

МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ ЭФФЕКТА  
ПРОЛЕТНОГО РАССТОЯНИЯ  
В ОПЫТАХ ПО НЕСТАЦИОНАРНОЙ  
ДИФфуЗИИ НЕЙТРОНОВ

А. А. Антонов, Во Дак Банг, А. И. Исаков,  
Ю. А. Меркульев

Как известно, в основе импульсного метода нестационарной диффузии лежит определение значений параметра  $\lambda$ , характеризующего экспоненциальное затухание со временем плотности тепловых нейтронов, образующихся в блоках замедлителя различных размеров после кратковременного облучения их быстрыми нейтронами:  $N = N_0 \exp(-\lambda t)$ . Величина  $\lambda$  связана с диффузионными параметрами соотношением:

$$\lambda = \overline{\Sigma_a v} + D\bar{v}^2 - c\bar{v}^4 + \dots, \quad (1)$$

где  $\overline{\Sigma_a v}$  - усредненная по спектру вероятность поглощения нейтрона за 1 секунду,  $\bar{v}$  - усредненный по спектру коэффициент диффузии нейтронов,  $c$  - коэффициент диффузионного охлаждения,  $\bar{v}^2 = \pi^2(1/a^2 + 1/b^2 + 1/c^2)$  - лапласиан системы,  $a, b, c$  - размеры замедлителя.

При проведении опыта вытекающие из замедлителя нейтроны считаются детектором, расположенным на некотором расстоянии  $l$  от излучающей поверхности. Вследствие этого регистрируемая скорость счета нейтронов как функция времени заметно отличается от зависимости, по которой плотность нейтронов затухает внутри замедлителя. Пренебрежение этим эффектом при-

водит к заметному снижению точности получаемых значений параметров диффузии. В работах /1,2,3/ приближенно рассчитывались зависимости скорости счета нейтронов от времени при различных расстояниях от детектора до замедлителя. Проведенные авторами этих работ эксперименты показали только качественное согласие с расчетом, что говорит о недостаточной точности последнего. Уточнение расчетов в принципе возможно, но сложно, так как требует тщательного учета многих конкретных условий каждого эксперимента. В силу этих обстоятельств авторами цитируемых работ рекомендуется экспериментально определять  $\lambda$  при нескольких  $l$  и полученную зависимость  $\lambda(l)$  экстраполировать к  $l = 0$ . Предложенный метод трудоемок и применение его в ряде случаев затруднительно, например, при исследованиях с замедлителями, свойства которых меняются во времени (неравновесный жидкий водород, гидриды металлов при высоких температурах и т.д.). Кроме того, для решения некоторых физических задач, например, для определения так называемого предела Корнгольда /4/, необходимо прослеживание зависимости скорости вытекания нейтронов из небольших блоков замедлителя в течение длительных промежутков времени после инъекции быстрых нейтронов. Искажающее влияние пролетного расстояния в этих опытах должно быть особенно сильным и может настолько снижать точность, что их проведение станет вообще нецелесообразным.

В данной работе предложен метод, позволяющий почти полностью исключить влияние пролетного расстояния на скорость счета нейтронов детектором.

Легко показать, что для детектора малых размеров величина  $J(t)$  выражается формулой:

$$J(t) = A \int_{1/t}^{\infty} D(v)N(v)\psi(v)\exp[-\lambda(t - 1/v)]dv, \quad (2)$$

где  $D(v)$  - зависимость коэффициента диффузии нейт-

ронов от их скорости,  $N(v)$  – распределение нейтронов по скоростям,  $\psi(v)$  – зависимость эффективности детектора от скорости нейтронов. Выражение (2) отличается от экспоненты  $\exp(-\lambda t)$  вследствие: 1) наличия под интегралом множителя  $\exp(\lambda l/v)$ , учитывающего запаздывание регистрации нейтронов со скоростью  $v$  по отношению к моменту их вылета из замедлителя и 2) отличия от нуля нижнего предела интегрирования. Последнее обстоятельство означает то, что в момент  $t$  детектора достигают нейтроны со скоростями  $v \geq \frac{l}{t}$ . При больших временах функция  $J(t)$  резко отличается от экспоненты.

Если на пути пучка нейтронов поместить фильтр толщиной  $d$  из материала с эффективным сечением поглощения нейтронов  $\Sigma_a = a/v$  (где  $a$  константа), то регистрируемая детектором интенсивность счета нейтронов будет

$$J(t) = A \left[ \int_{l/t}^{\infty} D(v)N(v)\psi(v)\exp(\lambda l/v - ad/v)dv \right] e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

При  $t \rightarrow \infty$  интеграл в выражении (3) расходится при  $\lambda l > ad$  и сходится при

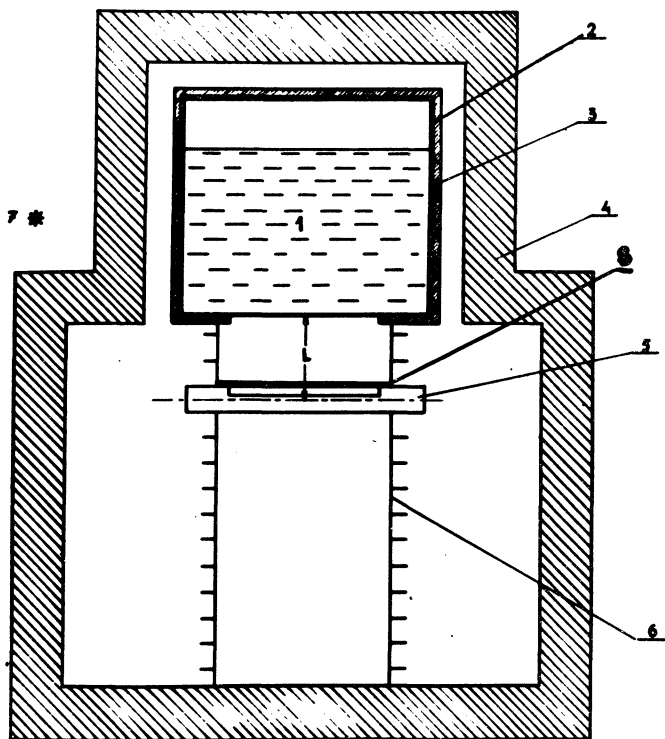
$$\lambda l \leq ad. \quad (4)$$

При  $\lambda l = ad$

$$J(t) = A \exp(-\lambda t) \int_0^{\infty} D(v)N(v)\psi(v)dv \times \left[ 1 - \int_0^{l/t} D(v)N(v)\psi(v)dv / \int_0^{\infty} D(v)N(v)\psi(v)dv \right]. \quad (5)$$

Второй член, стоящий в скобках, неограниченно уменьшается с увеличением  $t$ .

Таким образом  $J(t)$  является практически чистой экспонентной при  $t \gg 1/v_T$  ( $v_T$  – средняя скорость



Р и с. 1. Экспериментальная установка. 1 - замедлитель, 2 - контейнер для замедлителя, 3 - покрытие из кадмия, 4 - защита из карбида бора, 5 - детектор нейтронов, 6 - устройство для изменения положения детектора, 7 - мишень нейтронного генератора, 8 - серебряный фильтр.

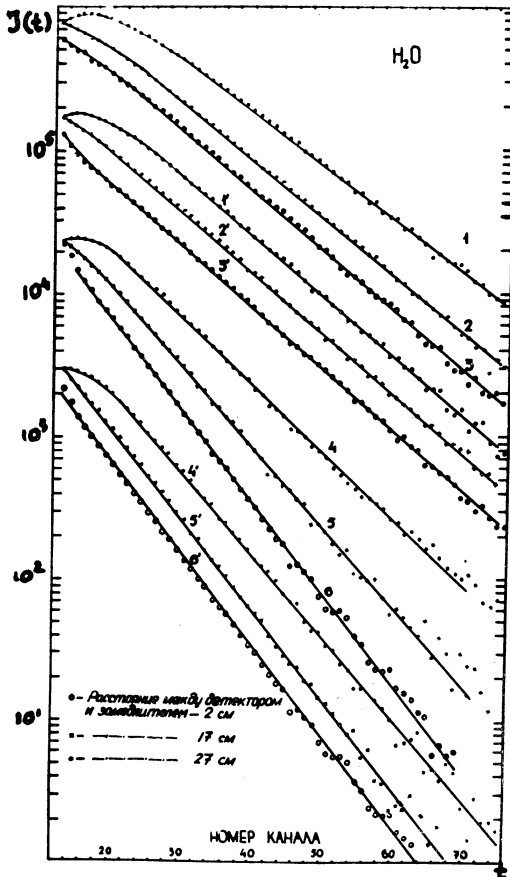
максвелловского распределения нейтронов). Аналогичный результат получается также при выполнении неравенства (4).

Авторами была проведена экспериментальная проверка предложенного метода компенсации влияния пролетного расстояния на измеряемые значения величины  $\lambda$ . Опыты проводились с гидридом циркония и водой на установке, показанной на рис. 1. Фильтром нейтронов служила серебряная пластинка толщиной 3 мм, помещаемая в позиции, показанной на рис. 1. Пролетное расстояние  $l$  можно было изменять в пределах от 2 до 27 см. Схемы электроники и параметры нейтронного генератора, на котором установка облучалась нейтронами, приведены в работе /5/.

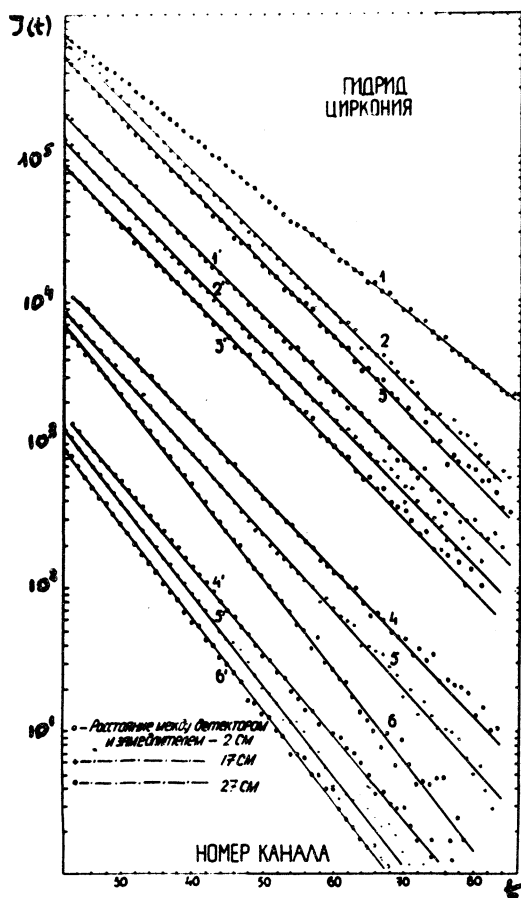
Таблица 1

|             |   |              |             |             |            |
|-------------|---|--------------|-------------|-------------|------------|
| $H_2O$      | $B^2, \text{см}^{-2}$<br>$l^*, \text{см}$ | 0,0803<br>32 | 0,136<br>24 | 0,310<br>17 | 0,618<br>8 |
| $ZrH_{1,9}$ | $B^2, \text{см}^{-2}$<br>$l^*, \text{см}$ | 0,0632<br>29 | 0,208<br>22 | 0,391<br>16 |            |

В таблице 1 даны значения исследованных объемов воды и гидрида циркония и приведены значения  $l^*$ , вплоть до которых должна происходить компенсация эффекта пролетного расстояния. При проведении этих оценок нами использовались значения параметров диффузии, известные из литературы. Для каждого объема замедлителя измерения проводились при 3-4 различных расстояниях от замедлителя от детектора. Измерения с фильтром показали, что в соответствии с оценками таблицы 1 влияние пролетного расстояния на значения  $\lambda$  действительно полностью компенсируется при  $l \leq l^*$  (для времен, достаточно больших по сравнению с  $t = 1/v_T$ ). При  $l > l^*$  наблюдается частичная компенсация эффекта пролетного расстояния. Для иллюстрации



Р и с. 2. Экспериментальные кривые затухания плотности нейтронов со временем, полученные при измерениях с водой. По оси ординат отложена в произвольных единицах скорость счета нейтронов  $J(t)$ , по оси абсцисс - время запаздывания  $t$  момента регистрации относительно начала импульса быстрых нейтронов (ширина канала 10 мксек). Цифрами без штрихов обозначены кривые, полученные без фильтра, со штрихами - с серебряным фильтром. Верхние шесть кривых относятся к измерениям при  $V^2 = 0,134 \text{ см}^{-2}$ , нижние - при  $V^2 = 0,32 \text{ см}^{-2}$ .



Р и с. 3. Экспериментальные кривые затухания плотности нейтронов со временем, полученные при измерениях с гидридом циркония. Маркировка осей координат и обозначения аналогичны использованным на рис. 2. Верхние шесть кривых относятся к измерениям при  $v^2 = 0,208 \text{ см}^{-2}$ , нижние - при  $v^2 = 0,391 \text{ см}^{-2}$ .

сказанного на рис. 2 для воды и на рис. 3 для гидрида циркония приведены результаты измерения скорости счета нейтронов детектором от времени с фильтром и без фильтра для двух различных объемов замедлителя при трех пролетных расстояниях.

Кривые, снятые без фильтра на больших расстояниях от излучателя, существенно отличаются от кривых, снятых с фильтром; отличие тем заметнее, чем больше  $l$  и меньше размер системы, то-есть чем больше  $B^2$ . Кривые (для данного  $B^2$ ), полученные с фильтром при всех  $l \leq l^*$  при больших временах, имеют одинаковый наклон; при  $l > l^*$  наклон уменьшается, оставаясь большим, чем наклон кривой, снятой без фильтра, то-есть происходит частичная компенсация эффекта пролетного расстояния.

Таким образом предложенный метод компенсации влияния пролетного расстояния на измеряемое значение  $\lambda$  является более эффективным и менее трудоемким, чем предложенный в работах /1,2,3/. Использование этого метода, по-видимому, необходимо в тех случаях, когда детектор нейтронов по условиям эксперимента необходимо размещать на значительном расстоянии от излучателя (например, при измерениях с замедлителями при низких и высоких температурах).

Поступила в редакцию  
5 декабря 1970 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. L. Pal, L. Bod and Z. Szatmary. Pulsed Neutron Research, vol. 1 p. 165, Vienna (1965).
2. J. Cervená et al. Czech. Journal of Phys., 17, 1098 (1967).
3. G. A. Price, H. H. Windsor. Nucl. Sci. Eng., 31, 547 (1968).
4. N. Corngold. Pulsed Neutron Research, v. I, p. 199, Vienna (1965).
5. А. В. Антонов и др. Атомная энергия, 12, 25 (1962).