

Савченко С. В.  
3450 + 3499

2226/90

Б1-18-90-51



+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-18-90-51

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 90

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Б1-18-90-51

О.В.Савченко

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ СЕПАРИРОВАННЫХ  
ПУЧКОВ ПИ- И МД-МЕЗОНОВ НА ФАЗОТРОНЕ ОИЯИ  
ДЛЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна, 1990

25.01.90

Дубна, 1990

ОИЯИ  
Дубна

Перспективы получения интенсивных сепарированных пучков  
пи- и мю-мезонов на фазотроне ОИЯИ для медико-  
биологических и физических исследований

О.В.Савченко

Аннотация

Рассмотрены различные варианты получения сепарированных мезонных пучков на фазотроне ОИЯИ с помощью широкоугольных фокусирующих линз, промежуточно-го замедлителя и повторного магнитного анализа.

Показано, что при полученных несепарированных мезонных пучках с энергией до 80 МэВ и интенсивностях около  $5 \cdot 10^7 \text{сек}^{-1}$  на 1 мкА падающего на мишень протонного пучка с энергией 660 МэВ имеется принципиальная возможность формирования сепарированных пучков пи-мезонов с интенсивностью до  $10^7 \text{сек}^{-1}$ , мю-мезонных пучков - до  $10^6 \text{сек}^{-1}$  и пучков "поверхностных" мю-плюс мезонов с интенсивностью около  $10^5 \text{сек}^{-1}$  на 1 мкА протонного пучка.

## § I. ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ уже продолжительное время, начиная с 1971 года, ведутся разработки нетрадиционных методов фокусировки мезонных пучков, основанные на использовании широкоугольных магнитных систем с аксептансом по телесному углу, на один-два порядка большим по сравнению с обычными каналами частиц из квадрупольных линз и отклоняющих магнитов /1,2,3/.

В первом варианте такой широкоугольной фокусирующей системы, осуществленной в 1974 году /2/ на основе соленоидальной линзы с неоднородным аксиально-симметричным магнитным полем, были получены интенсивные пи-мезонные пучки с энергией до 30 МэВ, на которых была выполнена серия радиобиологических экспериментов по определению относительной биологической эффективности и кислородного отношения /4/, а также цикл физических экспериментов по определению множественности нейтронов, возникающих при захвате отрицательных пи-мезонов тяжелыми ядрами и по изучению эффекта образования высокоспиновых ядерных изомеров /5,6/.

В период реконструкции синхроциклотрона в сильноточный фазотрон был разработан и создан второй вариант широкоугольной магнитной линзы, показанной на рис. I /7/. Особенностью этого варианта является возможность фокусировки заряженных частиц за пределами железного ярма линзы, где магнитное поле не превышает 5-10 Э. В ходе экспериментов, выполненных на этой широкоугольной линзе после завершения реконструкции фазотрона, были получены детальные данные о глубинных дозных распределениях

и составе мезонных пучков с энергией до 80 МэВ в зависимости от импульса, знака заряда и типа мишени /8/. Интенсивность пучков достигает величины  $5 \cdot 10^7 \text{сек}^{-1}$ , а пучки "поверхностных" мю-плюс мезонов -  $5 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$  на 1 мкА падающего на мишень протонного пучка. Удачно выбранное расположение широкоугольной линзы, позволяющее отбирать и фокусировать заряженные частицы под средним углом  $90^\circ$  к протонному пучку, а также малый вертикальный размер протонного пучка на мезонной мишени (около 10 мм) позволили значительно (до 3 раз) уменьшить примеси электронно-позитронной компоненты в мезонных пучках даже для таких мишеней, как медь и вольфрам.

В случае пи-мезонов с энергией 60-80 МэВ уровень примеси составляет всего около 10%, что для целей лучевой терапии является вполне удовлетворительной величиной. Однако при энергии пи-мезонов 20-30 МэВ этот уровень примеси возрастает до 50-60%, а для "поверхностных" мю-плюс мезонов соотношение  $e^+/\mu^+$  составляет величину около 30. Такие величины примесей уже не являются удовлетворительными ни для лучевой терапии пучками отрицательных пи-мезонов, ни для целого ряда физических экспериментов, где надо регистрировать каждую входящую в установку частицу, и задача пространственного разделения частиц по массам приобретает актуальное значение. Из известных методов разделения частиц с одинаковым импульсом по массам метод разделения с помощью промежуточного замедлителя с последующим повторным магнитным анализом является достаточно простым и эффективным при использовании широкоугольных фокусирующих систем. В этом случае потери мезонов при таком разделении из-за многократного кулоновского рассеяния будут не очень велики вследствие большого фазового объема падающего на про-

межуточный замедлитель мезонного пучка.

Действительно, как видно из рис. I, расходимость пучка на выходе пи-мезонной линзы составляет, примерно  $\theta = 10-11^\circ$  и уменьшение интенсивности мезонного пучка после подтормаживания характеризуется величиной  $\eta = \pi \theta^2 / \pi \theta^2 + \pi \langle \theta^2 \rangle_K$  <sup>/7/</sup>, где  $\langle \theta^2 \rangle_K$  - среднеквадратичный угол многократного кулоновского рассеяния. Для типичной ситуации, когда толщина замедлителя составляет примерно половину первоначального пробега пучка частиц  $\sqrt{\langle \theta^2 \rangle_K} \approx 5^\circ$  и  $\eta = 0,1/0,1+0,025 = 0,8$ .

Целью настоящей работы явилось рассмотрение различных вариантов получения сепарированных мезонных пучков с помощью использования широкоугольных фокусирующих систем, промежуточного замедлителя и повторного магнитного анализа и оценки интенсивности таких пучков в зависимости от импульса и знака заряда частиц.

## § 2. ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СЕПАРИРОВАННЫХ МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ СОЛЕНОИДАЛЬНЫХ ЛИНЗ

Уже на первом этапе проектирования широкоугольной линзы для получения мезонных пучков на реконструированном фазотроне в качестве далекой перспективы предлагалось соленоидальную линзу с "теплыми" катушками возбуждения заменить двумя соленоидальными линзами со сверхпроводящими обмотками, размещенными по вертикали таким образом, что фокус первой линзы является источником мезонов для второй линзы <sup>/2,3/</sup>. Если в этом фокусе разместить подходящий тормозитель, то появляется возможность разделения по массам частиц, составляющих пучок и получение тем самым чистых мезонных пучков, свободных от примесей электро-



нов или позитронов. Применение сверхпроводящих обмоток позволяет уменьшить габариты всей магнитной системы, сравнительно легко получить требуемый минимум поля на оси симметрии и тем самым в полной мере использовать эффект значительного уменьшения сферической и хроматической аберраций такой системы. Общая схема такой магнитной системы приведена на рис. 37 работы /1/. Однако из-за технологических трудностей применение сверхпроводимости для больших магнитных катушек и радиационных ограничений на сверхпроводящую обмотку при ее размещении вблизи мезонообразующей мишени этот вариант получения сепарированных мезонных пучков так и не был реализован до настоящего времени.

В 1980 году был предложен вариант широкоугольной линзы с "теплыми" катушками возбуждения, который допускает путем перераспределения тока в катушках и замены внутреннего сердечника линзы превращение ее в две соленоидальные линзы и получение как медицинских пучков отрицательных пи-мезонов с импульсом до 180 МэВ/с, так и сепарированных пучков пи- и мю-мезонов с импульсом от 20 до 60 МэВ/с /7/. Общий вид этого варианта линзы показан на рис. 2. При получении чистого пучка мю-мезонов поглотитель из полиэтилена толщиной около 1 см, помещенный в фокус первой линзы на расстоянии 190 см от мезонообразующей мишени, полностью тормозит все пи-мезоны, уменьшает при этом импульс мю-мезонов всего на 15-20% и практически не изменяет импульса электронов. Поэтому вторая соленоидальная линза, настроенная на импульс затормозенных мю-мезонов, собирает их во втором фокусе, отсекая практически полностью все электроны с незначительно измененным импульсом, которые, как показано на рис. 2 поглощаются в последней катушке и железном ярме этой линзы.

Аналогичным образом, изменяя только толщину поглотителя в фокусе первой линзы, можно настроить вторую фокусирующую линзу на получение сепарированных пи-мезонов, уменьшив при торможении их импульс на 10-150% по сравнению с импульсом мю-мезонов. Таким образом, варианты широкоугольной фокусирующей линзы, изображенные на рис. 1 и 2, позволяют осуществить как получение пучка отрицательных пи-мезонов для медицинских целей с импульсом до 180 МэВ/с и пробегом около 20 см  $H_2O$ , так и получение сепарированных пучков пи- и мю-мезонов с импульсом до 46 МэВ/с. При этом аксептанс по телесному углу составляет 0,35 и 0,72 ср соответственно в первом и втором случаях, что уменьшает потери пучка при сепарации из-за многократного кулоновского рассеяния в промежуточном поглотителе до пренебрежимо малых значений.

Однако уже при монтаже варианта линзы, изображенного на рис. 1, выяснилось, что установка сердечника линзы является весьма трудоемкой и длительной операцией, требующей разборки всей верхней части линзы с последней катушкой возбуждения и разъема вакуумной камеры в труднодоступном месте. Кроме того вариант линзы, показанный на рис. 2, позволяет получать сепарированные мезонные пучки сравнительно малых энергий (до 10 МэВ), пригодные только для некоторых физических исследований, и потому в таком виде никак не решает проблемы получения чистых пучков отрицательных пи-мезонов для медицинских целей. Все это заставило отказаться и от этого варианта получения сепарированных мезонных пучков.

На рис. 3 представлен еще один вариант получения сепарированных мезонных пучков, в котором к уже действующей широкоугольной линзе добавлена для повторного магнитного анализа солено-



идальная линза, состоящая из двух катушек магнита МС-4, окруженных железным ярмом с профилированными наконечниками для "поджатия" области магнитного поля на оси линзы. Такую магнитную систему можно рассматривать как относительно "тонкую" магнитную линзу с апертурой 45 см и фокусным расстоянием определяемым выражением <sup>19)</sup>:

$$f = 4(N\rho)^2 / \int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz,$$

где  $N\rho = \rho c / 300$ ,  $\rho c$  - импульс частиц в эВ,  $H(z)$  - распределение поля на оси линзы. Для бронированных катушек магнитное поле на оси линзы можно приближенно аппроксимировать кривой Гаусса с шириной на полувысоте  $\Delta z_0$ , равной суммарной толщине двух катушек. Для линзы, изображенной на рис. 3 при токе в катушках 900 А  $H_{max} \approx 12000$  эрс.,  $\Delta z_0 \approx 75$  см и  $\int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz \approx H_{max}^2 \cdot \Delta z_0 / \sqrt{2} \approx 7,5 \cdot 10^9$  эрс.<sup>2</sup>см.

Для пучка с расходимостью  $\pm 10^\circ$  расстояние от промежуточного замедлителя до середины второй соленоидальной линзы не должно превышать 120 см. В этом случае пучок свободно проходит через апертуру линзы 45 см и фокусное расстояние "тонкой" линзы при уменьшении изображения во втором фокусе в два раза должно равняться 40 см.

Отсюда можно найти, что максимальный импульс мезонов, который можно сфокусировать этой линзой, составит около 80 МэВ/с, что совершенно недостаточно для медицинского применения пучка отрицательных пи-мезонов. Это обстоятельство не позволит использовать и такой сравнительно простой вариант получения сепарированных мезонных пучков.

### § 3. ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОЛУЧЕНИЯ СЕПАРИРОВАННЫХ МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОВОРОТНОГО МАГНИТА

Для разделения по массам мезонных пучков, получающихся на выходе широкоугольной линзы, можно после подтормаживания пучка использовать отклонение частиц в поперечном магнитном поле специально подобранной конфигурации. На рис. 4 на примере магнита МС-4 с раздвинутыми катушками показано два варианта такого разделения, где используются поперечные магнитные поля с симметрией вращения вида  $H = H_0 (z_0 / z)^{1/2}$ , обеспечивающие двойную фокусировку при повороте частиц на угол  $90^\circ$  и  $270^\circ / 10^\circ$ . При повороте частиц на  $90^\circ$  можно также использовать поперечные магнитные поля, спадающие по одной из координат в медианной плоскости как  $H = H_0 (y_0 / y)^{1/2}$ .

В случае поля  $H = H_0 (z_0 / z)^{1/2}$  движение частиц в медианной и аксиальной плоскостях магнита МС-4 описывается простыми уравнениями вида  $P_z = P_x = A \sin S / \sqrt{2} z_0$ , где  $S$  расстояние по круговой равновесной орбите радиуса  $z_0$  от источника частиц  $/10^\circ/$ . При повороте частиц на угол  $90^\circ$  с помощью магнитной дорожки секторного типа двойная фокусировка обеспечивается при одинаковом расстоянии  $a$  от источника или изображения до эффективной границы поля, равном:

$$a = \sqrt{2} z_0 \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \approx 2,27 z_0.$$

При радиусе кривизны  $z_0 = 50$  см расстояние  $a = 112$  см, что не выходит за пределы габаритов магнита типа МС-4. Однако при расходимости пучка из широкоугольной линзы  $\pm 10^\circ$  апертура

секторной магнитной дорожки должна быть около  $2A \approx z_0 = 50$  см. При таком зазоре между полюсами магнита протяженность рассеянного магнитного поля с двух сторон магнитной дорожки будет иметь величину, сравнимую с эффективной длиной самой дорожки, равной  $z_0 \pi/2 \approx 78$  см, что полностью исключает практическую реализацию этого варианта. Аналогично по этим причинам не представляется возможным и создать магнитную дорожку с полем вида  $H = H_0 (y_0 / y)$ . Трудности с рассеянными полями магнитной дорожки можно обойти во втором варианте, когда поворот осуществляется на угол  $270^\circ$ , что возможно только для поля  $H = H_0 (z_0 / z)^{1/2}$ . Однако в этом варианте двойная фокусировка с промежуточным фокусом при угле поворота  $135^\circ$  обеспечивается при одинаковом расстоянии  $a$  от источника или изображения до эффективной границы, равно:

$$a = \sqrt{2} z_0 \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \left( 2 - \frac{3}{2\sqrt{2}} \right) \approx 14,4 z_0.$$

При  $z_0 = 50$  см величина  $a$  будет составлять около 7 м, что для пучка с расходимостью  $\pm 10^\circ$  делает совершенно неприемлемым и этот вариант разделения частиц в поперечном магнитном поле.

Можно несколько увеличить угол поворота частиц с  $270^\circ$  до  $280-290^\circ$ , т.е. сделать пучок наклонным на  $10-20^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости. В этом случае величина  $a$  уменьшается до  $8,9 z_0 \div 6,2 z_0$  ( $4,5 \div 3,1$  м), что все равно еще очень далеко до приемлемой величины  $a$ , равной 1,0 - 1,5 метра.

Наиболее удовлетворительным вариантом разделения частиц по массам представляется вариант отклонения частиц на угол  $90^\circ$  в поперечном однородном магнитном поле, изображенный на рис. 5.

В магните МС-4 катушки возбуждения раздвигаются на дополнительную величину 80 см. В образовавшийся промежуток вставляется вакуумная камера с зазором 15-20 см и с круглыми крышками из железа диаметром около 80 см, плотно примыкающих к катушкам магнита. Мезонный пучок на выходе широкоугольной линзы подтормаживается в ее фокусе и затем проходит через одну секцию магнитной квадрупольной линзы с апертурой 20-30 см, которая фокусирует пучок в аксиальной плоскости магнита МС-4 и дефокусирует его в медианной плоскости этого магнита. При отклонении пучка на  $90^\circ$  происходит широкоугольная фокусировка пучка в медианной плоскости и вторая секция магнитной квадрупольной линзы, поставленная симметрично на выходе пучка из магнита, окончательно формирует изображение отклоненного пучка на расстоянии от центра магнита МС-4, равном расстоянию от центра этого магнита до промежуточного фокуса пучка, где происходит его подтормаживание. В такой симметричной системе, радиус кривизны в магнитном поле  $z_0$  равняется радиусу эффективной границы магнитного поля и фокусирующее действие однородного магнитного поля в медианной плоскости будет эквивалентно действию тонкой линзы с фокусным расстоянием  $f = z_0$ . Траектории частиц в линейном приближении в рассматриваемой магнитной системе показаны на рис. 6. Обеспечивается двойная фокусировка отбираемых частиц причем линейная и угловая дисперсии всей магнитной системы равны соответственно  $\mathcal{D} = z_0$  и  $\mathcal{D}' = +1$ , что приводит к ширине изображения пучка, равной  $\Delta x = 2z_0 \Delta p/p$ , т.е. при  $z_0 = 50$  см  $\Delta x = 1$  см на  $1\% \Delta p/p$ . Это позволяет при ширине входной диафрагмы около 5 см,  $\Delta p/p = 0,05$  и выходном коллиматоре диаметром около 7 см получить примерно такой же импульсный разброс отобранных по массе частиц. В рассмат-

риваемой широкоугольной магнитной системе необходимо уменьшить сферические aberrации при фокусировке частиц в медианной плоскости магнита МС-4. Это может быть достигнуто путем создания слабого градиента магнитного поля в вертикальном направлении. Верхние траектории частиц должны проходить область более слабого магнитного поля, чем нижние траектории. Необходимый градиент магнитного поля можно будет создать увеличением зазора камеры по направлениям снизу-вверх или подходящим шиммированием магнитного поля в зазоре камеры.

#### § 4. ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СЕПАРИРОВАННЫХ МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ

Для варианта изображенного на рис. 5, на основании экспериментальных данных, полученных для несепарированных мезонных пучков на широкоугольной линзе, были выполнены оценки интенсивностей, плотностей потока и плотностей остановок сепарированных мезонных пучков. При проведении этих расчетов учитывались потери частиц из-за многократного кулоновского рассеяния (до 20%), увеличение фазового объема пучка в импульсном пространстве при его подтормаживании (до 50%), ограничение размеров пучка коллиматором (до 30%), распад пи-мезонов налету на длине поворотной магнитной системы 2,3 м.

Результаты выполненных оценок в расчете на 1 мкА падающего на мишень протонного пучка приведены в прилагаемой таблице. Там же для сравнения приведены данные для мезонных пучков, получаемых в других физических центрах. Как следует из этой таблицы, применение широкоугольных фокусирующих систем позволяет получить при одинаковых токах протонного пучка интенсивности сепарированных мю-мезонных пучков примерно на порядок больше, чем при использовании обычных каналов пучков, составленных

из квадрупольных линз и отклоняющих магнитов.

Кроме того магнитная система, изображенная на рис. 5, в случае несимметричного варианта позволяет уменьшать изображение источника в 1,5-2 раза и тем самым увеличивать плотность потока, а следовательно и мощность дозы сепарированных пучков в 2-3 раза.

## § 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены различные варианты получения сепарированных мезонных пучков на фазотроне ОИЯИ с помощью широкоугольных фокусирующих линз, промежуточного замедлителя и последующего магнитного анализа.

Наиболее перспективным является вариант, изображенный на рис. 5, в котором разделение частиц по массам осуществляется путем отклонения частиц на угол  $90^\circ$  в поперечном однородном магнитном поле. Такой вариант можно осуществить на базе магнита типа МС-4 и трех магнитных квадрупольных линз с апертурой 20 см. Преимущество этого варианта заключается в использовании готового магнита и линз, простоте конструкции вакуумной камеры и полюсных накладок, а также возможность перехода с режима работы "на медицину" в режим работы "на физику" без всяких механических перемещений путем только переключения токов в элементах магнитной системы.

Реализация этого варианта позволит увеличить примерно на один порядок интенсивности сепарированных мезонных пучков и тем самым повысить статус фазотрона ОИЯИ до уровня малых мезонных фабрик с эквивалентным током выведенного протонного пучка около 20 мкА.

ПАРАМЕТРЫ СЕПАРИРОВАННЫХ МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ

Мишень W (5 см по пучку) или Cu (5 см по пучку)  $\Delta p/p = 6\%$ , коллиматор  $6 \times 10$  см<sup>2</sup>, ток протонов 1 мкА

М-ульс частиц Р ЭВ/с	Интенсивность $I(\pi^-)$ сек <sup>-1</sup>	Плотность потока $J(\pi^-)$ сек <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup>	Плотн. останов. $n(\pi^-)$ г <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O	Интенсивность $I(\mu^-)$ сек <sup>-1</sup>	Плотность потока $J(\mu^-)$ сек <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup>	Плотн. останов. $n(\mu^-)$ г <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O	Интенсивность $I(\pi^+)$ сек <sup>-1</sup>	Плотность потока $J(\pi^+)$ сек <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup>	Интенсивность $I(\mu^+)$ сек <sup>-1</sup>	Плотность потока $J(\mu^+)$ сек <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup>	Плотн. останов. $n(\mu^+)$ г <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O	Мешки
Поверхностные мю-плюс мезоны 28									$1,3 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^5$	Cu
95	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$	W
I23	$4 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	W
I65	$4 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	-	-	-	$8,5 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$	-	-	-	W

Сравнение с пучками других центров

Центр	ЛИЯФ /I2/	RAL /I3/	LAMPF /I4/	TRIUMF /I5/	SIN /I6/	ЛЯП /I7/ (до реконстр.)
Интенсивность поверхностных мю-плюс мезонов сек <sup>-1</sup> мкА	$3 \cdot 10^4$ (не сепар.)	$3 \cdot 10^4$ (сепар.)	$2 \cdot 10^4$ (сепар.)	$2 \cdot 10^4$ (не сепар.)	$8 \cdot 10^4$ (не сепар.)	
Интенсивность сепарированных мю-минус мезонов 110 МэВ/с сек <sup>-1</sup> мкА	$5,3 \cdot 10^4$		$1,4 \cdot 10^4$		$2 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^4$



## Литература

- I. Савченко О.В. Депонированная публикация ОИЯИ, БИ-13-6255, Дубна, 1971.
2. Абазов В.М. и др. Сообщение ОИЯИ, Р13-8079, Дубна, 1974.
3. Абазов В.М., Савченко О.В. Депонированная публикация ОИЯИ, БИ-13-9782, Дубна, 1976.
4. Ярмоненко С.П. и др. Медрадиология № 2, 70, 1975.
5. Бутцев В.С. и др. Препринт ОИЯИ, Р6-8541, Дубна, 1975.
6. Butsev V.S. et al. Preprint JINR E6-8535, Dubna, 1975.
7. Абазов В.М. и др. Сообщение ОИЯИ, Р13-80-707, Дубна, 1980.
8. Абазов В.М. и др. Тезисы докладов симпозиума "Радиационная аппаратура для лучевой терапии" (Москва, 23-26 мая 1989 г.), стр. 29, Москва, 1989 г.
9. Грошев Л.В., Шапиро И.С. Спектроскопия атомных ядер, стр. 107 Москва, 1952.
10. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, стр. 380, Ленинград, 1968 г.
11. Burgov N.A. et al. Nucl.Instr.and Meth., 12, № 2, 316, 1961
12. Волченков В.А. и др. Препринт ЛИЯФ-617, Л., 1980  
Абросимов Н.К. и др. Препринт ЛИЯФ-622, Л., 1980
13. Eaton G.H. et al. Nucl.Instr.and Meth., A269, 483, 1988.
14. Lisenko W.P. et al. IEEE Trans. NS-22, № 3, p.1593, 1975.  
Badertscher A. et al. Nucl.Instr. and Meth., A238, 200, 1985.
15. Al-Qazzar N.M.M. et al. Nucl.Instr.and Meth., I74, 35, 1980
16. SIN Jahresbericht. P. 1319, 1975.  
SIN Jahresbericht. P. **58**, 1978.
17. Роганов В.С. ОИЯИ, БИ-9-4707, Дубна, 1969.

## Подписи к рисункам

- Рис. 1. Действующая широкоугольная линза для получения пучков несепарированных мезонов. Интервал углов захвата  $\theta = (10,45^\circ - 21,77^\circ)$ . Аксептанс по телесному углу - 0,34 ср. Угловая расходимость пучка на выходе линзы  $\pm 10^\circ$ .
- Рис. 2. Вариант широкоугольной линзы для получения пучков сепарированных пи- и мю-мезонов. Первоначальный импульс мезонов 55 МэВ/с. Допустимый разброс по импульсу -  $\pm 1$  МэВ/с. Интервал углов захвата -  $\theta = (36^\circ - 46^\circ)$ . Аксептанс по телесному углу - 0,72 ср. Положение первого фокуса - 190 см, второго - 380 см.
- Рис. 3. Вариант получения сепарированных мезонных пучков с помощью дополнительной соленоидальной короткой магнитной линзы, состоящей из двух катушек от магнита МС-4, окруженных железным экраном. Пояснения в тексте.
- Рис. 4. Вариант получения сепарированных мезонных пучков путем отклонения в поперечном неоднородном магнитном поле. Пояснения в тексте.
- Рис. 5. Вариант получения сепарированных мезонных пучков путем отклонения в поперечном однородном магнитном поле. Пояснения в тексте.
- Рис. 6. Траектории частиц в магнитной системе, изображенной на рис. 5.

T/R=2= .035 1/CM=2  
P=183.6 MEV/C TETA=(10. 45. 21. 77) T-ANGLE=. 344 Z-CROS=405 CM R-CROS=3.14 CM

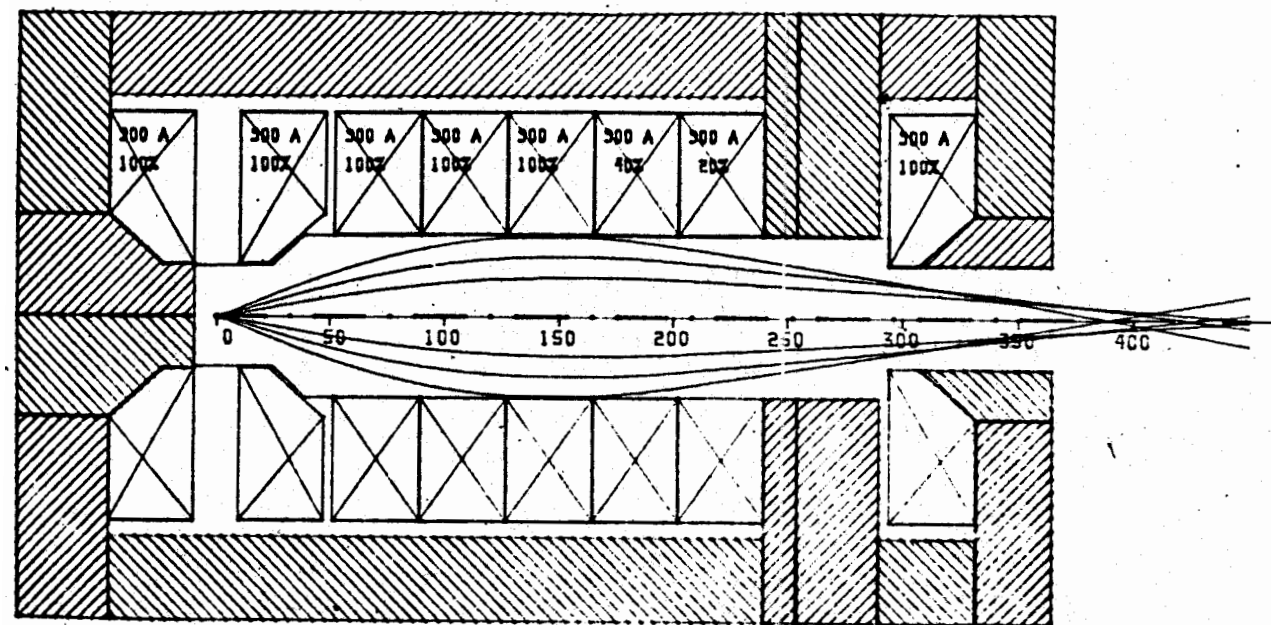


Рис. 1

P=55+/-1 MEV/C TETA=(36. 46) T-ANGLE=. 72 Z1=190 CM Z2=380 CM

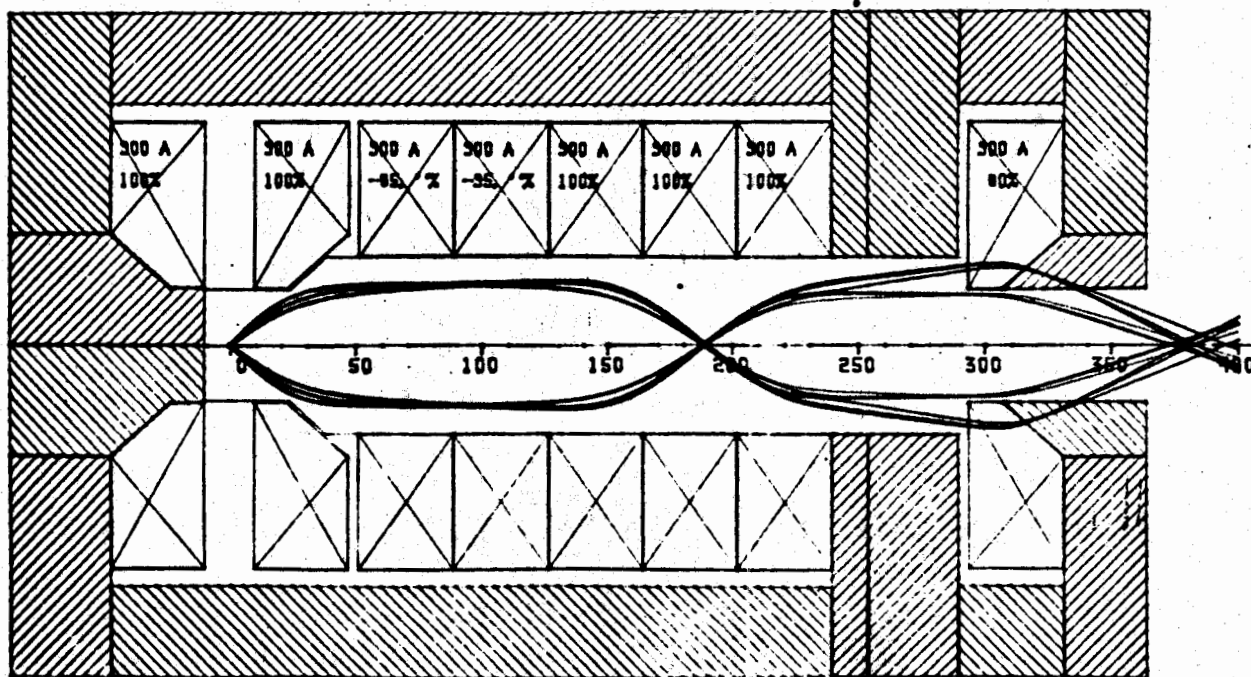


Рис. 2.

Короткая магнитная линза  
из двух катушек типа МС-4  
окруженных железным экраном

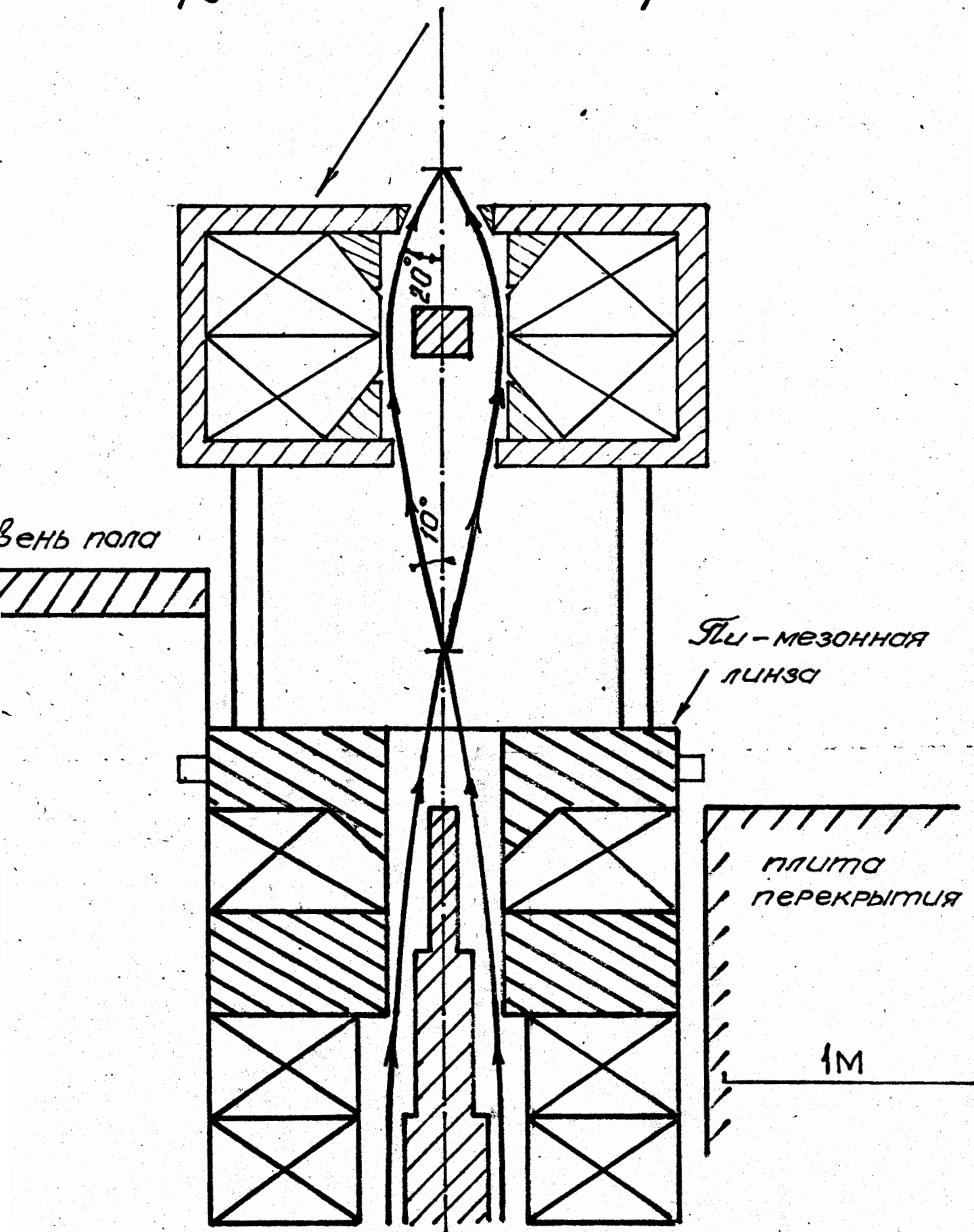


Рис. 3

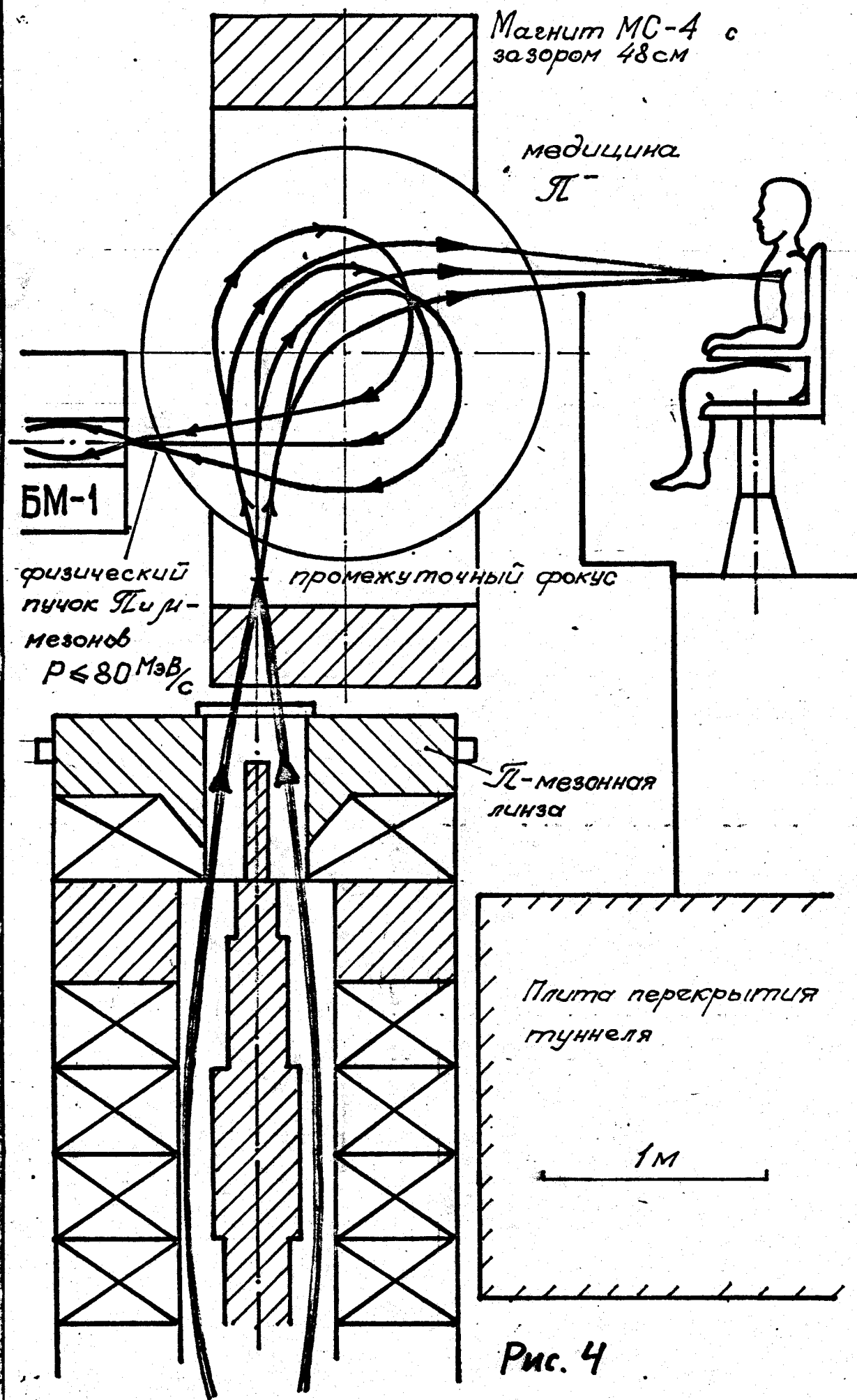


Рис. 4

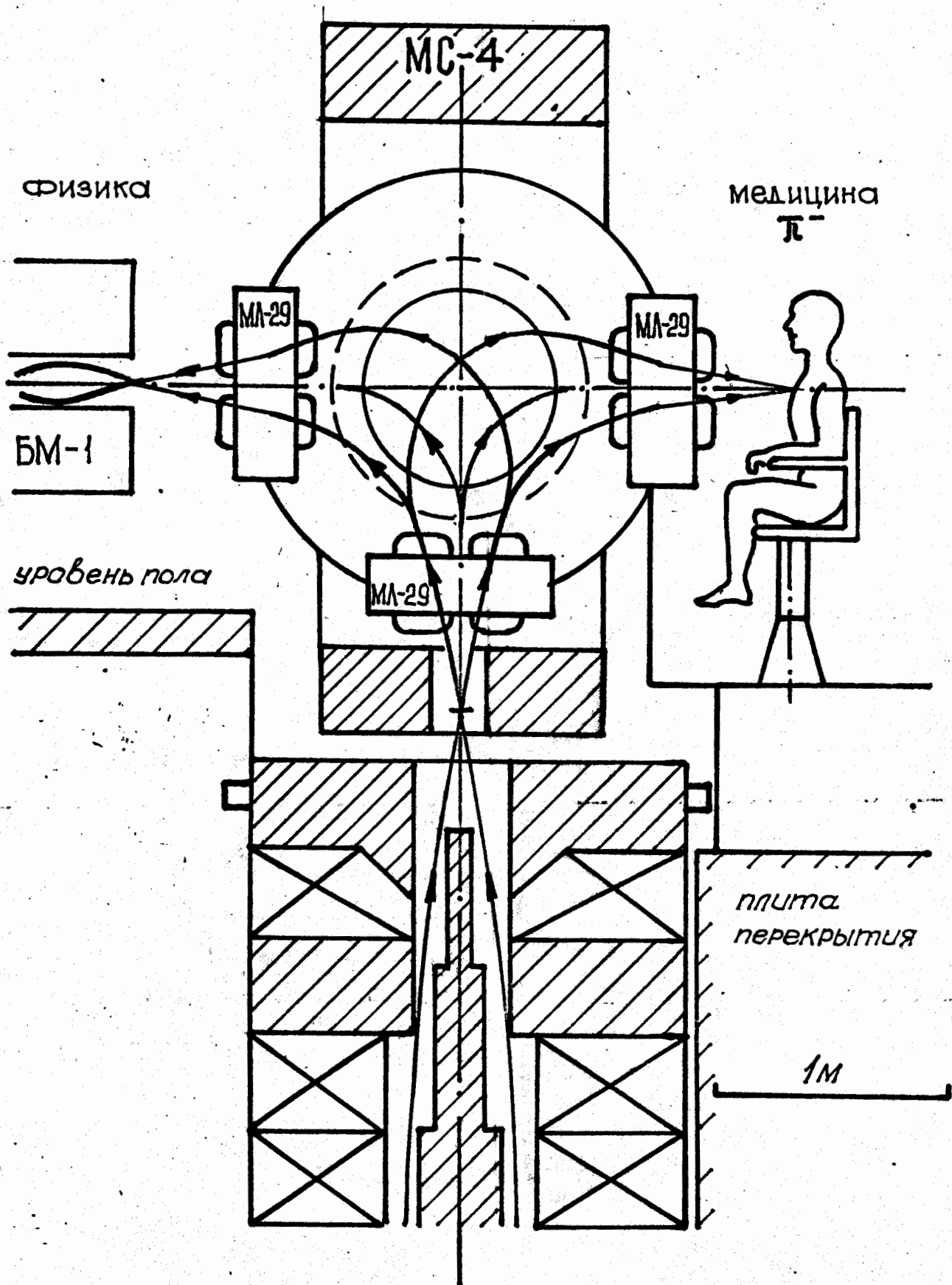
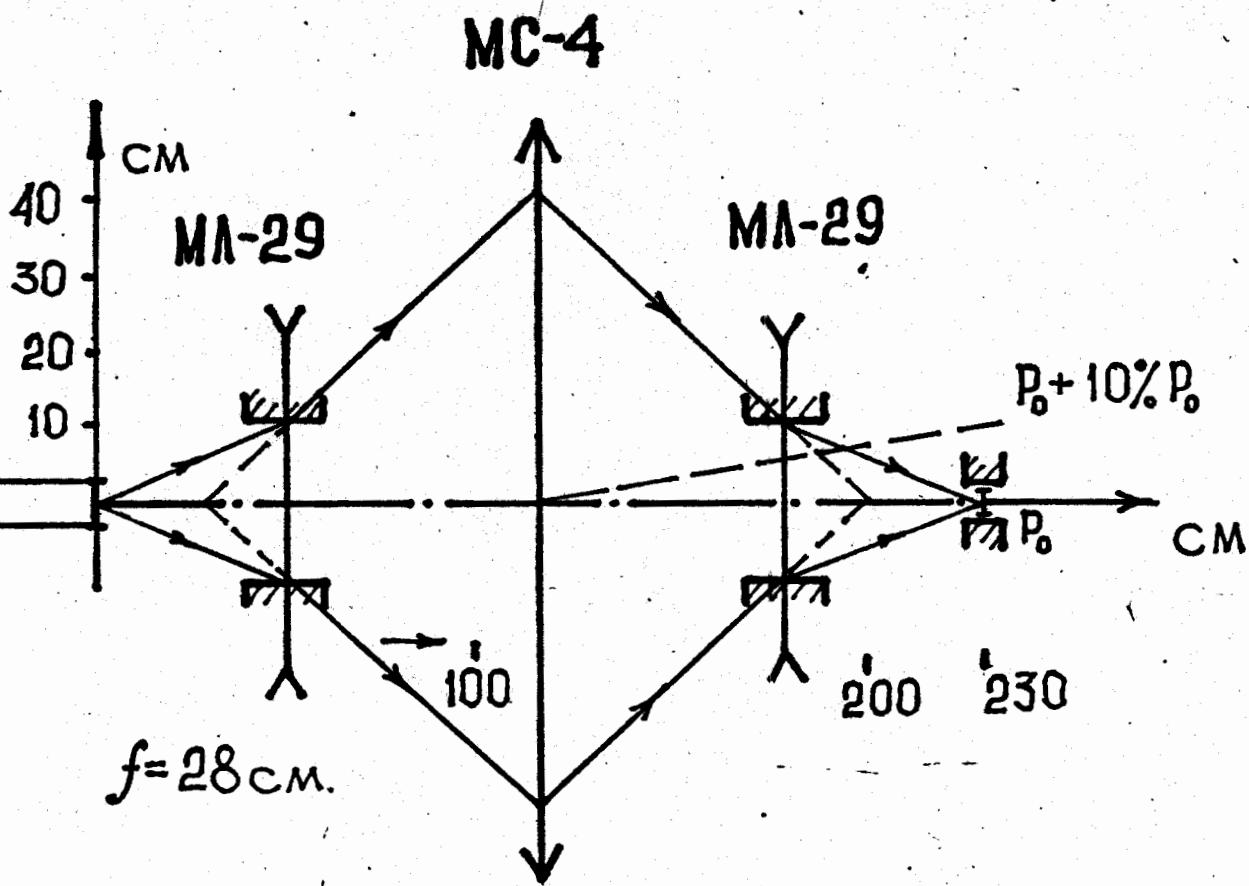
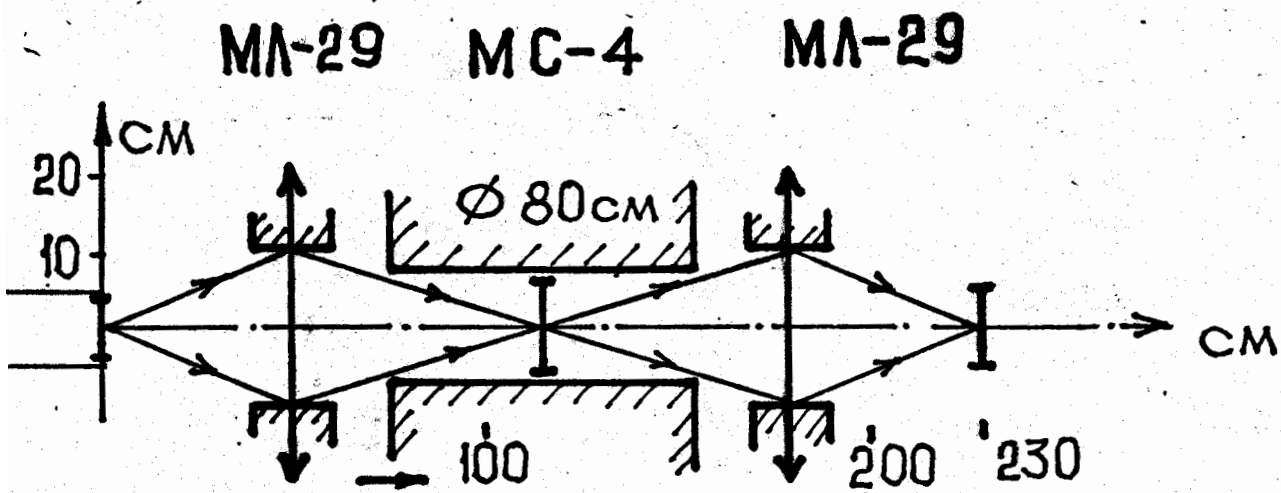


Рис. 5



Траектории частиц в линейном приближении в медианной плоскости магнита МС-4



Траектории частиц в линейном приближении в аксиальной плоскости магнита МС-4

Рис. 6