

Угловые и энергетические распределения нейтронов на границе двух сред

В. А. Дулин, В. Г. Двухшерстнов, Ю. А. Казанский, **И. В. Шугар**

Измерены угловые и энергетические распределения быстрых нейтронов ($0,4-3,4$ Мэв), выходящих из воды, графита, алюминия, железа, никеля и свинца на границе среда — вода, после прохождения толщин, равных $1,5-4,6$ длины свободного пробега. Источником нейтронов служила реакция $D(D, n)He^3$. Измерения проводились с помощью однокристалльного сцинтилляционного спектрометра быстрых нейтронов с дискриминацией γ -лучей. Результаты измерений сравниваются с расчетами.

Наиболее полными характеристиками нейтронного потока в среде являются угловое и энергетическое распределения. Точное решение кинетического уравнения с целью нахождения этих характеристик связано с большими трудностями. Приближенные методы требуют экспериментальной проверки, тем более что система констант не является полной. Представляют интерес глобальные эксперименты, так как они дают рекомендации, важные для практического конструирования защит; кроме того, могут служить критерием правильности выбора приближенных методов расчета и, наконец, позволяют уточнить систему констант.

Интенсивности существующих моноэнергетических источников и эффективности нейтронных спектрометров быстрых нейтронов до последнего времени были недостаточны для детального изучения нейтронного потока в средах. Высокоэффективные детекторы нейтронов [1, 2] позволили провести измерения угловых и энергетических распределений для случая точечного изотропного источника с энергией $E_0 \approx 3,2$ Мэв на расстояниях $1,5-4,6$ длины свободного пробега в интервале углов $20-70^\circ$. Настоящая работа является продолжением цикла, начатого работой [3].

Экспериментальное устройство

Источником нейтронов служил каскадный нейтронный генератор. Дейтоны с энергией 400 кэв попадали на $Zr-D$ -мишень толщиной 200 кэв, при этом вдоль пучка дейтонов нейтроны имеют энергию $3,08-3,4$ Мэв. Схема экспериментального устройства показана на рис. 1. Выделение потока нейтронов под определенным углом осуществлялось с помощью

конического коллиматора с угловым разрешением $\sim 8^\circ$. Для того чтобы нейтроны, вышедшие из исследуемой среды в окрестности точки А в направлении 0° , не рассеивались в воде, на границе раздела имелась воздушная полость. Фон нейтронов регистрировался при залитом

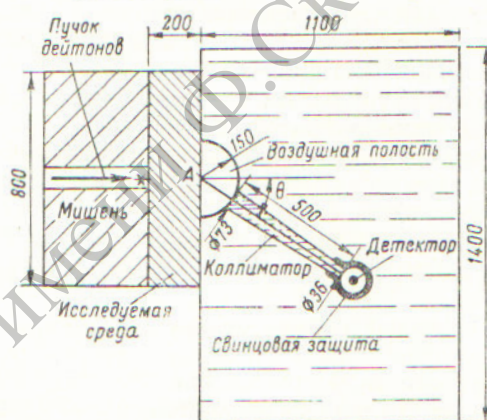


Рис. 1. Схема экспериментального устройства.

водой коллиматоре. В воду добавлялось около 1% борной кислоты, а спектрометр закрывался сзади и с боков слоем свинца толщиной $1,5$ см. При этом соотношение между потоком γ -лучей и нейтронов при открытом коллиматоре даже под углом 70° не превышало 10. У всех исследуемых сред отношение эффекта нейтронов к их фону составляло около 5—6 и 20—30 для углов 70° и 20° соответственно.

При измерении энергетических распределений за исследуемой средой детектор помещался

воздушную полость вблизи точки А. Нейтронные спектры измерялись сцинтилляционным спектрометром быстрых нейтронов, описанным в работе [4]. В спектрометре использовался фотоумножитель ФЭУ-13. Дискриминация γ -лучей осуществлялась по схеме, описанной в работе [1], с той лишь разницей, что в диодной и анодной цепях использовались диоды Д-10, а после сложения импульсов отрицательная составляющая полученного импульса закорачивалась на землю через диод Д-11. Спектроскопический порог был равен 0,5 Мэв при ослаблении счета γ -лучей в 10^3 раз. Амплитудные распределения импульсов измерялись на стокальном анализаторе. Энергетическая шкала спектрометра устанавливалась и периодически контролировалась по измерениям амплитудного распределения нейтронов под углом 0° . Стабильность аппаратуры (главным образом фотоумножителя) составляла 2—3% на протяжении всех измерений. Под каждым углом амплитудное распределение измерялось три — пять раз. Преобразование амплитудных распределений в энергетические спектры производилось по формуле

$$\Phi(E_n) = - \frac{E_n}{1 - \exp[-\Sigma(E_n)d]} \cdot \frac{dV}{dE} \times \\ \times \frac{d}{dV} \left[N(V) \frac{dV}{dE} \right],$$

где $\Sigma(E_n)$ — макроскопическое сечение рассеяния нейтронов на водороде кристалла; d — толщина кристалла; dV/dE — производная амплитуды импульса по энергии.

Таким образом, обработка результатов измерений сводилась к умножению измеренного амплитудного распределения $N(V)$ на dV/dE (каждого канала), дифференцированию в шкале амплитуд импульсов методом «подвижной полосы» [5] и затем умножению на $\frac{dV}{dE}$ и учету эффективности регистрации. Оказалось, что дифференцирование методом подвижной полосы позволяет использовать довольно малый шаг (~ 70 кэв) и это не приводит к «раскачке» результатов.

Дифференцирование аппаратных спектров, как известно, не является строгим методом обработки, так как форма линии кристалла отличается от «столика» (dE/E_n). Но, как показал В. Г. Золотухин, это несущественно для непрерывных спектров, даже при работе с кристаллами больших размеров. На рис. 2 показан полученный указанным способом спектр нейтронов под углом 0° без исследуемой

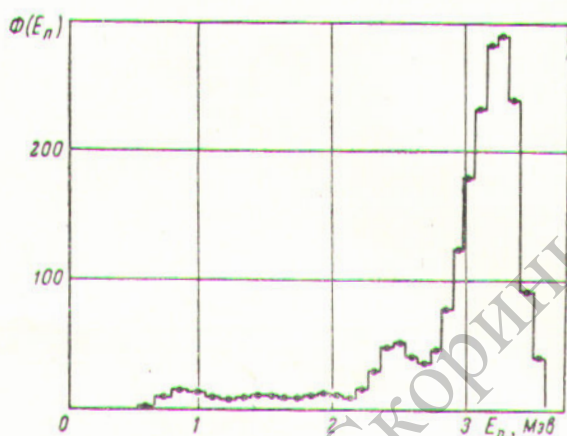


Рис. 2. Энергетическое распределение нейтронов под углом 0° без исследуемой среды.

среды. Видно, что в спектре при энергии $\sim 2,5$ Мэв проявляется слабый максимум, обусловленный главным образом тем, что не учитывалась реальная форма линии в кристалле

Обсуждение результатов

Угловые энергетические распределения быстрых нейтронов. На рис. 3 представлены экспериментально полученные энергетические распределения нейтронов под углом $20,40$ и 70° , а на рис. 4 — угловые распределения энергетических групп нейтронов $0,4-1,2$; $1,2-2,0$; $2,0-2,8$; $2,8-3,4$ Мэв после прохождения слоев воды ($3,3 \lambda_t$), графита ($3,3 \lambda_t$), алюминия ($1,5 \lambda_t$), железа ($3,0$ и $4,6 \lambda_t$), никеля (2 и $4 \lambda_t$) и свинца ($3 \lambda_t$). Все толщины даны в длинах свободного пробега для нейтронов с энергией $3,4$ Мэв. Из рисунков видно, что во всех средах формы энергетических спектров изменяются нерегулярно. Но везде, кроме воды, достаточно четко проявляется пик упругого рассеяния (для железа проявляется пик, обусловленный неупругим рассеянием) и наблюдается смягчение спектра с увеличением угла. В первом приближении зависимость энергетических групп от угла во всех средах одинакова. На зависимость энергетических групп от угла слабо влияет и величина пробега.

На рис. 5 показаны угловые распределения группы $2,8-3,4$ Мэв и результаты расчета в приближении однократного рассеяния, которые были проведены с изотропными и реальными анизотропными сечениями рассеяния. Экспериментальные и расчетные угловые распределения умножались на $\sin \theta$. Расхождения между рас-

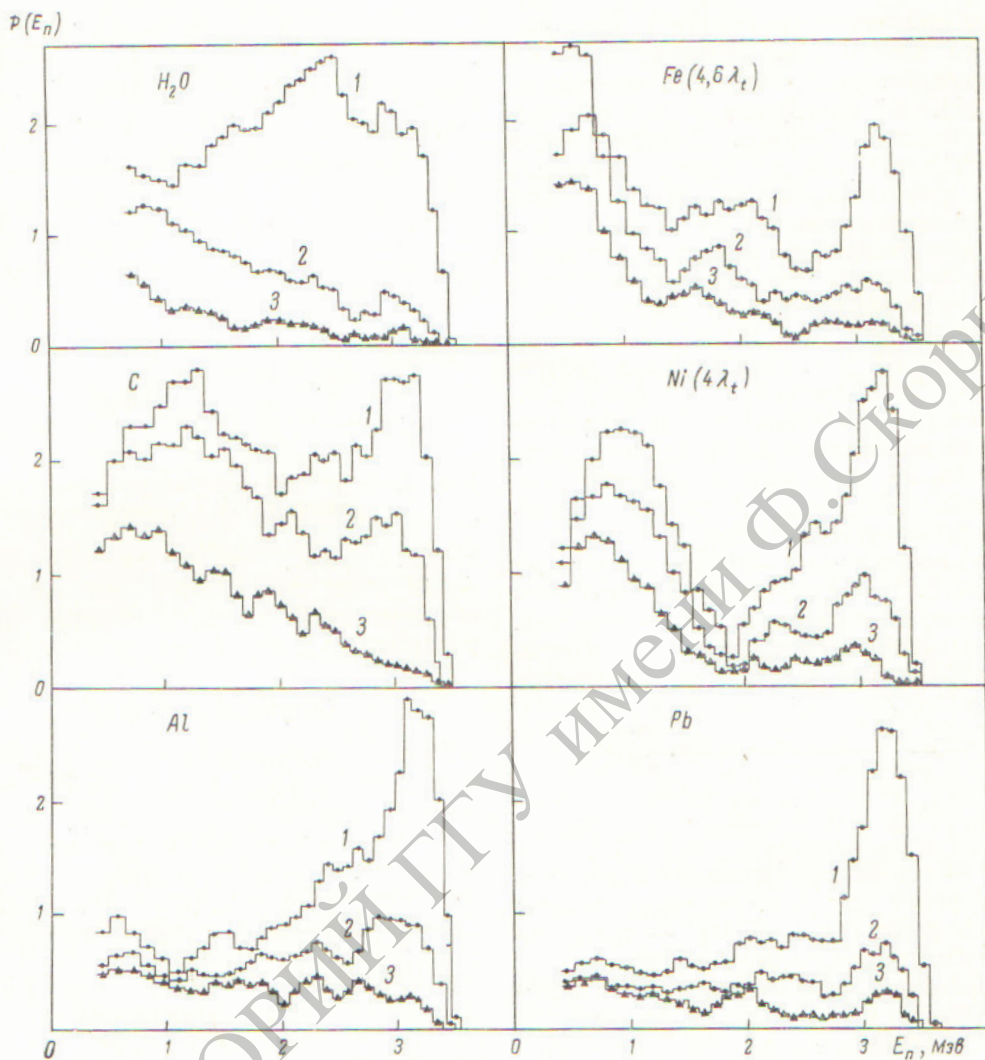


Рис. 3. Энергетические распределения нейтронов в воде, графите, алюминии, железе, никеле и свинце под углом:
1—20°; 2—40°; 3—70°.

четом и экспериментом для группы 2,8—3,4 Мэв указывают на существенную роль многократного рассеяния.

Для практических целей весьма полезным может быть угловое распределение дозы нейтронов. На рис. 6 показано угловое распределение дозы нейтронов с энергией 0,4—3,4 Мэв,

умноженное на $\sin \theta$, т. е. $\sin \theta \int_{0,4}^{3,4} \Phi(E, \theta)$

$D(E) dE$.

Зависимость дозы от энергии $D(E)$ взята из работы [6]. Данные для углов 0—20° могут быть получены из расчетов в приближении

однократного рассеяния для группы 2,8—3,4 Мэв и путем экстраполяции для остальных энергетических групп. Как видно из рис. 6, в интервале углов 20—70° величина дозы для всех сред, кроме воды, слабо зависит от угла и может быть описана формулой

$$D(\theta) \sim \frac{1}{\sin \theta} \exp\left(-\frac{\theta}{\theta_0}\right),$$

где $\frac{2\pi}{3} \leq \theta_0 \leq 2\pi$. Для воды зависимость дозы от угла близка к зависимости дозы γ -лучей [7] ($\theta_0 \approx \frac{\pi}{4}$).

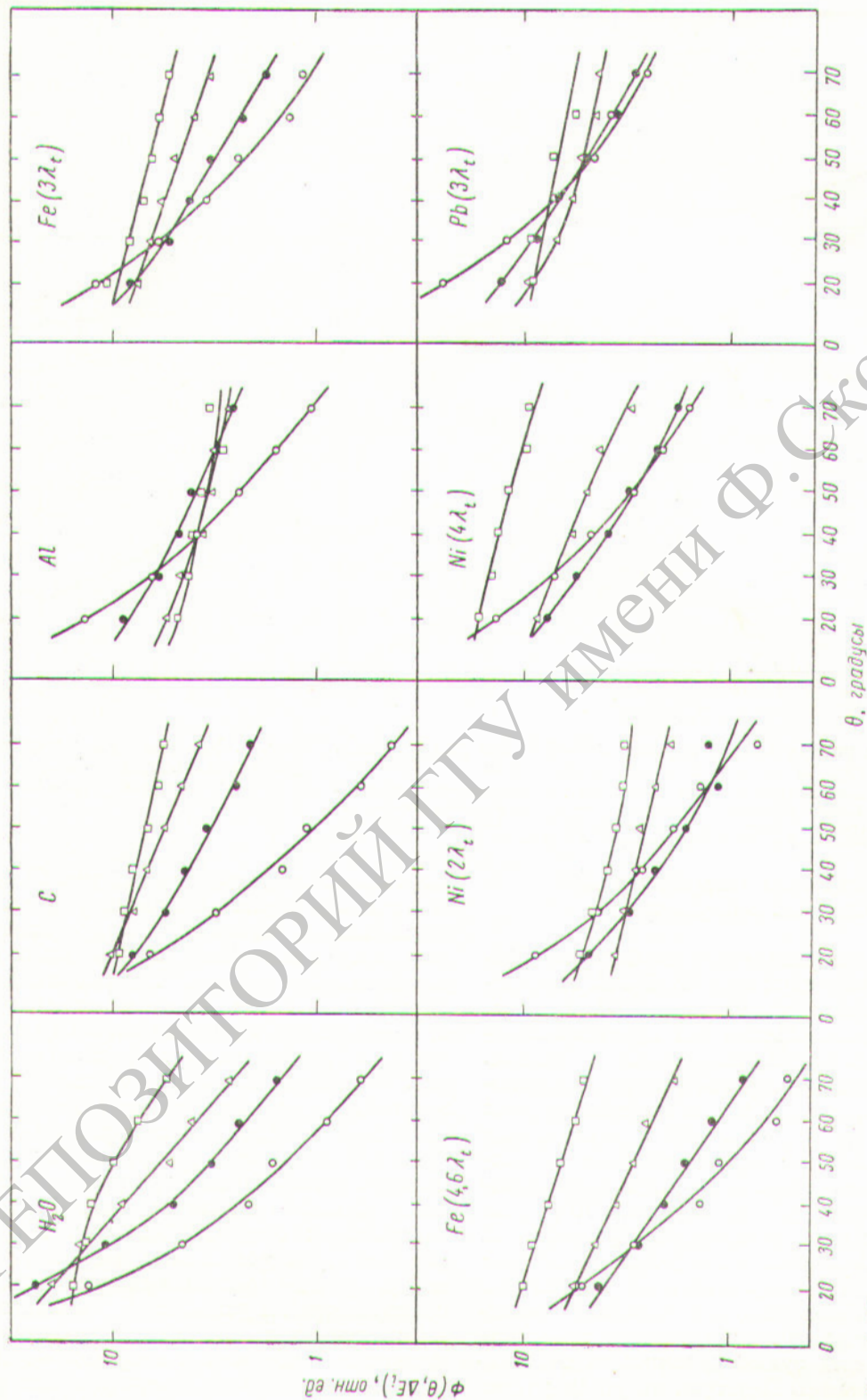


Рис. 4. Угловые распределения нейтронов в воде, графите, алюминии, железе, никеле и свинце в единичном телесном угле для энергетических групп:

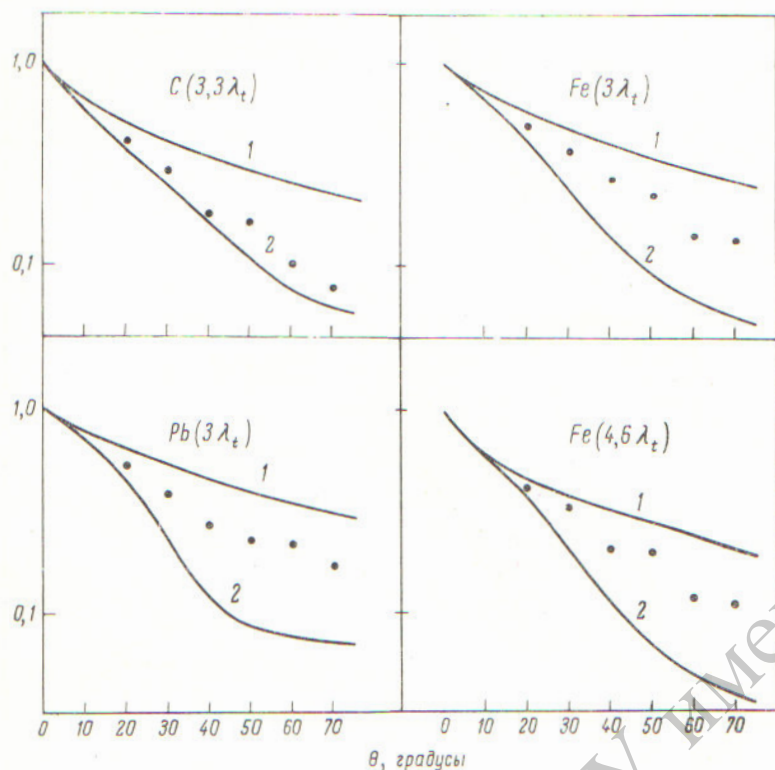


Рис. 5. Угловые распределения группы 2,8—3,4 Мэв для графита, свинца и железа в телесный угол $d\Omega$:

1 — расчет в приближении однократного рассеяния в предположении изотропности дифференциального сечения рассеяния; 2 — расчет в приближении однократного рассеяния для реального дифференциального сечения рассеяния нейтронов с энергией, близкой к 3,4 Мэв.

Энергетические распределения быстрых нейтронов

Энергетические распределения быстрых нейтронов на границе двух сред $\Phi(E_0, E, R)$ представляют не только самостоятельный интерес, но могут использоваться и для проверки полученных энергетических угловых распределений. На рис. 7 показаны энергетические распределения нейтронов, измеренные на границе раздела среда — вода (в полости А) и полученные интегрированием угловых энергетических распределений. Распространение результатов измерений на область углов, больших 70° , было получено экспоненциальной экстраполяцией. Экстраполяция в интервале углов $0-20^\circ$ для группы 2,8—3,4 Мэв проведена по результатам расчета в приближении однократного рассеяния. Энергетическое распределение нейтронов в полости А есть сумма рассеянного и нерассеянного излучений. Интеграл по углам учитывает только рассеянное излучение. Измерение

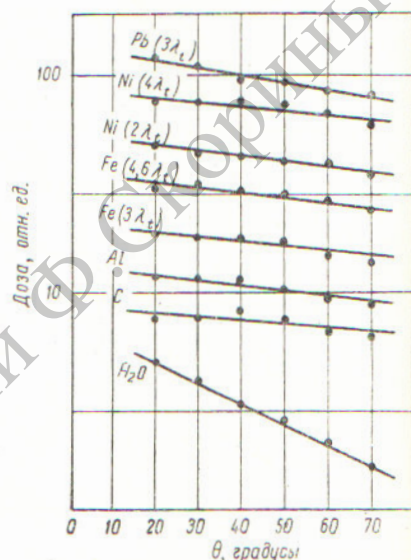


Рис. 6. Угловое распределение дозы нейтронов с энергией 0,4—3,4 Мэв в телесный угол $d\Omega$.

энергетических распределений при 0° позволяет найти вклад нерассеянного излучения. Удовлетворительное согласие между измеренными спектрами и спектрами, полученными интегрированием, показывает, что выбранная экспоненциальная экстраполяция является удачной и, по-видимому, отражает главные особенности угловых энергетических распределений. На рис. 7 приведены также результаты расчетов энергетических распределений методом моментов в воде, графите и железе для точечного изотропного источника нейтронов [8] и расчеты методом Монте-Карло [9] в железе для практически плоского мононаправленного источника нейтронов с энергией 3,0 Мэв. На этом же рисунке даны результаты измерений быстрых нейтронов однокристалльным сцинтилляционным спектрометром в условиях барьерной геометрии и практически плоского мононаправленного источника нейтронов с энергией ~ 3 Мэв [10]. Детальное сравнение энергетических распределений затруднительно из-за различия началь-

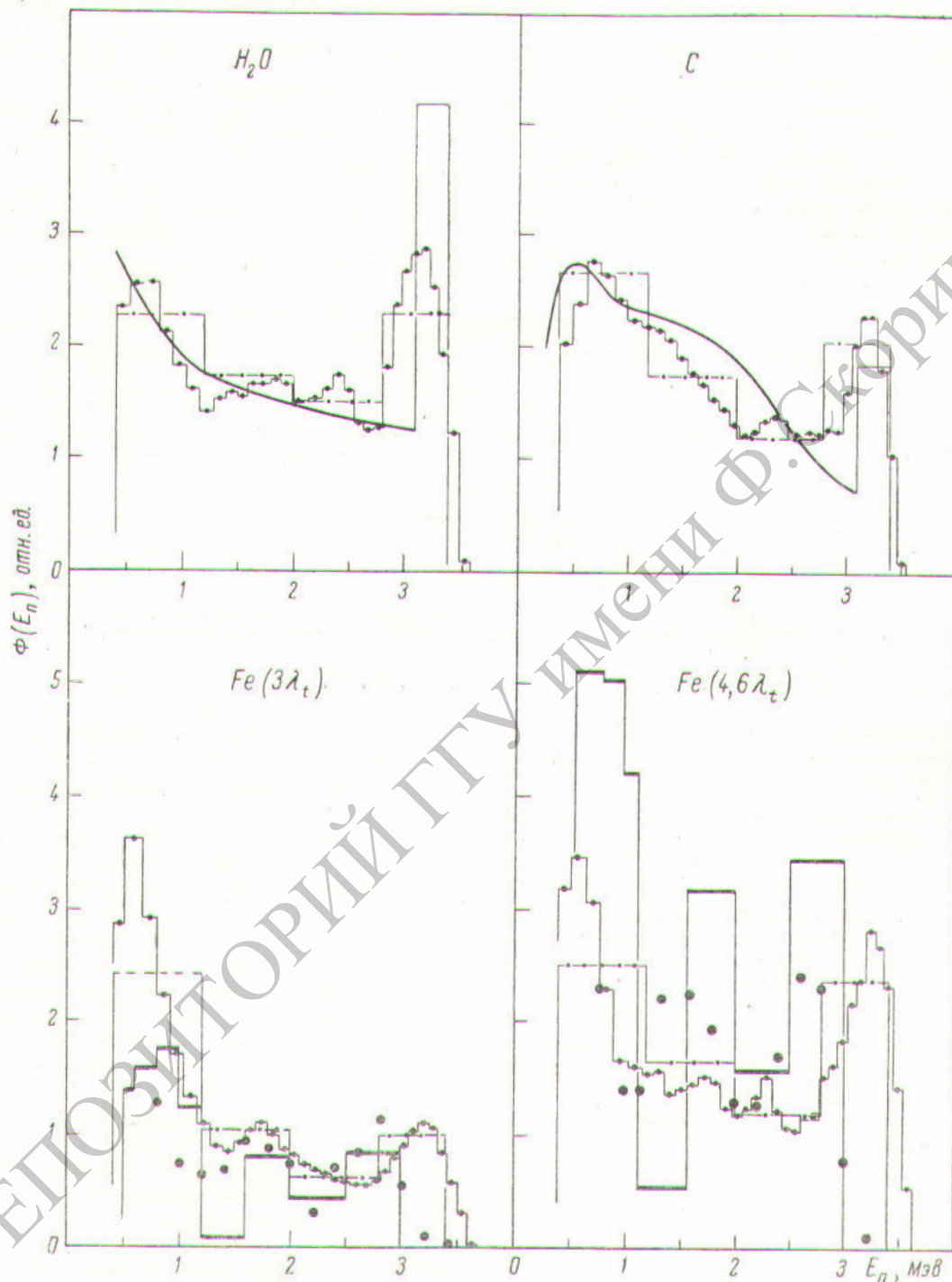


Рис. 7. Энергетические распределения нейтронов:

—●— — измеренные на границе раздела среда — вода (в полости А); — — — — — угловые энергетические распределения, полученные интегрированием с учетом нерассеянных нейтронов; — — — — — результаты расчета в воде и графите [8]; — (гистограмма) — расчет [9]; ● — результаты измерений [10] в барьерной геометрии.

ных энергий и геометрии. Однако разница между энергетическими распределениями, даже в столь различных геометриях, не очень велика.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность С. Г. Цыпину за ценные замечания и обсуждение и Л. А. Трыкову за полезные советы. Кроме того, авторы благодарны А. П. Климову за обеспечение четкой работы нейтронного генератора и А. Т. Бакову за помощь при измерениях.

Поступила в Редакцию 8/VIII 1963 г.

В окончательной редакции 2/VII 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Brooks. Nucl. Instrum. and Methods, No. 4, 151 (1959).

2. Р. Оуэн. «Атомная техника за рубежом», № 1, 16 (1960).
3. В. А. Дулин, Ю. А. Казанский, И. В. Шугар. «Атомная энергия», 14, 488 (1963).
4. В. А. Дулин и др. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 35 (1961).
5. К. Ланиош. Практические методы прикладного анализа. М., Физматгиз, 1961, стр. 327.
6. Х. Д. Андросенко, Г. Н. Смиренин. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 64 (1962).
7. Ю. А. Казанский. «Атомная энергия», 8, 432 (1960).
8. Г. Гольдштейн. Основы защиты реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
9. M. Leimdörfer. FOA 4A 4196—411, May 1961. AB Atomenergi, Internat. Rpt RFA-88 (1962).
10. G. Düring, R. Jansson, N. Starfelt. Симпозиум по регистрации, дозиметрии и стандартизации нейтронов (Харуэлл, 10—14 декабря 1962 г.). Vienna, IAEA, SM-36/T02.



УДК 537.591:550.35

О нейтронном фоне у земной поверхности

Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, О. С. Цветков

Измерены потоки медленных нейтронов над почвой и водной поверхностью. Поток медленных нейтронов над почвой оказался в 3,1 раза больше, чем над водной поверхностью. Рассматриваются возможные причины увеличения потока медленных нейтронов над почвой по сравнению с водной поверхностью. Рассчитан поток тепловых нейтронов на поверхности материала, в котором космическими лучами образуются быстрые нейтроны.

Сделан вывод о том, что разница потоков медленных нейтронов над почвой и водой в значительной мере обусловлена генерацией нейтронов космическим излучением в верхних слоях земной коры.

Ход высотной зависимости нейтронного потока космических лучей вблизи поверхности земли искажается рядом факторов, основными из которых являются следующие:

1. Образование нейтронов космическим излучением в верхних слоях земной коры.

2. Искажение нейтронного спектра земной поверхностью. На этот фактор указывали в 1940 г. Бете, Корфф и Плячек [1], которые рассмотрели случай бесконечно протяженной водной поверхности. Часть быстрых нейтронов, образованных в атмосфере вблизи водной поверхности, падая в воду, замедляется в ней до тепловых энергий. Некоторые из этих тепловых нейтронов, диффундируя обратно в воздух, повышают плотность тепловых нейтронов вблизи

водной поверхности по сравнению со свободной атмосферой, где относительная плотность тепловых нейтронов значительно ниже вследствие их захвата азотом по реакции $N^{14}(n, p)C^{14}$ (образование радиоактивного углерода).

Так как эффективность любого нейтронного детектора зависит от спектра регистрируемых нейтронов, то искажение этого спектра может повлиять на результаты измерений.

3. Образование нейтронов в земной коре вследствие естественной радиоактивности.

В настоящей работе мы попытались оценить поток медленных нейтронов на уровне моря над водной и земной поверхностями.

Эксперимент

Нейтронное излучение регистрировалось сцинтилляционным счетчиком, который состоял из детектора медленных нейтронов и фотоумножителя с диаметром 200 мм.

Детектор, изготовленный нами на основе обогащенной борной кислоты (обогащение В¹⁰ до 91%) и сернистого цинка методом совместного прокаливания [2] с учетом изменений, изложенных в работе [3], имел вид диска диаметром 200 мм. Устройство сцинтилляционного счетчика кратко изложено в работах [4, 5].