

Рис. 1. Влияние вида примеси на скорость забивания индикатора: ● — водород; ○ — кислород.

вания индикатора от температуры забивания, т. е. от содержания примеси. Из рисунка видно, что существует явное расслоение точек для примесей водорода и кислорода. Если измерить кроме температуры забивания также скорость забивания индикатора, можно определить вид примеси, выпадающей в осадок в индикаторе. Зная зависимость концентрации этой примеси от температуры насыщения, можно определить ее содержание.

Рассмотрим эту возможность на следующем примере. Как известно, примеси кислорода и водорода взаимодействуют между собой, образуя гидроксильную группу OH [2]. Эксперимент заключался в следующем: в натрий-калиевый теплоноситель, содержащий около $1,5 \cdot 10^{-2}$ вес. % кислорода, вводили порциями водород. Образующаяся при этом группа OH обладает, по-видимому, достаточной растворимостью, поэтому ввод водорода первоначально приводил не к возрастанию температуры забивания, а наоборот, к ее падению. При этом скорость забивания индикатора оставалась равной кислородной, что свидетельствовало об уменьшении содержания несвязанного кислорода в теплоносителе.

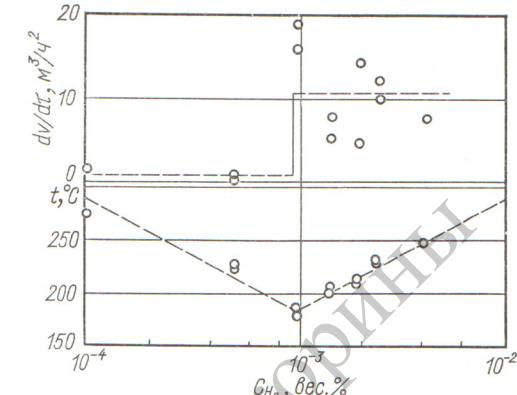


Рис. 2. Изменение скорости и температуры забивания в процессе ввода примеси водорода в теплоноситель, содержащий примесь кислорода.

После того как весь возможный при данных условиях кислород был связан водородом, дальнейшие добавки водорода приводили к повышению температуры забивания. Характер забивания индикатора после этого менялся с кислородного на водородный, что видно из скорости забивания (рис. 2). Таким образом, из перераспределения кислорода между свободной и связанный формами следует, что с помощью измерения скорости забивания можно контролировать и анализировать достаточно сложные процессы, происходящие в теплоносителе.

Поступило в Редакцию 24/I 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Жидкометаллические теплоносители. Пер. с англ. Под ред. А. Е. Шнейдлина. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
- М. Н. Арнольдов и др. «Теплофизика высоких температур», 8, № 1, 88 (1970).

Измерение энерговыделения в компенсирующем стержне реактора

В. А. КУЗНЕЦОВ, А. И. МОГИЛЬНЕР, В. П. КОРОЛЕВА, Ю. А. ПРОХОРОВ,

В. С. САМОВАРОВ, С. Н. ФОКИН, Л. А. ЧЕРНОВ

УДК 621.039.51

До настоящего времени энерговыделение в борсодержащих стержнях оценивалось главным образом расчетными методами. Поэтому представляет интерес непосредственное измерение этой величины. Ранее проводившиеся экспериментальные работы [1] не были совершенны в методическом отношении, так как в них использовались активационные детекторы с энергетической зависимостью сечений, отличной от зависимости для сечения захвата B^{10} . Полное энерговыделение в компенсирующем стержне обусловлено реакцией $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ и поглощением γ - и β -излучений реактора, причем для стержней из карбида бора величина последней части невелика и составляла 8—10% полного энерговыделения.

Цель данной работы — измерение удельного энерговыделения в борном стержне в результате реакции (n, α) на B^{10} с использованием современных полупроводниковых и трековых детекторов вместе с индикаторными слоями из B^{10} и U^{235} .

Основы метода. Пусть имеется тонкий слой B^{10} весом Δm (в граммах), расположенный в фиксированной точке гомогенного реактора (r_0 , Φ_0 , z_0). Тогда удельное энерговыделение в этом слое

$$Q_B^0 = \frac{q_B r_0}{\Delta m W} \frac{M_{\text{эф}}}{\text{сек} \cdot \text{г} \cdot \text{вт}}, \quad (1)$$

где q_B , $M_{\text{эв}}$ — энергия реакции, выделяемая на один испущенный нейтрон; r_0 — число реакций (n , a) в борном слое в единицу времени; W , вт — мощность реактора.

Если N_B^0 — интенсивность счета α -частиц в реакции (n , a) от борного слоя, а ξ_B — эффективность регистрации, то

$$r_0 = N_B^0 / \xi_B. \quad (2)$$

Выразим мощность реактора через интенсивность деления f_0 тонкого слоя U^{235} весом ΔM (в граммах), помещенного в ту же самую точку реактора, что и борный слой:

$$W = \frac{f_0 G}{\Delta M K_0 3,26 \cdot 10^{10}} \text{ вт}. \quad (3)$$

Здесь G — полная загрузка U^{235} в реакторе; $K_0 = q(\rho_0, \Phi_0, z_0) / \bar{q}$ — локальный коэффициент энерговыделения, где $q(\rho_0, \Phi_0, z_0)$ — плотность энерговыделения в точке (ρ_0, Φ_0, z_0) ; \bar{q} — плотность энерговыделения, усредненная по объему активной зоны реактора. Если N_f^0 — интенсивность счета актов делений слоя U^{235} , а ξ_f — эффективность их регистрации, то

$$f_0 = N_f^0 / \xi_f. \quad (4)$$

Подставляя в формулу (4) выражения (2)–(4) и учитывая, что $\Delta m = n_B A_B / 6,02 \cdot 10^{23}$, а $\Delta M = n_f A_f / 6,02 \times 10^{23}$ (n_B и n_f — числа ядер B^{10} или U^{235} в слое, A_B и A_f — атомные веса бора и урана), получим

$$Q_B^0 = q_B \frac{N_B^0}{N_f^0} \frac{A_f}{A_B} \frac{K_0 3,26 \cdot 10^{10}}{G} \frac{n_f \xi_f}{n_B \xi_B}. \quad (5)$$

Калибровка борного и уранового слоев в одном и том же потоке тепловых нейтронов дает возможность исключить из формулы (5) выражение $n_f \xi_f / n_B \xi_B$. При этом интенсивность счета α -частиц слоя бора N_B^T и осколков деления урана N_f^T в тепловом потоке

$$N_B^T = n_B \xi_B \sigma_B^T \Phi_T, \quad N_f^T = n_f \xi_f \sigma_f^T \Phi_T, \quad (6)$$

откуда

$$n_f \xi_f / n_B \xi_B = N_f^T \sigma_f^T / N_B^T \sigma_B^T, \quad (7)$$

где σ_f^T — сечение деления U^{235} ; σ_B^T — сечение реакции (n , a) на B^{10} для тепловых нейтронов.

Если величины σ_f^T и σ_B^T брать при скорости нейтронов 2200 м/сек, то в сечение деления U^{235} необходимо вводить поправку $K_{1/v}$ на отклонение от закона $1/v$. Учитывая, что энерговыделение в борном слое Q_B^0 , расположенному в поперечном разрезе борного стержня и заэкранированном им, связано с энерговыделением в том же слое в фиксированной точке реактора Q_B^0 соотношением

$$Q_B^0 = Q_B^0 \frac{N_B^0}{N_B^0} \quad (8)$$

N_B^0 — интенсивность счета α -частиц слоя бора, расположенного в стержне, и подставляя в выражение (8) значения (5) и (7), получаем окончательную формулу

удельного энерговыделения:

$$Q_B^0 = \left(\frac{N_B^0}{N_B^0} \frac{N_f^T}{N_f^0} \frac{N_B^0}{N_B^0} K_0 \right) \times \\ \times \left(\frac{A_f}{A_B} \frac{\sigma_B^T}{\sigma_f^T K_{1/v}} \frac{q_B 3,26 \cdot 10^{10}}{G} \right) \frac{M_{\text{эв}}}{\text{сек} \cdot \text{г} \cdot \text{вт}}. \quad (9)$$

При отличии экспериментального борного слоя по обогащению изотопов B^{10} от компенсирующего стержня производится соответствующий пересчет. Таким образом, задача измерения энерговыделения в борном стержне сводится к измерению отношений для индикаторов интенсивности поглощений и делений и к исследованию полей энерговыделения в реакторе для получения величины K_0 .

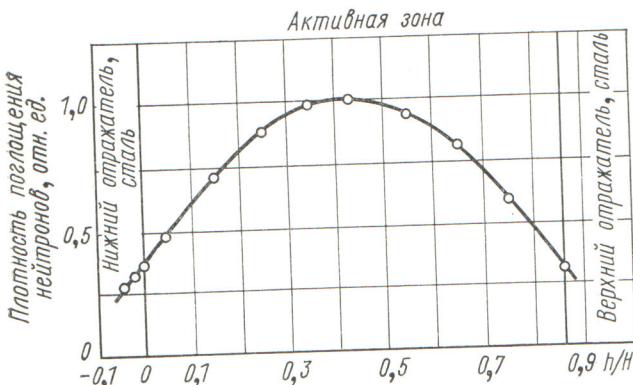
Измерения. Эксперименты по измерению энерговыделения в борсодержащем стержне проводились на критической сборке ИФ-4Ф8 [2], в центре которой располагался стержень из B_4C диаметром 19,2 мм. Для получения величины K_0 активационным методом измеряли поля энерговыделения в реакторе. При этом определяли отношение γ -активности твэлов, расположенных в соответствующих точках реактора, к активности мониторного твэла, установленного в точке (ρ_0, Φ_0, z_0) . Гамма-кванты регистрировали сцинтилляционным спектрометром с кристаллом $NaI(Tl)$ размером 100×100 мм. Распределение энерговыделения интегрировали по высоте каждого твэла и по площади активной зоны. В результате для данной сборки получили значение $K_0 = 1,451 \pm 0,008$.

Отношения N_B^0/N_B^T , N_B^T/N_B^0 и N_f^T/N_f^0 , входящие в формулу (9), для большей надежности измеряли двумя типами детекторов: полупроводниковым золотокремневым счетчиком и твердыми трековыми детекторами (нитроцеллюлозой и слюдой) вместе с индикаторными слоями из B^{10} (толщиной $0,05 \text{ мг/см}^2$) и U^{235} (толщиной $0,1 \text{ мг/см}^2$). В результате измерений вводили экспериментальные поправки на фон от подложки индикаторного слоя, на зазор в поперечном сечении борного стержня при расположении в нем счетчика или нитроцеллюлозы, а также на краевой эффект в счетчике, связанный с утечкой заряженных частиц с краев слоя. Две последние поправки измеряли экспериментально методом экстраполяции к нулевому значению зазоров в стержне и счетчике.

Отношения интенсивностей счета, измеренные разными детекторами

N_f^T/N_f^0	N_B^0/N_B^T	N_B^T/N_B^0	Поправка	Q_B^0 , $\text{вт}/\text{г} \text{B}_{\text{ест}} \cdot \text{вт}$	Используемый детектор
$0,634 \pm 0,001$	$0,829 \pm 0,003$	$0,466 \pm 0,005$	$0,841$	$(1,323 \pm 0,028) \cdot 10^{-6}$	Полупроводниковый счетчик
$0,729 \pm 0,010$	$0,700 \pm 0,036$	$0,440 \pm 0,011$	$0,973$	$(1,403 \pm 0,083) \cdot 10^{-6}$	Трековый детектор

Среднее $Q_B^0 = (1,365 \pm 0,50) \cdot 10^{-6}$



Распределение плотности поглощения нейтронов по высоте стержня из карбида бора, измеренное полупроводниковым счетчиком.

В таблице приводятся результаты, полученные с помощью разных детекторов. При расчете использовали сечение деления U^{235} и сечение захвата бора $\sigma_B^t = 721,5(18,8\% \cdot B^{10})$ для тепловых нейтронов [3, 4] при $q_B = 2,34 \text{ Мэв}$. Как видно из таблицы, значения удельного энерговыделения, полученные двумя типами

Радиационно-резонансный детектор нейтронов для геофизических исследований

Б. С. ВАХТИН, В. С. ИВАНОВ, А. В. НОВОСЕЛОВ, Е. М. ФИЛИППОВ

УДК 539.1.074.88.004.1

Для детектирования нейтронов используются в основном две реакции: упругое рассеяние нейтронов на протонами и захват нейтронов ядрами бора, гелия или лития. Кроме того, детектирование нейтронов может осуществляться путем регистрации наведенной β -активности фольг из определенных металлов (метод резонансных индикаторов) [1] или путем регистрации γ -квантов радиационного захвата [2]. Этот принцип авторы использовали в радиационно-резонансном детекторе, который применили для исследования скважин, пересекающих пласты с высокими концентрациями бора.

Известно [3], что для определения бора в скважинах применяется нейтрон-нейтронный (ННК) и нейтронный гамма-каротаж (НГК). При проведении ННК в качестве детекторов нейтронов применяются люминофоры, на основе Т-1 и Т-2, имеющие низкую эффективность, или сцинтилляторы типа ЛДНМ. Эти детекторы нейтронов позволяют определять содержание бора до концентраций не выше 3–5% B_2O_3 .

При проведении НГК в качестве детектора γ -излучения применяются в основном сцинтилляционные счетчики. НГК, как и ННК, применяется только при низких концентрациях бора, так как его показания тоже определяются степенью поглощения тепловых нейтронов в породах.

Радиационно-резонансный детектор состоит из фольги и сцинтилляционного счетчика. В качестве фольги могут применяться серебро, родий, индий, туллий и другие элементы, имеющие резонансы поглощения нейтронов и испускающие при резонансном захвате γ -кванты.

детекторов, совпадают в пределах экспериментальных ошибок.

На рисунке представлено распределение плотности поглощения нейтронов по высоте стержня из карбида бора, измеренное полупроводниковым счетчиком. Оно может быть полезно при расчете полного энерговыделения в стержне.

Разработанный нами метод измерения удельного энерговыделения в борсодержащих стержнях является достаточно надежным и простым. Для подобных измерений удобно использовать как полупроводниковый счетчик, так и твердые трековые детекторы.

Поступило в Редакцию 31/1 1972 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. Leipunskiy et al. Physics of Fast and Intermediate Reactors, SM-18/80, Vienna, IAEA, 1962.
2. A. И. Могильдер, В. А. Осипов, Г. Н. Фокин. «Атомная энергия», 24, 42 (1968).
3. И. В. Гордеев и др. Ядернофизические константы. М., Госатомиздат, 1963.
4. J. Stehn et al. Neutron Cross Section. BNL-325. Suppl. No. 2, vol. III, z = 88 to 98, 1965.

С помощью таких детекторов можно регистрировать нейтроны в области резонансов этих элементов, где сечение поглощения нейтронов бором составляет не 755 барн, как для тепловых нейтронов, а 100 барн в области резонансов родия и индия, 52 барн в области резонанса серебра и т. д. [4]. Таким образом, диапазон определяемых концентраций бора в породах можно расширить.

Детектор, показанный на рис. 1, состоит из фольги и сцинтилляционного счетчика, помещенных в гильзу. На корпусе гильзы укреплен свинцовый экран, который ослабляет γ -излучение, выходящее из скважины. Другой свинцовый экран служит для защиты детектора от γ -излучения нейтронного источника. Фольга имеет вид стаканчика, который надевается на сцинтиллятор.

Для определения оптимальных параметров этого детектора были проведены лабораторные исследования. Критерием выбора фольги для данного детектора служило, во-первых, наличие резонансов у этого элемента в области энергий 0,025–10 эв. Из исследуемых фольг таким условиям удовлетворяли кадмий (энергия резонанса $E_p = 0,18 \text{ эв}$), родий ($E_p = 1,26 \text{ эв}$), индий ($E_p = 1,45 \text{ эв}$), туллий ($E_p = 3,9 \text{ эв}$), tantal ($E_p = 4,28 \text{ эв}$), золото ($E_p = 4,94 \text{ эв}$) и серебро ($E_p = 5,23 \text{ эв}$). Вторым критерием являлось наличие в спектре γ -излучения достаточно интенсивных линий в области энергий 0,1–0,2–2–3 Мэв. Как показали результаты измерений, наиболее четко выраженные спектры наблюдаются у кадмия, серебра, родия и туллия в области энергий 0,5–1,0 Мэв.