

у
с-137

Савченко О.В.

+

Б1-2748

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных проблем

О.В.Савченко

Б1-2748

ПРОЕКТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КЛИНИЧЕСКОГО ПОМЕЩЕНИЯ И
ФОКУСИРУЮЩЕГО ПРОТОННОГО КАНАЛА В КОРПУСЕ СИНХРОТРОНА
ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОИЯИ ДЛЯ ПРОВЕДЕ-
НИЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ:
"ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ
В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ"

с.ф. 1429

Рукопись поступила
в издательский отдел
..17.. 1966 г.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ОИЯИ

г.Дубна, 1966 г.

С целью создания всех необходимых условий для проведения в Лаборатории ядерных проблем медико-биологических исследований предполагается вывести протонный пучок с варьируемой энергией от 100 до 600 Мэв в специально оборудованное экспериментально-клиническое помещение, расположенное за двухметровой бетонной стеной левого крыла корпуса синхротрона. Общая схема вывода пучка и расположения помещения показана на рис. I.

Экспериментально-клиническое помещение включает в себя четыре комнаты. Комната "1" предназначена для установки ротационного штатива на протонном пучке, а также рентгеновского, встиковочного, телевизионного и дозиметрического оборудования. В комплекс дозиметрических приборов входят ионизационные камеры для мониторинга пучка и снятия кривых Брэгга, подвижный сцинтилляционный счетчик малых размеров для определения радиальной зависимости поглощенной дозы в плоскости, нормальной протонному пучку и цилиндр Фарадея, необходимый для абсолютной калибровки протонного пучка. Комната "2" предназначена для врача оператора; в ней предполагается разместить все приборы, регистрирующие показания дозиметрической аппаратуры. Комнату "3" намечается выделить для медицинского осмотра пациентов, и комната "4" будет переделана под санитарный узел. Экспериментально-клиническое помещение имеет отдельный выход из здания ускорителя и может быть полностью изолировано во время сеанса облучения от остальной части корпуса синхротрона.

Для обеспечения радиационной безопасности врача-оператора комната "2" отделяется от комнаты "1" бетонной стеной толщиной около 1 метра, а проход между этими двумя комнатами на время сеанса облучения перекрывается подвижной дверью из тяжелого бетона

или железа толщиной около 0,5 метра. Для непосредственного наблюдения врача-оператора за пациентом во время сеанса облучения в бетонной стене оставлен зигзагообразный проем с наклонными зеркалами, образующими перископическую систему. При терапии протонным пучком основным источником рассеянного излучения является само тело пациента, где в результате ядерных взаимодействий протонов возникают испарительные нейтроны и γ -кванты с энергией в несколько Мэв. Соответствующие оценки показывают, что при однократной поглощенной дозе 300 рад и площади протонного пучка $\sim 100 \text{ см}^2$ поток рассеянных нейтронов в месте расположения врача-оператора с учетом ослабления в защитной бетонной на фактор $e^{-\frac{1}{2}} \approx 1/140$ составит около 750 нейтронов/ см^2 , а за одну рабочую смену после 20 сеансов облучения около $1,5 \cdot 10^4$ нейтронов/ см^2 , что, примерно, в 30 раз меньше предельно допустимого уровня облучения. Поток рассеянных γ -квантов в комнате "2" будет гораздо меньше, так как радиационная длина γ -квантов в бетоне равняется $\sim 10 \text{ см}$ и ослабление потока γ -квантов после прохождения 1 метра защиты составит более 10^4 раз.

Протонный пучок с энергией от 100 до 600 Мэв предполагается получать путем торможения выведенного протонного пучка в нелинейном блоке, расположенном перед отклоняющим магнитом. Заторможенный пучок протонов очищается в магнитном поле и затем транспортируется на расстояние около 30 метров в комнату "1". Для получения необходимой интенсивности протонного пучка в месте расположения пациента предполагается на всем пути транспортировки пучка установить семь магнитных фокусирующих линз с апертурой 12 см, а для исключения рассеяния протонного пучка в воздухе предусмотрено сооружение вакуумного тракта с полной длиной 26 метров, откачиваемого до давления $\sim 1 \text{ мм Hg}$. Общее расположение протонного

канала показано на рис. I. Фокусирующие линзы протонного канала, разработанные в конструкторском бюро Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, представляют собой симметричные квадрупольные триплеты с максимальным градиентом магнитного поля ~ 800 эрстед/см, при электрическом токе через обмотки полюсов около 300 ампер. Крайние секции триплета имеют длину 20 см, средняя - 40 см, а расстояние между секциями равняется 15 см. Омическое сопротивление обмоток одного такого триплета составляет около 0,33 ом и максимальная электрическая мощность, рассеиваемая всеми линзами протонного канала составляет

$$W = n \cdot I^2 \cdot R = 7 \cdot (300)^2 \cdot 0,33 \approx 210 \text{ кВт}$$

Полная конструктивная длина квадрупольного триплета равняется 1,5 метра и все линзы располагаются на расстояниях 2,2 метра друг от друга по направлению распространения заторможенного протонного пучка.

Хотя квадрупольные триплеты и являются менее экономичными по расходу электроэнергии, чем квадрупольные дублеты с той же самой длиной полюсов $\sqrt{1,2}$, однако такие свойства квадрупольных триплетов, как равные коэффициенты увеличения для вертикальной и горизонтальной плоскостей фокусировок, а также несколько большая эффективная апертура, определяют их явное преимущество по сравнению с квадрупольными дублетами; имеющими резко отличные увеличения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Квадрупольные триплеты обычно применяются при транспортировке пучков заряженных частиц на большие расстояния и работают от предмета

к изображению /3/. Если, кроме того, источник частиц имеет конечные размеры, то в точках, где располагаются промежуточные изображения, устанавливаются дополнительные линзы, называемые полевыми /4/.

Эквивалентная оптическая система проектируемого протонного канала изображена на рис.2. Выведенный из камеры ускорителя протонный пучок с энергией 660 Мэв после замедления в тормозящем полиэтиленовом фильтре толщиной около 1,5 метра до энергии 140 Мэв характеризуется углом многократного рассеяния $\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = 0,06 = 3,4^\circ$ /5/ и среднеквадратичным радиусом поперечного расширения $\langle r^2 \rangle$, величина которого определяется из выражения

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{q^2} \int_0^{\mathcal{L}} (\mathcal{L} - l)^2 d\langle \theta^2 \rangle = \frac{1,83 \cdot 10^{-3}}{q^2} \int_{R_1}^{R_0} \frac{(x - R_1)^2}{x^{1,02}} dx = 2,18 \cdot 10^{-3} \int_{13}^{172} \frac{(x - 13)^2}{x^{1,02}} dx = 14,5 \text{ см}^2,$$

где $q = 0,92 \text{ г/см}^3$ - удельный вес полиэтилена, \mathcal{L} - толщина тормозящего фильтра в г/см^2 , $R_0 = 172 \text{ г/см}^2$ и $R_1 = 13 \text{ г/см}^2$ - пробеги в полиэтилене протонов с энергией 660 Мэв и 140 Мэв соответственно, /6/ а $d\langle \theta^2 \rangle$ вычисляется по формуле /5/

$$d\langle \theta^2 \rangle = \frac{1,83 \cdot 10^{-3}}{x^{1,02}} dx.$$

Размеры заторможенного протонного пучка будут характеризоваться величиной $2R = 2\sqrt{\langle r^2 \rangle + r_c^2} = 2\sqrt{14,5 + 2,25} = 8,3 \text{ см}$, где $2r_c = 3 \text{ см}$ - размеры первичного пучка. Величина $2R = 8,3 \text{ см}$ близка к диаметру вакуумпровода равному 11 см и поэтому траектории протонов заполняют все свободное пространство вакуумпровода. Линзы протонного канала 1,3,5 и 7 Рис.2 не переносят такое

Изображение источника протонов в место расположения пациента в масштабе 1:1, а полевые линзы 2п, 4п и 6п, помещенные в точках промежуточных изображений, обеспечивают сохранение полного потока частиц, захватываемого передающими линзами. Эффективная длина области магнитного поля в крайних секциях квадрупольного триплета равняется приблизительно $l_{\text{эф}} = 25 \text{ см} \sqrt{1/\dots}$, свободное от поля расстояние между секциями равно $C = 10 \text{ см}$, а фокусное расстояние f может быть оценено по формуле [7]

$$\frac{1}{f} = 2 \kappa^2 l_{\text{эф}}^2 \left[\frac{2}{3} l_{\text{эф}} + C \right]$$

Здесь $\kappa = \frac{dH}{dz} / \frac{pc}{300}$, $\frac{dH}{dz}$ — градиент магнитного поля в линзе в эрс/см. pc — импульс частицы в eV.

Для максимального градиента магнитного поля 800 эрс/см и фокусного расстояния $f = 1,8$ метра квадрупольные триплеты обеспечивают фокусировку протонов с энергией $T_p \approx 160 \text{ Мэв}$. Линзы протонного канала могут запитываться последовательными группами от нескольких источников питания, причем для совмещения изображения в двух взаимноперпендикулярных плоскостях фокусировки крайние секции триплета необходимо запитывать отдельно от промежуточных секций. При выбранных параметрах фокусирующих линз и внутреннем диаметре вакуумопровода 11 см коэффициент захвата

\mathcal{K} заторможенных частиц протонным каналом равняется

$$\mathcal{K} = \varepsilon \int_0^{\theta_0} \frac{2}{\langle \theta^2 \rangle} e^{-\frac{\theta^2}{\langle \theta^2 \rangle}} \theta d\theta = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{\theta_0^2}{\langle \theta^2 \rangle}} \right) \approx \varepsilon \frac{\theta_0^2}{\langle \theta^2 \rangle} = 0,04,$$

где $\theta_0 = \frac{55}{360} = 1,5 \cdot 10^{-2}$

- угловая апертура триплета,

$$\langle \theta^2 \rangle = 3,6 \cdot 10^{-3}$$

- среднеквадратичный угол много-

кратного кулоновского рассеяния первичных частиц в тормозящем фильтре, $\Sigma = 0,7$ - эффективная апертура триплета.

Интенсивность пучка заторможенных протонов с энергией около 140 Мэв на выходе протонного канала может быть оценена из выражения

$$n = N_0 e^{-n\sigma} \approx 3 \cdot 10^{11} \cdot 0,065 \cdot 0,04 = 7,8 \cdot 10^8 \text{ протонов/сек,}$$

или

$$n_0 = \frac{n}{S} = \frac{7,8 \cdot 10^8}{10^2} = 7,8 \cdot 10^6 \text{ протонов/см}^2 \text{ сек,}$$

где $N_0 = 3 \cdot 10^{11}$ - интенсивность первичного пучка протонов,
 $e^{-n\sigma} = 0,065$ - фактор уменьшения интенсивности пучка протонов в результате ядерных взаимодействий при замедлении в тормозящем фильтре.

Такая интенсивность протонного пучка обеспечивает скорость накопления дозы в максимуме пика Брэгга

$$n_0 \cdot \frac{dE}{dx} 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 60 = 7,8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} \cdot 60 \approx 75 \text{ рад/мин,}$$

где $\frac{dE}{dx} = 10 \text{ Мэв/см}^{-2} \text{ г}^{-1}$ - ионизационные потери в максимуме кривой Брэгга,

$n_0 = 7,6 \cdot 10^6$ - плотность потока протонов в месте облучения, и при дозе облучения за один сеанс, равной в среднем 300 рад, время облучения одного пациента составит в этом случае всего несколько минут.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. H.A. Enge, Rev. Sci. Inst, 32, 662, (1961)
2. В.С.Кладницкий, препринт ОИЯИ ЛЯП, I477, (1963).
3. "Измерение характеристик ядерных реакций и пучков частиц" стр.306, перевод с англ. под редакцией Л.А.Арцимовича. Издательство "МИР", Москва 1965 г.
4. Д.Ритсон. "Экспериментальные методы в физике высоких энергий". стр.428. Перевод с англ. под редакцией В.П.Джеленова Издательство "Наука", Москва 1964 г.
5. И.М.Всильевский, В.И.Комаров, С.В.Савченко.
"Формирование пучка протонов с энергией 100 + 200 Мэв для проведения медико-биологических исследований и предварительные результаты его дозиметрии". ЛЯП ОИЯИ, 1966 г.
6. Studies in penetration of charged particles in matter
Nucl. Sci. Series Report Number 39.
National Academy of Science USA. Publication 1133
7. В.И.Данилов, С.В.Савченко, препринт ОИЯИ ЛЯП, I79, (1958).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Общая схема формирования протонного пучка и расположения экспериментально-клинического помещения в корпусе синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

ВКУ - вакуумная камера ускорителя, ОН-отклоняющие насадки, Р- выведенный протонный пучок с энергией 660 МэВ.

МКЛ - магнитная квадрупольная линза для фокусировки первичного пучка, ТФ - тормозящий полиэтиленовый фильтр, ОМ - отклоняющий магнит, К - коллиматоры, ВТ-вакуумный тракт. МФЛПК - магнитные фокусируемые линзы протонного канала, ЗВ - защитные ворота, ДА - дозиметрическая аппаратура, РВ - ротационный штатив, ЦФ - цилиндр Фарадея.

"1" - комната для облучения пациента,

"2" - комната врача-оператора,

"3" - комната для медицинского осмотра пациента,

"4" - санитарный узел.

Рис.2. Эквивалентная оптическая схема фокусирующего протонного канала.

ВКУ - вакуумная камера ускорителя, МКЛ - магнитная квадрупольная линза для фокусировки первичного пучка протонов, ТФ - тормозящий полиэтиленовый фильтр,

$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle}$ - среднеквадратичное поперечное расширение протонного пучка, f - фокусное расстояние отдельной линзы, 1, 3, 5 и 7 - передающие линзы протонного канала, 2п, 4п и 6п - полевые линзы протонного канала.

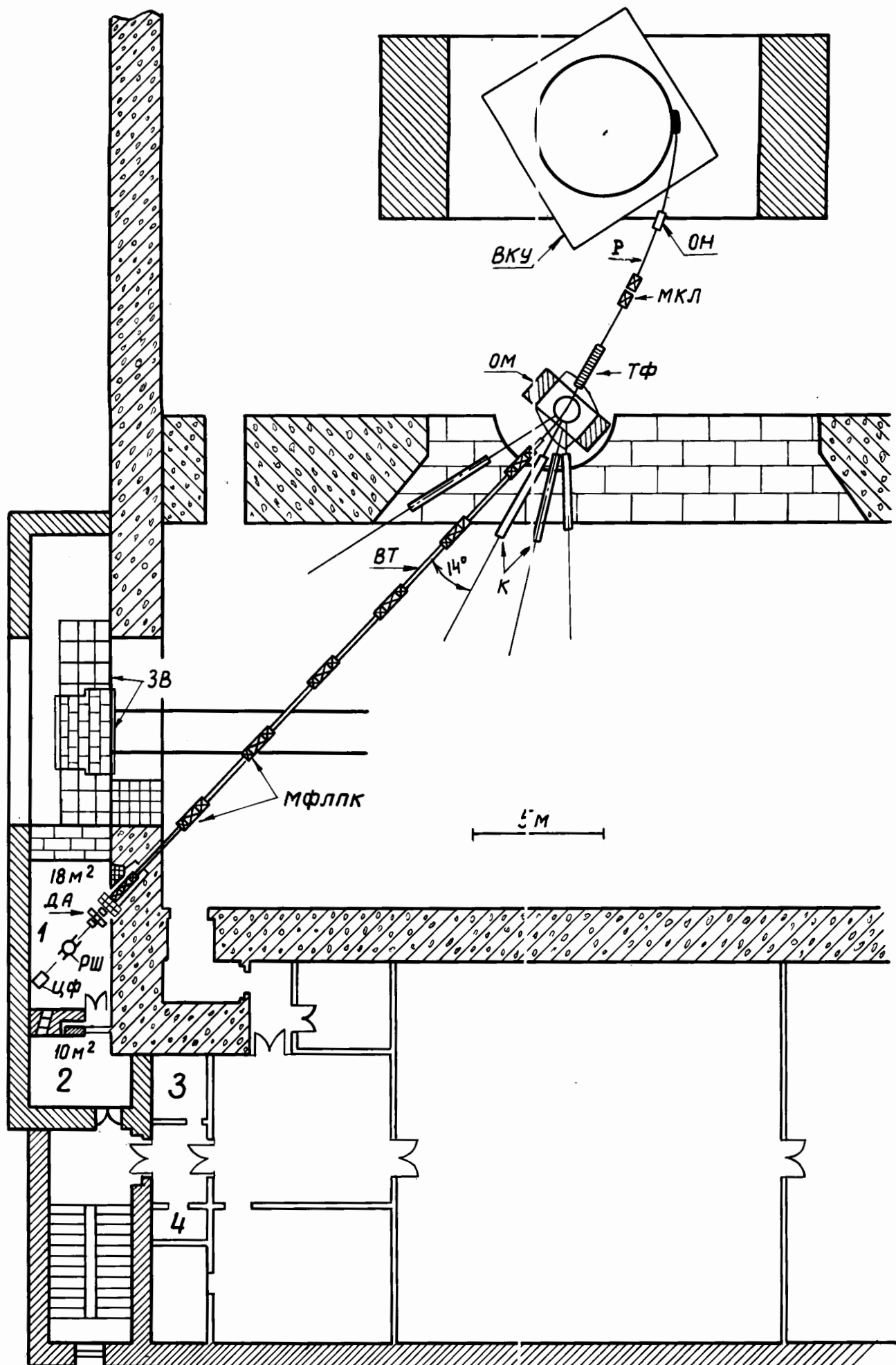


Рис. 1.

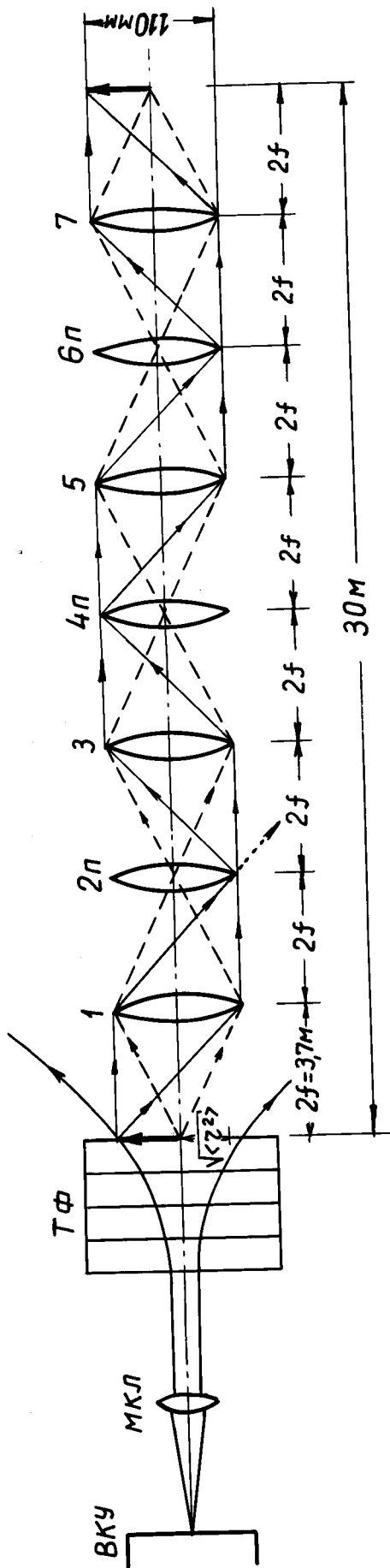


Рис. 2.