

СЗ49а

Б-22

+

2605/79

БАМБЛЕВСКИЙ, В.П.

Б2-16-12123



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-16-12123

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1979

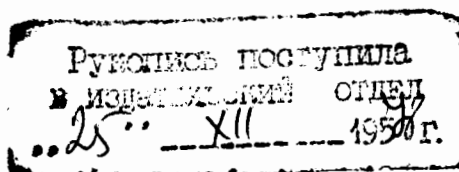
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Отдел радиационной безопасности и радиационных исследований

В.П.Бамблевский, В.В.Гречко*)

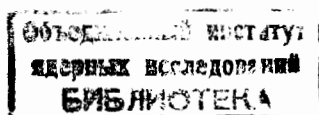
*) Институт ядерных исследований АН СССР, г.Москва

52-16-12123

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ И МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ И
ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ПУЧКЕ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИБР-30.



Дубна, 1979 .



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отдел радиационной безопасности и радиационных исследований

В.П.Бамблевский, В.В.Гречко^{ж)}

ж) Институт ядерных исследований АН СССР, г.Москва

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ И МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ И ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ПУЧКЕ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИБР-30.

Аннотация

Измерены спектры нейтронов в энергетическом интервале $10^{-8} + 15$ МэВ в пучке нейтронов канала № 6 реактора ИБР-30 на расстояниях (базах) 8,8 и 68,5м от центра активной зоны. Спектры восстанавливались методом статистической регуляризации на основании информации, полученной с помощью активационных детекторов нейтронов: тепловых, резонансных, пороговых и тепловых в шаровых полиэтиленовых замедлителях. Установлено, что спектры на базах 8,8 и 68,5м несколько отличаются друг от друга, причем спектр на базе 8,8м "мягче". При таких расстояниях отклонения от закона Γ^2 плотностей потоков нейтронов значительны и не постоянны для различных энергетических групп нейтронов. На основании полученных спектров определяли значения максимальных эквивалентных и поглощенных мощностей доз нейтронов. Проведено сравнение некоторых полученных результатов с литературными данными.

Полученные результаты необходимы для проведения в дальнейшем в пучке нейтронов ИБР-30 проверки адекватности показаний детекторов дозиметрического контроля, используемых в ОИЯИ.

I. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты измерений дифференциальных энергетических зависимостей плотностей потоков нейтронов (спектров нейтронов) реактора ИБР-30^{/1/} ОИЯИ. Эти результаты необходимы для проверки адекватности показаний детекторов дозиметрического контроля эквивалентной и поглощенной дозам в пучке нейтронов ИБР-30^{/2/}.

Измерения проводились с помощью активационных детекторов нейтронов: тепловых, резонансных, пороговых и тепловых в полиэтиленовых шаровых замедлителях по методике, описанной в^{/3/}. По сравнению с^{/4/} исключена какого-либо рода интерполяция спектра на отдельных энергетических участках, а также существенно увеличено число детекторов, по показаниям которых методом статистической регуляризации^{/5/} восстанавливали искомый спектр. Представлены результаты определения спектров в области энергий 10^{-8} –15 МэВ в пучке нейтронов канала №6 на расстояниях 8,8 м и 68,5 м от центра активной зоны реактора. Используя коэффициенты перехода^{/6-8/} и восстановленные спектры, были вычислены значения максимальных поглощенных и эквивалентных доз нейтронов.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились в пучке нейтронов канала №6 на 8,8 и 68,5-метровых базах реактора. Нейтронотвод диаметром 40 см был вакуумирован, кроме начального участка 10 м. Толщина каждой дуралюминиевой заглушки на торцах нейтронотова – 2 мм. Полученные результаты соответствуют следующему режиму работы реактора :

а) реакторный режим;

б) средняя мощность - 21 кВт;

в) частота следования импульсов - 5Гц;

г) замедлитель сложный, состоящий из слоя воды толщиной 30 мм с карбидом бора и "гребенчатого" водяного фильтра, назначение которого состояло в обогащении пучка нейтронами промежуточных энергий.

В процессе облучения детекторов мощность реактора непрерывно контролировалась по показаниям двух мониторов: мощности реактора и пучка. Отклонения показаний обоих мониторов от средних значений не превышали 1,5%. Однородность пучка на базе 8,8 м проверялась по показаниям активационных детекторов из меди; в пределах ошибок измерений (3%) неоднородность поля нейтронов в пучке не обнаружена. На базе 68,5 м неоднородность в пределах ошибки измерений ~15% также не обнаружена^{/2/}.

3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЕТЕКТОРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ АКТИВНОСТИ.

На 68,5 м базе облучались детекторы из индия размерами \emptyset 5x5мм в центрах шести полиэтиленовых замедлителей диаметрами 5,1; 7,6; 12,7; 20,3; 25,4 и 30,5 см, детекторы из золота в кадмии и без него (реакция $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$), пороговый детектор из серы $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$, а на 8,8 м базе кроме указанных детекторов были добавлены резонансные детекторы: $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$, $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$, $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$, $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ и пороговые: $^{103}\text{Rh}(n,n')^{103m}\text{Rh}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$, $^{57}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$, $^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$.

Активности большинства облученных детекторов измеряли сцинтилляционным γ -спектрометром с кристаллом $NaI(Tl)$ размером $\emptyset 80 \times 60$ мм. Разрешение спектрометра по изотопу ^{137}Cs равнялось 9,5%. Градуировка спектрометра осуществлялась γ -источниками из трех наборов ОСТИ. Значения фотоэффективностей ϵ для точечных источников представлены на рис. 1. Полученные значения ϵ хорошо согласуются с данными^{/9/}. При определении активностей детекторов вводились поправки на схему распада^{/10/}, геометрический размер^{/11/} и самоослабление γ -излучения^{/10/}. Необходимые данные о характеристиках распадов рассматриваемых изотопов брались из^{/12/}.

Для измерения активности родиевого детектора был сконструирован спектрометр мягкого γ -излучения с кристаллом $NaI(Tl)$ $\emptyset 40 \times 5$ мм и имеющим тонкое входное окно из бериллия. Необходимые данные о схеме распада ^{103m}Rh брались из^{/13/}. По данным этой же работы вычислялась эффективность регистрации ϵ_x рентгеновского излучения от родиевого детектора толщиной 0,075 мм. Значение ϵ_x определялось также экспериментально следующим путем. Родиевый детектор облучался одновременно с аллюминиевыми нейтронами энергий 14,7 МэВ из реакции $T(d,n)^4He$. С помощью мониторинговой реакции $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$ измерялась плотность потока нейтронов в точке облучения, после чего нетрудно определить активность родиевого детектора и ϵ_x . Значения ϵ_x , полученные двумя способами, в пределах погрешности определения ($\sim 7\%$) совпадают.

Измерения β -активности детектора из серы размером $\emptyset 20 \times 5$ мм проводились на установке УМФ-1500м^{/14/}. Эффективность регистрации β -частиц ϵ_β в этом случае определялась экспериментально. Во-первых, способом, аналогичным градуировке родиевого детектора; во-вторых, путем определения удельной активности серного детектора с помощью образцового источника $^{90}Sr + ^{90}Y$ и источника, содержа-

щего радиоактивный изотоп ^{40}K в естественной смеси изотопов элемента калия^{/15/}. Полученные три значения ε_β хорошо согласуются между собой, разница между ними составляет менее 5%, что укладывается в ошибку измерений.

Погрешности в определении абсолютных активностей всех используемых детекторов составляют 3-7%, что вполне удовлетворяет требованиям современных методов восстановления спектров нейтронов по показаниям активационных детекторов^{/16/}.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ

Восстановление методом статистической регуляризации (МСР)^{/5/} спектра нейтронов $\varphi(E)$ в области энергий от $E_{min} = 10^{-8}$ МэВ до $E_{max} = 15$ МэВ сводилось к решению системы уравнений

$$Q_i + \varepsilon_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E) R_i(E) dE \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (I)$$

где Q_i - величины, определяемые на основе экспериментальных результатов;

ε_i - погрешность в определении Q_i ;

$R_i(E)$ - ядро i -го уравнения.

Смысл каждого уравнения из (I) изложен в^{/3/}, тем не менее опишем каждое уравнение несколько подробнее в нашем случае.

Для детектора из золота размером $\varnothing 20 \times 0,02$ мм, облученного в пучке нейтронов в кадмии толщиной 1 мм и без него можно записать

$$A_{th} (1 - F_{cd} / R_{cd}) / N + \varepsilon_1 = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E) \sigma_1(E) \eta(E - E_{cd}) dE, \quad (2)$$

где A_{th} - насыщенная активность детектора, облученного без кадмия;

F_{Cd} - коэффициент, учитывающий ослабление кадмиевым экраном потока надтепловых нейтронов^{/10/};

R_{Cd} - кадмиевое отношение;

$\sigma_1(E)$ - сечение реакции $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$;

N - число ядер в детекторе;

E_{Cd} - граничная кадмиевая энергия^{/17/};

$\eta(x)$ - принимает значения

$$\eta(x) = 1 \quad \text{при } x \leq 0$$

$$\eta(x) = 0 \quad \text{при } x > 0 \quad (3)$$

Заметим, что R_{Cd} для используемого детектора из золота на базе 8,8м оказалось равным $(1,68 \pm 0,03)$, а на базе 68,5м $-(1,81 \pm 0,04)$.

По показаниям резонансных детекторов были определены по формулам из^{/10,17/} значения $\varphi(E)$ при E_z^k - энергии резонанса k -го детектора. По найденным значениям $\varphi(E_z^k)$ спектр промежуточных нейтронов в области 1,5 эВ до 2 кэВ на базе 8,8м можно представить

$$\varphi(E) = 1,66 \cdot 10^6 / E^{0,93} \quad \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}, \quad (4)$$

где E - энергия нейтронов в эВ. На основании (4) запишем следующие уравнения системы (I)

$$\Phi_i + \epsilon_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E) [\eta(E - E_i^2) - \eta(E - E_i^1)] dE \quad i=2,3,\dots,7, \quad (5)$$

где E_i^1 и E_i^2 - соответственно границы следующих энергетических интервалов: 1,5-10, 1,5-100, 1,5-2000, 10-2000, и 100-2000 эВ;

Φ_i - значение плотности потока нейтронов в i -ом энергетическом интервале $E_i^1 - E_i^2$;

$\eta(x)$ определяется из (3).

Активность насыщения на одно ядро i -го порогового детектора A_i равна

$$A_i + \varepsilon_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E) \sigma_i(E) dE \quad i=8,9,\dots,14, \quad (6)$$

σ_i - сечение активации i -го порогового детектора.

Скорости счетов n_i от детекторов тепловых нейтронов, облученных в замедлителях диаметрами 5,1; 7,6; 12,7; 20,3; 25,4; 30,5 см связаны с $\varphi(E)$ соотношением

$$n_i + \varepsilon_i = K \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E) S_i(E) dE \quad i=15,16,\dots,20, \quad (7)$$

здесь n_i - скорость счета от i -го детектора;

K - градуировочный коэффициент /18/;

$S_i(E)$ - зависимость чувствительности детектора с i -ым замедлителем.

Необходимые характеристики теплового детектора из золота и резонансных детекторов брались из /10,17/, сечения активации пороговых детекторов - в основном из /19/, а зависимости $S_i(E)$ для детекторов в замедлителях - из /20,21/.

Источники ошибок измерений тепловыми и резонансными детекторами наиболее подробно рассмотрены в^{17/}. Общая погрешность для теплового детектора в нашем случае составляет 8%, а для резонансных детекторов - 10-20%. Суммарная погрешность \mathcal{E}_1 активационного интеграла A_i из (6) от неточности измерения наведенной активности порогового детектора и ошибок в величине сечения не превышала 10-15%. Погрешности \mathcal{E}_2 скоростей счетов n_i от детектора тепловых нейтронов, облученного в замедлителе, обусловлена, в основном, определением градуировочного коэффициента K -10% и ошибками в зависимости чувствительности $S_i(E)$. Автором^{122/} приводятся результаты сравнения литературных данных значений $S_i(E)$ с рекомендованными им. В частности, используемые нами зависимости $S_i(E)$ из^{120/} хорошо совпадают с рекомендованными^{122/} за исключением области энергий нейтронов $E < 10^{-4}$ МэВ. Для проверки влияния этого расхождения на результаты восстановления спектров, восстанавливали также спектры с использованием чувствительностей $S_i(E)$ из^{121,23,24/}. Спектры, восстановленные при использовании различных наборов $S_i(E)$ отличаются заметно только в тепловой области.

Спектр нейтронов на базе 8,8м восстанавливали по 20 уравнениям из (2), (6), (7), (8). На базе 68,5м плотность потока нейтронов приблизительно на два порядка меньше, чем на базе 8,8м, вследствие чего пока не представлялось возможным использовать весь набор детекторов. Поэтому на базе 68,5 м спектр восстанавливали из уравнений (2), (8), а также по показаниям порогового детектора из серы и резонансного детектора из золота.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На рис. 2,3 представлены результаты восстановления спектров нейтронов. На рис.3 указан для сравнения спектр, измеренный по методу времени пролета^{/1/}. Спектр нейтронов ИБР-30 мягче, чем спектр деления, максимум $\varphi(E) \cdot E$ находится в районе 1 МэВ, что хорошо согласуется с данными^{/25/}.

Как и следовало ожидать, восстановленный спектр на базе 68,5м имеет бóльший коридор неопределенности, чем на базе 8,8м, т.к. последний восстановлен по бóльшему числу уравнений. Спектр на базе 8,8м несколько мягче, чем на 68,5м базе; не соблюдается при таких расстояниях закон τ^2 . Эти выводы можно сразу сделать из сравнения отношений скоростей счетов детекторов облученных в замедлителях (рис.4).

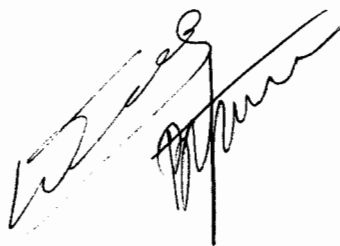
Значения плотностей потоков тепловых нейтронов Φ_0 , вычисленные по восстановленным спектрам, существенно зависят от используемого набора зависимостей чувствительностей детекторов тепловых нейтронов в замедлителях $S_i(E)$ и находятся в пределах на базе 8,8 м от $1,3 \cdot 10^7$ до $1,9 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а на базе 68,5м — от $1,2 \cdot 10^5$ до $1,7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Плотности потоков тепловых нейтронов Φ_0 определялись также методом активации золотых фольг по формулам из^{/10/}, при этом значение температуры максвелловского спектра, равное 30 мэВ, бралось из^{/1/}. Значения Φ_0 на базах 8,8м и 68,5м в этом случае оказались соответственно равными $(1,4 \pm 0,15) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $(1,6 \pm 0,15) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

На основании восстановленных спектров с помощью коэффициентов перехода из^{/8-9/} были вычислены интегральные энергетические зависимости максимальных эквивалентных и поглощенных мощностей

доз нейтронов (рис.5).

Определенная с помощью спектра мощность эквивалентной дозы нейтронов отличается на 13% от значения полученного рекомбинационным дозиметром^{/2/}, что не превышает погрешности измерений этим дозиметром. Вычисленное число треков для ИФКн по восстановленному спектру также хорошо (в пределах нескольких процентов) совпадает с экспериментальным^{/2/}.

Авторы благодарны В.А.Архипову за помощь при проведении эксперимента, В.Е.Алейникову и М.М.Комочкову за дискуссии и полезные замечания.



ЛИТЕРАТУРА

1. В.В.Голиков, Ж.А.Козлов, Л.К.Кулькин, Л.Б.Пикельнер, В.Т.Руденко, Э.И.Шарапов. Сообщение ОИЯИ, З-5736, Дубна, 1971.
2. В.Е.Алейников и др. Сообщение ОИЯИ, P16-12122, Дубна, 1979.
3. В.П.Бамблевский, В.В.Гречко. Препринт ОИЯИ, P16-12069, Дубна, 1978.
4. V.E.Aleinikov e.o. Proceedings of IV-th International Congress, IRPA; v.3, p.831; Paris, 20-30 April, 1977.
5. Л.С.Туровцева. Решение обратных некорректных задач методом статистической регуляризации. Препринт ИИМ, Москва, 1975.
6. ICRU Rep.20, Radiation Protection, Instrumentation and its Application. International Comission on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1971, p.7.
7. Rindi A. Health Phys., v.27, p.322, 1974.
8. Rindi A. Health Phys., v.33, p.264, 1977.
9. Экспериментальные исследования полей гамма-излучения и нейтронов. Под ред. Ю.А.Егорова. М., Атомиздат, 1974.
10. Е.А.Крамер-Агеев, В.С.Трошин, Е.Г.Тихонов. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М., Атомиздат, 1976.
11. В.П.Бамблевский. Препринт ОИЯИ, P13-10367, Дубна, 1977.
12. Н.Г.Гусев, П.П.Дмитриев. Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. Справочник. М., Атомиздат, 1977.
13. H.Ing and W.G.Cross. Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, 1973, v.24, p.437.
14. Дозиметрические и радиометрические приборы (каталог). М., Атомиздат, 1964.

II.

15. Дозиметрические и радиометрические методики. Под ред. Н.Г.Гусева и др. М., Атомиздат, 1966.
16. A.Fisher. KFA, Jul-1196, 1975.
17. С.С.Ломакин, В.И.Петров, П.С.Самойлов. Радиометрия нейтронов активационным методом. М., Атомиздат, 1975.
18. В.Е.Алейников, В.П.Бамблевский, Е.П.Череватенко. Сообщение ОИЯИ, Р16-9123, Дубна, 1975.
19. А.А.Лапенас. Измерение спектров нейтронов активационным методом. Рига, "Зинатне", 1975.
20. В.Е.Алейников, В.П.Гердт, М.М.Комочков. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, v.1, IAEA, Vienna (1973), 31.
21. M.Bricka e.o. В работе 20, с.279.
22. H.L.Zaborowski. Symposium International sur L'Utilisation du Californium 252. 26-28 Avril 1976, Paris, France.
23. H.W.Patterson, R.H.Thomas. Accelerator Health Physics. Academic Press, New York and London, 1973.
24. Topics in Radiation Dosimetry, supplement 1. Edited by Frank H. Attix. Academic Press, New York and London, 1972.
25. К.К.Кошаева, С.Н.Крайтор, Л.Б.Шкельнер. Препринт ОИЯИ, РЗ-5421, Дубна, 1970.

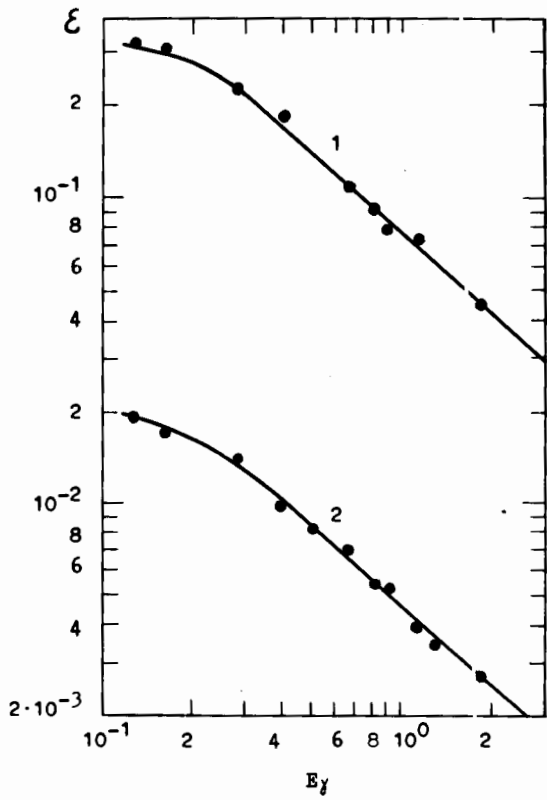


Рис. 1

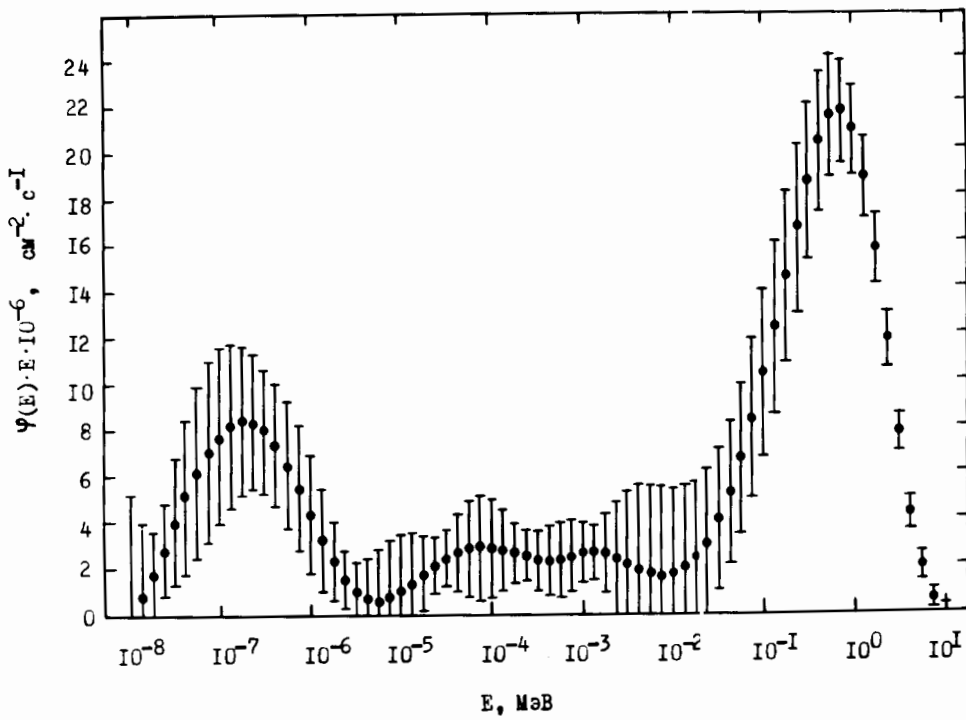


Рис. 2

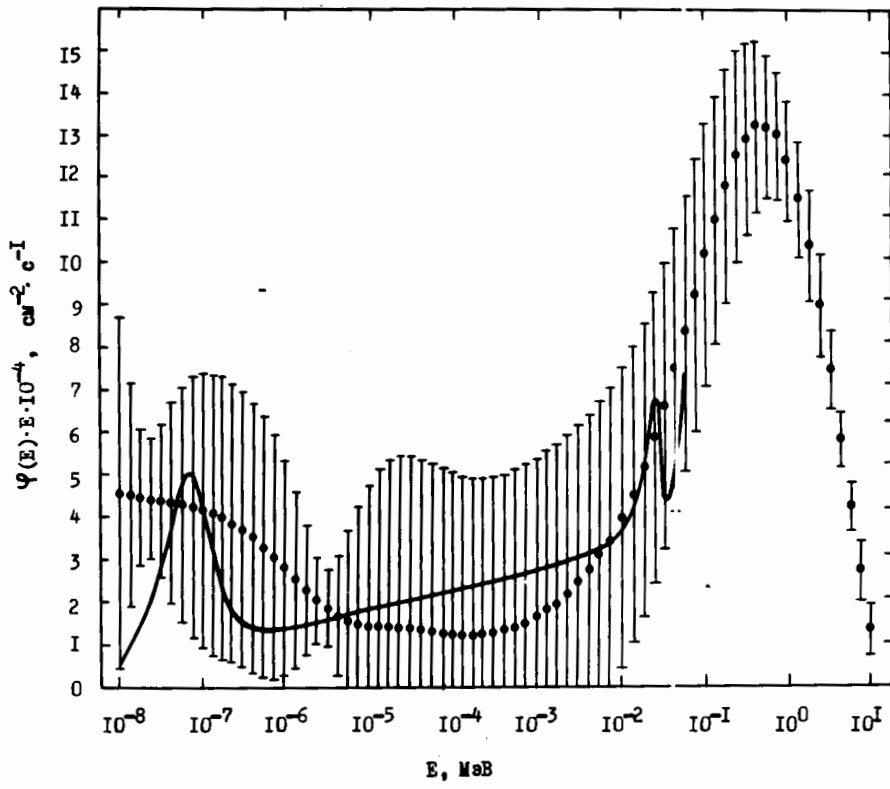


Рис. 3

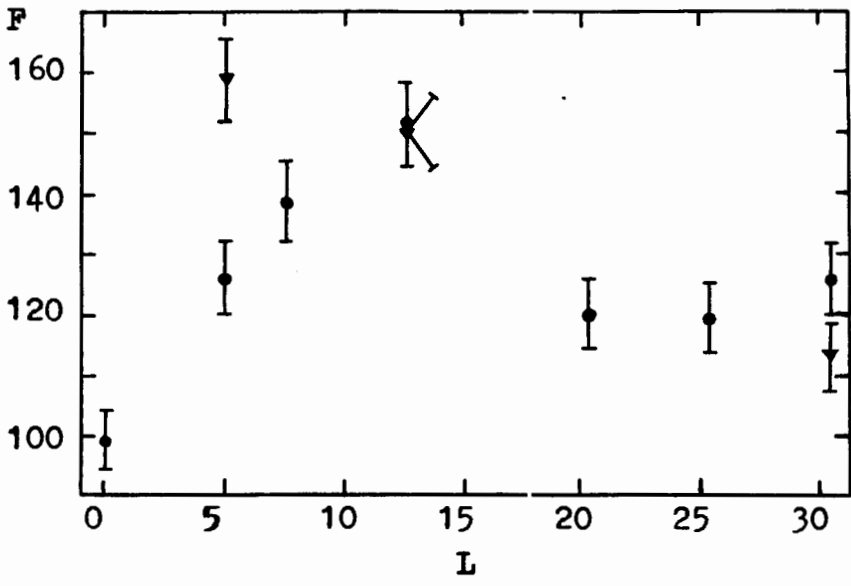


Рис. 4

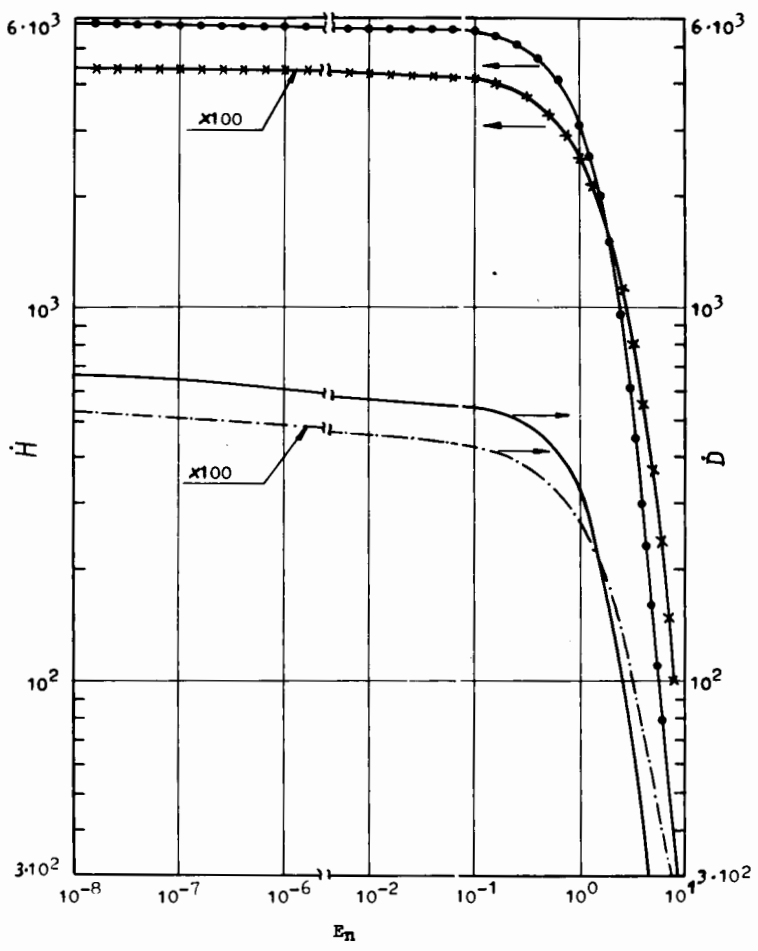


Рис. 5