

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ В ВВЭР-1000

Бачучин И.В., Ерак Д.Ю., Николаенко В.А. (ИПМТ РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Одним из основных параметров, воздействующих на свойства облучаемых в ядерном реакторе материалов, является флюенс быстрых нейтронов, определяемый на основании ядерных реакций между нейтронами и изотопами некоторых элементов. По активности образующихся при этом ядер можно судить о потоке быстрых нейтронов [1].

Использование активационных методов физически безупречно, но отдельные факторы все же ограничивают их применение. Например, при использовании ^{54}Fe из-за малого периода полураспада образующегося радиоактивного ^{54}Mn исчезает информация о предшествующих измерению потоках нейтронов за 3 года и более. Поэтому если при длительном облучении изменяется плотность потока быстрых нейтронов, приходится использовать не всегда надежные процедуры, это учитывающие. При использовании ниобия, имеющего больший период полураспада, возникают другие трудности.

Однако флюенс нейтронов может быть определен по изменению других свойств облучаемых материалов, в частности, по расширению кристаллической решетки алмаза [2]. Но и этот метод не свободен от недостатков. Например, влияние температуры облучения изменяет свойства алмазного датчика. Кроме того, его использование требует предварительной градуировки, в частности, посредством тех же активационных методов.

В связи с этим можно ожидать, что комбинация двух методов может свести к минимуму недостатки и обеспечить максимум преимуществ. Такое сочетание методов особенно полезно в случае массовых измерений, например, при изучении свойств образцов-свидетелей корпусной стали ВВЭР-1000, когда температура облучения 300 °С постоянна [3]. В этом случае одновременно с образцами-свидетелями размером 10×10×57 мм облучаются алмазные датчики, представляющие собой наполненные порошком алмаза алюминиевые капсулы диаметром 3, длиной 10 мм. Датчики устанавливаются в отверстия, расположенные непосредственно в образцах-свидетелях на расстоянии 5 мм от одного из его торцов [4].

Кристаллическая решетка алмаза при облучении нейтронами расширяется, и это расширение функционально связано с флюенсом нейтронов. Расширение решетки алмаза с большой точностью ($\pm 0,005\%$) может быть измерено рентгеновскими методами, что обеспечивает возможность его использования в качестве суммирующего датчика флюенса нейтронов. Для этого должна быть получена градуировочная зависимость расширения решетки алмаза от флюенса для температуры 300 °С.

Рассмотрим зависимости расширения решетки алмаза от эффективных суток работы АЭС.

Многочисленные данные о расширении кристаллической решетки алмаза получены при облучении в ВВЭР-1000 двухэтажных сборок, на каждом этаже которых равномерно по окружности диаметром 66 мм на расстоянии 300 мм над активной зоной установлены шесть контейнеров с образцами-свидетелями и алмазными датчиками.

Совокупность полученных данных о расширении решетки алмаза удовлетворительно аппроксимируется синусоидальными зависимостями от азимутального угла расположения контейнеров. Объясняется это тем, что окружение каждого этажа сборки с контейнерами точечными источниками активной зоны оказывается симметричным. Поэтому совместное воздействие всех источников создает максимальный поток нейтронов в ближайшем к активной зоне контейнере, минимальный — в наиболее удаленном. При этой геометрии отклонение интенсивности нейтронного излучения по контейнерам каждого этажа сборки от синусоидальной зависимости составляет менее 0,5%, если система находится в вакууме.

Представленная упрощенная картина осложняется тем, что, во-первых, пространство между контейнерами и активной зоной заполнено водой и элементами конструкции реактора. Поэтому изменяются спектр и интенсивность нейтронного излучения. Кроме того, поглощающее вещество в области активной зоны и соседнем пространстве распределено неравно-

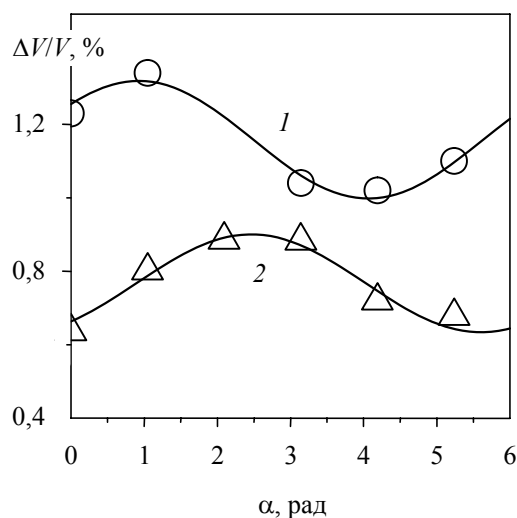
мерно, что усугубляет неравномерность облучения сборок с образцами и алмаза.

Во-вторых, имеет место неопределенность расположения алмазного датчика на этаже. В каждом контейнере облучаются два образца-свидетеля, а алмазный датчик имеется только в одном. В результате алмаз всегда оказывается смещенным от центра контейнера на 5 мм. Поскольку азимутальная ориентация контейнеров произвольна, произвольно (в пределах ± 5 мм) и смещение алмазного датчика от окружности, на которой расположены контейнеры. Это также ведет к изменению интенсивности падающего на алмаз излучения, следовательно, и к отклонениям расширения решетки алмаза от закона синуса, действующего только на окружности.

Надежно рассчитать влияние перечисленных факторов и определить суммарное отклонение экспериментальных данных от синусоидальной зависимости не представляется возможным, но оценить отклонение экспериментально можно. На основании данных о расширении решетки алмаза для верхних и нижних этажей всех сборок второй выгрузки второго энергоблока Балаковской, третьей, второй выгрузки первых трех энергоблоков Хмельницкой, третьей выгрузки третьего энергоблока Ровенской АЭС была вычислена относительная разность между экспериментально полученными значениями расширения алмаза и найденными по соответствующим синусоидам. Оказалось, что в 95% случаев максимальное отклонение от синусоидальной зависимости для 146 точек измерения составило менее $\pm 3\%$. Для примера на рис. 1 приведены экспериментальные результаты и соответствующие синусоидальные зависимости расширения решетки алмаза в случае облучения на нижних этажах сборок Л-2 в течение 4404 эф. сут на Ровенской и 2116 эф. сут на Запорожской АЭС.

Поскольку расширение решетки алмаза определяется флюенсом, то оно по отношению к нему является вторичным. Поэтому реальное распределение флюенса по сравнению с функцией расширения алмаза может быть только ближе синусоиде. Из этого следует, что распределение флюенса нейтронов в центрах контейнеров любого этажа с ошибкой менее $\pm 3\%$ должно всегда следовать закону синуса.

В таблице приведено максимальное расширение решетки алмаза, полученное при облучении на нижних этажах сборок Л-2 для разных блоков АЭС и очередности выгрузок. На рис. 2

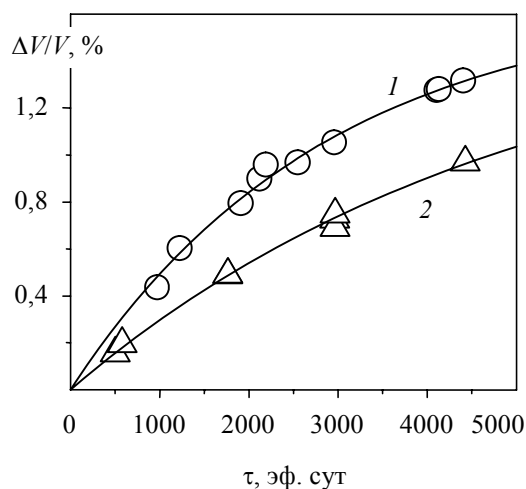


Р и с. 1. Зависимость расширения кристаллической решетки алмаза на нижних этажах сборок Л-2 для третьей выгрузки из третьего энергоблока Ровенской (1) и первой выгрузки из первого энергоблока Запорожской АЭС (2) в функции угла следования контейнеров

эти данные представлены в зависимости от эффективных суток работы АЭС. Аналогичные зависимости получены и для верхних этажей тех же сборок Л-2, а также для обоих этажей Л-1, -3, -4. Зависимости отличались лишь абсолютным

Максимальное расширение решетки алмаза на нижнем этаже сборки Л-2

АЭС	Очередность выгрузки	Длительность облучения, эф. сут	Расширение решетки алмаза, %
Калининская, 1-й блок	1-я	503	0,156
Балаковская, 1-й блок	1-я	582	0,196
Запорожская, блок:			
2-й	1-я	969	0,437
4-й	1-я	1222	0,605
Балаковская, блок:			
1-й	2-я	1765	0,489
	2-я	1765	0,492
2-й	1-я	1908	0,795
Запорожская, 1-й блок	1-я	2116	0,9
Балаковская, 4-й блок	1-я	2187	0,959
Запорожская, 4-й блок	2-я	2546	0,97
Балаковская, 3-й блок	2-я	2956	1,055
Калининская, 1-й блок	2-я	2964	0,729
Балаковская, блок:			
1-й	3-я	2968	0,69
	3-я	2968	0,748
2-й	2-я	4103	1,278
Хмельницкая, 1-й блок	3-я	4128	1,282
Ровенская, 3-й блок	3-я	4404	1,34
Калининская, 1-й блок	3-я	4426	0,97



Р и с. 2. Зависимость максимального расширения решетки алмаза на нижних этажах сборок Л-2 для разных станций, блоков и выгрузок от времени работы реактора: 1, 2 — расположение алмаза в контейнерах ниже или выше места надреза образца-свидетеля соответственно

расширением алмаза: на нижних этажах расширение было всегда больше, чем на верхних, больше оно было по сравнению со сборкой Л-2 для сборок Л-1 и меньше для Л-3.

На рис. 2 видно, что экспериментальные точки группируются в две зависимости с разным уровнем расширения, причем ясно, что при одном и том же времени облучения расширение должно быть больше, если алмаз располагается ниже центра образца-свидетеля, и соответственно меньше, если выше, т.е. дальше от активной зоны.

Способ установки образцов-свидетелей в контейнеры (вверх или вниз алмазным датчиком) не был оговорен техническими требованиями, поэтому решение принималось на заводе во время сборки контейнеров. Положение датчика относительно центра образца-свидетеля, т.е. место надреза на нем можно было определить при демонтаже сборок после облучения, и эта операция была проведена при выгрузке сборок из Хмельницкой, Балаковской и Ровенской АЭС. Кроме того, для второй выгрузки сборок третьего энергоблока Балаковской АЭС расположение алмазных датчиков при облучении было проверено по интенсивности излучения ^{60}Co на разных концах образцов с отверстием для капсул. Выяснилось, что во всех случаях алмазные датчики располагались в нижней части. Таким образом, визуально установлено, что алмаз этих комплектов при облучении находился в нижней части образцов-свидетелей (см. рис. 2, кривая 1). Поэтому можно допустить, что все данные для комплектов, блоков и выгрузок, ха-

рактеризуемые этой кривой, получены при нижнем расположении алмазного датчика.

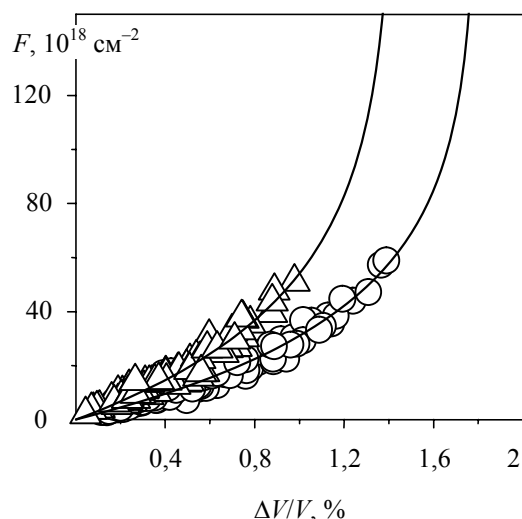
Для всех сборок Л-2 разных выгрузок первых энергоблоков Балаковской и Калининской АЭС максимальное расширение решетки алмаза всегда характеризуется кривой 2 на рис. 2, следовательно, можно заключить, что в этих случаях алмаз в образцах-свидетелях находился в их верхней части, т.е. дальше от активной зоны, был облучен слабее и расширился меньше. Эти допущения подтверждаются количественно степенью различий двух зависимостей рис. 2. Видно, что для одного и того же времени работы они различаются примерно на 30%, что соответствует разнице между флюенсом нейтронов для положений алмаза при нижней и верхней установке датчиков в образцах-свидетелях. Этот вывод был подтвержден при демонтаже сборок четвертой выгрузки первого энергоблока Балаковской АЭС, в которых алмазные датчики находились в верхней части образцов-свидетелей. Таким образом, наличие двух зависимостей на рис. 2 вызвано разным расположением алмазных датчиков по высоте образцов-свидетелей (в таблице курсивом обозначены случаи верхнего расположения алмазных датчиков).

Отсюда появляется возможность построения в соответствии с расположением датчиков двух градуировочных графиков для определения флюенса нейтронов по расширению кристаллической решетки алмаза. На рис. 3 приведена зависимость флюенса нейтронов, определенного по активности марганца, от расширения кристаллической решетки алмаза при нижнем и верхнем расположении датчиков в образцах-свидетелях. На практике флюенс по активности ^{54}Mn определяется в трех точках образца-свидетеля: на расстоянии 9,5, 27,5 (место надреза) и 47,5 мм от одного из его торцов, но кривые рис. 3 построены только для флюенса нейтронов в центре образца-свидетеля.

Полученное экспериментальное расширение решетки алмаза при постоянной температуре облучения в зависимости от флюенса нейтронов удовлетворительно описывается уравнением

$$\Delta V/V = A[1 - \exp(-BF)], \quad (1)$$

где A — насыщение расширения решетки алмаза, достигаемое при большом флюенсе нейтронов (10^{21} см^{-2} и более, $E > 0,5 \text{ МэВ}$); B — коэффициент, характеризующий угол наклона зависимостей в начале координат.



Р и с. 3. Зависимость флюенса нейтронов ($E > 0,5$ МэВ) в центре образцов-свидетелей от расширения кристаллической решетки алмаза для случаев его расположения ниже (○) и выше места надреза (△)

Решая уравнение (1) относительно флюенса нейтронов, получаем

$$F = -B^{-1} \ln[1 - A^{-1} (\Delta V/V)].$$

Затем из данных рис. 3 для нижнего и верхнего положений алмазного датчика в образце-свидетеле получаем методом наименьших квадратов градуировочные уравнения связи флюенса быстрых нейтронов в месте надреза с расширением решетки алмаза:

$$F = -38,02 \ln [1 - 0,558(\Delta V/V)_{\text{датчик внизу}}]; \quad (2)$$

$$F = -44,41 \ln [1 - 0,704(\Delta V/V)_{\text{датчик вверх}}]. \quad (3)$$

Таким образом, уравнения (2), (3) позволяют по расширению решетки алмаза определить флюенс нейтронов в центре контейнера с образцами-свидетелями. Тем не менее следует отметить и недостатки алмазных датчиков. Например, их использование в предложенном виде не позволяет оценить отдельно флюенс нейтронов каждого образца-свидетеля одного контейнера и не дает сведений о флюенсе на отметках образца 9,5 и 47,5 мм. Кроме того, этот метод не учитывает спектральные различия мест облучения. Однако иногда алмаз может оказаться полезным, особенно если по каким-либо причинам результаты определения флюенса нейтронов по активности ^{54}Mn вызывают сомнения.

Примером такой ситуации является случай с образцами-свидетелями первой выгрузки из первого блока Балаковской АЭС. Метод активации требует данных об истории облучения, и

информация о том, что первая выгрузка состоялась после двух кампаний реактора, была использована при расчете флюенса по активности марганца. Однако расширение кристаллической решетки алмаза датчиков, извлеченных при этой выгрузке, свидетельствовало о том, что флюенс нейтронов был примерно в 2 раза меньше. Противоречие было устранено, когда выяснилось, что сборки с образцами-свидетелями и алмазом были установлены в активную зону только при планово-предупредительном ремонте после первой кампании. После пересчета на меньшее время облучения датчиков активации результаты, полученные разными методами, совпали.

Таким образом, можно считать целесообразным одновременное использование обоих методов, для чего имеются все возможности (алмазные датчики установлены во все сборки с образцами-свидетелями, по шесть на каждый этаж, а технические трудности при использовании алмаза незначительны). Во всяком случае, алмаз может применяться для верификации флюенса нейтронов, полученного методом активации. В качестве дополнительного преимущества алмаза следует отметить сохранность информации во времени, а также отсутствие требований о данных начала и окончания облучения, перерыва в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авраменко В.И., Бородин А.В., Вихров В.И., Красноштанов В.Ф. СРЕКТР — расчетно-экспериментальный метод определения потоков быстрых нейтронов в исследовательских реакторах: Препринт ИАЭ-2886, 1977. 27 с.
2. Pravdyuk N.F., Nikolaenko V.A., Karpuhin V.I., Kuznetsov V.N. Investigation of diamond and silicon carbide as indicators of irradiation conditions. — In Proc. Intern. Conf. on Properties of Reactor Materials and Effects of Radiation Damage. Berkeley Castle Gloucestershire, England, 1961, p. 57—62.
3. Ерак Д.Ю., Николаенко В.А. Определение температуры облучения образцов-свидетелей корпусной стали ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 3, с. 145—150.
4. Nikolaenko V.A., Zaritsky S.M., Bachuchin I.V. Evaluation of diamond detectors for fast neutron fluence measurements in WWER-1000 surveillance assemblies. — J. of ASTM International, 2006, v. 3, № 6, p. 467—474.

Поступила в Редакцию 19.08.09