

Экспериментальная привязка данных по облучению графита в реакторах к универсальной шкале повреждающего потока быстрых нейтронов

В. И. КЛИМЕНКОВ, В. Г. ДВОРЕЦКИЙ

УДК 539.16.04:621.039.512.45

Рассматриваемая задача возникает в связи с необходимостью согласования результатов по облучению графита нейтронными потоками, имеющими различные параметры [1] (облучение проводится не в одном и том же реакторе или в разных участках одного реактора). Это связано с тем, что радиационное повреждение графита зависит от величины и энергетического спектра повреждающего потока нейтронов.

Согласованность результатов облучения достигается при измерении дозы в единицах интегрального повреждающего потока быстрых нейтронов [2]. Если известны величина и спектр нейтронного потока, то привязка к этой шкале может быть осуществлена расчетным путем с учетом концепции эквивалентных температур [3] и повреждающей способности нейтронов разных энергий по всему спектру [4, 5]. Если спектр нейтронного потока неизвестен, то необходимо провести калибровочный эксперимент, который кардинально отличается от экспериментальной привязки [6, 7]. В последнем случае плотность потока нейтронов выражается по известному спектру с определенной нижней энергией (например, $> 0,18$ Мэв).

Методика эксперимента. Калибровочный эксперимент заключается в следующем: в реакторе в течение времени $t_{обл}$ облучается ампула, в которую помещены образец графита и активационный пороговый детектор (например, Ni^{58}). Облучение проводится в той точке реактора, для которой необходима привязка. Ампула не должна существенно влиять на параметры нейтронного поля.

По удельной активности порогового детектора определяется эквивалентный поток нейтронов деления Φ_{Ni}^f . Для этого используется сечение пороговой реакции (n, p), усредненное по спектру деления. Интегральный поток $\Phi_{Ni}^f t_{обл}$ не должен существенно отличаться от величины $10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$ нейтр/см², а температура облучения графита $T_{обл}$ должна лежать в пределах 100—150° С.

У облученного образца графита определяется остаточный радиационный прирост электросопротивления $\Delta\rho/\rho$, затем по спаду электросопротивления при отжиге $\Delta\rho = f(T_{отж})$ опре-

деляется температура облучения графита [8]. Измерение температуры можно дублировать применением метода алмаза [9].

По величине $\Delta\rho/\rho$ и значению Φ_{Ni}^f , определенному по активационному пороговому детектору, с учетом температуры облучения находится коэффициент перевода эквивалентных потоков нейтронов деления в точки облучения в данном реакторе к универсальной шкале повреждающего потока быстрых нейтронов Φ_{df} :

$$k_{fj} = \Phi_{df} / \Phi_{Ni}^f. \quad (1)$$

Это осуществляется с помощью градуировочной формулы [2], выведенной для графита ПГГ, вырезанного перпендикулярно к оси формования:

$$\Delta\rho/\rho = 0,030 (1 - 0,00514T) (\Phi_{df} t \cdot 10^{-16})^{0,75}, \quad (2)$$

где T — температура облучения, °С.

Зависимость, описываемая этой формулой, справедлива для калибровочного значения повреждающего потока $\Phi_{dfk} = 2,65 \times 10^{11}$ нейтр/см²·сек. В случае, если облучение в эксперименте проводилось при другой величине Φ_{df} , применяется концепция эквивалентных температур для соотношения Φ_{df} / Φ_{dfk} . Однако задача усложняется тем, что величина Φ_{df} неизвестна, в связи с этим используется метод итераций [1, 2, 10].

Методика обработки экспериментальных данных. Для упрощения расчетов по методу итераций применяется номограмма (рис. 1) решения уравнения (2) относительно $\Phi_{df} t$. Первое значение $(\Phi_{df} t)_1$, полученное в первой итерации по экспериментальным значениям $(\Delta\rho/\rho)_{эксп}$ и $T_{обл}$, позволяет определить в первом приближении

$$\Phi_{df1} = \frac{(\Phi_{df} t)_1}{t_{обл}}. \quad (3)$$

Если эта величина отличается от калибровочного значения Φ_{dfk} , равного $2,65 \times 10^{11}$ нейтр/см²·сек (как правило, она выше), то, следовательно, условия формулы (2) не выполнены. Поэтому необходимо внести поправку. Для этого следует определить эквивалентную температуру $T_{экви}$ (более низкую, чем $T_{обл}$). Она обеспечит при облучении в пото-

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,031(1 - 0,00514 T)(\Phi_{df} t \cdot 10^{-16})^{0,75}$$

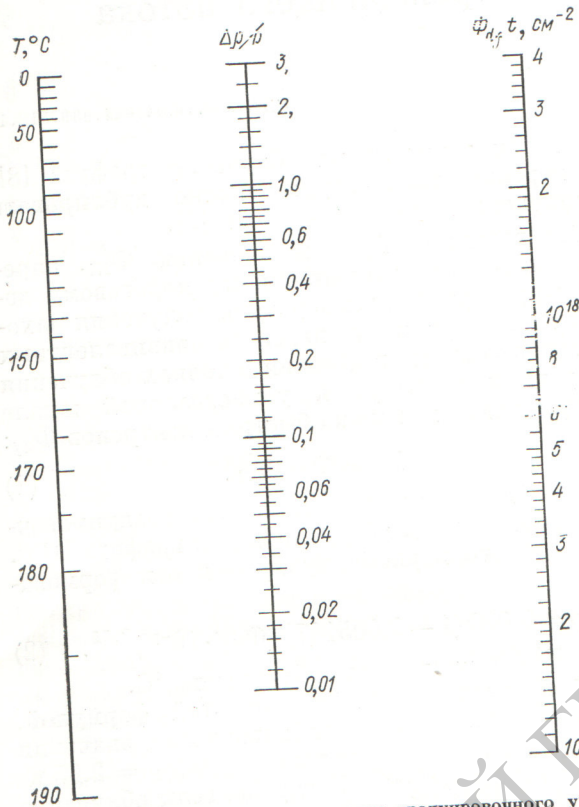


Рис. 1. Номограмма для решения градуировочного уравнения в случае графита ПГГ (перпендикулярная вырезка образца).

ке Φ_{dfk} такую же скорость повреждения, как и при облучении в более высоком потоке Φ_{df1} и при более высокой температуре $T_{обл}$ [11].

Для полученных значений $T_{экв}$ и $(\Delta\rho/\rho)_{экв}$ во второй итерации с помощью номограммы находится второе значение $(\Phi_{df} t)_2$, по которому, так же как и в выражении (3), определяется $\Phi_{df2} = \frac{(\Phi_{df} t)_2}{t_{обл}}$. Затем вся процедура повторяется до тех пор, пока не будут получены постоянные, не меняющиеся от итерации к итерации значения $T_{экв}$ и Φ_{df} . Это означает, что условия, налагавшиеся на уравнение (2), выполнены. По полученному значению Φ_{dfn} определяется искомый переводной коэффициент k_{fx} из выражения (1). Теперь все значения $\Phi_{Ni}^i t$, полученные в экспериментах по облучению графита в данной точке одного реактора X, следует умножить на этот коэффициент, чтобы получить значение дозы нейтронного облучения в универсальных единицах повреждающего нейтронного потока $\Phi_{df} t$.

Применение концепции можно существенно упростить (по сравнению с методом, предложенным ранее [11]), если ввести непрерывную зависимость от соотношения потоков. На основании тех же простых представлений, которые положены в основу концепции [10], можно установить безразмерный критерий подобия (критерий Курчатова) для эквивалентных условий облучения по нейтронному потоку и температуре:

$$Kv = \frac{Q}{kT_{обл}} + \frac{\ln \Phi_{df}}{\Phi_0} \quad (4)$$

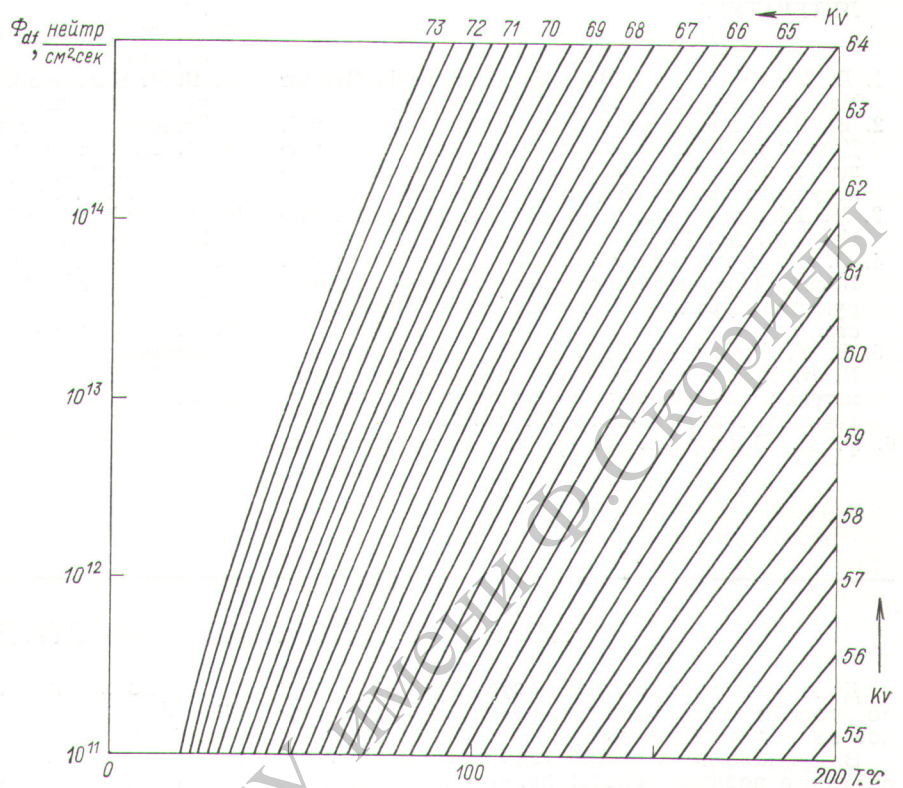
В интервале температур T (°K), где величина энергии активации радиационных дефектов в графите Q может считаться одинаковой, постоянное значение критерия подобия Kv для ряда случаев облучения с различающимися Φ_{df} и $T_{обл}$ определяет эквивалентность условий облучения, обеспечивающих одинаковую скорость повреждения графита (k — постоянная Больцмана). Декартов абак, приведенный на рис. 2, позволяет легко подбирать эквивалентные условия в широком интервале Φ_{df} (принято $\Phi_0 = 1$ нейтр/см²·сек).

Результаты эксперимента. Облучение проводилось в каналах 4 и 14 реактора СМ-2 (не на номинальной мощности). Ампулы из нержавеющей стали содержали по два образца графита ПГГ, вырезанных перпендикулярно к оси формовки. Пороговые индикаторы весом 10—20 мг в виде дисков диаметром 2 мм, вырубленных из фольги (толщиной 0,05 мм), никеля и карбонильного железа, размещались в миниатюрной кадмиевой капсуле (толщина стенки 1 мм).

Результаты экспериментов и их обработки

Параметр	Облучение			
	Канал 14			Канал 4
	I	II	III	IV
$t_{обл}, \times 10^{-5}$ сек	2,55	9,9	4,75	0,155
$\Phi_{Ni}^i \times 10^{-12}$ нейтр/см ² × сек ²	1,3	0,95	1,3	146
$\Phi_{Ni}^i, 10^{-18}$ нейтр/см ²	3,32	9,40	6,17	1,68
$T_{обл}, ^\circ C$	100	100	150	100
$\frac{\Delta\rho}{\rho}$	0,64	1,24	0,60	2,40
$\Phi_{df}, \times 10^{-12}$ нейтр/см ² × сек	3,84	2,72	3,68	382
$T, ^\circ C$	72	78	120	40
k_{fx}	2,95	2,50	2,83	2,62

Рис. 2. Декартов абак для температуры облучения, нейтронного потока и критерия эквивалентности облучения графита.



В такой же капсуле, но из алюминия находится порошок алмаза.

Активность пороговых индикаторов после облучения измерялась относительным методом путем сравнения измеряемого индикатора с эталонным индикатором известной активности в идентичной геометрии с относительной ошибкой, не превышающей $\pm 8\%$. Электросопротивление образцов графита до и после облучения измерялось обычным потенциометрическим методом путем сравнения падения электронапряжений на эталонном и измеряемом сопротивлении с погрешностью при определении относительного прироста электросопротивления лишь в третьем знаке после запятой.

В таблице приводятся экспериментальные данные и результаты их обработки с целью определения переводного коэффициента. Среднее экспериментальное значение \bar{k}_{fx} для канала 14 реактора СМ-2 (облучения I—III), равное 2,75, достаточно близко к расчетному $k_{fx} = 2,86$ [2], полученному на основе известного спектра в этом канале. Как видно, описываемый метод позволяет получить вполне приемлемые результаты. Его применение целесооб-

разно при сопоставлении данных о поведении графита, полученных в различных типах реакторов [12], при прогнозировании поведения графита в кладках уран-графитовых реакторов [13], а также при рассмотрении различия в поведении графита в толще деталей кладок [14], когда необходимо учитывать разницу не только в температуре облучения, но и в нейтронных спектрах. Недостаток метода — ограничение невысокими температурами облучения графита. Однако оно относится не к облучению графита по исследовательской программе, где могут быть применены любые температуры, а только к данному калибровочному эксперименту. Поэтому это ограничение существенно только в том случае, если в реакторе нельзя получить требуемую невысокую температуру. Что касается кажущегося недостатка из-за привязки метода к определенному типу графита, то из (2) видно, что задача сводится к введению поправочного множителя $\rho_x/\rho_{пгг}$ в правой части этого уравнения, где ρ_x относится к любому типу реакторного графита [2].

Поступила в Редакцию 31/I 1972 г.