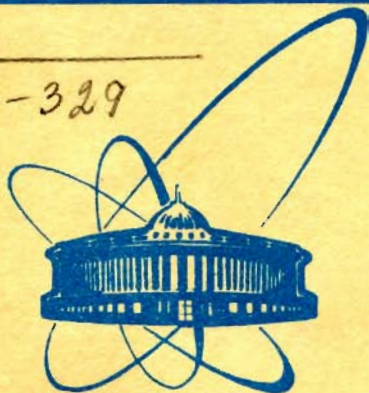


C-329



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

131/2-80

14/1-80

P16 - 12765

А.Я.Серов, Б.С.Сычев, С.И.Ушаков,
Е.П.Череватенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ВТОРИЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ
ЗА СВИНЦОВЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ
ПРИ ЕГО ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 640 МЭВ

1979

P16 - 12765

А.Я.Серов, Б.С.Сычев, С.И.Ушаков,
Е.П.Череватенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ВТОРИЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ
ЗА СВИНЦОВЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ
ПРИ ЕГО ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 640 МЭВ

Направлено в АЭ

Серов А.Я. и др.

P16 - 12765

Исследование поля вторичных излучений за свинцовым поглотителем при его облучении пучком протонов с энергией 640 МэВ

Определены пространственно-энергетические распределения вторичных протонов за свинцовым поглотителем толщиной 680 г/см^2 . Энергетические спектры протонов в интервале 60-400 МэВ измерены с помощью спектрометра по времени пролета. Радиальные распределения флюенса адронов с энергией выше 20 МэВ, флюенса протонов в интервале 0,5-150 МэВ и поглощенной дозы измерены с помощью углеродных детекторов, ядерных эмульсий типа "К" и рентгеновских пленок соответственно. Экспериментальные данные сравниваются с результатами выполненных расчетов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Serov A.Ya. et al.

P16 - 12765

Study of the Secondary Radiation Field Behind the Lead Absorber Exposed to the 640 MeV Proton Beam

The spatial-energy distribution of the secondary protons behind the lead absorber with thickness of 680 g/cm^2 has been determined. The energy spectra of protons in the interval of 60-400 MeV have been measured using the time-of-flight spectrometer. The measurements of the radial distributions of hadron fluence with energy above 20 MeV, proton fluence in the interval of 0.5-150 MeV and adsorbed dose have been carried out by means of carbon detectors, k-type nuclear emulsions and x-ray films, respectively. The experimental data are compared with the results of our calculation.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Экспериментальное и теоретическое исследование полей вторичных излучений, возникающих в результате развития межъядерного каскада в веществе поглотителей, является одной из важнейших задач радиационной физики. Данные такого рода исследований позволяют накапливать фактический материал, необходимый для решения ряда практических проблем, таких, как расчет защиты от излучений, прогнозирование радиационных нагрузок, интерпретация показаний дозиметров в смешанных полях излучений и др. Кроме того, экспериментальные данные по характеристикам полей вторичного излучения, в особенности по дифференциальным распределениям, необходимы для проверки и уточнения различных расчетных методов, применяемых в теории переноса излучений в веществе. В настоящее время совершенствование вычислительных алгоритмов особенно актуально, так как создание сильноточных ускорителей обуславливает возрастание требований к точности расчетной информации.

До недавнего времени практически отсутствовали экспериментальные данные по дифференциальным характеристикам полей излучений за поглотителями толщиной в несколько длин пробега нуклонов до неупругого взаимодействия, так как имеющиеся данные ^{/1,2/} в основном относились к измерениям за относительно тонкими поглотителями /порядка ионизационного пробега первичных протонов/. Несмотря на то, что в последнее время наметилась тенденция к расширению экспериментальных исследований в этом направлении ^{/3,4/}, набор данных по параметрам полей вторичных излучений все еще весьма ограничен.

В данной работе, которая является продолжением работы ^{/3/}, измерены пространственно-энергетические и радиальные распределения вторичных излучений, выходящих из свинцового поглотителя под действием пучка протонов с энергией 640 МэВ. Толщина поглотителя вдоль направления пучка $d = 60 \text{ см} / 680 \text{ г/см}^2 /$, поперечное сечение - $70 \times 40 \text{ см}^2$. Диаметр пучка протонов на переднем торце поглотителя /со стороны пучка/ - 2,5 см.

Мониторинг пучка проводился с помощью ионизационной камеры, прокалиброванной путем измерения абсолютного выхода продуктов реакций $^{27}\text{Al}(p,2p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(p,spall)^{18}\text{F}$ и $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$ в алюминиевых фольгах и графитовых пластинках соответственно. При обработке использовались данные по сечениям этих реакций из работы^{/5/}. Оцениваемая погрешность калибровки составляла ~10%.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ПРОТОНОВ

В настоящем эксперименте проведены измерения энергетических спектров протонов, испущенных с поверхности поглотителя под углом $\theta = 0^\circ$ относительно оси первичного пучка, при трех значениях радиуса: $r = 0; 15; 25$ см, где r есть расстояние от точки пересечения оси спектрометра до точки пересечения оси пучка с поверхностью поглотителя. Геометрия эксперимента показана на рис. 1.

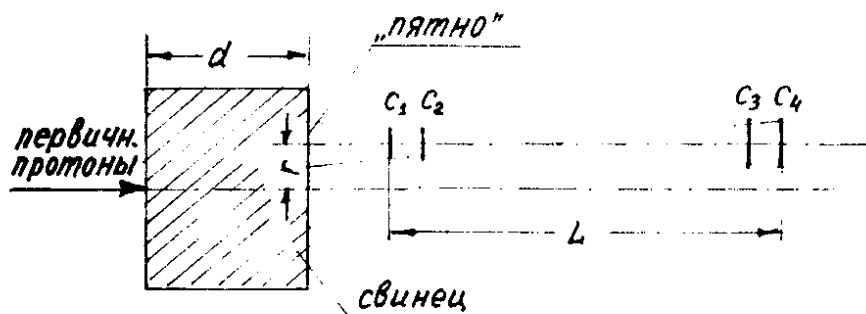


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

Для проведения измерений использовался спектрометр по времени пролета с временным разрешением $2\tau = 1$ нс и порогом регистрации протонов - 60 МэВ. Размеры пластических сцинтилляторов передних счетчиков / C_1 и C_2 / составляли $4,5 \times 4,5$ см², задних счетчиков / C_3 и C_4 / - 8×8 см² /см. рис. 1/. Более подробное описание спектрометра содержится в работе^{/6/}.

Спектры протонов были измерены при постоянных расстояниях от торца поглотителя до первого счетчика 1 м и между базовыми счетчиками (L) - 2,36 м /база спектрометра/. Угловое разре-

шение при этом составляло $5,7 \cdot 10^{-4}$ ср. Пятно на торце поглотителя, которое "видел" спектрометр, имело площадь $9,8 \times 9,8$ см².

Фоновые измерения проводились двумя способами. В первом случае пучок первичных протонов гасился в защите /4 м железа/, отделяющей зал ускорителя от экспериментального зала, и фон определялся случайными совпадениями, вызванными рассеянным излучением. Во втором случае пучок протонов гасился в сборке, а спектрометр был ориентирован таким образом, что его ось не проходила через поглотитель, но при этом все счетчики размещались в непосредственной близости от поглотителя. В этом случае источником фоновых загрузок являлись случайные совпадения, вызванные в основном частицами, входящими из поглотителя. Уровень фона в обоих случаях не превышал 1% от эффекта.

При обработке временных спектров для получения энергетических распределений учитывались ионизационные потери энергии протонами на пути от поглотителя до последнего счетчика спектрометра и соответствующие этим потерям энергии изменения времени пролета.

Систематическая ошибка /~12%/ измерения спектров протонов определяется погрешностью мониторингования /10%/, неточностью калировки спектрометра /6%/, а также вкладом в спектры протонов /возникающих при взаимодействии нейтронов с веществом сцинтиллятора первого счетчика/ и заряженных π^{\pm} -мезонов /~4%/.

На рис. 2 приведены измеренные распределения выхода вторичных протонов. Заштрихованная область неопределенности обусловлена статистической погрешностью, разрешением спектрометра по энергии, а в области энергий ниже 150 МэВ также неопределенностью поправок на многократное кулоновское рассеяние. Систематическая ошибка не учтена.

В данной работе также проведен расчет полей вторичных излучений, образующихся при развитии межъядерного каскада в данном свинцовом поглотителе, с помощью программы CASC-2^{/7/}. Эта программа реализует метод последовательных столкновений, примененный к расчету межъядерного каскада в аксиально-симметричной геометрии^{/8/}. В качестве исходной информации использовалась система констант D2N1^{/7,9/}.

Энергетические спектры вторичных протонов, рассчитанные применительно к условиям настоящего эксперимента, представлены на рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что наблюдается вполне удовлетворительное согласие как по абсолютным величинам, так и по форме спектров.

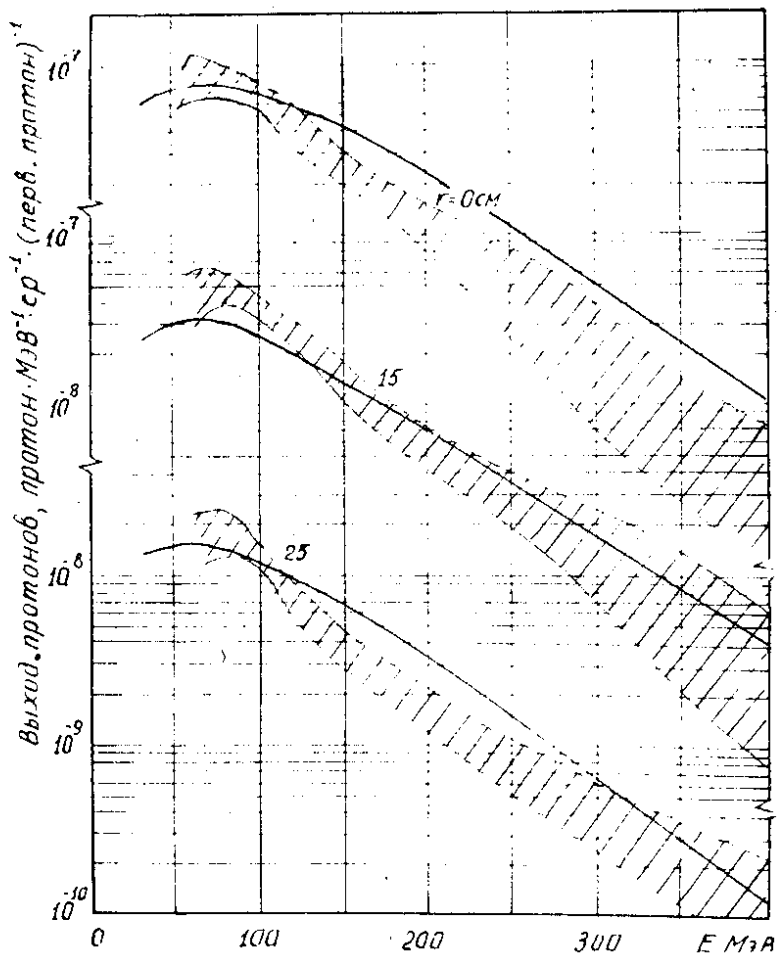


Рис. 2. Энергетические спектры протонов, испускаемых с поверхности свинцового поглотителя на различных расстояниях r от оси пучка под углом $\theta=0^\circ$. Эксперимент - ||||| ; расчет - сплошные линии.

РАДИАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

В данном эксперименте также измерены радиальные распределения флюенса вторичных частиц и поглощенной дозы. При этом использовались углеродные детекторы, ядерные эмульсии типа "К" и рентгеновские пленки.

Измерение абсолютного выхода реакции $^{12}\text{C}(x, xn)^{11}\text{C}$ в облученных углеродных детекторах проводилось при помощи сцинтилляционного γ -спектрометра. Сечение этой реакции для вторичных нуклонов с энергией $E > 20$ МэВ принималось равным 21 мбарн^{/5/}.

Из данных, представленных в работе^{/10/}, следует, что эффективная область регистрации протонов ядерной эмульсией ^{11}C соответствует интервалу их энергии $0,5 \div 150$ МэВ.

Рентгеновские пленки, которые предназначены для измерения экспозиционной дозы γ -излучения, в данной работе применялись для определения поглощенной дозы, обусловленной заряженными частицами /в основном протонами/. При интерпретации показаний использовались данные работы^{/11/}, где проведена калибровка рентгеновских пленок в пучке протонов.

Экспериментальные и расчетные данные по радиальным распределениям показаний детекторов приведены на рис. 3.

Погрешность экспериментальных данных, полученных при помощи углеродных детекторов, определяется точностью, с которой известно сечение реакции $^{12}\text{C}(x, xn)^{11}\text{C}$ /~10%/ , а также погрешностью калибровки γ -спектрометра /~9%/.

Вклад протонов и π^\pm -мезонов во флюенс адронов за свинцовым поглотителем такой толщины составляет 2-3%. На рис. 4 представлены проинтегрированные по углам энергетические спектры нейтронов и протонов для различных расстояний r . Данные этого рисунка /исходные для расчета флюенса адронов/ наглядно иллюстрируют малый вклад протонов в поле нуклонов.

Поскольку мы не могли достоверно определить эффективную верхнюю границу чувствительности эмульсии ^{11}C , экспериментально измеренное число треков сравнивается на рис. 3 с расчетными данными, соответствующими двум значениям границы - 50 и 150 МэВ.

Источниками погрешности экспериментальных данных по поглощенной дозе, определенной с помощью рентгеновских пленок, являются коэффициент перехода от плотности почернения к поглощенной дозе /~16%/ и неравномерность почернения /~5%/ . Почернение рентгеновских пленок в условиях эксперимента было вызвано не только протонами /представленные расчетные данные относятся к поглощенной дозе от протонов/, но и γ -излучением, выходящим с поверхности поглотителя. Используемая для расчетов программа CASC-2 не позволяет рассчитывать дозу γ -излучения, в основном обусловленного захватом замедляющихся и тепловых нейтронов. Более детальное сравнение можно провести только с учетом этих процессов взаимодействия излучения с веществом, например с использованием программы FASTER^{/12/}.

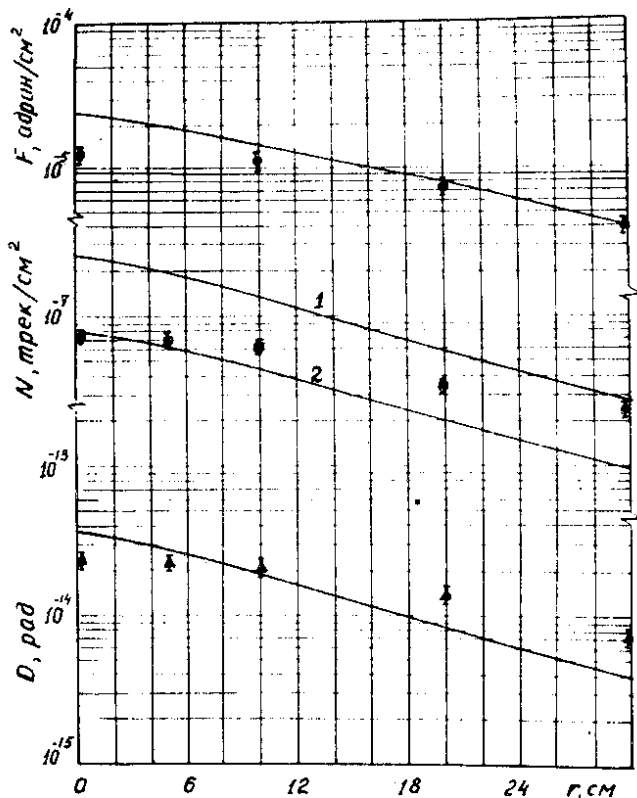


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные данные по радиальному распределению показаний различных детекторов за свинцовым поглотителем. Эксперимент: \bullet - F - флюенс адронов с энергией $E > 20$ МэВ; \blacksquare - N - плотность треков в ядерной эмульсии; \blacktriangle - D - поглощенная доза /измерено по почернению рентгеновских пленок/. Расчет: сплошные кривые /кривая 1 - для $E_{\text{пор}} = 150$ МэВ, кривая 2 - для $E_{\text{пор}} = 50$ МэВ/.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает вполне удовлетворительное их согласие, что позволяет сделать заключение о возможности применения программы CASC-2 для получения количественной информации о характеристиках полей вторичных излучений в рассматриваемой геометрии. Вместе с тем сравнение даже по дифференциальным характеристикам не позволяет однозначно определить причины расхождений, к которым в первую очередь можно отнести недостатки алго-

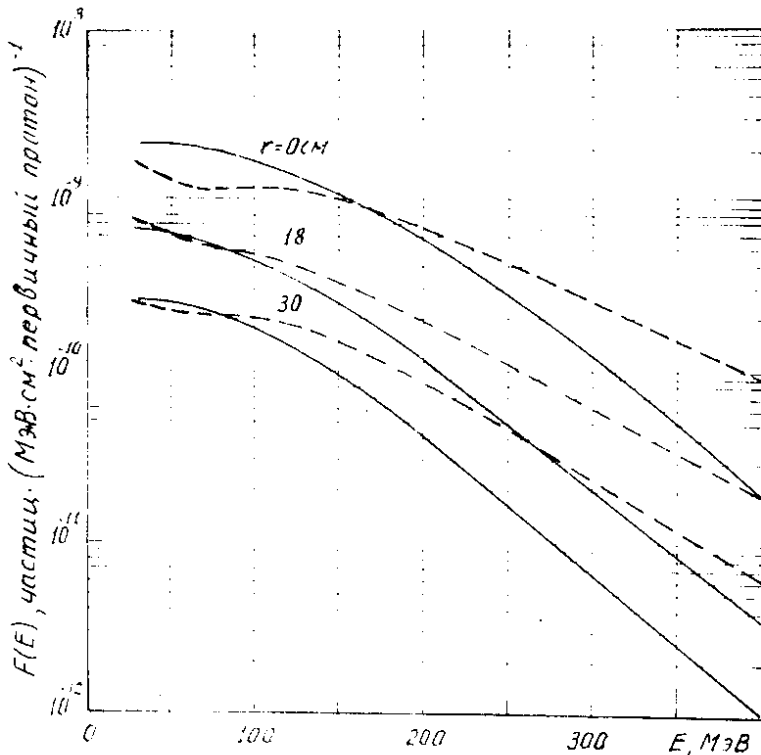


Рис. 4. Расчетные энергетические спектры протонов и нейтронов на поверхности свинцовой сборки на различных расстояниях r от оси пучка. Сплошные линии - протоны; пунктир - нейтроны /результат умножения расчетных данных на 0,01/.

ритма расчета, а также несовершенство исходной информации по дифференциальным сечениям. В связи с этим представляется целесообразным использование системы констант D_2N_2 [7] в программе CASCO-2, что делает эту программу более универсальной.

В заключение авторы выражают благодарность чл.-корр. АН СССР В.П.Джелепову за поддержку работы, Ю.М.Казаринову и В.С.Киселеву за содействие ее проведению. Мы признательны М.М.Комочкову, М.И.Салацкой и Г.Н.Тимошенко за оказанную методическую помощь. На протяжении всей работы нам постоянно помогали наши коллеги Е.К.Гельфанд, А.А.Демьянов и Ю.А.Разумов, которым мы глубоко благодарны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брилли О.Д. и др. Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей. Атомиздат, М., 1968.
2. Wachter J.W., Gibson W.A., Burrus W.R. Phys.Rev., 1972, C6, p.1496.
3. Серов А.Я., Сычев Б.С. АЭ, 1978, 45, с.235.
4. Алейников В.Е., Гердт В.П., Тимошенко Г.Н. ОИЯИ, Р16-9400, Дубна, 1975.
5. Bruninx E. CERN-61-1, Geneva, 1961.
6. Серов А.Я., Сычев Б.С. В кн.: Труды Радиотехнического института АН СССР, 1976, №25, с.176.
7. Гельфанд Е.К. и др. В кн.: Труды II Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок /Тезисы докладов/. Изд. МИФИ, М., 1978, с.10.
8. Серов А.Я., Гельфанд Е.К., Сычев Б.С. В кн.: Труды II Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. /Тезисы докладов/. Изд. МИФИ, 1978, с.28.
9. Серов А.Я., Сычев Б.С. В кн.: Труды Радиотехнического института АН СССР, М., 1976, №14.
10. Комочков М.М. и др. ОИЯИ, 13-10188, Дубна, 1976.
11. Серов А.Я., Сычев Б.С. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1977.
12. Jordan T.M. Nucl.Eng.and Des., 1970, 13, p.415.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 сентября 1979 года.