

турного коэффициента кварцевого резонатора в диапазоне 0—100 °С составляет 0,074 °С.

Частотный выход термодатчика позволяет удалять цифровой измеритель температуры на большие расстояния от измеряемого объекта без внесения дополнительных погрешностей. В экспериментах были применены кварцевые резонаторы с $f_0 \approx 5$ МГц и $K \approx 170$ Гц/°С. Информация с цифрового измерителя температуры по каналу связи через стандартные модули вводилась в ЭВМ. Коммутация термодатчиков осуществлялась также через стандартные модули.

Следует заметить, что при относительных измерениях плотности тепловыделения может быть использован режим перехода реактора с одного уровня мощности на другой (рис. 1, 2). На рис. 1 показано, как изменяется температура в различных зонах критической сборки при различной мощности. На рис. 2 приведено распределение плотности тепловыделения по радиусу критической сборки, измеренное в центральной плоскости. Измерения выполнены контактным кинетическим методом и малогабаритными камерами деления [5].

Переход от скорости счета, полученной с помощью камер деления, к плотности тепловыделения осуществляется по формуле

$$Q = \sum_i AN_i E_f^i n_i (\langle \sigma_f^i \rangle / \langle \sigma_f^{235} \rangle), \quad (3)$$

где N_i — относительная скорость счета камеры деления i -го делящегося элемента; E_f^i — часть энергии, выделяемая при одном акте деления i -го делящегося элемента, которая реализуется в тепло; n_i — концентрация ядер данного

элемента в 1 см³ сборки; $\langle \sigma_f^i \rangle / \langle \sigma_f^{235} \rangle$ — отношение усредненных по спектру нейтронов сечений деления соответствующих элементов.

Отношение средних сечений реакций для делящихся элементов определялось экспериментально. Коэффициент A определен с помощью абсолютной камеры деления для центра активной зоны. При вычислении плотности полного тепловыделения по формуле (1) значения молярных теплотемкостей взяты из работы [6]. Оказалось, что в зонах малого обогащения (ЗМО) и большого обогащения (ЗБО) результаты, полученные обоими методами, в пределах погрешностей совпадают. Различие в экране полностью соответствует расчетному значению вклада в полное тепловыделение вторичного γ -излучения. Статистическая погрешность измеренных распределений в пределах активной зоны была не более 1%, в экране 3—5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геращенко О. А., Климентов В. Б., Никонов А. В. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 3, с. 232.
2. Жилкин А. С. и др. Там же, 1977, т. 42, вып. 6, с. 502.
3. Simons G., Olson A. «Nucl. Sci. Engng», 1974, v. 53, p. 162.
4. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М., «Энергия», 1978.
5. Бондаренко В. В. и др. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 1, с. 82.
6. Таблицы физических величин. Справочник под ред. И. К. Кикина. М., Атомиздат, 1976.

Поступило в Редакцию 24.01.79

УДК 621.039.548

Влияние водорода на погрешность измерения содержания делящихся нуклидов нейтронными методами

БУЛАНЕНКО В. И., ЧАРЫЧАНСКИЙ В. В.

Требования безопасности и материального учета в производстве ядерного топлива для энергетических ядерных реакторов вызывают необходимость в надежных методах и средствах измерения содержания делящихся нуклидов в различных средах. На практике наряду с другими применяются активные и пассивные нейтронные методы измерения содержания делящихся нуклидов. При использовании быстрых нейтронов (активные методы) и собственного нейтронного излучения среды (пассивные методы) для индуцирования делений в безводных средах наличие неконтролируемого количества водорода в анализируемом материале может вносить дополнительные погрешности в результате измерений [1]. Погрешность в этом случае вызывает изменение скорости реакции деления, изменение размножения, а также смягчение энергетического спектра нейтронов утечки за счет замедления последних при взаимодействии с ядрами водорода, находящимися в контролируемой среде. В конечном итоге изменение этих параметров может привести к изменению отклика детектирующей системы, не связанного с изменением содержания делящихся нуклидов.

Влияние водорода на погрешность измерения содержания делящихся нуклидов в безводных средах рассмотрим на примере контроля обогащения гексафторида урана UF₆ изотопом ²³⁵U. Для контроля обогащения урана в UF₆, находящегося в транспортных емкостях, используют собственное нейтронное излучение, возникающее в реакции ¹⁹F(α , n)²²Na [2]. Хотя основным α -излучателем среди изотопов урана является ²³⁴U ввиду практически постоянного изотопного отношения ²³⁵U/²³⁴U при низком (до 5%)

обогащении по ²³⁵U, выход нейтронов (α , n)-реакции может служить мерой содержания ²³⁵U [3].

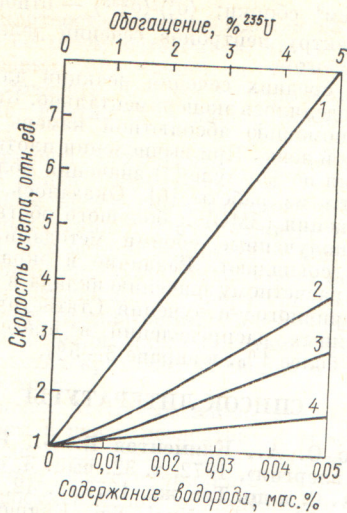
В общем случае отклик детектирующей системы, используемой для определения обогащения, является функцией обогащения J и содержания водорода C_H :

$$N \approx f(J, C_H). \quad (4)$$

Приближенное выражение для функции отклика можно получить расчетами нейтронных полей системы, содержащей UF₆ с различным обогащением урана и различным содержанием ядер водорода. Методика расчета основывалась на решении многогрупповых уравнений, описывающих взаимодействие нейтронов с веществом в P_1 -приближении. Были проведены расчеты для цилиндра с отношением высоты к диаметру порядка единицы, заполненного UF₆ с плотностью 5 г/см³, в диапазоне обогащения урана от природного до 5% и содержания водорода от 0 до 0,05 мас.%. В качестве распределенного в UF₆. В качестве детектора использовали нейтронный счетчик с радиатором из ³He с кадмиевым экраном и без него, а также с экраном из карбида бора (B₄C).

Скорость счета нейтронного детектора определяли по рассчитанным групповым потокам и известной групповой эффективности. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Эти результаты позволяют сделать следующие выводы, упрощающие дальнейшие расчеты.

1. Для указанного диапазона содержания водорода в UF₆ изменением размножения нейтронов в системе можно пренебречь. Относительное изменение $k_{эф}$ не превышает 5%, при обогащении 5% и отсутствии водорода $k_{эф} = 0,297$.



Р и с. 1. Зависимость скорости счета нейтронов от обогащения (1) и содержания водорода (2, 3, 4), измеренного тепловым детектором (2) и детекторами с экранами из кадмия (3) и В₄С (4)

2. Изменение обогащения урана в UF₆ от природного до 5% практически не влияет на энергетический спектр нейтронов утечки.

3. Зависимость скорости счета нейтронов от обогащения в исследуемом диапазоне можно представить прямой линией вида

$$N_0 = A + BJ, \quad (2)$$

где A — постоянная вклада ²³⁸U в скорость счета; B — постоянная изменения скорости счета нейтронов на 1% изменения обогащения.

4. Зависимость скорости счета нейтронов от содержания водорода аппроксимируется линейной функцией вида

$$N = N_0(1 + \gamma C_H). \quad (3)$$

Здесь γ — постоянная изменения скорости счета нейтронов на 0,1% изменения содержания водорода. Значения γ различны для теплового детектора и детекторов с экранами из кадмия и карбида бора. Следовательно, приближенное выражение для явной зависимости скорости счета от обогащения и содержания водорода запишется следующим образом:

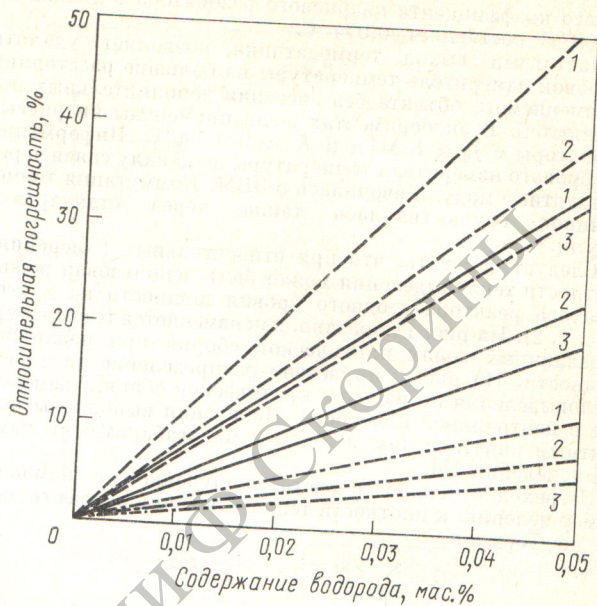
$$N = (A + BJ)(1 + \gamma C_H). \quad (4)$$

Из выражения (4) получим аналитическую зависимость для определения обогащения по результатам измерения скорости счета нейтронов при произвольном содержании водорода:

$$J = \frac{1}{B} \left(\frac{N}{1 + \gamma C_H} - A \right). \quad (5)$$

Предположим теперь, что составляющие погрешности измерения обогащения, не связанные с наличием водорода, сведены до минимума и точно известны. Тогда погрешность, вносимая неопределенностью содержания водорода, может быть оценена так:

$$\Delta J_{(\Delta C_H)} = (\partial J / \partial C_H) \Delta C_H. \quad (6)$$



Р и с. 2. Зависимость относительной погрешности измерения обогащения урана в UF₆ от содержания водорода: — — — тепловой детектор; — — — кадмиевый детектор; — — — детектор с экраном из В₄С; 1—3 — обогащение 0,7; 1,8; 3,6% соответственно

Из равенств (4)–(6) легко получить выражение для относительной погрешности определения обогащения урана в UF₆, вносимой неопределенностью содержания водорода:

$$\delta J = \frac{\gamma}{B} \frac{A + BJ}{1 + \gamma C_H} \frac{\Delta C_H}{J}. \quad (7)$$

На рис. 2 представлены результаты расчетов δJ . При этом было принято, что $A = 1$, $B = 1,5$ (1/1% ²³⁵U); $\gamma = 1,4; 3,5; 5,8$ (1/0,1% H) соответственно для детекторов с экранами из В₄С и кадмия и без экрана. Значения постоянных A , B и γ получены с использованием зависимости (4) и результатов расчетов, представленных на рис. 1.

Таким образом, наличие неконтролируемого количества водорода в анализируемой среде приводит к значительной погрешности измерения обогащения (~ 6–10% на 0,01% водорода в зависимости от обогащения для теплового детектора). В связи с этим при измерении содержания делящихся веществ в безводных средах нейтронными методами необходимо контролировать содержание водорода или исключить его влияние на измерения, что может быть в некоторой степени обеспечено использованием комбинированных пороговых и 1/v-нейтронопоглощающих фильтров или детектирующей системы с эффективностью, не зависящей от энергии.

Авторы благодарят В. В. Фролова за постановку задачи и обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Close D., Barse R., Menlove H. «Nucl. Instrum. Methods» 1976, v. 136, p. 131.
2. Walton R. e.a. «Nucl. Technol.», 1974, v. 21, p. 133.
3. Sampson T. «Nucl. Sci. Engng», 1974, v. 54, p. 430.

Поступило в Редакцию 24.01.79