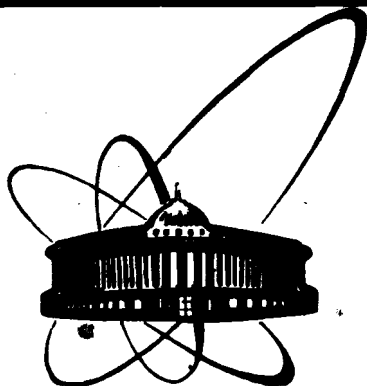


89-39.1



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

M 757

9-89-391

А. Г. Молоканов

**ПРИМЕНЕНИЕ ГРЕБЕНЧАТЫХ ФИЛЬТРОВ
В НЕМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОННЫХ ПУЧКАХ**

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

В процедурной кабине № 2 клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ сформирован пучок протонов с энергией 130 ± 160 МэВ для однопольного облучения онкогинекологических больных. Для облучения таких мишеней требуется сформировать круглое поле диаметром от 3 до 5 см с постоянной мощностью дозы по глубине до 8 г/см^2 в мягкой ткани и резким спадом дозы на границах поля.

Метод модификации пика Брэгга замедленного протонного пучка с использованием магнитного анализа и коллиматорной системы, преобразующей форму энергетического распределения протонов в пучке ^{1,2/}, не позволяет получить такую большую протяженность плоской вершины дозного распределения. Поэтому при формировании этого пучка был применен гребенчатый фильтр.

Гребенчатый фильтр применялся в лучевой терапии тяжелыми заряженными частицами для преобразования глубинного дозного распределения ^{3,4/}. Обычно при этом узкий пик Брэгга моноэнергетического пучка преобразуется в однородное дозное распределение с плоской вершиной, протяженность которой соответствует размерам облучаемой мишени.

Особенностью метода формирования однородного глубинного дозного распределения на протонном пучке ЛЯП ОИЯИ является использование получаемого в результате замедления протонного пучка с широким энергетическим распределением, обрезанным со стороны высоких импульсов для получения крутого спада дозы за пиком Брэгга. При этом форма кривой Брэгга может изменяться в зависимости от средней энергии пучка, режима работы фокусирующего канала, параметров анализирующей магнитной системы и т.д. Это затрудняет применение аналитических методов расчета формы гребенчатого фильтра, используемых для моноэнергетических протонных пучков ^{5,6/}, и наиболее удобным оказывается численный метод расчета на ЭВМ.

При прохождении через гребенчатый фильтр протонный пучок испытывает сильное многократное кулоновское рассеяние. При этом происходит заметное уширение пучка, а также изменение относительного вклада в дозу частей пучка, прошедших различную толщину вещества в гребенчатом фильтре, в результате чего искажается глубинное дозное распределение, и при расчете гре-

бенчатого фильтра многократное кулоновское рассеяние должно быть учтено.

2. МЕТОД РАСЧЕТА ФОРМЫ ГРЕБЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА

Гребенчатый фильтр - это устанавливаемый на пути пучка тяжелых заряженных частиц замедлитель, толщина которого меняется в поперечном сечении пучка по определенному закону. Частицы, 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.

На первом этапе применялся линейно-ступенчатый гребенчатый фильтр. Поперечное сечение такого гребенчатого фильтра изображено на рис.1. Фильтр набирается из латунных пластин, конфигурация которых зависит от формы глубинного дозного распределения исходного пучка и требуемой протяженности плоского максимума формируемого дозного распределения. Такая конструкция гребенчатого фильтра позволяет производить коррекцию его формы в процессе формирования пучка. В этом фильтре преобразование глубинного дозного распределения происходит в результате суммирования имеющейся исходной кривой Брэгга с рядом таких же кривых Брэгга, смещенных относительно исходной на толщину t_i и с относительными интенсивностями ρ_i , определяющимися частью пучка, прошедшего данную толщину вещества фильтра. При отсутствии многократного кулоновского рассеяния, для параллельного и однородного в поперечном сечении пучка, падающего на гребенчатый фильтр,

изображенный на рис.1, коэффициенты ρ_i могут быть определены по формуле $\rho_i = \Delta x_i / T$, где Δx_i - толщина i -й латунной пластины, а T - шаг гребенчатого фильтра. Величины t_i и ρ_i для фильтра рассматриваемой конструкции могут быть получены на основе численных расчетов на ЭВМ. Количество используемых шагов гребенчатого

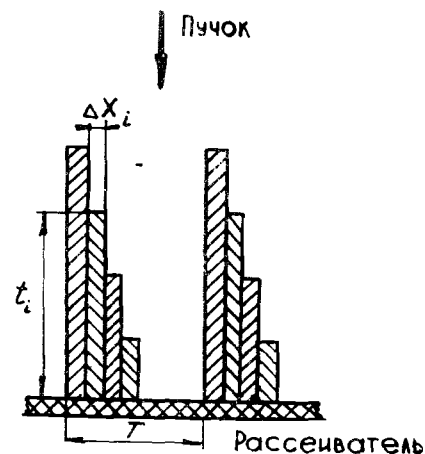


Рис.1. Поперечное сечение гребенчатого фильтра.

фильтра i_{max} определяется требованиями к протяженности однородного дозного распределения и его однородности. Учет многократного рассеяния изменит величины коэффициентов ρ_i .

Шаг гребенчатого фильтра T и толщина рассеивателя должны обеспечить равномерное смешивание в поперечном сечении дозного поля протонов, прошедших различные толщины вещества в этом фильтре.

Расчеты формы гребенчатого фильтра проводились на ЭВМ HEWLETT-PACKARD 21-MX по программе RIDGE. В результате расчетов выбирались количество шагов i_{max} , конфигурация фильтра для различных энергий протонного пучка и способов его формирования.

Чтобы получить однородное глубинное дозное распределение протяженностью до 8 г/см^2 для пучка со средней энергией 130 МэВ требуется не менее четырех шагов гребенчатого фильтра t_i . Для пучка протонов со средней энергией 160 МэВ, кривая Брэгга которого более плавная, однородное распределение дозы по глубине такой же протяженности можно получить, используя всего три значения t_i .

Наряду с плоскопараллельной формой гребенчатого фильтра могут использоваться и другие конструкции. Так, например, на медицинском протонном пучке ИТЭФ применяется спиральный гребенчатый фильтр в виде рулона из лавсановой ленты переменной ширины [7]. Для нашего пучка при формировании дозного распределения из пучка со средней энергией 160 МэВ применен мед-

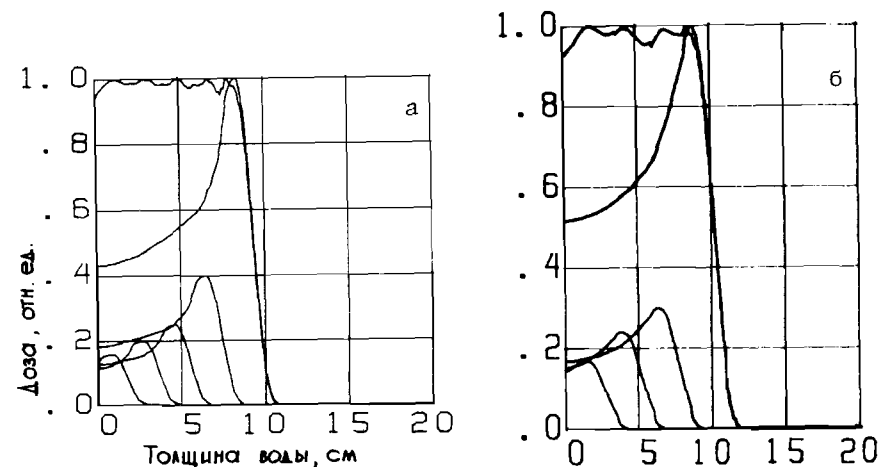


Рис.2. Набор кривых Брэгга, смещенных по толщине гребенчатым фильтром и их сумма - почти однородное распределение для пучков со средними энергиями 130 МэВ /а/ и 160 МэВ /б/.

ный кольцевой гребенчатый фильтр, который может быть изготовлен на токарном станке и обеспечивает получение пучка, аксиально-симметричного относительно оси коллиматора.

На рис.2а изображена исходная кривая Брэгга для протонного пучка со средней энергией 130 МэВ, измеренная в процедурной кабине № 2, и четыре таких же кривых Брэгга, смещенных на толщину t_i относительно первоначальной и умноженных на коэффициенты ρ_i . При их суммировании получается почти однородное по глубине дозное распределение, также изображенное на этом рисунке. Такой же набор кривых Брэгга для пучка со средней энергией 160 МэВ приведен на рис.2б.

3. МНОГОКРАТНОЕ КУЛОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ В ГРЕБЕНЧАТОМ ФИЛЬТРЕ

При расчетах многократного кулоновского рассеяния предполагалось, что на гребенчатый фильтр падает параллельный пучок протонов, однородный внутри поперечного сечения, ограниченного коллиматором радиуса R .

На больших расстояниях L от гребенчатого фильтра ($L \gg R$) угловое распределение протонов, пересекающих пластину гребенчатого фильтра толщиной t_i и рассеиватель, может быть описано соотношением

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

где $\overline{\theta_i^2}$ - средний квадрат угла многократного кулоновского рассеяния протонов^{/8/}.

Если проинтегрировать это выражение по всему поперечному сечению пучка, т.е. по площади круга радиусом R , то уменьшение вклада каждой i -й составляющей пучка вдоль оси на расстоянии L от гребенчатого фильтра C_i будет равно

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

$\theta_{\max} = R/L$

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты расчетов конфигурации гребенчатых фильтров для пучков 130 МэВ и 160 МэВ сведены в табл.1 и 2. Приводятся расчетные значения толщин пластин гребенчатого фильтра t_i в единицах пробега протонов в ткани и эквивалентные им толщины меди, из которой были изготовлены гребенчатые фильтры, и их относительные интенсивности, обеспечивающие получение плоской вершины глубинного дозного распределения.

Таблица 1

Гребенчатый фильтр для пучка протонов диаметром 6 см на расстоянии $L = 75$ см от облучаемой мишени. Рассеиватель Pb толщиной $0,4$ г/см²

i	$t_i, \text{ г/см}^2 \text{ тк.}$	$t_i, \text{ мм Cu}$	$\rho_i, \%$	$\overline{\theta_i^2}$	C_i	$\rho_{i \text{ м.с.}}, \%$	$\rho_{i \text{ эксп.}}, \%$
0	0	0	49,4	$3,1 \text{ E-4}$	0,99	31,0	30
1	1,9	3,0	20,0	$12,9 \text{ E-4}$	0,71	17,5	20
2	3,8	6,1	12,5	$24,0 \text{ E-4}$	0,47	16,7	17
3	5,7	9,1	10,0	$35,6 \text{ E-4}$	0,36	17,3	17
4	7,6	12,2	8,0	$47,5 \text{ E-4}$	0,29	17,5	17

Таблица 2

Кольцевой гребенчатый фильтр для пучка протонов диаметром 6 см на расстоянии 45 см от мишени. Рассеиватель - Cu толщиной 5 мм

i	$t_i, \text{ г/см}^2 \text{ тк.}$	$t_i, \text{ мм Cu}$	$\rho_i, \%$	$\overline{\theta_i^2}$	C_i	$\rho_{i \text{ м.с.}}, \%$	$\rho_{i \text{ эксп.}}, \%$
0	0	0	58,5	$17,6 \text{ E-4}$	0,92	48	49,0
1	2,5	4,0	17,5	$33,8 \text{ E-4}$	0,73	18	18,7
2	5,0	8,0	14,0	$50,0 \text{ E-4}$	0,59	18	17,7
3	7,5	12,0	10,0	$67,2 \text{ E-4}$	0,48	16	14,6

В таблице даны также значения средних квадратов угла многократного кулоновского рассеяния θ^2 протонов в веществе гребенчатого фильтра и рассеивателя и соответствующие им величины ослабления пучка в месте расположения облучаемой мишени, а также относительные интенсивности с учетом рассеяния.

Конструкция линейно-ступенчатого гребенчатого фильтра позволяет в процессе формирования пучка корректировать коэффициенты ρ_i . В табл.1 приводятся полученные экспериментально при формировании плоской вершины дозного распределения относительные интенсивности $\rho_{i \text{экспер.}}$, которые достаточно близки к расчетным. Некоторые расхождения результатов расчетов с измерениями обусловлены следующими причинами:

1. Погрешности в учете многократного кулоновского рассеяния, связанные с уменьшением энергии пучка при прохождении через гребенчатый фильтр.
2. Отклонения от параллельности и однородности в поперечном сечении пучка.
3. Погрешности при изготовлении гребенчатого фильтра.

Изодозное распределение, полученное с этим гребенчатым фильтром, показано на рис.3. Крутой спад дозы в радиальном направлении обеспечивается тубусом, расположенным непосредственно перед облучаемой мишенью.

С целью повышения мощности дозы в пучке средняя энергия протонов была увеличена до 160 МэВ, а гребенчатый фильтр был приближен к облучаемой мишени до 45 см. Для формирования глубинного дозного распределения в таком пучке использовался кольцевой гребенчатый фильтр.

На основе проведенных измерений также проводилась коррекция формы гребенчатого фильтра, в результате которой были определены значения величин относительных интенсивностей $\rho_{i \text{экспер.}}$, которые также достаточно близки к расчетным. Глубинное дозное распределение, измеренное с этим гребенчатым фильтром, приводится на рис.4, а на рис.5 показано изодозное распределение. Мощность дозы на плоской части такого распределения составляет около 100 рад/мин на 1 мкА выведенного из фазотрона протонного пучка, что позволяет использовать такой пучок при проведении лучевой терапии.

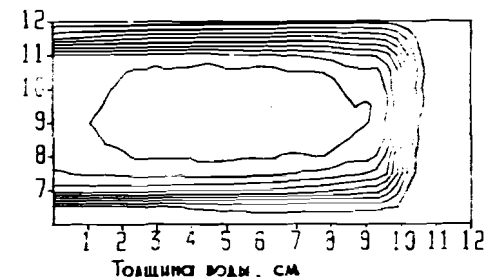


Рис.3. Изодозное распределение, сформированное из пучка со средней энергией 130 МэВ.

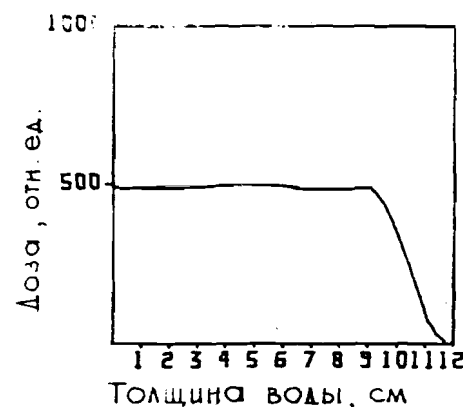
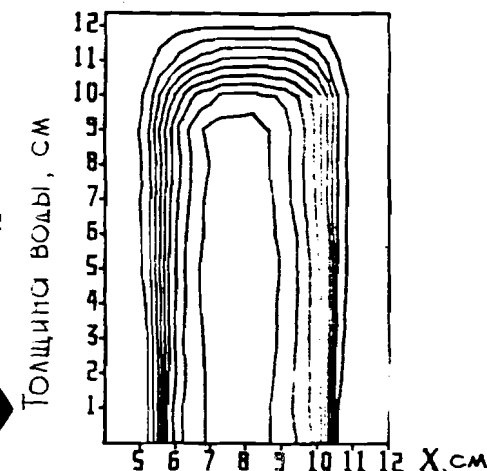


Рис.5. Изодозное распределение, сформированное из пучка со средней энергией 160 МэВ. The graph shows isodose lines in a rectangular cross-section. The vertical axis is labeled 'Толщина воды, см' (Water thickness, cm) with values from 1 to 12. The horizontal axis is labeled 'X, см' (X, cm) with values from 5 to 12. The isodose lines are roughly rectangular, indicating a uniform dose distribution in the center of the field.

Рис.4. Глубинное дозное распределение, сформированное из пучка со средней энергией 130 МэВ.



ВЫВОДЫ

1. Разработан численный метод расчета гребенчатого фильтра с учетом многократного кулоновского рассеяния, который может использоваться для немонотонных пучков тяжелых заряженных частиц.
2. Метод расчета обеспечивает достаточно хорошее согласие результатов расчетов с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин Е.С. и др. - ОИЯИ, Р9-84-445, Дубна, 1984.
2. Абазов В.М. и др. - ОИЯИ, 9-87-280, Дубна, 1987.
3. Larsson B. - Brit.J. Radiol., 1961, 34, p.143.
4. Блохин С.И. и др. - Мед.радиология, 1970, № 5, с.64.
5. Ломанов М.Ф. - Мед.радиология, 1975, № 11, стр.64.
6. Гольдин Л.Л., Монастырский М.И. - Мед.радиология, 1978, № 12, стр.65.
7. Хорошков В.С. и др. - Препринт ИТЭФ 86-149, М., 1986; Мед.радиология, 1987, № 8, стр.76.
8. Экспериментальная ядерная физика /под ред.Э.Сегре/, М.: ИЛ, 1955.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 июня 1989 года.