

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

A 131

9-87-280

**В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов,
И.В.Мирохин, Г.В.Мицын, А.Г.Молоканов,
О.В.Савченко**

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ФИЗИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕДИЦИНСКОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА
СО СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИЕЙ 130 МэВ**

1987

В процедурном помещении № 2 клинко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ размещено оборудование для однополюсного облучения мишеней, расположенных вблизи жизненно важных центров. Для облучения таких мишеней требуется сформировать однородное поле облучения диаметром до 5 см протяженностью дозного максимума до 8 г/см^2 мягкой ткани и резким спадом дозы на его границах.

Метод модификации пика Брэгга замедленного протонного пучка с использованием магнитного анализа и коллиматорной системы, преобразующей форму широкого энергетического распределения замедленных протонов, позволяет получить плоскую вершину размером не более $1,7 \text{ г/см}^2$ для протонов со средней энергией $130 \text{ МэВ}^{1,2/}$. Поэтому для получения более протяженного дозного максимума был дополнительно применен метод преобразования глубинного дозного распределения с использованием гребенчатого фильтра для немонахроматического пучка протонов.

Гребенчатый фильтр применяется в лучевой терапии для преобразования глубинного дозного распределения пучков тяжелых заряженных частиц. При этом узкий пик Брэгга от монохроматического пучка преобразуется в однородное дозное распределение, размеры которого соответствуют размерам облучаемой мишени^{3,4,5/}.

Гребенчатый фильтр представляет собой профилированную пластину-замедлитель, толщина которой изменяется определенным образом в различных частях поперечного сечения пучка. Протоны, проходящие через различные участки гребенчатого фильтра, теряют различную величину энергии. Форма гребенчатого фильтра должна быть выбрана из условия, чтобы прошедшие через него протоны при смешивании образовывали заданное глубинное дозное распределение.

Транспортировка пучка в процедурное помещение осуществляется с помощью ионно-оптического тракта, подробно описанного в работе^{6/}. Поперечные размеры пучка в процедурном помещении формируются двумя коллиматорами - основным длиной 60 см и чистовым, расположенным непосредственно перед облучаемым объектом. Гребенчатый фильтр располагается на выходе пучка из основного коллиматора.

Интенсивность пучка измерялась двумя плоскопараллельными воздушными ионизационными камерами. Для измерения пространственных дозных распределений использовался изодозограф с миниатюрным полупроводниковым кремниевым детектором, работающим

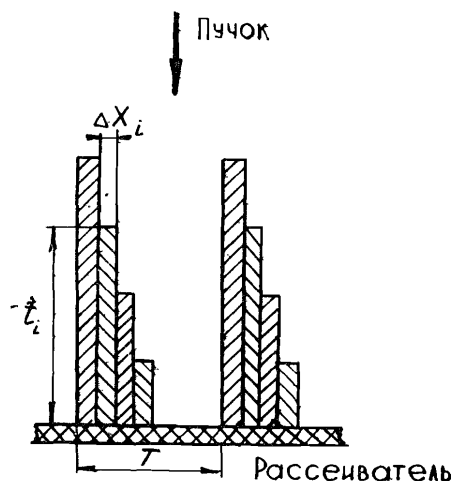


Рис.1. Сечение гребенчатого фильтра.

на связи с ЭВМ. Абсолютные измерения дозы проводились дозиметром VA-J-18.

Была выбрана ступенчатая конструкция гребенчатого фильтра /рис.1/. Фильтр набирается из латунных пластин, и его конфигурация зависит от параметров исходного пучка и требуемой протяженности плоского максимума глубинного дозного распределения. В таком гребенчатом фильтре преобразование глубинного дозного распределения происходит

в результате сложения имеющейся кривой Брэгга с рядом таких же кривых Брэгга, смещенных относительно исходной на толщину t_i и с относительными интенсивностями $\rho_i = \Delta x_i / T$, где Δx_i - толщина i -й латунной пластины, а T - шаг гребенчатого фильтра. Величины t_i и ρ_i для такой конструкции могут быть получены в результате численных расчетов на ЭВМ. Количество используемых пластин i определяется требованиями к протяженности однородного дозного распределения и его однородности.

Шаг гребенчатого фильтра T и толщина свинцового рассеивателя выбираются из условия, чтобы обеспечить равномерное смешивание в поперечном сечении дозного поля протонов, прошедших различные толщины вещества в гребенчатом фильтре.

На рис.2 приведены изодозные распределения пучка протонов, измеренные без гребенчатого фильтра в центре неподвижного стенда без чистового коллиматора /а/ и с чистовым коллиматором /б/. Мощность дозы в таком пучке составляет около 100 рад/мин в пике Брэгга при токе выведенного пучка 1 мка /6,3·10¹² прот./с/, спад дозы от 90 до 10% от максимального значения происходит на толщине 1,3 г/см² за пиком Брэгга и на 1,6 см в поперечном направлении.

Это дозное распределение сформировано из немонахроматического пучка, широкое энергетическое распределение которого обрезано в высокоэнергетической части спектра пластинами коллиматора, расположенного в области максимальной линейной дисперсии протонного пучка с целью получения крутого спада дозы за пиком Брэгга/6/.

Для определения формы гребенчатого фильтра проводились численные расчеты на ЭВМ, в результате которых были определе-

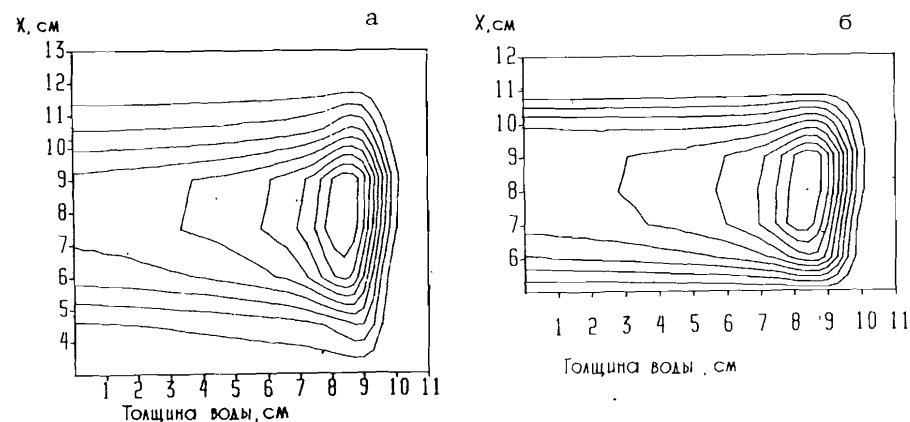


Рис.2. Изодозные распределения протонного пучка без гребенчатого фильтра: а/ без чистового коллиматора, б/ с чистовым коллиматором.

ны необходимое количество пластин гребенчатого фильтра i и его конфигурация.

В качестве исходного глубинного дозного распределения использовалась кривая Брэгга, измеренная на этом пучке. Достаточно однородное распределение оказалось возможным получить при использовании всего четырех значений толщин пластин гребенчатого фильтра t_i .

На рис.3 изображены исходная кривая Брэгга и четыре таких же кривых Брэгга, смещенных на толщину t_i относительно первой и умноженные на коэффициенты ρ_i . При суммировании получается почти однородное по глубине дозное распределение.

При прохождении через гребенчатый фильтр пучок испытывает сильное многократное кулоновское рассеяние. При этом

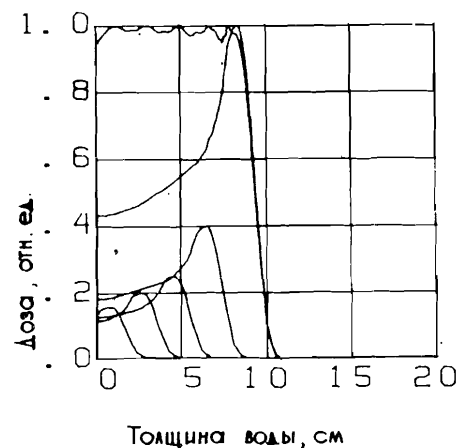


Рис.3. Набор кривых Брэгга, смещенных по толщине гребенчатым фильтром, и их сумма - почти однородное дозное распределение по глубине.

происходит заметное уширение пучка, а также изменение относительного вклада частей пучка, прошедших различную толщину гребенчатого фильтра, в результате чего искажается глубинное дозное распределение. Поэтому конфигурация гребенчатого фильтра определялась с учетом многократного кулоновского рассеяния.

Оценка многократного рассеяния проводилась в предположении, что на гребенчатый фильтр падает параллельный пучок протонов, однородный внутри поперечного сечения, ограниченного коллиматором радиусом R .

На большом расстоянии от гребенчатого фильтра угловое распределение протонов, прошедших i -ю пластину гребенчатого фильтра толщиной t_i , может быть описано соотношением

$$P(\theta) d\theta = \frac{2}{\theta_i^2} e^{-\frac{\theta^2}{\theta_i^2}} \theta d\theta,$$

где θ_i^2 - средний квадрат угла многократного кулоновского рассеяния пучка протонов, прошедшего свинцовый рассеиватель и i -ю пластину гребенчатого фильтра [7].

Проинтегрировав это выражение по площади круга радиусом R , можно получить величину ослабления пучка вдоль оси на расстоянии L от гребенчатого фильтра:

$$\int_0^{\theta_{\max}} P(\theta) d\theta = 1 - e^{-\frac{R^2}{L^2 \theta_i^2}}$$

Как показали измерения, даже такая грубая оценка многократного кулоновского рассеяния обеспечивает достаточно хорошую точность при расчете конфигурации гребенчатого фильтра.

Дозное распределение пучка, прошедшего через гребенчатый фильтр, приводится на рис. 4. Протяженность плоской вершины по глубине составляет 8 г/см^2 , спад дозы за вершиной от 90 до 10% - $1,5 \text{ г/см}^2$. Мощность дозы на плоской части такого распределения равна 25 рад/мин при токе выведенного пучка 1 мка .

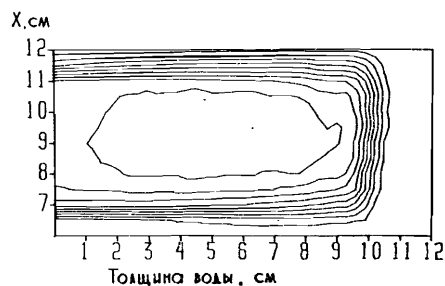


Рис. 4. Изодозное распределение протонного пучка с гребенчатым фильтром.

Таким образом, в процедурное помещение № 2 клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ выведен протонный пучок с энергией 130 МэВ и сформировано дозное распределение с плоской вершиной протяженностью до 8 г/см^2 и мощностью дозы, достаточной для проведения на нем медико-биологических и клинических исследований по лечению онкологических больных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорин В.П., Молоканов А.Г., Савченко О.В. ОИЯИ, Р16-11080, Дубна, 1977.
2. Кузьмин Е.С. и др. ОИЯИ, Р9-84-445, Дубна, 1984.
3. Larsson B. - Brit.J.Radiol., 1961, 34, p.143.
4. Блохин С.И. и др. - Мед.радиология, 1970, 15/5/, с.64.
5. Хорошков В.С. и др. ИТЭФ 86-149, М., 1986.
6. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, Р9-86-648, Дубна, 1986.
7. Экспериментальная ядерная физика /под ред. Э.Сегре/, М.: ИЛ, 1955.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 апреля 1987 года.