

Петров Е. А.,
научный руководитель Семенов А.А
Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

Влияние пространственных эффектов выгорания на показания внутриреакторных датчиков прямой зарядки.

В работе описаны результаты исследования пространственных эффектов выгорания датчиков прямой зарядки (ДПЗ). Для проведения исследования построена математическая модель ДПЗ. Показана необходимость учета этого эффекта в реакторных расчетах.

В настоящее время датчики ДПЗ имеют точность порядка 1% и протяженность чувствительной части от 10 до 40 см. В таких условиях не учет пространственного распределения выгорания эмиттера может дать заметную методическую погрешность. Сейчас в штатных методиках и большинстве расчетных программ используется точечное приближение для описания датчика. Целью данной работы была оценка влияния пространственной неравномерности выгорания датчика ДПЗ на его показания.

Работа выполнялась в 3 этапа:

- создание точечной модели ДПЗ и тестирование ее по экспериментальным данным;
- создание распределенной модели ДПЗ;
- проведение вычислительных экспериментов с распределенной моделью ДПЗ.

В работе рассматривалось два эффекта:

- эффект от учета неоднородности выгорания датчика;
- эффект от учета неоднородности выгорания датчика при наложении изменений высотного профиля нейтронного поля.

В работе считалось, что ток, формируемый датчиком, обусловлен β -электронами, а также электронами отдачи, образующимися при комптоновском рассеянии γ -квантов.

$$I = C_{104Rh} \lambda_2 k_\beta + (\sigma_1 + \sigma_2) C_{103Rh} \varphi \cdot k_\gamma \quad (1)$$

где:

C -концентрации ядер нуклидов;

λ_2 -постоянная распада ^{104}Rh ;

φ -нейтронный поток;

σ_1, σ_2 -сечения (n, γ) реакции для двух каналов;

k_β, k_γ -активационная и комптоновская паспортные чувствительности датчика.

Для нахождения концентраций изотопов использовались следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{103_{Ro}}}{\partial t} &= -(\sigma_1 + \sigma_2) \varphi C_{103_{Ro}} \\ \frac{\partial C_{104m_{Ro}}}{\partial t} &= \sigma_1 \varphi C_{103_{Ro}} - \lambda_{104m_{Ro}} C_{104m_{Ro}} \\ \frac{\partial C_{104_{Ro}}}{\partial t} &= \sigma_2 \varphi C_{103_{Ro}} + \lambda_{104m_{Ro}} C_{104m_{Ro}} - \lambda_{104_{Ro}} C_{104_{Ro}} \\ C_{103_{Ro}}(0) &= C_0 \\ C_{104m_{Ro}}(0) &= 0 \\ C_{104_{Ro}}(0) &= 0\end{aligned}\tag{2}$$

Обозначения такие же, как и в уравнении (1).

Предусмотрено два способа задания начальной концентрации родия.

Один способ задать концентрацию ядер на основе плотности материала эмиттера и его геометрии.

Поскольку эти данные могут содержать существенные ошибки, был предусмотрен второй способ - откалибровать датчик по экспериментальным данным.

Калибровка датчика производилась по экспериментальным данным, представленным в паспорте ДПЗ компании «ИНКОР». В начальный момент времени в датчике длиной 1м формируется ток

$$I(0) = k_\gamma \varphi(0)\tag{3}$$

где $k(\gamma)$ – начальная комптоновская чувствительность датчика к условному потоку на 1м длины эмиттера [$A \cdot cm^2 \cdot c$], φ - нейтронный поток [$1/ cm^2 \cdot c$]

по формуле (1)

$$i(t=0) = (\sigma_1 + \sigma_2) C_{Rh103}(t=0) \varphi k_\gamma$$

Приравняв, получим начальную концентрацию Rh103

$$C_{Rh103}(t=0) = 1 / (\sigma_1 + \sigma_2)$$

С применением методов объектно-ориентированного программирования был написан класс для моделирования точечного датчика ДПЗ. Такой подход позволил легко перейти к распределенной модели датчика, которая была построена просто как совокупность точечных датчиков. Предполагалось, что длина свободного пробега теплового нейтрона составляет не менее 1см, и на этой длине поле нейтронов остается неизменным. Поэтому шаг дискретизации датчика по пространству был выбран равным 1 см.

Класс датчика содержит 2 функции для решения задачи Коши при помощи как явных, так и неявных методов интегрирования. Таким образом, модель оказывается полностью отделена от методов интегрирования, что позволяет использовать любые шаги по времени и исследовать выгорание как на коротких, так и на протяженных промежутках времени.

Исследование выгорания датчика проводилось в реальных полях реактора ВВЭР-1000. Для аппроксимации множества экспериментальных точек нейтронного поля использовалась сплайн-аппроксимация.

Исследование выгорания ДПЗ длиной 20 см в постоянном неравномерном поле в рамках данной модели показало, что ток датчика в некоторых неоднородных полях отличается от тока датчика в тех же усредненных полях на величину порядка 10%.

Отличие же хода кривых $I(t)/I(0)$ в двух случаях достигает 5%. Вследствие этих отличий возникает методическая погрешность, превышающая погрешность, указанную в паспорте(0.75%).

Исследование выгорания ДПЗ длиной 20 см в полях с переменным профилем показало, что в различных полях отношение I/I_{cp} отличается более чем на 1%, что также приводит к возникновению методической погрешности.

Вывод: при определении потока нейтронов по показаниям датчика ДПЗ необходимо учитывать влияние неравномерности выгорания датчика, а также изменение высотного профиля поля во время кампании.

Список литературы:

1. Черезов А.Л., Романин С.Д., Щукин Н.В. Разработка модулей, расширяющих возможности программного комплекса "ROSA". //Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2007, Москва 2006, т.8, с. 133-135.

2. Соловьев Д.А., Семенов А.А., Романин С.Д. Новые возможности программного комплекса «ROSA» для курсового проектирования ЯЭУ. //Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2006, Москва 2006, т.8, с.112-113.

3. D. R. Ferguson, K. F. Hanson, "Solution of the Space-Dependent Reactor Kinetics Equations in Three Dimensions", Nuclear Science and Engineering: 51, 189-205 (1973).