

18  
E-83  
555



С.К. Есин, Л.П. Зиновьев, К.П. Мызников, В.П. Саранцев

555

НАСТРОЙКА  
ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПУЧКА ПРОТОНОВ,  
ВХОДЯЩЕГО В СИНХРОФАЗОТРОН

Дубна 1980 год

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С.К.Есин, Л.П.Зиновьев, К.П.Мызников, В.П.Саранцев

НАСТРОЙКА  
ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПУЧКА ПРОТОНОВ,  
ВХОДЯЩЕГО В СИНХРОФАЗОТРОН

729/10 чр.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Интенсивность ускоренных в синхрофазотроне частиц существенно зависит от параметров вводимого пучка /размеров, угла и разброса по энергии/. Достаточно сказать, что захваченные в режим ускорения частицы имеют при входе в камеру угол расходимости не более, чем  $\pm 15'$  [1]. Жесткие требования накладываются и на энергию инжектируемых частиц. Частицы должны отличаться по энергии не более, чем на 0,5%. Из этого видно, что правильная настройка пучка на входе в ускоритель имеет очень важное значение. Поэтому необходимо иметь достаточно чувствительную систему контроля всех основных параметров пучка протонов. Мы опишем инжекционную систему, формирующую пучок, инжектируемый в синхрофазотрон на 10 Бэв, а также методы настройки этой системы и измерительную аппаратуру.

#### 1. Измерение распределения плотности пучка протонов по сечению и его углового расхождения

Пучок протонов из линейного ускорителя попадал на, так называемый, участок ввода, схема которого изображена на рис. 1. Из этой схемы видно, что участок ввода содержит несколько элементов электронной оптики, от настройки которых зависят основные параметры пучка. Измерения размеров пучка проводились в нескольких местах: сразу после линейного ускорителя /коробка № 1/, после линзы /коробка № 2/, на входе и выходе поворотного магнита и после поворотных пластин.

Измерения проводились следующим образом: на пути пучка помещалась пластинка, полностью перекрывавшая пучок. В центре пластинки имелось отверстие диаметром в 1 мм. Частицы, проходившие в отверстие, попадали на флажок, покрытый тонким слоем  $\text{CaWO}_4$ . Флажок находился в поле зрения электронного фотоумножителя, сигнал с которого, пропорциональный числу попавших на флажок частиц, подавался на осциллограф. Для того чтобы не загрязнять опыт частицами других энергий /в частности частицами с энергией фор-инжектора/ отверстие заклеивалось алюминиевой фольгой толщиной 30 микрон.

Это приспособление, благодаря специальному устройству, можно было перемещать в любом направлении в плоскости, перпендикулярной движению пучка.

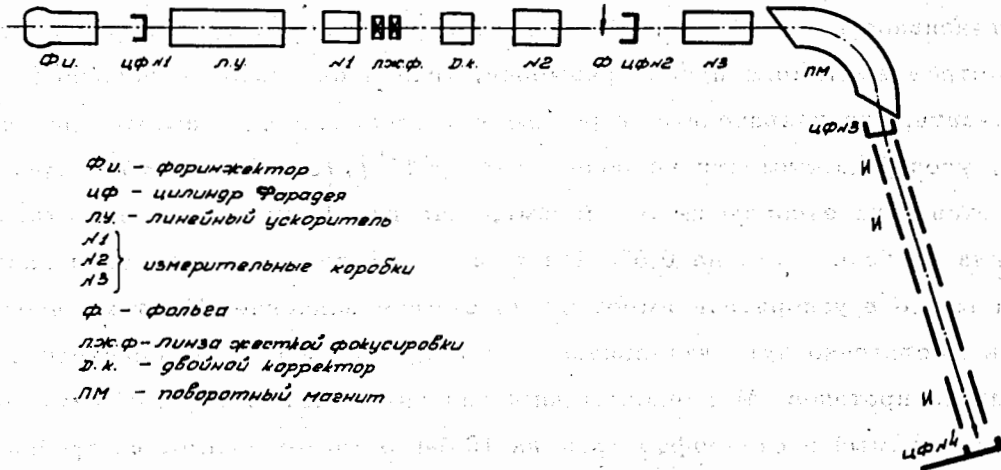


Рис. 1. Схема участка ввода частиц в синхрофазотрон.

Ниже приводится фотография этого устройства. /Рис. 2/.

На рис. 3. даны кривые распределения интенсивности по сечению, снятые в 4-х различных направлениях в коробке № 1. На основании этих измерений можно нарисовать сечение пучка протонов, выходящих из линейного ускорителя. Такое сечение показано на рис. 4.

В эти измерения внесены поправки, связанные с изменением угла зрения фотоумножителя при перемещении флажка. Размеры пучка при выходе из линейного ускорителя, приведенные на рис. 3, были бы удовлетворительными, если бы не значительное расстояние до входа в ускоритель /13м/. На этом расстоянии пучок безусловно увеличивает свои размеры. Были приведены эксперименты по измерению величины расходимости пучка. Для этого в коробке № 1 ставилась на пути пучка круглая диафрагма, диаметром в 3 мм, а на коробке № 3 проводились измерения размеров пучка, аналогичные описанным выше. Диафрагма ставилась в разные области сечения пучка.

Результаты этих опытов показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что угол расхождения наибольший для частиц, идущих в ядре пучка, но тем не менее этот угол не превышает  $10^\circ$ . Несмотря на малость угла пучок на пути от линейного ускорителя до поворотного магнита только из-за угловой расходимости увеличил бы свои размеры до 3 см. Это совершенно неудовлетворительно. Для того, чтобы уменьшить размеры и расхождение пучка при входе в

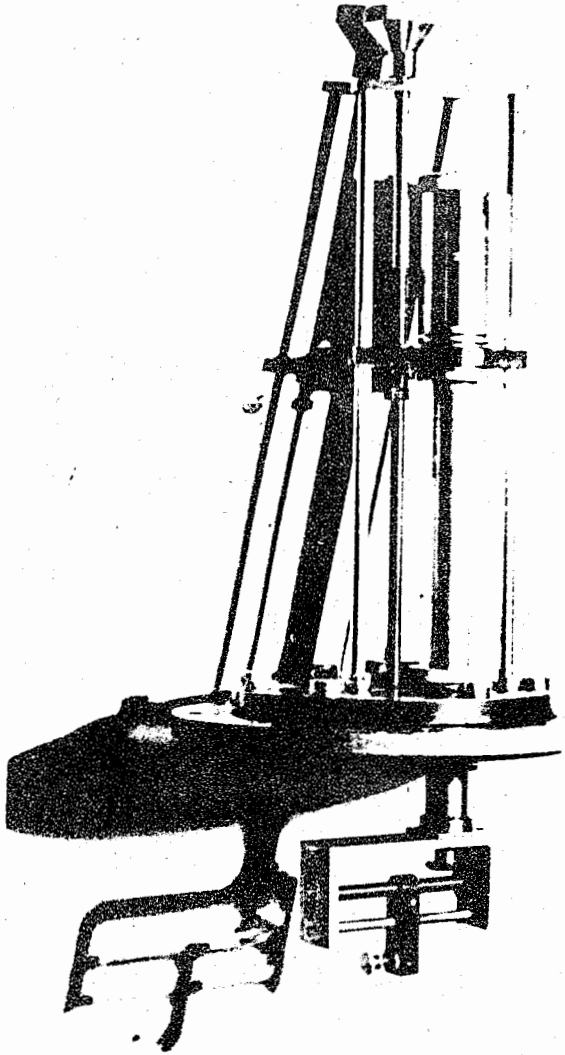


Рис. 2. Механическое приспособление, применяемое для измерения интенсивности пучка протонов по сечению.

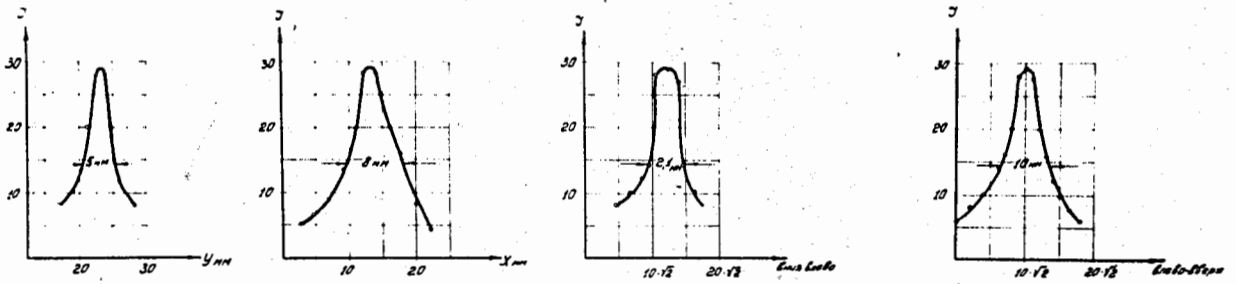


Рис. 3. Распределение интенсивности пучка протонов в различных направлениях по сечению.

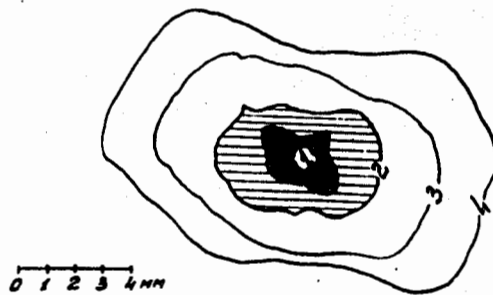


Рис. 4. Сечение пучка протонов, выходящего из линейного ускорителя.

- 1/ Область 1 составляет 25 % интенсивности пучка
- 2/ Область 2 - 60% интенсивности пучка
- 3/ Область 3 - 70% интенсивности пучка
- 4/ Область 4 - 90% интенсивности пучка.

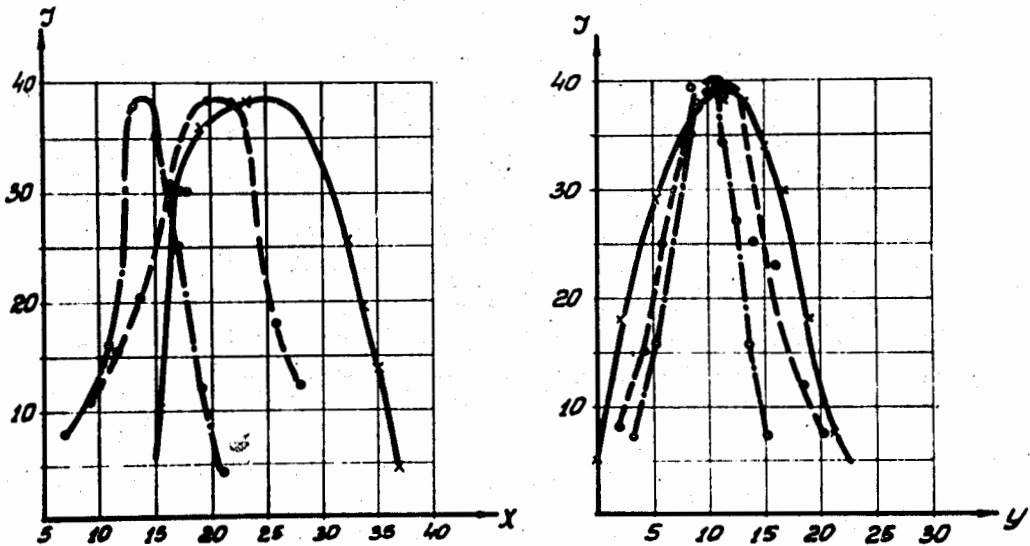


Рис. 5. Распределения интенсивности пучка протонов, снятые для различного положения диафрагмы в коробке № 1

поворотную систему на участке ввода была поставлена гиперболическая линза жесткой фокусировки. Для выбора параметров этой линзы необходимо было провести оценку фокусирующего действия линейного ускорителя.

В нашей Лаборатории был проведен расчет радиальных колебаний в линейном ускорителе. Из этих расчетов можно ориентировочно получить, что наименьшие размеры пучка получаются на расстоянии 1,5–2 м от выхода линейного ускорителя. Рассчитанная из этих соображений линза была поставлена на выходе Л.У. После юстировки этой линзы, которая заключалась в нахождении такого положения полюсов по отношению к пучку, при котором изменение тока в линзе не смещает центр пучка вдали от линзы, были проведены измерения интенсивности пучка по сечению на коробке № 3 /рис.6/. Было также измерено угловое расхождение пучка после линзы. Для этого диафрагма 2x2 ставилась в разных участках сечения пучка на коробке № 2 и снималось семейство кривых распределения интенсивности на коробке № 3. Результаты для измерений центральной части пучка приведены на рис. 7.

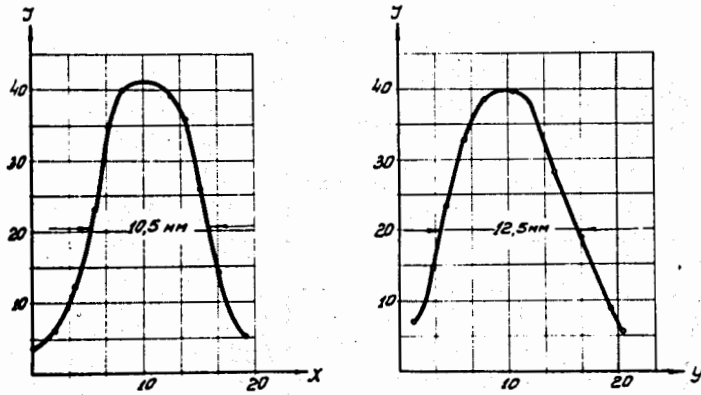


Рис. 6. Размеры пучка протонов по горизонтали и вертикали на входе в поворотную систему.

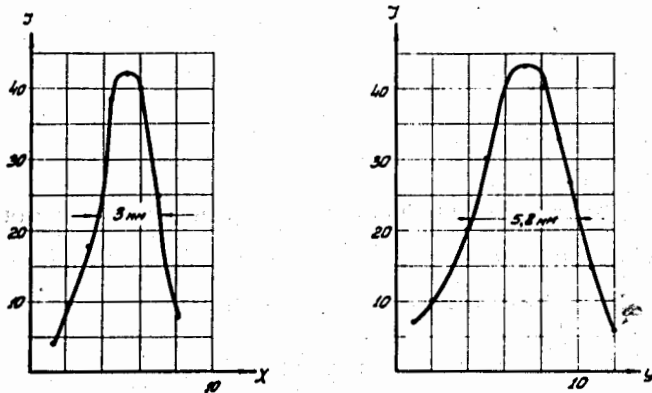


Рис. 7. Измерения расходимости пучка с линзой. Приведены распределения интенсивности пучка на коробке № 3.

На основании полученных значений угла и размеров можно нарисовать ход пучка протонов на всей длине участка ввода от линейного ускорителя до поворотного магнита так, как это сделано на рис. 8. Из этого рисунка видно, что на входе в поворотный магнит получается пучок удовлетворительных размеров.



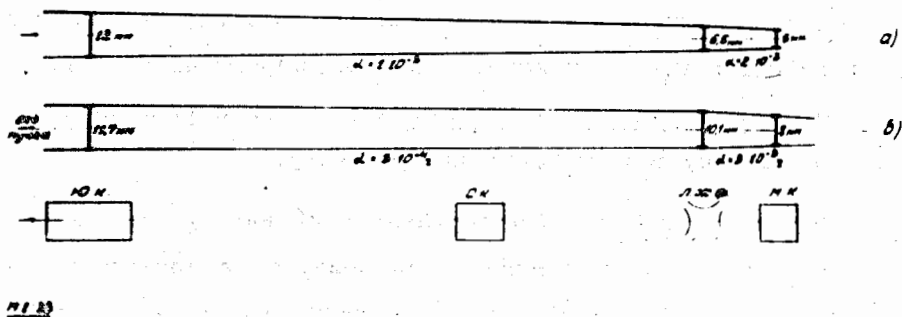


Рис. 8. Ход пучка на участке до входа в поворотный магнит,  
 а/ в вертикальном направлении,  
 б/ в горизонтальном направлении.

Размеры пучка, полученные таким построением, достаточно хорошо согласуются с результатами измерения, полученными без диафрагмирования / см.рис.6/. При этом ток линзы достаточно хорошо совпал с расчетным. Это говорит о правильности оценки фокусирующего действия линейного ускорителя.

### 11. Измерения энергетического спектра частиц

Для измерения энергетического разброса частиц необходим анализатор, дающий возможность разрешать энергии, отличные на 0,1%. Нами для подобных измерений был использован поворотный магнит. Геометрия опыта была следующей. В коробке № 2 на пути пучка ставилась круглая диафрагма диаметром 3 мм. Непосредственно на входе в поворотный магнит находилась щель размером в 0,3 мм. Такая геометрия давала возможность вырезать достаточно узкий параллельный пучок частиц, поэтому расхождением пучка из-за размеров и углов можно было пренебречь. После прохождения магнита частицы разделялись по энергиям и на расстоянии 4 м от магнита определялся размер пучка.

Для измерения спектра на пути пучка помещалась узкая пластинка, имевшая возможность перемещаться по сечению пучка. Световой сигнал, возникающий при бомбардировке пластинки пучком, передавался с помощью световода на фотоумножитель. Фотоумножитель давал сигнал, пропорциональный интенсивности частиц, попадающих на пластинку.

Для того, чтобы определенно знать какая величина расхождения пучка соответствует данному разбросу частиц по энергии, была проведена предварительная градуировка установки. Для этого менялся ток в обмотках магнита на 2% /эту операцию можно сделать с большой точностью/ и наблюдалось смещение спектра /рис. 9/. Сдвиг спектра, вызванный изменением магнитного поля

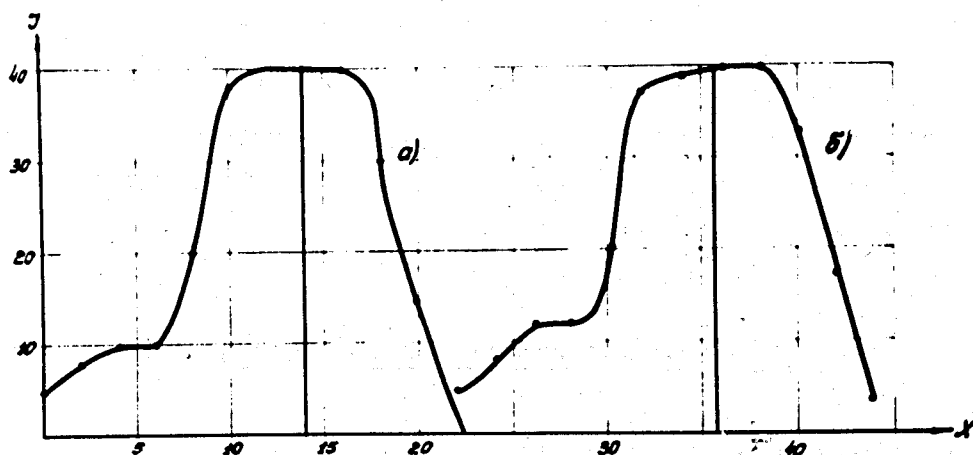


Рис. 9. Смещение спектра, вызванное изменением тока поворотного магнита. Распределение б/ снималось при изменении тока магнита на 2%.

на 2%, соответствует изменению энергии частиц на 4%. Отсюда можно определить, какое отклонение соответствует разбросу по энергии в 1%. В указанном на рис. 9 случае это соответствует 5,5 мм. Таким образом можно построить зависимость интенсивности от энергии, т.е. энергетический спектр. На рис. 10 показан спектр частиц в рабочем режиме.

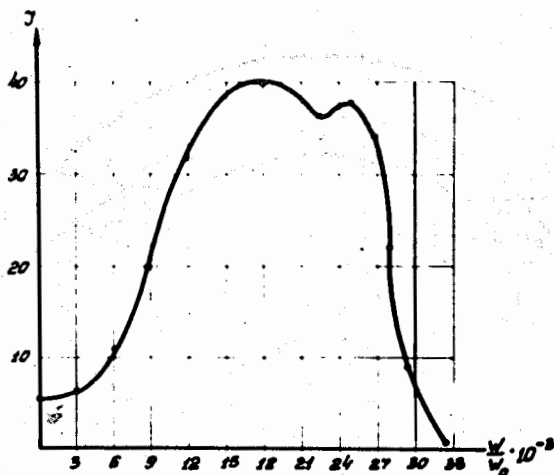


Рис. 10. Характер зависимости интенсивности от энергии частиц, выходящих из линейного ускорителя /спектр частиц/.

### 111. Настройка поворотного магнита

Для ввода частиц в камеру синхрофазотрона применена отклоняющая система. В связи с тем, что угол отклонения велик и составляет  $90^\circ$ , в синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований применена, наряду с электростатической, магнитная отклоняющая система. Обыкновенный поворотный магнит с "градиентной" фокусировкой страдает тем недостатком, что пучок на выходе из такого магнита имеет значительный угловой развор, обусловленный в первую очередь энергетическим разбросом частиц, выходящих из линейного ускорителя. Исходя из этого, была рассчитана [2] и затем изготовлена поворотная система с "градиентной" и краевой фокусировкой. Эта система была изготовлена так, что показатель поля и краевые углы /см.рис. 11/ могут меняться в широких пределах и позволяют осуществлять различные варианты впуска частиц в камеру. В качестве одного из основных требований, предъявляемых к этой поворотной системе, было требование уменьшения влияния энергетического разброса частиц на угол и размер пучка на входе в синхрофазотрон.

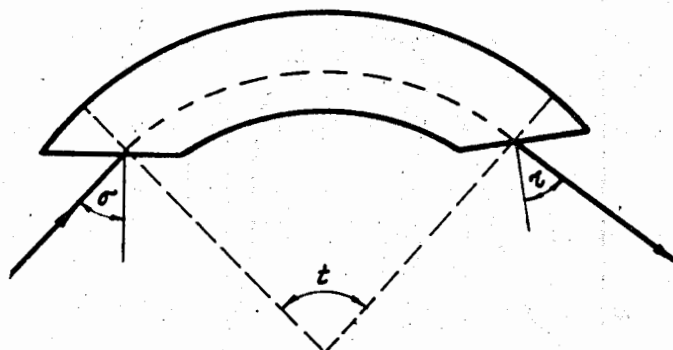


Рис. 11. Схема устройства поворотного магнита и угловые насадки, обеспечивающие краевую фокусировку.

С учетом этого требования, производилась настройка поворотной системы. Первый этап настройки состоял в том, чтобы подобрать угол  $\tau$  таким, чтобы разброс по энергии не влиял на размеры пучка на выходе поворотных пластин. Для этого пучок диафрагмировался в двух местах на входе в поворотную систему. Первая диафрагма ставилась на средней коробке размером 2x2 мм. Непосредственно на входе в поворотный магнит ставилась вертикальная щель размером в 0,3 мм. Щели были поставлены для того, чтобы исключить влияние размера и угла пучка на входе в поворотную систему.

Размеры измерялись тем же способом, что и при измерении спектра. Подбирался угол  $\tau$  таким, чтобы при изменении тока в магните /это соответствует изменению энергии пучка/ положение пучка после поворотного магнита оставалось постоянным. Результаты такой предварительной настройки показаны на рис. 12 и 13.

Из рис. 12 видно, что наличие угла  $\tau$  сокращает размеры пучка, так как компенсируется расхождение из-за энергетического разброса. Из рисунка 13 видно, что поворот в такой системе не зависит от энергий частиц. На рис. 13 приведены 2 распределения частиц для двух значений тока в поворотном магните, отличающихся на 4%.

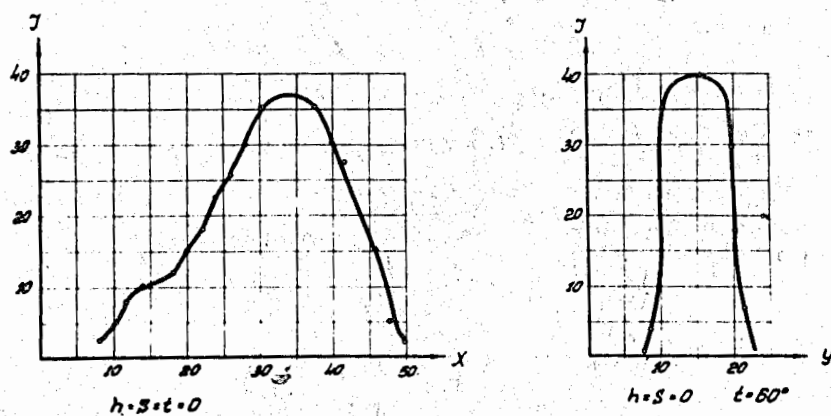


Рис. 12. Влияние угла  $\tau$  на размер пучка, вышедшего из поворотной системы.

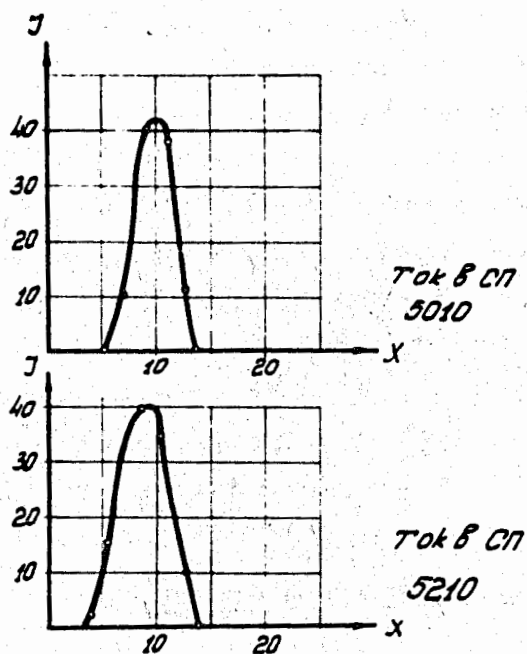


Рис. 13. Влияние изменения тока поворотного магнита на положение пучка при подобранном значении угла  $\tau$ .

Положение пучка, как видно из рисунка, меняется при этом несущественно. На этом этап настройки был закончен. Целью второго этапа явилась настройка второго краевого угла  $\sigma$ .

Подбор  $\sigma$  и  $n$  /показатель спада магнитного поля по радиусу/ позволяет исключить зависимость положения пучка при выходе из поворотных пластин от изменения размеров пучка, входящего в поворотный магнит, а также уменьшает размер пучка, выходящего из отклоняющей системы.

Геометрия пучка при настройке  $\sigma$  была той же, что и на первом этапе настройки.

Настройка велась следующим образом. Выставлялись расчетные значения  $\sigma$  и  $n$  и делались измерения положения пучка на выходе из магнита. После этого магнит передвигался в направлении, перпендикулярном входному пучку, и измерения повторялись. Выбиралось такое значение  $\sigma$  и  $n$ , при котором пучок не менял своего положения от изменения места входа в магнит.

На рис. 14 показаны 2 последовательно снятые кривые распределения интенсивности по сечению пучка для подобранных значений  $\sigma$  и  $n$ , при изменении места входа пучка в магнит на 20 мм. После предварительной настройки поворотного магнита были сняты все диафрагмы и проконтролированы размеры пучка по всему тракту от поворотного магнита до выхода из поворотных пластин. Пучок был примерно параллельным и его размеры были гораздо меньше размеров пластин /70 мм/. Но при этом оказалось, что пучок имеет недопустимо большие размеры по вертикали. И тогда начался последний этап настройки - подбор всех параметров  $\tau$ ,  $\sigma$  и  $n$  для получения разумных размеров пучка как по горизонтали, так и по вертикали. Эта работа была очень кропотливой и долгой. Достаточно сказать, что при настройке магнита распределение пучка по сечению в разных местах тракта было измерено около 200 раз.

#### Проведение пучка через инфлекторные пластины

Пучок частиц, введенных в ускорительную камеру, необходимо дополнительно повернуть на угол порядка  $14^\circ$  при помощи цилиндрического конденсатора, состоящего из пяти пар пластин общей длиной 4,1 метра.

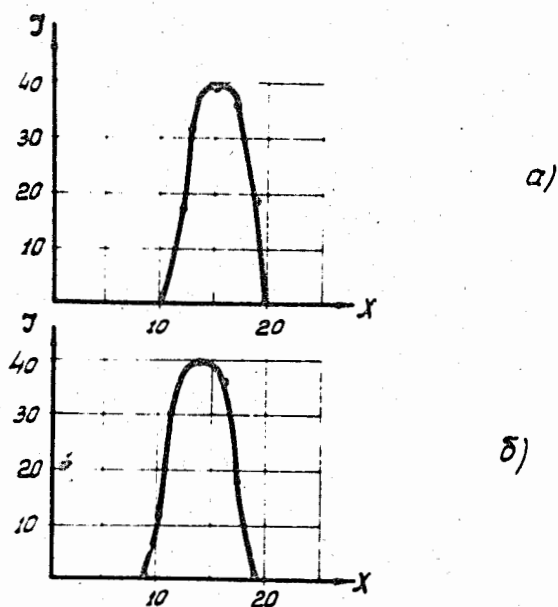


Рис. 14. Влияние места входа пучка в поворотную систему на положение пучка, выходящего из поворотных пластин при подобранном значении угла.

На рис. 15 показано расположение поворотных пластин, а также устройств, использовавшихся для проведения пучка через пластины.

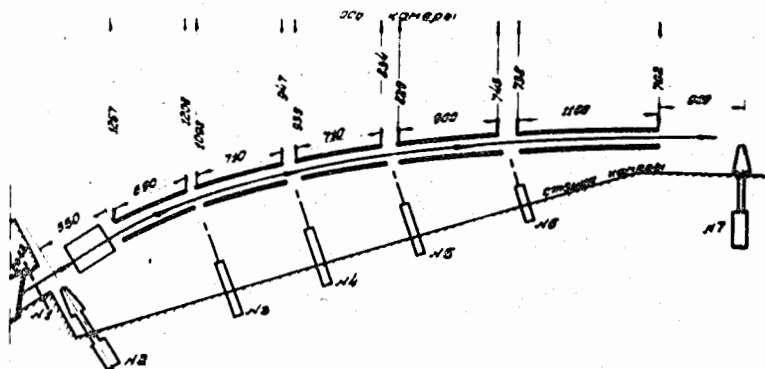


Рис. 15.

Предварительно был произведен расчет установки пластин в предположении, что траектория частицы имеет одинаковую кривизну на всей длине пластин. Расстояние между пластинами было принято равным 7 см. В расчете предполагалось, что на протяжении всего конденсатора ядро пучка проходит по середине зазора между пластинами и только в последней по ходу пучка паре меняет свою траекторию так, что выходит из нее вблизи заземленной пластины, по касательной к ней. На основании расчета, пластины были выставлены по отношению к центральной оси камеры, как показано на рисунке. Расчетная величина напряженности поля при этом составляет  $\sim 10,0$  кв/см.

Практически проведение пучка через отклоняющие пластины производилось следующим образом. С помощью мишени № 2 было определено положение по горизонтали ядра пучка, выходящего из поворотного магнита СП-52А. Перемещением поворотного магнита по направлению входящего в него пучка было подобрано такое его положение, чтобы ядро пучка входило в центр рабочего промежутка между пластинами. Чтобы иметь возможность контролировать положение пучка на входе в поворотные пластины, торцевые участки первой пары пластин были покрыты светящимся составом  $/CaWO_4/$ . Затем было отъюстировано вертикальное положение поворотного магнита таким образом, чтобы траектория пучка, выходящего из него, лежала в средней плоскости камеры.

По окончании указанных операций было произведено измерение распределения интенсивности пучка на входе в поворотные пластины по горизонтали и по вертикали. Результаты приведены на рис. 16 и рис. 17.

Ход пучка в поворотных пластинах наблюдался визуально. Для этого на пути пучка, непосредственно за поворотным магнитом, располагалась вертикальная щель шириною 5 мм. Координата щели соответствовала центру ядра пучка. Диафрагмированный пучок пропусклся через первую пару пластин и его световой сигнал наблюдался на экране мишени № 3. Подбором напряжения на первой паре пластин пучок направлялся в центр рабочего зазора второй пары пластин. Затем мишень № 3 устанавливалась имеющейся на ней вертикальной щелью по центру проходящего пучка и дважды диафрагмированный пучок наблюдался на следующей мишени № 4. Таким образом последовательно подбиралось напряжение на всех пластинах. Полученные значения напряжений на пластинах согласовывались с расчетными.



729/10 чр.

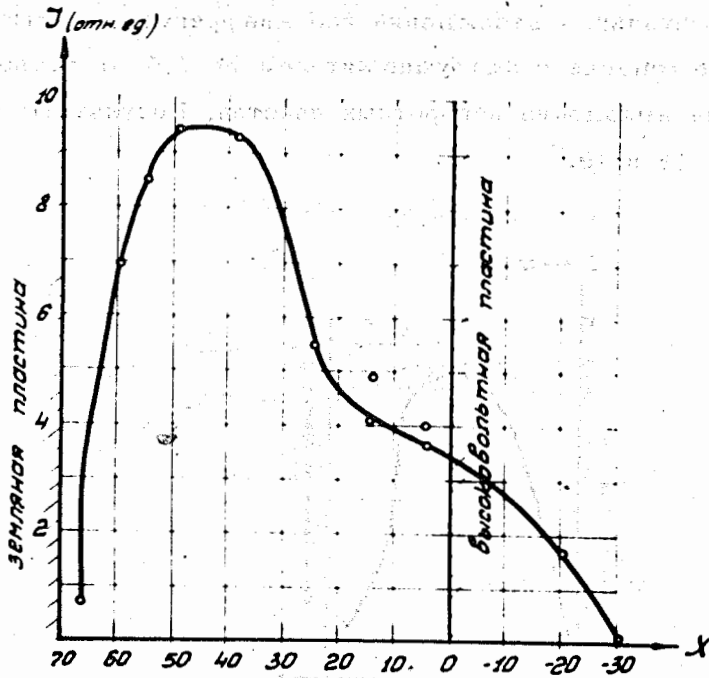


Рис. 16. Горизонтальное распределение интенсивности пучка за поворотным магнитом.

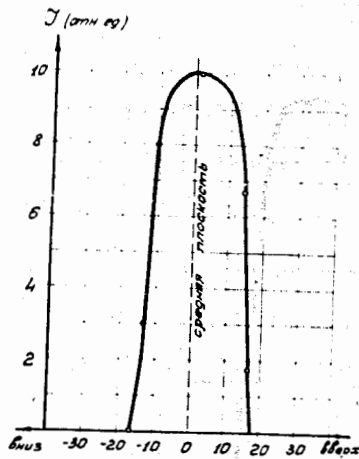


Рис. 17. Вертикальное распределение интенсивности пучка за поворотным магнитом.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

По окончании визуальных наблюдений все диафрагмы на пути пучка были удалены и с помощью мишени с фотоумножителем № 7 были проведены измерения размеров пучка на выходе из поворотных пластин. Результаты измерений представлены на рис. 18 и 19.

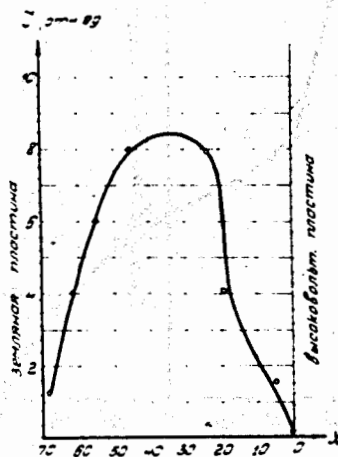


Рис. 18. Горизонтальное распределение пучка, входящего в камеру синхрофазотрона.

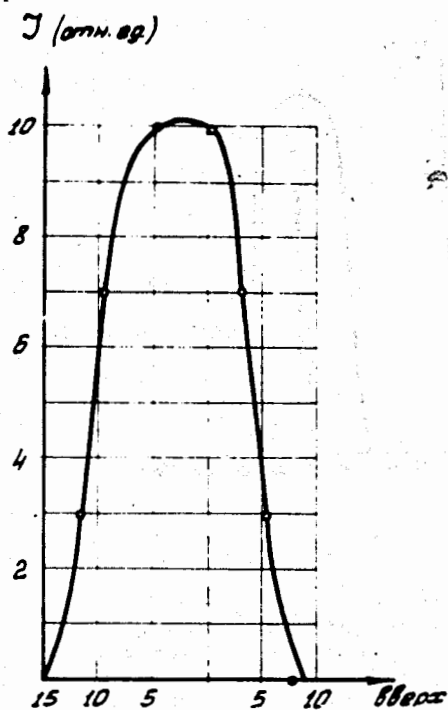


Рис. 19. Вертикальное распределение пучка, входящего в камеру синхрофазотрона.

Измерение угловой расходимости пучка, выходящего из поворотных

пластин

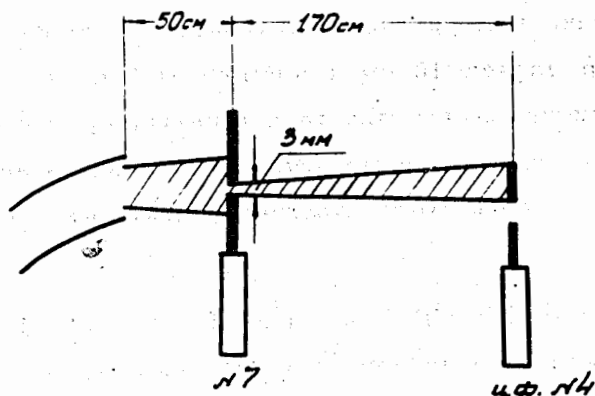


Рис. 20.

Схема эксперимента показана на рис. 20. На мишени № 7 была установлена вертикальная щель шириною 3 мм. Положение мишени было выбрано таким, чтобы через щель проходила наиболее интенсивная часть пучка. Горизонтальный размер пучка, прошедшего через диафрагму, на расстоянии 1,7 м от нее измерялся с помощью цилиндра Фарадея и оказался равным 6 мм. Однако на этих измерениях могут сказываться расширения пучка из-за энергетического разброса и растущего поля. Оценка показывает, что вклад этих погрешностей мал и не превышает 10%.

Аналогичным способом проведены измерения вертикального угла пучка, выходящего из поворотных пластин. Измерения показали, что по вертикали пучок имеет сходящийся характер. Полный вертикальный угол пучка составляет  $\Delta\gamma_z = 1,5 \cdot 10^{-3}$  рад.  $\approx 5'$ .

Измерение тока пучка протонов на различных участках

инжекционного тракта

Для определения интенсивности пучка протонов на различных участках инжекционного тракта была разработана и изготовлена система измерительных

устройств. Все эти устройства работают по принципу заряда пучка /так называемого, цилиндра Фарадея/ и потому позволяют производить измерения абсолютной величины тока частиц. Схема расположения измерительных устройств показана на рис. 1.

Первое по ходу пучка измерительное устройство ЦФ-ФИ представляет из себя латунный цилиндр длиной 15 см и диаметром 5 см с откидным дном, которое перекрывает пучок при включении тока в катушке, расположенной аксиально с цилиндром. Одновременно магнитное поле, создаваемое катушкой, используется для предотвращения ухода вторичных электронов с измерительного цилиндра.

Аналогичное устройство ЦФ-ЛУ было применено для измерения интенсивности пучка, выходящего из линейного ускорителя. В процессе измерений было замечено, что через линейный ускоритель проникает небольшая компонента тока частиц с энергией форинжектора. Чтобы предотвратить попадание этих частиц в ЦФ-ЛУ на расстоянии 10 см, перед ним устанавливалась алюминиевая фольга толщиной  $30 \mu$ . Рассеяние на такой фольге для протонов с энергией 9 Мэв ничтожно и потому не сказывается на измерениях.

Непосредственно за поворотным магнитом располагался цилиндр Фарадея, выполненный в виде прямоугольной коробки с основанием  $16 \times 6,5$  см и высотой 1 см. Величина рассеянного поля поворотного магнита, составляющая в этом районе около 1000 эрстед, обеспечивает возврат вторичных электронов на измерительную коробку.

И, наконец, на выходе из пластин на расстоянии 220 см от последней пары был также установлен цилиндр Фарадея.

В таблице № 1 приведены результаты измерений на различных участках инжекционного тракта.

Таблица № 1

Ме сто измерения	ЦФ-ФИ	ЦФ-ЛУ	ЦФ-ПМ	ЦФ-И
Число протонов в импульсе	$7 \cdot 10^{13}$	$7,3 \cdot 10^{11}$	$6,7 \cdot 10^{11}$	$3,7 \cdot 10^{11}$

Ослабление пучка в 100 раз при прохождении через линейный ускоритель объясняется рассеянием на фокусирующих сетках, условиями захвата в ускорительный режим, а также тем, что ток форинжектора содержит 25% молекулярных ионов.

Как видно из таблицы № 1, полная прозрачность всего инъекционного тракта на участке от линейного ускорителя и до выхода из инфлекторных пластин составляет 50%. Основная доля частиц /около 40%/ теряется на входе в инфлекторные пластины.

Рукопись поступила в издательский отдел

22 июня 1960 года.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.И.Векслер, А.А.Коломенский, В.А.Петухов, М.С.Рабинович. "Физические основы сооружения синхрофазотрона на 10 Бэв", приложение к журналу "Атомная энергия" № 4 /1957/.
2. А.А.Коломенский, А.Б.Кузнецов, Н.Б.Рубин. "Поворотно-фокусирующая система для ввода частиц в синхрофазотрон", препринт ОИЯИ. Р-250.