

C 3496

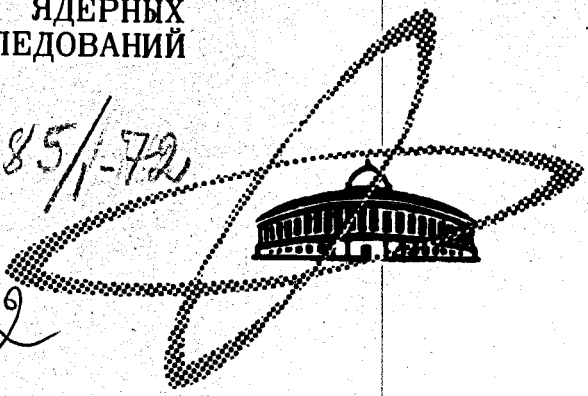
K-402

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1285/1-72

P16 - 6182



6182

Л.Р. Кимель, Я.Н. Расцветалов, В.П. Сидорин,
В.Б. Хвостов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

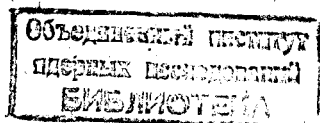
РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО
СПЕКТРАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
РАССЕЯННОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

1972

P16 - 6182

Л.Р. Кимель, Я.Н. Расцветалов, В.П. Сидорин,
В.Б. Хвостов

РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО
СПЕКТРАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
РАССЕЯННОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ



В комплексе задач по защите высокоэнергетических ускорителей важное место занимает проблема защиты от рассеянного излучения.

Ускоритель в целом можно представить расположенным вблизи границы раздела земля - воздух поверхностным источником ионизирующего излучения определенного компонентного состава и спектрально-углового распределения.

Экспериментальные исследования, выполненные на действующих ускорителях, показали, что определяющим компонентом излучения по дозе за защитой ускорителей являются быстрые ($0,1 \text{ Мэв} < E < 20 \text{ Мэв}$) и сверхбыстрые нейтроны с энергией приблизительно до $600 \text{ Мэв}^{1-5/}$.

Следовательно, если известно спектрально-угловое распределение нейтронов, выходящих за защиту ускорителя, то, решив задачу о прохождении нейтронного излучения в воздушной среде с таким спектрально-угловым распределением, можно получить информацию о поле рассеянного излучения вокруг ускорителя.

Анализ имеющихся экспериментальных и расчётных данных о спектральных распределениях нейтронов за защитой действующих ускорителей ^{6-10/} показал, что их форма практически не зависит от конкретного ускорителя, однако вопрос об универсальности сделанного обобщения остается открытым.

Информация относительно углового распределения нейтронного излучения за защитой ускорителей в настоящее время отсутствует.

Отмеченные выше обстоятельства для прогнозирования полей рассеянных нейтронов от высокоэнергетических ускорителей позволяют использовать набор функций пространственно-спектральных распределений рассеянных нейтронов для точечных моноэнергетических источников, поскольку любой реальный источник излучения можно рассматривать как их суперпозицию.

В данной работе получены расчётные характеристики пространственно-спектральных распределений рассеянных в воздухе нейтронов от точечных источников сверхбыстрых нейтронов.

Метод расчёта

В самом общем виде поставленная задача сводится к расчёту прохождения быстрых и сверхбыстрых нейтронов в воздушной среде с учётом влияния земли.

Наличие границы раздела двух сред, сильно различающихся по плотности, и выбранная форма источника излучения затрудняют применение методов решения кинетического уравнения.

Данная задача решалась модифицированным методом Монте-Карло, известным под названием "Способ локального вычисления потока" /11/.

Энергия первичных нейтронов выбиралась в интервале 25+600 Мэв. Нижняя граница энергий, до которой рассматривалось прохождение нейтронов, принималась равной 100 кэв.

При неупругих взаимодействиях нейтронов в диапазоне энергий 25+600 Мэв учитывалось множественное образование вторичных нуклонов; образованием пионов в этом диапазоне энергий пренебрегаем. В каждом акте взаимодействия частиц высоких энергий производился розыгрыш типа вторичного нуклона (протон или нейтрон), статистический вес которого затем умножался на полную множественность для данного взаимодействия.

Для нейтронов с энергиями $0,1 < E < 25$ Мэв учитывались все известные процессы взаимодействия с ядрами вещества.

При розыгрыше ядерного взаимодействия протонов ($E \geq 25$ Мэв) принималось во внимание изменение сечения неупругого взаимодействия на длине пробега, обусловленное потерями энергии на ионизацию. Прохождение протонов с энергиями ниже 25 Мэв не рассматривалось; т.к. иони-

зационные пробеги для них значительно меньше пробегов до ядерного взаимодействия, например, ионизационный пробег протонов с энергией 25 Мэв в воздухе ($\rho = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$) равен $R_{\text{ион}} = 5,65 \text{ м/12/}$, а пробег до ядерного взаимодействия $R_{\text{я}} = 435 \text{ м/20/}$. Микроскопические сечения процессов были взяты из работ /13-22/.

В расчётах предполагалось, что земля состоит из двуокиси кремния с 10% содержанием воды (по весу) и имеет плотность $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$. Состав воздуха принимался следующим: 80% азота и 20% кислорода.

Для реализации принятого алгоритма решения была составлена программа на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Характеристики программы следующие. Количество точек (детекторов), в которых вычисляются энергетические распределения рассеянных нейтронов, равно 56. Максимальное число энергетических групп - 20. Время счёта 10^3 историй составляет примерно 20-30 мин (зависит от энергии первичной частицы).

Правильность работы отдельных блоков программы контролировалась с помощью тестовых расчётов, а работа программы в целом проверялась расчётом некоторых задач прохождения излучения через вещество, для которых известны экспериментальные или расчётные данные.

Информация о прохождении в воздушной среде нейтронного излучения от моноэнергетических точечных источников сверхбыстрых нейтронов в литературе отсутствует. Для проверки работы программы в этом диапазоне энергий был произведен расчёт радиальных распределений плотностей потоков нейтронов с энергией до и более 20 Мэв вдоль поверхности бетонного блока, на которую нормально падал пучок протонов с энергией 660 Мэв/23/. Такая геометрия аналогична входящему в круг рассматриваемых нами задач моноэнергетическому и мононаправленному источнику, испускающему сверхбыстрые нейтроны в воздух нормально к поверхности земли.

Сравнение экспериментальных и расчётных данных представлено на рис. 1. Точки, отмеченные треугольниками, соответствуют плотностям потоков нейтронов, измеренным детектором на основе реакции $^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$ (регистрируются нейтроны с энергией $> 2 \text{ Мэв}$), кружками - детектором на основе реакции $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}$ (нуклоны с энергией $E > 20 \text{ Мэв}$). Заштрихованные области соответствуют расчёту радиальных распределений плотнос-

тей потоков нейтронов с энергиями $E > 2$ Мэв (область 1) и $E > 20$ Мэв (область 2). Ширина заштрихованных участков определяет статистическую ошибку вычислений.

В качестве контрольных задач, проверяющих правильность выбранного алгоритма решения для быстрых нейтронов, были использованы расчётные и экспериментальные литературные данные о распространении в воздушной среде нейтронного излучения от точечного моноэнергетического изотропного источника с начальной энергией $E = 14$ Мэв^{/24-26/}.

На рис. 2 приведено сравнение расчётов пространственных распределений плотностей потоков и мощности дозы рассеянных нейтронов для такого источника, находящегося в воздухе на расстоянии 90 м от поверхности земли.

Сравнение спектральных распределений рассеянных нейтронов от точечного изотропного источника с энергией $E = 14$ Мэв, расположенного в бесконечной воздушной среде, с аналогичными расчётами, выполненными методом моментов (результаты приведены в^{/26/}), представлено на рис. 3.

Анализ данных, приведенных на рис. 1-3, показывает, что выбранная методика расчёта при использовании разработанного алгоритма решения и необходимых констант, дает правильное описание основных закономерностей прохождения быстрых и сверхбыстрых нейтронов через вещество (воздух, бетон, земля).

Результаты расчёта пространственно-спектральных распределений рассеянных нейтронов

Расчёт пространственных и спектральных распределений нейтронов был выполнен для точечного моноэнергетического и мононаправленного источника сверхбыстрых нейтронов, помещенного в начало координат (рис. 4). Направление вылета нейтронов из такого источника можно описать углами θ и ϕ в сферической системе координат.

Римскими цифрами на рис. 4 отмечена среда, в которой может происходить перенос излучения (*I* - воздух, *II* - земля). На этом же рисунке показан возможный переход нейтрона из одной среды в другую.

При вариантных расчётах изменяли только полярный угол ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) для источника, а азимутальный угол ($0 \leq \phi \leq 2\pi$) всегда полагали равным нулю, но при этом точки детектирования располагали под различными азимутальными углами относительно источника, что эквивалентно повороту источника относительно детектора.

Спектральные распределения нейтронов при фиксированном полярном угле источника рассчитывались сразу для всего набора детекторов. Такая геометрия позволяет при сравнительно небольшом увеличении времени счёта (из-за введения большого числа детекторов) рассчитывать сразу все варианты для набора азимутальных углов источника.

В частности, при конкретных вычислениях диапазон азимутального угла $0-180^\circ$ был разбит на 6 равных интервалов через 30° .

Для углов $180 < \phi < 360^\circ$ расчёт не производился, поскольку в принятой геометрии существует симметрия относительно плоскости YOZ (рис. 4), в которой расположен источник излучения.

Спектральные распределения рассеянных нейтронов рассчитывали для углов вылета первичных нейтронов $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ в интервале расстояний 25-1500 м и в диапазоне энергий 25-600 Мэв.

На рис. 5-9 в качестве примера приведены некоторые результаты вычислений.

Зависимость спектральных распределений нейтронов от расстояния при $\theta = 0^\circ$ и $E_0 = 150$ Мэв показана на рис. 5. Видно, что вид спектрального распределения практически не меняется с увеличением расстояния. Такая зависимость характерна и для других энергий источника, когда нейтроны вылетают под углом $\theta = 0^\circ$. Влияние угла вылета первичных нейтронов на энергетический спектр вторичных нейтронов отражено на рис. 6-7 для двух расстояний источник - детектор 25 м и 500 м, соответственно. Энергия первичных нейтронов равна 250 Мэв, азимутальный угол $\phi = 0^\circ$.

На рис. 8-9 даны спектральные распределения нейтронов в зависимости от азимутального угла ϕ для расстояний 25 м и 500 м, соответственно.

Первичные нейтроны с энергией $E_0 = 400$ Мэв вылетают под углом $\theta = 90^\circ$ на высоте 5 м от поверхности земли (сплошные гистограммы).

Здесь же нанесены расчётные данные при тех же условиях, но для бесконечной воздушной среды (пунктирные гистограммы).

Как видно из рис. 8-9, наличие земли сказывается существенно лишь на низкоэнергетической части спектра, т.е. для нейтронов с энергиями приблизительно до 10 Мэв.

На малых расстояниях от источника наличие земли увеличивает число рассеянных нейтронов по сравнению с бесконечной воздушной средой (земля является как бы отражателем нейтронов), а на больших расстояниях, наоборот, — уменьшает их (поглотителем нейтронов).

Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования полей рассеянных излучений от высокоэнергетических ускорителей.

Авторы признательны Л.Н. Зайцеву за большую помощь при выполнении настоящей работы.

Литература

1. J. Vaarli, A.N. Sullivan. Health Physics, 11, 353 (1965).
2. Л.С. Золин и др. Препринт ОИЯИ 2251, Дубна, 1965.
3. В.Н. Лебедев и др. Препринт ОИЯИ P-2177, Дубна, 1965.
4. J. Vaarli, A.N. Sullivan. Proceedings of the USAEC First Symposium on Accelerator Dosimetry and Experience, New York, November, 3-5, 1965, p. 103.
5. С.М. Wallace. RHEL/M R3, 1970.
6. W. Gilbert et al. UCRL-17941, 1968.
7. H.W. Patterson et al. UCRL-19389, 1969.
8. Л.Н. Зайцев и др. Сообщение ОИЯИ P16-6057, Дубна, 1971.
9. K. O'Brien et al. Nucl. Sci. and Eng., 27, 338 (1967).
10. K. O'Brien. HASL-240, 1971.
11. В.Г. Золотухин, С.М. Ермаков. В сб. "Вопросы физики защиты реакторов", Москва, 1963.
12. В.Г. Бобков и др. "Радиационная безопасность при космических полетах", Атомиздат, Москва, 1964.

13. R.G. Alsmiller. ORNL-TM-2277, 1968.
14. R.G. Alsmiller, ORNL-4046, 1967.
15. Hughes. BNL-325, 1958.
16. Peterson. Phys.Rev., 120, No.2 (1960), p.521.
17. Марчук. "Применение численных методов для расчёта нейтронных сечений", Атомиздат, 1970.
18. Биологическая защита ядерных реакторов. Атомиздат, 1965.
19. Принципы и методы регистрации элементарных частиц". ИЛ., Москва, 1963.
20. Дж. Хафнер. Ядерное излучение и защита в космосе. Атомиздат, 1971.
21. Абагян и др. Групповые константы для расчёта ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
22. Бергельсон. Многогрупповые методы расчёта защиты от нейтронов. Атомиздат, Москва, 1970.
23. Л.Р. Кимель и др. Препринт ОИЯИ P16-3514, Дубна, 1967.
24. М.В. Wells. Health Physics, 8, 543-9, 1962.
25. R.L. French and Mooney. Nucl.Sci. and Eng., 43, 273-280 (1971).
26. W.E. Kinney, ORNL-3287, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 февраля 1972 года.

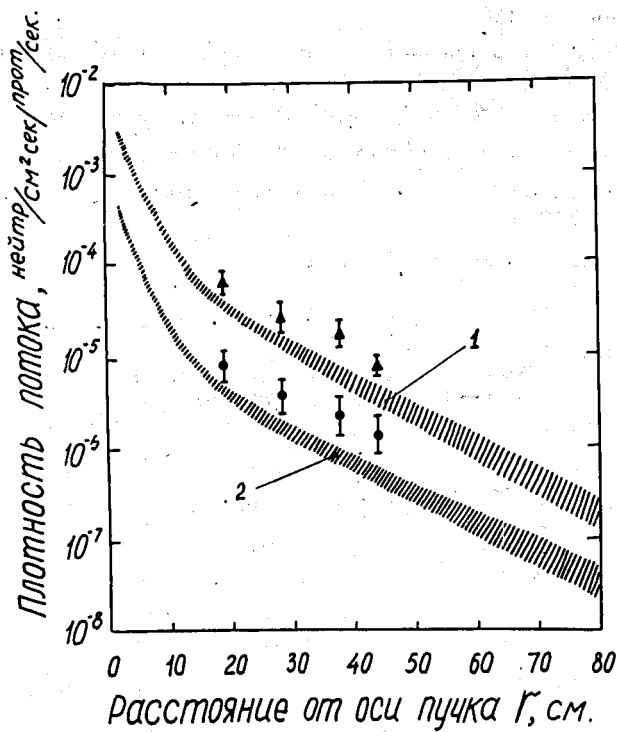


Рис. 1. Сравнение расчётного и экспериментального обратного выхода нейтронов из бетонной защиты под действием протонов с энергией 660 Мэв. (Обозначения см. в тексте).

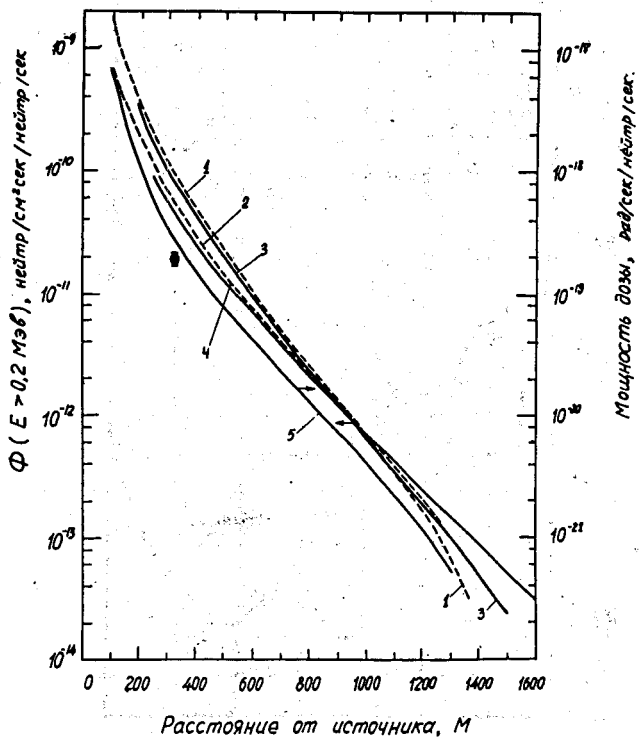


Рис. 2. Сравнение интегральных плотностей потоков нейтронов с энергией $E > 0,2$ МэВ от изотропного источника с энергией 14 МэВ. Источник расположен в воздухе на высоте 90 м от поверхности земли. 1,2,5 - результаты настоящей работы (1 - пространственное распределение плотностей потоков нейтронов с учётом земли; 2 - то же, для бесконечной воздушной среды; 5 - пространственное распределение мощности дозы нейтронов с учётом земли; 3,4 - пространственные распределения плотностей потоков нейтронов, полученные в работе 24/ (3 - с учётом и 4 - без учета земли). $\dot{\Phi}$ - мощность дозы ^{25/}.

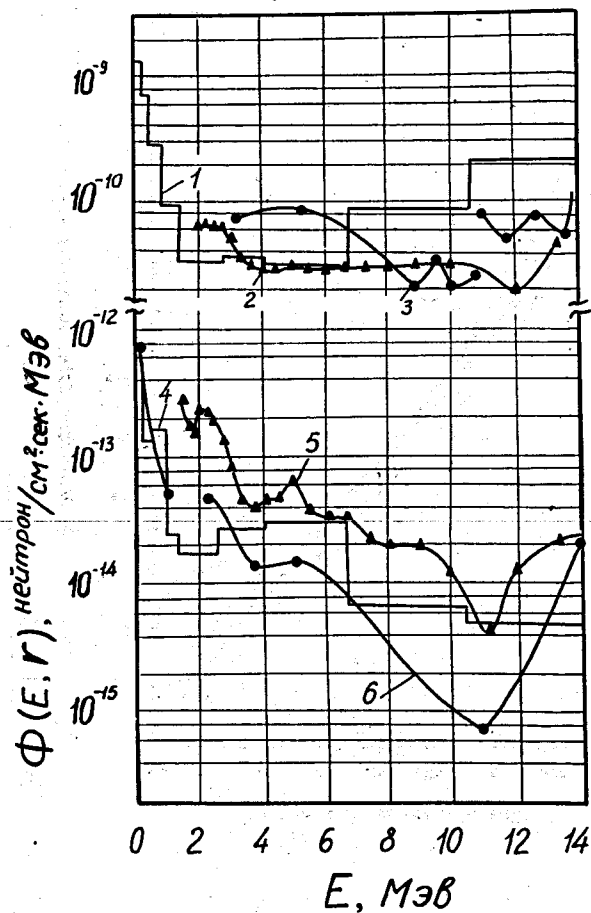


Рис. 3. Сравнение спектральных распределений рассеянных нейтронов от точечного изотропного источника с энергией 14 Мэв в бесконечной воздушной среде. 1,4 - спектральные распределения нейтронов на расстояниях $R = 56$ м и 1100 м от источника, соответственно - результаты настоящей работы, 2,5 - то же, полученное в работе ^{26/} методом моментов, Репирак . 3,6 - то же (метод моментов ^{26/}) Holland and Richards.

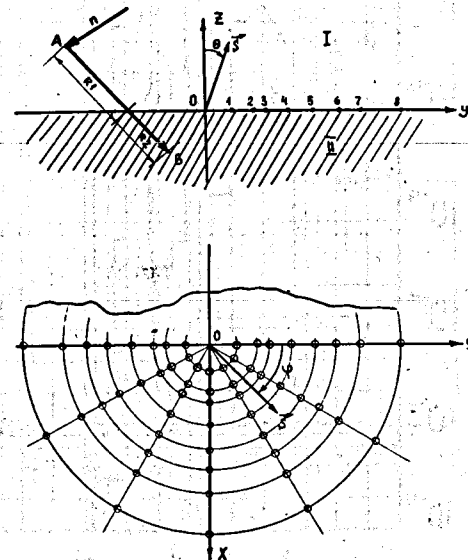


Рис. 4. Геометрия расчёта пространственно-спектральных распределений от точечных моноэнергетических и мононаправленных источников.

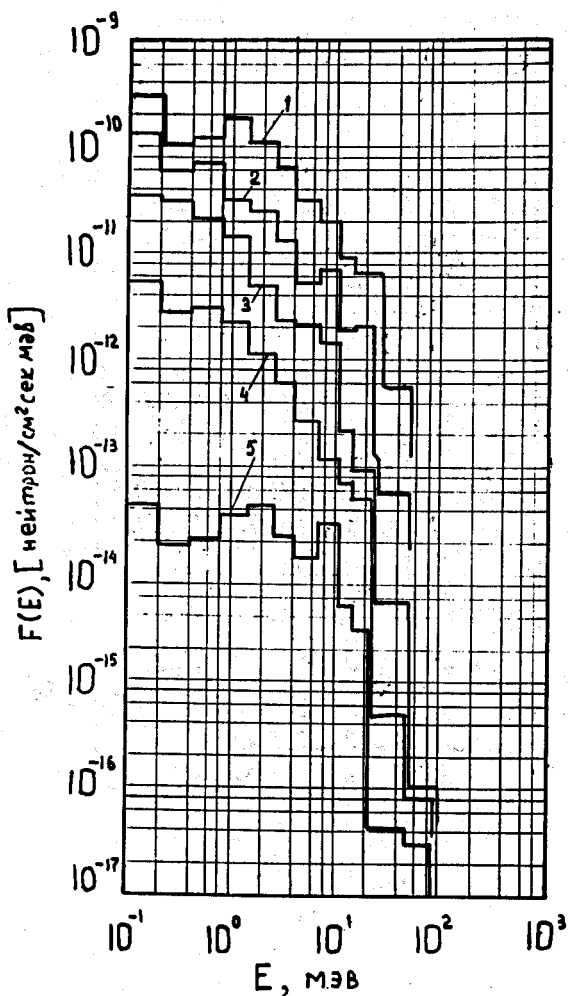


Рис. 5. Спектры рассеянных нейтронов в зависимости от расстояния источник-детектор. (Энергия источника 150 Мэв, угол вылета $\theta = 0^\circ$; 1-5 - обозначают расстояния от источника до детектора соответственно 25м; 100м; 250м; 500 и 1000м).

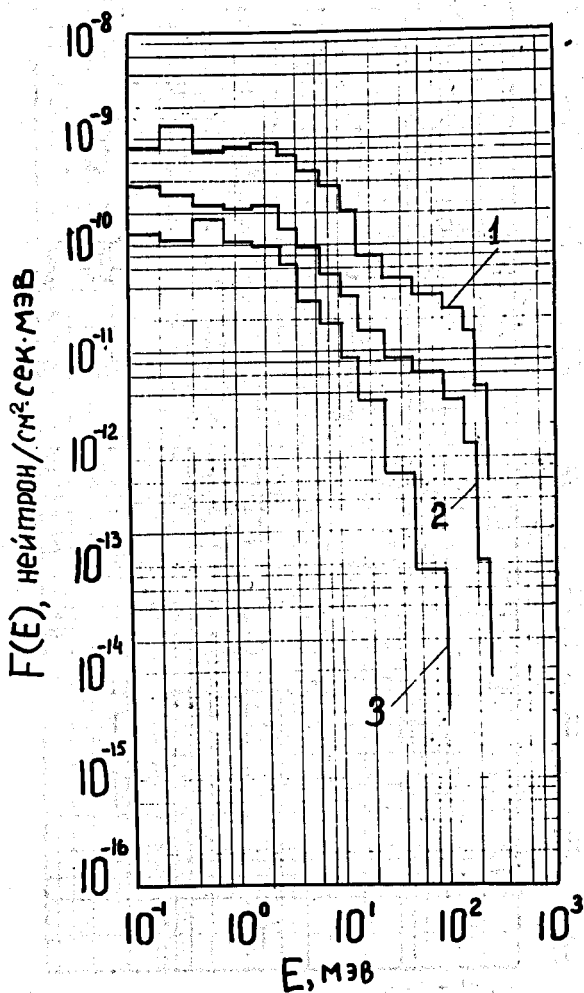


Рис. 6. Зависимость спектрального распределения рассеянных нейтронов от полярного угла вылета первичных нейтронов (энергия первичных нейтронов 250 Мэв, азимутальный угол $\phi = 0^\circ$, расстояние от источника $R = 25\text{м}$). 1,2,3 - спектральные распределения для углов $\theta = 90, 45$ и 0° , соответственно.

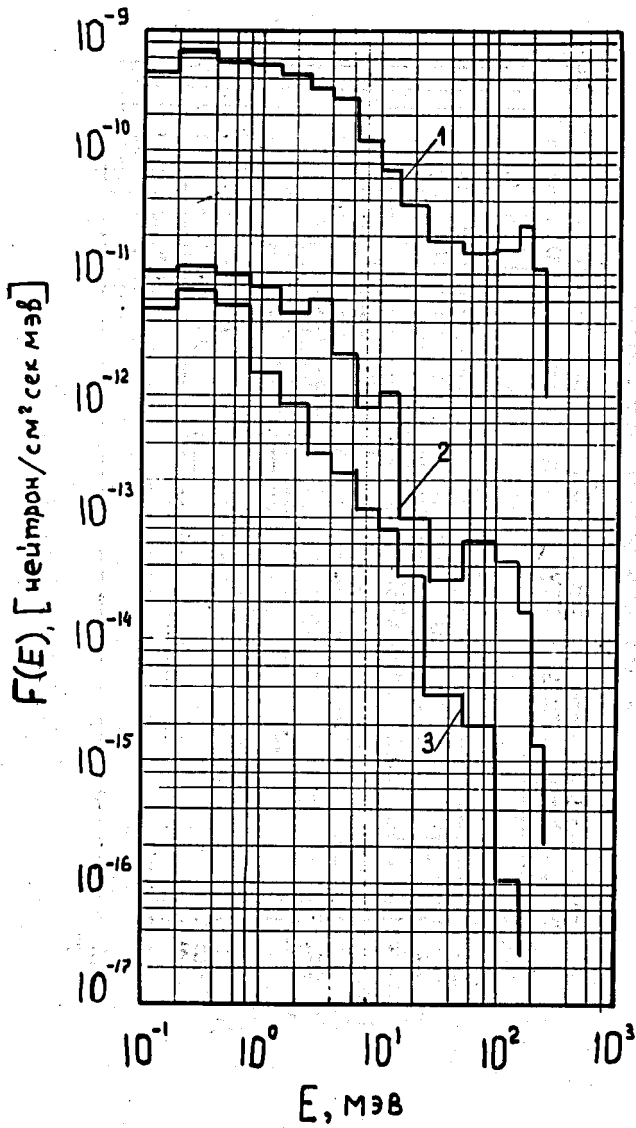


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, при $R=500$ м.

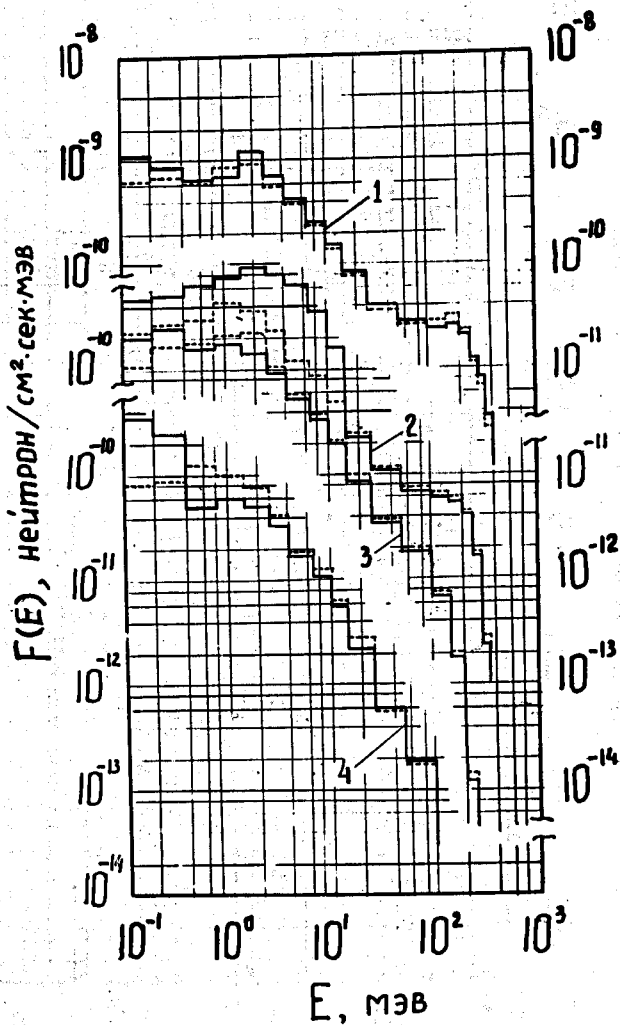


Рис. 8. Зависимость спектрального распределения рассеянных нейтронов от азимутального угла вылета первичных нейтронов (энергия источника $E_0=400$ Мэв, $\theta=90^\circ$, расстояние до источника $R=25$ м). Цифрами 1,2,3,4, у сплошных гистограмм обозначены спектральные распределения для углов $\phi=0, 30, 60$ и 180° , соответственно. Пунктиром нанесены те же результаты для бесконечной воздушной среды.

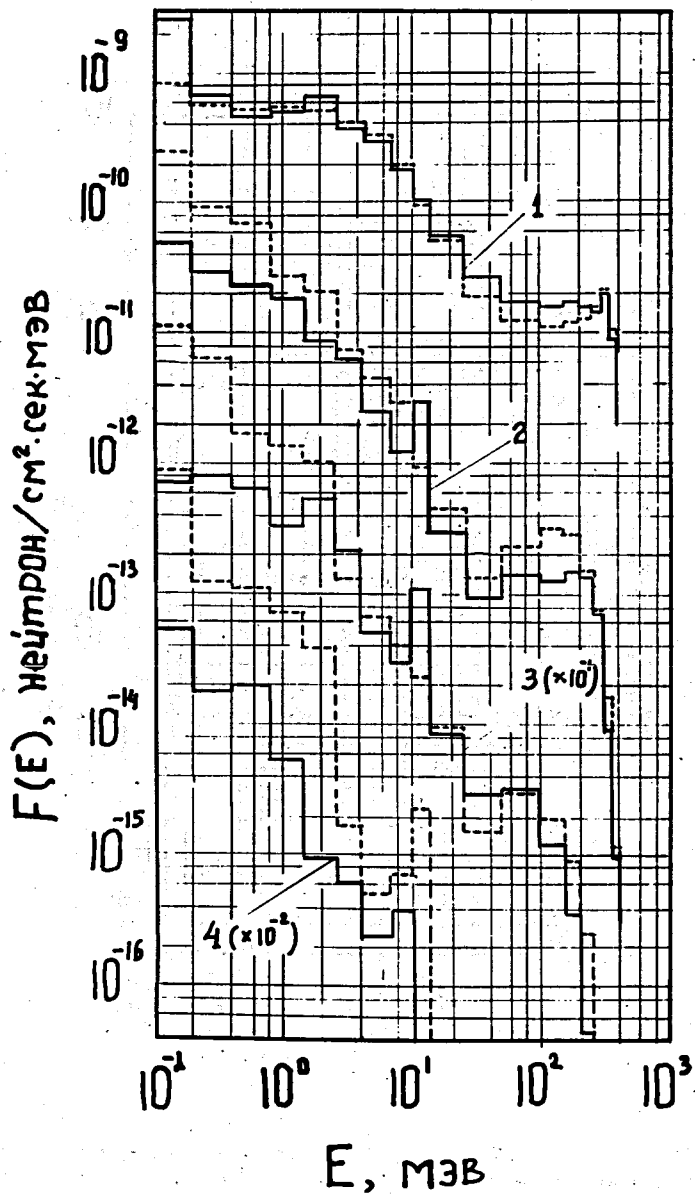


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, при $R = 500$ м.