен содержать систематизированные результаты расчетов и аргументированные выводы из их сопоставления и анализа.

Таблица 2. Примерная форма лабораторного журнала

i	Время t , сек	Мощность $W(t_i)$, Вт	$\ln y(t)$ (вычисляется по формуле (2))
1			
2			
...			
15			

Таблица 3. Параметры запаздывающих нейтронов

i	β_i эфф	λ_i
1	2.15E-04	1.24E-02
2	1.42E-03	3.05E-02
3	1.27E-03	1.11E-01
4	2.57E-03	3.01E-01
5	7.48E-04	1.14E+00
6	2.73E-04	3.01E+00

Контрольные вопросы

1. Дайте определение периода реактора, периода удвоения мощности. Как связаны эти параметры между собой?
2. Выведите формулу обратных часов.
3. Выведите краткие формы уравнения обратных часов для больших и малых реактивностей.
4. Графический вид решения уравнения обратных часов.
5. Графики изменения плотности потока нейтронов при сообщении реактору положительной и отрицательной реактивности.
6. Перечислите условия применимости формулы обратных часов для измерения реактивности по методу разгона. На что влияет каждое из условий?
7. Основные принципы применения метода асимптотического периода для измерения реактивности стержней.
8. Почему первые замеры периода после вывода реактора из подкритического состояния в надкритическое отличаются от последующих и в какую сторону?
9. Почему последние замеры периода после вывода реактора из подкритического состояния в надкритическое отличаются от предыдущих и в какую сторону?
10. Как влияет источник нейтронов на точность калибровки по периоду разгона?

Критерий успешности выполнения задачи

Учебная задача считается выполненной успешно в случае, если обучаемый способен при защите работы без использования каких-либо вспомогательных материалов (методические пособия, отчет по работе, домашние заготовки):

1. Детально объяснить последовательность выполнения работы;
2. Продемонстрировать понимание теоретических основ, необходимых для выполнения данного задания;
3. Объяснить полученные результаты и графики;
4. Ответить на контрольные вопросы, включая вывод необходимых уравнений “с чистого листа”.