

УДК 539.12.164

## Измерение плотности потока быстрых нейтронов от горных пород

БАРАБАНОВ И. Р., ГАВРИН В. Н., ЗАЦЕПИН Г. Т., ОРЕХОВ И. В., ПРОКОПЬЕВА Л. П.

В последнее десятилетие в связи с уже осуществленными [1] и планируемыми [2] экспериментами по детектированию солнечных нейтрино возросла актуальность задачи измерения плотности потока быстрых нейтронов в горных породах. Это связано с тем, что в нейтринных экспериментах быстрые нейтроны являются источником фона [3]. В настоящее время нет прямых сведений о плотности потока быстрых нейтронов в горных породах и имеется только расчетная оценка [4], согласно которой эта плотность потока составляет  $N$  ( $E_n \geq 1$  МэВ)  $\approx 1,5$  нейтр.  $\cdot$ сут $^{-1}$   $\cdot$ см $^{-2}$ . Согласно работе [5], основной источник быстрых нейтронов — ( $\alpha, n$ )-реакции, протекающие под действием  $\alpha$ -частиц радионуклидов рядов урана и тория на легких элементах (Al, Si, O). Примерно 15%-ный вклад вносит спонтанное деление  $^{238}\text{U}$ . Форма спектра нейтронов в горных породах точно не известна. В публикации [6] оценен спектр нейтронов для двух предельных случаев, когда вылетающий из составного ядра нейтрон имеет в ЦМ-системе энергию, равную энергии выходного канала реакции, и когда вылетающие нейтроны в ЦМ-системе имеют максвелловское распределение по энергии.

Эти два случая соответствуют предельным жесткому и мягкому спектрам нейтронов, средняя энергия которых соответственно равна 4 и 2 МэВ.

Измерение столь малой плотности потока быстрых нейтронов как  $1,5$  нейтр.  $\cdot$ сут $^{-1}$   $\cdot$ см $^{-2}$  с помощью обычных детекторов нейтронов (сцинтилляторов, газоразрядных счетчиков и др.) при фоне  $\gamma$ -излучения в  $10^6$  раз больше едва ли возможно. В связи с этим для измерения плотности потока быстрых нейтронов от горных пород выбран радиохимический метод с использованием реакции  $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ . (1)

Эта реакция удобна тем, что ее сечение [7] (рис. 1) сильно уменьшается при  $E < 2$  МэВ и фактически носит пороговый характер. Техника извлечения образующегося в малом количестве  $^{37}\text{Ar}$  (вплоть до десятков атомов) и измерения его активности хорошо разработаны [1, 8].

Сложность эксперимента заключается в том, что даже при использовании 100 кг кальция скорость счета от образовавшегося  $^{37}\text{Ar}$  будет составлять только  $\sim 1$  ч $^{-1}$ . Наиболее хорошо разработанная методика извлечения  $^{37}\text{Ar}$  из жидкофазной смеси дает возможность создания детектора на основе водных растворов солей кальция [9]. Однако соли кальция плохо растворимы в воде и, кроме того, вода, являясь хорошим замедлителем быстрых нейтронов, существенно уменьшает эффективность реакции (1). Поэтому для создания детектора выбрали другой путь.

В работе [10] показано, что  $^{37}\text{Ar}$  можно извлечь со 100%-ной эффективностью из некоторых твердых соединений калия. В связи с этим предприняли поиск таких твердых соединений кальция, из которых  $^{37}\text{Ar}$  можно получить с высокой эффективностью. Метод исследования, более подробно описанный в работе [11], состоял в следующем.

Иследуемое вещество в виде порошка помещали в колбу, которую откачивали до вакуума  $\sim 0,01$  Па и облучали нейтронами Pu — Be-источника. После облучения колбу соединяли с ловушкой, содержащей активированный уголь при  $-196^\circ\text{C}$ , в которой  $^{37}\text{Ar}$  сорбировали по реакции (1). Очистка извлеченного аргона и измерение его активности с помощью пропорционального счетчика описаны в публикации [8]. Для контроля эффективности извлечения  $^{37}\text{Ar}$  из порошкообразного вещества в аналогичных условиях облучали колбу малого размера с водным раствором  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , из которого  $^{37}\text{Ar}$  извлекали

продувкой гелием и принимали за 100%. В результате было найдено, что выход  $^{37}\text{Ar}$  из обезвоженного щавелевокислого кальция ( $\text{CaC}_2\text{O}_4$ ) достигает 100%. Это вещество обладает высоким содержанием кальция (31%) и не содержит водорода — хорошего замедлителя быстрых нейтронов.

На основе полученных результатов был создан детектор нейтронов [12], представляющий собой цилиндрический бак диаметром 60 и длиной 120 см, содержащий 187 кг обезвоженного порошкообразного  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ . На верхнем торце установлен вентиль для откачки бака и извлечения  $^{37}\text{Ar}$ , на нижнем торце — математическая лампа ЛТ-4М для контроля за этими процессами.

После экспозиции детектора в измеряемом потоке нейтронов к верхнему вентилю присоединяли ловушку с активированным углем ( $\sim 1$  г) при  $-196^\circ\text{C}$ , на котором сорбировали образовавшийся по реакции (1)  $^{37}\text{Ar}$ . Последующие очистка извлеченного  $^{37}\text{Ar}$ , перекачка в пропорциональный счетчик и измерение его активности описаны в работе [8].

Калибровочное измерение с нейтронным Pu — Be-источником показало:

1) процесс извлечения  $^{37}\text{Ar}$  из детектора подчиняется закону:

$$Q = Q_0 [1 - \exp(-t/t_0)],$$

где  $t$  — время извлечения,  $t_0 = 1,4$  ч;  $Q$  — количество извлеченного  $^{37}\text{Ar}$ ;  $Q_0$  — количество  $^{37}\text{Ar}$  в детекторе в момент времени  $t = 0$ .

Таким образом, за время  $t = 4$  ч извлекается 95%  $^{37}\text{Ar}$ . Необходимо подчеркнуть, что этому закону подчиняется только процесс извлечения  $^{37}\text{Ar}$  из обезвоженного  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ ;

2) эффективность детектора к нейтронам Pu — Be-источника составляет 1%. Учитывая, что современная низкофоновая техника позволяет измерять столь малую активность  $^{37}\text{Ar}$ , как 1 расп.  $\cdot$ сут $^{-1}$ , чувствительность детектора к глобальной плотности потока нейтронов составляет  $\sim 10^{-2}$  нейтр.  $\cdot$ сут $^{-1}$   $\cdot$ см $^{-2}$ .

Зависимость эффективности детектора от энергии нейтронов рассчитана методом Монте-Карло. При расчете принимали во внимание упругое и неупругое рассеяние нейтронов, а также ядерные реакции на всех ядрах, входящих в состав детектора. Сечение реакции  $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$  взято из библиотеки оцененных ядерных данных ENDL-2 [7]. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Описанным детектором выполнены измерения в подземных помещениях Баксанской нейтринной обсерватории на глубине 700 и 1200 м водного эквивалента, где поток нейтронов от горных пород заведомо превышает поток нейтронов, идущих в равновесии с мюонами [5]. Скорость образования  $^{37}\text{Ar}$  равна  $(0,90 \pm 0,09)$  и  $(0,84 \pm 0,09)$  атом  $^{37}\text{Ar} \cdot$ ч $^{-1}$  соответственно, что в пределах статистической точности можно считать равными значениями.

Если аппроксимировать эффективность на рис. 2 значением 1,7% для  $E_n \geq 3$  МэВ и 0% для  $E_n < 3$  МэВ, то для

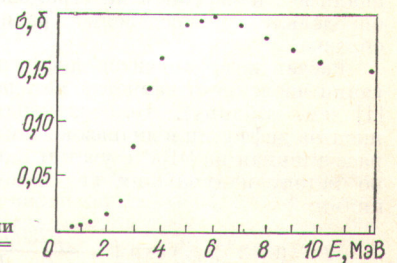
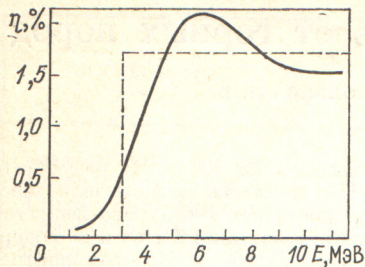


Рис. 1. Сечение реакции  $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$  [11] ( $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ )



Р и с. 2. Зависимость эффективности детектора от энергии нейтронов (моноэнергетический изотропный источник, распределенный равномерно по поверхности детектора)

потока нейтронов с  $E_n \geq 3$  МэВ получим  $N(E_n \geq 3 \text{ МэВ}) = 0,045 \text{ нейтр.} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Так же измерена плотность потока нейтронов от горных пород за защитой толщиной 50 см из специально разработанного низкофонового бетона [4]. В этих условиях скорость образования  $^{37}\text{Ar}$  составляет  $(0,17 \pm 0,03) \text{ атом}^{37}\text{Ar} \times \text{ч}^{-1}$ , что соответствует снижению плотности нейтронного потока от горных пород примерно в 5 раз.

Полученная оценка плотности потока быстрых нейтронов справедлива в том случае, если спектр при малой энергии ( $E < 3$  МэВ) возрастает медленнее, чем спадает эффективность регистрации (см. рис. 2). В противном случае это значение следует рассматривать как верхний предел.

Полученные нейтронные потоки дают возможность более точно оценить фон радиохимических детекторов солнечных нейтрино, связанных с нейтронами от горных пород.

УДК 533.15

## Исследование диффузии железа в аустенитных хромоникелевых сталях 0X16N15M3B и 1X18N10T

ПАВЛИНОВ Л. В., ГЛАДЫШЕВ А. М., СУГОНЯЕВ В. Н.

Аустенитные хромоникелевые стали широко применяются в качестве материалов натриевых контуров быстрых реакторов. Поскольку выход атомов основы и легирующих элементов из сталей в натрий в значительной мере осуществляется диффузионным путем, представляет интерес изучение их диффузии в сталях.

Диффузию железа в аустенитных хромоникелевых сталях 0X16N15M3B и 1X18N10T при температуре 1000—1250° С определяли с использованием радиоизотопа  $^{59}\text{Fe}$ . В этих целях на поверхность плоских образцов стали, предварительно отожженных в вакууме, методом вакуумного распыления наносили тонкий слой изотопа, рассматриваемый как мгновенный источник. Диффузионный отжиг образцов, попарно сложенных активными сторонами, проводили в высокотемпературной вакуумной печи при остаточном давлении  $\sim 10^{-3}$  Па. После отжига для устранения поверхностных эффектов с неактивными сторонами образцов снимали слои толщиной, близкой к глубине диффузии, а затем методом послойного радиометрического анализа с измерением интегральной  $\gamma$ -активности остатка определяли распределение радиоизотопа по толщине образца.

Расчет коэффициентов диффузии проводили на основании численного варианта метода интегрального остатка [1] (см. таблицу). Температурная зависимость коэффициентов диффузии в диапазоне температуры 1000—1250° С, рассчитанная на ЭВМ с учетом погрешности эксперимента по методу наименьших квадратов, описывается уравнениями:

$$D = (0,12 \pm_{-0,05}^{+0,10}) \exp\left(-\frac{62300 \pm 1700}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с} \quad (1)$$

- СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
1. Davis R., Hammer D., Hoffman K. Phys. Rev. Lett., 1968, v. 20, p. 1205.
  2. Zatsepin G. e.a. In: Proc. Intern. Conf. on Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics. Baksan Valley, 1978, v. 1, p. 20.
  3. Елштинский А. В. Канд. дис. М., ФИАН, 1972.
  4. Аршинов И. А., Глотов В. И., Зацепин Г. Т. In: Proc. Intern. Conf. on Low Radioactivity Measur. Appl. Bratislava, 1977, p. 29.
  5. Горшков Г. В. и др. Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры. М., Атомиздат, 1966.
  6. Глотов В. И. Краткие сообщения по физике, 1970, № 7, с. 75.
  7. Cullen D. e. a. The LLL Evaluated Nuclear Data Library (ENDL). UCRL-50400, 15, 1976.
  8. Барабанов И. Р. и др. Атомная энергия, 1974, т. 37, вып. 6, с. 503.
  9. Davis R. В кн.: Труды международного семинара по физике нейтрино и нейтринной астрофизике. Ч. II. М., 1968, с. 99.
  10. Spannagel G., Firman E. J. Geophys. Res., 1972, v. 77, p. 5351.
  11. Барабанов И. Р. и др. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1976, т. 40, с. 1050.
  12. Барабанов И. Р. и др. Атомная энергия, 1979, т. 47, вып. 4, с. 273.

Поступило в Редакцию 07.01.80

для стали 0X16N15M3B;

$$D = (0,012 \pm_{-0,008}^{+0,013}) \exp\left(-\frac{57800 \pm 1300}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с} \quad (2)$$

для стали 1X18N10T.

Полученные параметры диффузии железа в этих сталях близки к найденным для сходных по составу сплавов [2].

### Коэффициенты диффузии железа в сталях и в сплавах железа, см<sup>2</sup>/с

Температура, °С	D, см <sup>2</sup> /с		
	0X16N15M3B	1X18N10T	Сплавы Fe с 15–20% Ni, 15–20% Cr, 2% Mo [2]
950	—	—	$(1,62 \div 3,07) \cdot 10^{-12}$
1000	$2,26 \cdot 10^{-12}$	$2,27 \cdot 10^{-12}$	$(3,98 \div 6,04) \cdot 10^{-12}$
1050	$6,01 \cdot 10^{-12}$	$6,78 \cdot 10^{-12}$	$(7,40 \div 9,87) \cdot 10^{-12}$
1100	$1,37 \cdot 10^{-11}$	$1,38 \cdot 10^{-11}$	$(2,83 \div 6,04) \cdot 10^{-11}$
1150	$1,84 \cdot 10^{-11}$	$1,43 \cdot 10^{-11}$	—
1200	$3,20 \cdot 10^{-11}$	$3,30 \cdot 10^{-11}$	—
1250	$2,76 \cdot 10^{-11}$	$2,66 \cdot 10^{-11}$	—
	$5,59 \cdot 10^{-11}$	$5,99 \cdot 10^{-11}$	$(6,18 \div 8,66) \cdot 10^{-11}$
	$5,85 \cdot 10^{-11}$	$5,01 \cdot 10^{-11}$	—
	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$9,41 \cdot 10^{-11}$	$(4,33 \div 4,95) \cdot 10^{-10}$
	$1,61 \cdot 10^{-10}$	$1,09 \cdot 10^{-10}$	—