

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

920/2-81

23/11-81

18-80-540

А.Я.Серов, Б.С.Сычев, Е.П.Череватенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ
ИЗ ТОЛСТЫХ МИШЕНЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 645 МэВ

Направлено в АЭ

1980

Создание терапевтического комплекса Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, где наряду с другими видами излучений ^{1/1} будет использоваться пучок нейтронов высокой энергии ^{1/2}, предопределило необходимость проведения работы по выяснению оптимальных условий формирования такого пучка. Под оптимальными мы понимаем условия, соответствующие достижению максимального значения дозы в тканезквивалентном поглотителе, облучаемом рассматриваемым пучком нейтронов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема получения нейтронного пучка на внешней мишени ускорителя, моделирующая условия получения на установке "Ф" терапевтического нейтронного пучка, показана на рис.1. Выведенный из

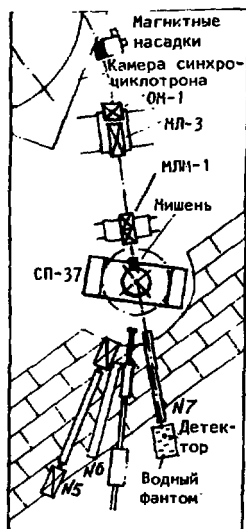


Рис.1. Схема получения нейтронного пучка с энергией в несколько сот мегаэлектронвольт на внешней мишени синхротрона.

синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ пучок протонов с энергией 645 МэВ транспортировался до мишени, установленной перед поворотным магнитом СП-37. Под действием первичных протонов в мишени генерировались нейтроны в широком энергетическом и угловом диапазоне. Пучок нейтронов "очищался" от примесей заряженных частиц в поле магнита СП-37, формировался и направлялся через коллиматор в защитной стене /длиной 3,6 м и диаметром 10 см/ на водный поглотитель сечением 50×50 см² и длиной 70 см по пучку, расположенный на расстоянии 6,7 м от переднего края мишени. При этом ось коллиматора совпала с направлением движения пучка протонов. Формируемый таким образом пучок нейтронов имел на выходе из коллиматора угловую расходимость $\Delta\omega = 2 \cdot 10^{-4}$ ср. Интенсивность первичного протонного пучка определялась с помощью калориметрического метода с погрешностью 10%. Все результаты измерений и расчетов нормировались на интенсивность $9,5 \cdot 10^{11}$ протон/с. Фон рассеянного излучения в месте расположения водного поглотителя во всех экспериментах составлял 0,02 рад/мин. В качестве материала мишени использовались бериллий, углерод, алюминий, железо, медь и свинец. Толщина мишени изменялась от 5 до 200 г/см². Поперечные размеры мишени обеспечивали полное перекрытие апертуры коллиматора.

Регистрация нейтронов осуществлялась по значению мощности дозы, измеряемой с помощью калиброванного дозиметра типа VA-J-18 /производство ГДР/, имеющего в качестве датчика ионизационную камеру сферической формы диаметром 16 мм /объем 1,5 см³/ типа VA-K-253, наполненную воздухом и имеющую воздухоэквивалентные стенки толщиной 1 мм. Калибровка дозиметра проводилась в поле гамма-излучения образцового источника Co-60, активность которого была известна с погрешностью 6%. Учитывая соотношение тормозных способностей и энергии ионообразования заряженных частиц для воздуха и воды, которое слабо меняется в широком диапазоне энергий и довольно близко к соотношению между рентгеном в воздухе и радом в ткани, считалось, что с точностью 10% показания данного дозиметра, отградуированного в рентгенах в воздухе, соответствуют показаниям в единицах рад в воде для данного нейтронного пучка. Система механического сканирования позволяла производить трехкоординатные перемещения ионизационной камеры по объему водного фантома.

На рис. 2 приведены результаты измерений глубинного /вдоль оси пучка/ и радиальных /в направлении, перпендикулярном оси пучка/ распределений мощности поглощенной дозы в водном фантоме для мишени из бериллия. Аналогичные измерения были выполнены и для других материалов при различных толщинах мишеней. Для каждой толщины максимальное значение мощности дозы $P_{\text{макс}}$ соответствовало некоторой глубине в фантоме $Z_{\text{макс}}$. На рис. 3

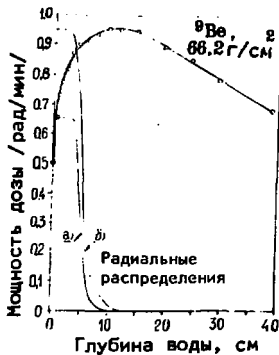


Рис. 2. Глубинное и радиальные распределения мощности поглощенной дозы в воде для нейтронного пучка, получаемого на бериллиевой мишени; а/ радиальное распределение в воде на глубине 0,4 см; б/ на глубине 12 см.

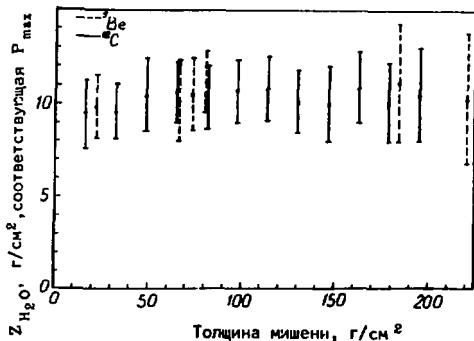


Рис. 3. Зависимость величины Z_{\max} от толщины мишени.

представлены зависимости Z_{\max} от толщины мишени для некоторых материалов.

РАСЧЕТ

Численное моделирование образования нейтронов в мишени осуществлялось следующим образом. Предполагалось, что пучок протонов падает перпендикулярно в центр торца цилиндрической мишени. Определялась спектральная плотность потока нейтронов $F(E, \theta)$, нейтрон/МэВ·см²с, за мишенью в месте расположения фантома. Моделирование межъядерного каскада в мишени осуществлялось с помощью программы CASC-2^{3,4}, реализующей метод последовательных столкновений в цилиндрической геометрии.

Величины сечений неупругого взаимодействия нуклонов с ядрами взяты из работы ^{5/} с учетом новейших экспериментальных данных ^{6,7/}. Дифференциальные сечения образования вторичных нуклонов определялись с помощью программы D2N2 ^{8/}. Степень воспроизведения используемой системой констант, имеющихся в исследуемом диапазоне энергий экспериментальных данных ^{9,10/}, иллюстрируется на рис. 4.

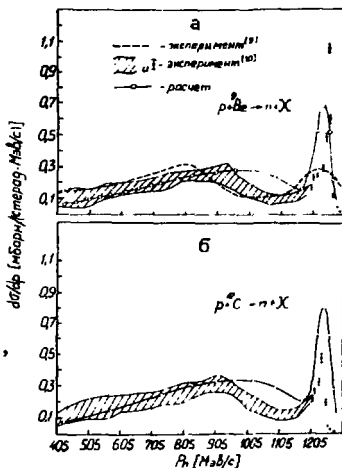


Рис. 4. Дифференциальные сечения образования вторичных нейтронов, испускаемых под углом 0° в протон-ядерных взаимодействиях. Расчет выполнен с помощью программы D2N2.

Проверка работоспособности программы по моделированию межъядерного каскада осуществлялась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными по спектральному выходу нейтронов из относительно толстых мишеней. На рис. 5 приведены экспериментальные данные по спектрам нейтронов, испускаемых под углом $\theta=0^\circ$ из кобальтовых мишеней под действием узкого пучка протонов с энергией 160 МэВ ^{11/} и 450 МэВ ^{12/}, и соответствующие им результаты расчета. Путем прямых расчетов было установлено, что в данной задаче достаточно учитывать первое и второе столкновения. Вклад третьего столкновения составляет 10% в спектр нейтронов с энергией 150 МэВ при толщине мишени более 150 г/см². Иллюстрацией служат данные, приведенные на рис. 6. Рассчитанные энергетические спектры плотности потока нейтронов, испускаемых из бериллиевой мишени различной толщины под углом $\theta=0^\circ$, показаны на рис. 7. Угловая зависимость спектров нейтронов, испускаемых из бериллиевой мишени толщиной 64 г/см², приведены на рис. 8.

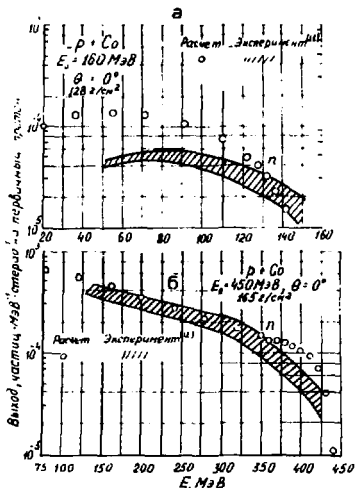


Рис. 5. Выход нейтронов из толстых кобальтовых мишеней. Расчет выполнен с помощью программы CASC-2.

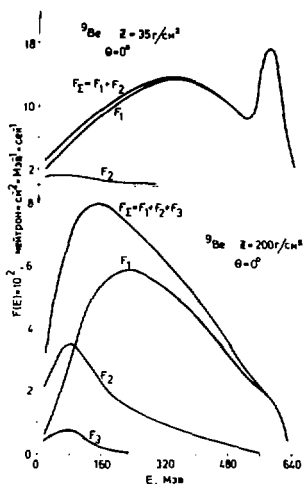


Рис. 6. Вклад первого (F_1), второго (F_2) и третьего (F_3) столкновений в суммарный спектр.

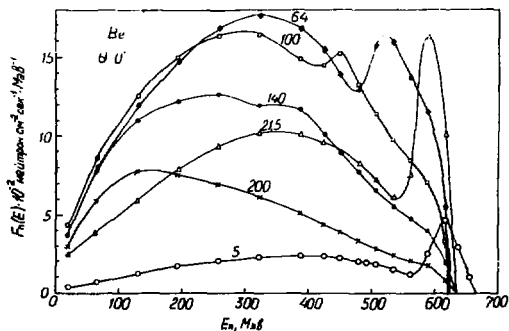


Рис. 7. Энергетические спектры плотности потока нейтронов, испускаемых из бериллиевой мишени различной толщины под углом 0° . Цифры над каждой кривой обозначают толщину мишени в $\text{г}/\text{см}^2$.

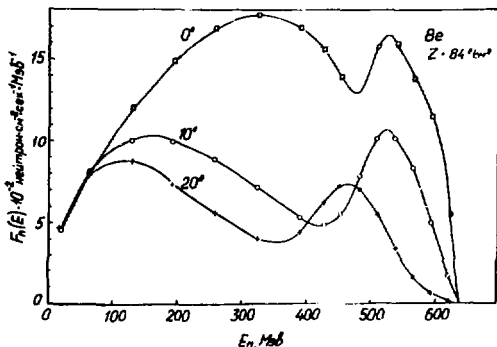


Рис.8. Спектры нейтронов, испускаемых под углами 0° , 10° и 20° из бериллиевой мишени.

На рис.9 представлены результаты расчета энергетических спектров плотности потока нейтронов, выходящих из различных мишеней оптимальной толщины под углом $\theta=0^\circ$. Величины оптимальных толщин приведены в нижеследующей таблице:

Материал мишени	^9Be	^{12}C	^{27}Al	^{50}Fe	^{64}Cu	^{207}Pb
Оптимальная толщина, г/см ² :						
расчет	64	62	75	92	98	113
эксперимент	64 ± 11	61 ± 11	80 ± 14	88 ± 23	98 ± 19	109 ± 37

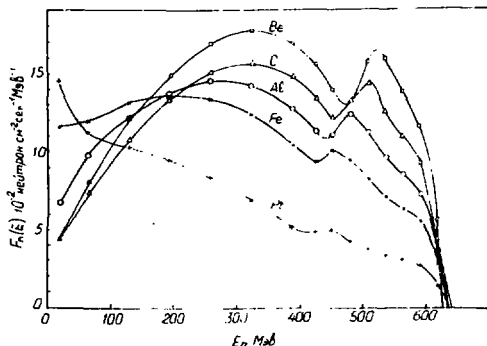


Рис.9. Энергетические спектры плотности потока нейтронов, выходящих под углом 0° из различных мишеней оптимальной толщины.

Экспериментальные данные, приведенные в последней строке таблицы, взяты из рис.10, на котором представлены результаты измерений и расчетов величины $R_{\text{макс}}$ как функции толщины мишени. Экспериментальные точки, представленные на этом рисунке,

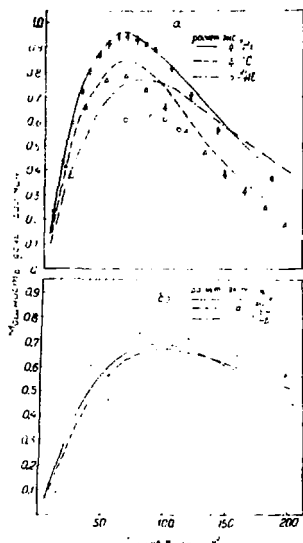


Рис.10. Зависимость величины максимальной поглощенной дозы в воде от толщины мишеней из различных материалов.

получены из глубинно-дозовых распределений в воде, измеренных для различных толщин исследуемых мишеней /одно из таких распределений показано на рис.2/.

При расчете поглощенной дозы в фантоме принималось во внимание, что получаемый нейтронный пучок содержит примеси гамма-квантов, испускаемых из мишени при распаде образовавшихся в ней π^0 -мезонов, а также примеси заряженных частиц /протонов, π -мезонов, электронов и позитронов/, образующихся при взаимодействии нейтронов и гамма-квантов высоких энергий со стенками коллиматора. Однако, как следует из работы /13/, доля флюенса всех примесей на выходе из коллиматора составляет около 1% от флюенса проходящего через него пучка нейтронов высоких энергий. Поэтому, пренебрегая вкладом в поглощенную дозу от примесей, в расчете рассматривались только нейтроны, испускаемые из мишени под углом $\Theta=0^\circ$.

Расчет максимального значения мощности дозы $R_{\text{макс}}$ производился согласно следующему соотношению:

$$P_{\text{макс}} = \int_{(E)} F_z(E, \theta) \Big|_{\theta=0^\circ} \cdot K(E) dE, \quad //1/$$

где $F_z(E, \theta) \Big|_{\theta=0^\circ}$ - энергетический спектр плотности потока нейтронов, испускаемых из мишени толщиной Z под углом $\theta=0^\circ$; $K(E)$ - коэффициент перехода от флюенса моноэнергетических нейтронов к поглощенной дозе.

В качестве функции $K(E)$ использовались энергетические зависимости максимальной поглощенной дозы в тканезквивалентной пластине толщиной 30 см, облучаемой широким пучком моноэнергетических нейтронов^{/14/}. Поскольку максимальное значение поглощенной дозы для нейтронов разной энергии достигается на разных толщинах тканезквивалентного вещества, отличающихся от глубины расположения результирующего $P_{\text{макс}}$, которая, как показывает рис. 3, примерно одна и та же для рассматриваемых толщин мишеней, выражение //1/ можно рассматривать как верхнюю расчетную оценку величины $P_{\text{макс}}$. Нижняя оценка величины $P_{\text{макс}}$ получится, если в качестве $K(E)$ использовать среднетканевую дозу. Однако согласно^{/14/} максимальная доза превышает среднетканевую всего на 15%, что делает вполне допустимым расчет дозовых характеристик рассматриваемого пучка нейтронов с помощью приведенного выше соотношения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку целью настоящей работы являлось выяснение оптимальных условий для создания высокоинтенсивного пучка нейтронов, основными результатами могут служить данные, представленные на рис. 10, показывающие зависимость $P_{\text{макс}}$ от толщины мишени для различных материалов. Из рисунка видно, что из всех рассмотренных вариантов мишеней наибольшее значение $P_{\text{макс}}$ обеспечивает бериллиевая мишень толщиной 60 ± 70 г/см². Видно также, что расчет воспроизводит все основные закономерности экспериментальных данных. Различие между сравниваемыми данными не превышает 20%. Если учесть, что в настоящее время вряд ли представляется возможным воспроизведение расчетным путем дифференциальных сечений образования нейтронов в протон-ядерных соударениях с погрешностью менее 20%, то согласие между результатами расчета и эксперимента можно считать вполне удовлетворительным.

Результаты расчета энергетических спектров плотности потока нейтронов, выходящих под разными углами из различных мишеней различной толщины, могут быть использованы в качестве исходной информации для изучения распределений ЛПЗ и дозного поля в фантоме при моделировании различных условий радиобиологических экспериментов, а также при интерпретации их результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джелепов В.П. и др. ОИЯИ, Р16-11183, Дубна, 1978.
2. Джелепов В.П. и др. Мед.радиология, 1980, XXV, №3, с.56.
3. Гельфанд Е.К. и др. В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Атомиздат, М., 1979, вып.18, с.160.
4. Серов А.Я. и др. В кн.: Труды II Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок /тезисы докладов/. Изд. МИФИ, М., 1978, с.28.
5. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
6. Schimmerling W. et al. Phys.Rev., 1973, C7, No.1, p.248.
7. Renberg P.V. et al. Nucl.Phys., 1972, A183, p.81.
8. Сычев Б.С., Серов А.Я., Манько Б.В. Препринт ИАН СССР №799, М., 1979.
9. Киселев В.С., Флягин В.Б. ЖЭТФ, 1957, 32, вып.5, с.962.
10. Cassapakis C.G. et al. Phys.Lett., 1976, 63B, No.1, p.35.
11. Wachter J.W., Burrus W.R., Gibson W.A. Phys.Rev., 1967, 164, p.971.
12. Wachter J.W., Gibson W.A., Burrus W.R. Phys.Rev., 1972, C6, p.1496.
13. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Б1-16-80-157, Дубна, 1980.
14. Alsmiller R.G., Armstrong T.W., Coleman W.A. ORNL-TM-2924, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 декабря 1980 года.