

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



6971

Экз. чит. зала
13 - 6971

В.В.Вишняков, Н.И.Журавлев, В.И.Комаров,
Г.Е.Косарев, Нгуен Мань Шат, А.Н.Синаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ
УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ИОНИЗАЦИОННОЙ
КАМЕРЫ С ПРОВОЛОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

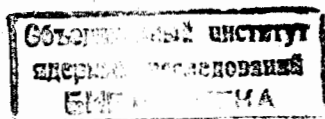
1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 6971

В.В.Вишняков, Н.И.Журавлев, В.И.Комаров,
Г.Е.Косарев, Нгуен Мань Шат, А.Н.Синаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ
УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ИОНИЗАЦИОННОЙ
КАМЕРЫ С ПРОВОЛОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ



Определение пространственного профиля выведенных пучков ускорителей является весьма важной задачей. Наиболее распространенным методом ее решения до последнего времени было применение сцинтилляционных счетчиков со сцинтилляторами, имеющими размеры порядка нескольких мм¹⁻⁴. Использование одиночного счетчика, перемещаемого в плоскости, перпендикулярной направлению пучка, требует значительного времени, а годоскоп, создаваемый для этих целей, имеет довольно сложное устройство. Кроме того введение сцинтилляторов в пучок может вызывать существенное рассеяние составляющих его частиц и тем самым изменять профиль за сцинтиллятором. Дополнительные трудности возникают при измерении профиля пучков большой интенсивности, в которых происходит быстрое радиационное разрушение сцинтилляторов; нормальная работа фотоумножителей невозможна в зонах с высоким уровнем радиации и в сильных магнитных полях /например, вблизи камеры ускорителя/.

Иногда для определения профиля пучка используются искровые проволочные камеры как с магнитострикционными линиями^{5,6}, так и с ферритовыми сердечниками. Они обладают хорошим пространственным разрешением и практически не искажают профиля пучка; для них разработаны удобные методы регистрации. Недостатком искровых камер является ограниченная скорость регистрации, поскольку число срабатываний в секунду у них не превышает $10^3 - 10^4$. Это делает нецелесообразным использование искровых камер в высокоинтенсивных пучках частиц. В последние годы вместо искровых камер стали находить применение пропорциональные камеры со схемами, регистрирующими каждую проходящую частицу^{8,9}. Такие устройства позволяют существенно продвинуться в область высоких интенсивностей измеряемых пучков.

Однако следует отметить, что все вышеперечисленные методы основаны на дискретном счете числа регистрируемых детектором импульсов, и поэтому требуется достаточно сложная электронная аппаратура, особенно в случае использования пропорциональных камер.

Более подходящим для определения профиля пучков, имеющих достаточно высокую интенсивность, является измерение тока ионизации, образуемого частицами пучка. В качестве регистратора тока удобно использовать установленную перпендикулярно направлению пучка токовую ионизационную камеру с проволочными электродами, а накопление заряда производить на емкостях, подсоединенных к проволочкам¹⁰⁻¹². Практическую реализацию указанный метод смог получить после появления промышленных полевых транзисторов с очень высоким сопротивлением в закрытом состоянии, через которые легко измерять напряжения, накопленные на емкостях. Эти напряжения можно наблюдать на осциллографе или регистрировать на многоканальном анализаторе. Такое устройство является достаточно простым и универсальным; оно обладает высоким пространственным разрешением, может работать непрерывно в пучках большой интенсивности и не вызывает искажений профиля пучка.

Используемая в описываемом устройстве ионизационная камера изображена на рис. 1. Она имеет 3 электрода размерами 160 x 160 мм²; средний электрод - сетчатый; по обе стороны от него на расстоянии 8 мм расположены электроды из нихромовой проволоки диаметром 0,1 мм. В одном из этих электродов проволочки натянуты в горизонтальной, а в другом - в вертикальной плоскости. Каждый из них состоит из 32 проволочек с расстоянием между соседними проволочками 5 мм. Стенки камеры, через которые проходит пучок, выполнены из тонкой алюминиевой фольги. Камера заполнена воздухом, находящимся при атмосферном давлении. На сетчатый электрод подается рабочее напряжение в пределах - /1000 - 3000/в. Каждая проволочка в крайних электродах подсоединена к конденсатору, вторая обкладка которого соединена с землей.

Оценим диапазон интенсивностей пучков, который можно регистрировать с помощью токовой ионизационной камеры. Ток ионизации I в камере связан с интенсивностью частиц N в пучке соотношением

$$I = k \frac{dE}{dx} \cdot x \cdot \frac{e}{c} \cdot N, \quad /1/$$

где $\frac{dE}{dx} = 2,6 \cdot 10^3$ эв/см - удельная ионизация, создаваемая

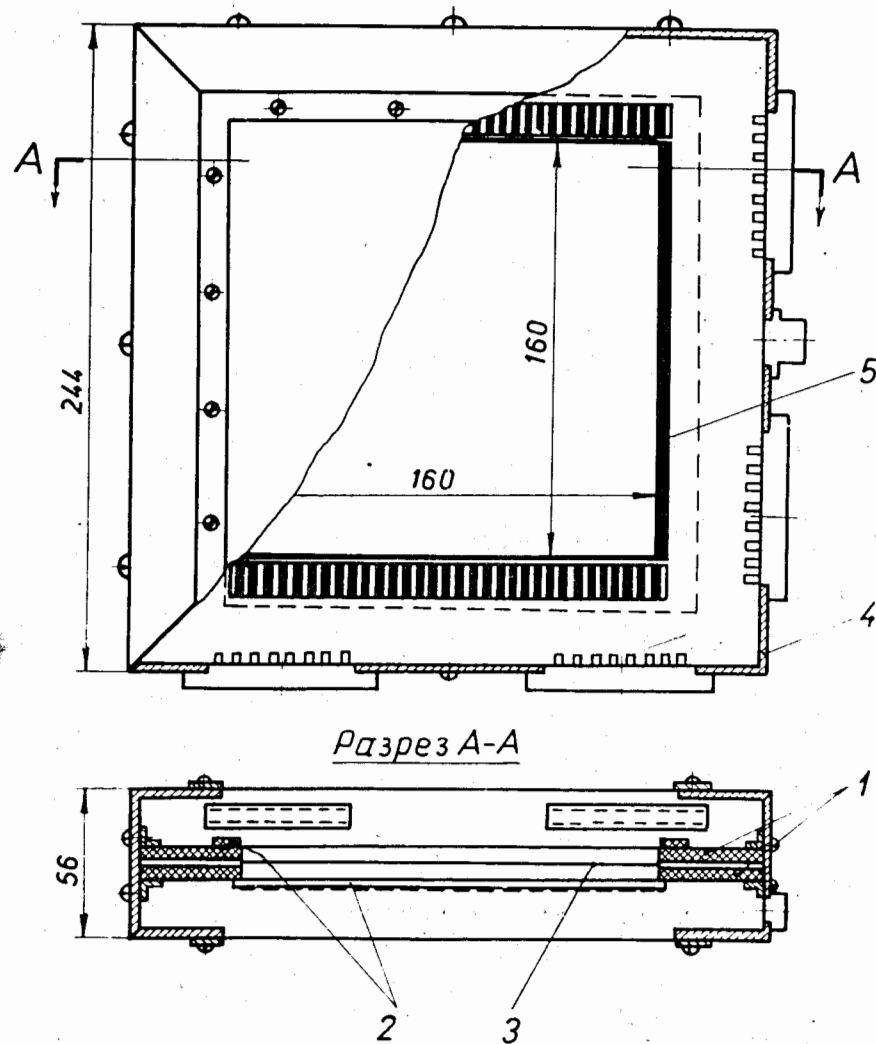


Рис. 1. Конструкция ионизационной камеры: 1 - изоляционная рамка; 2 - проволочные электроды; 3 - высоковольтный сетчатый электрод, 4 - защитный кожух, 5 - охранный кольцо.

протонами с энергией порядка 1 Гэв в камере, наполненной воздухом при атмосферном давлении; $x = 0,8$ см - расстояние между электродами камеры; $\epsilon = 34$ эв - средняя энергия, расходуемая на образование пары ионов; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ к - элементарный заряд частицы; $k = 0,5$ - коэффициент собирания ионов на электродах камеры при напряжении порядка 2,5 - 3 кв /ток насыщения не достигается/.

Таким образом:

$$I \approx 0,5 \cdot 10^{-17} N \text{ а.} \quad /2/$$

Ток, текущий через проволочку, будет заряжать конденсатор, имеющий емкость C , до напряжения

$$U = IR_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{R_3 C}}\right), \quad /3/$$

где t_3 - время протекания тока, R_3 - суммарное сопротивление утечки заряда с конденсатора. Накопление заряда на конденсаторе следует проводить в течение времени

$$t_3 \ll R_3 C, \quad /4/$$

тогда

$$U \approx \frac{I t_3}{C}, \quad /5/$$

т.е. напряжение на конденсаторе будет линейно зависеть от тока и не зависеть от сопротивления утечки. Из выражений /4/ и /5/ минимальный регистрируемый ток определяется как

$$I_{\text{мин}} \approx 10 \frac{U_{\text{мин}}}{R_3} \quad /6/$$

Принимая $U_{\text{мин}} = 0,1$ в и $R_3 = 10^{10}$ ом, получим

$$I_{\text{мин}} \approx 10^{-10} \text{ а.} \quad /7/$$

Если считать, что через одну проволочку может максимально проходить 10% общего тока пучка, то подставляя полученные

величины в выражение /2/, определим минимальную интенсивность пучка, равную

$$N_{\text{мин}} = 2 \cdot 10^8 \text{ частиц/сек.}$$

За минимально допустимую величину зарядной емкости целесообразно принять $C_{\text{мин}} = 1000$ пф, так как при меньшей величине может ухудшиться точность измерений из-за паразитных эффектов. Тогда из выражения /4/ получим $t_{3 \text{ макс}} = 1$ сек. Если исходить из требования, чтобы напряжение на емкости практически не изменялось во время его измерения при открытом полевом транзисторе в течение времени t_p , то

$$t_p \ll R_p C. \quad /8/$$

Следовательно, измерительное сопротивление R_p , на которое разряжается емкость, должно быть не менее $R_{p \text{ мин}} = 2 \cdot 10^5$ ом при $t_p = 2 \cdot 10^{-5}$ сек.

Для измерения данным методом менее интенсивных пучков следует вместо ионизационной камеры использовать ковры пропорциональных счетчиков или пропорциональную камеру, газовое усиление которых может быть доведено до 10^7 . Максимальная интенсивность пучка практически не ограничена и определяется выбором величины зарядных емкостей и временем накопления заряда.

Принципиальная схема линейной части устройства приведена на рис. 2. В качестве накопительных емкостей используются конденсаторы типа МБМ, имеющие емкость 1000пф и сопротивление утечки более 10^{10} ом. Величины емкостей подбирались с точностью /1-2/%. Накопительные конденсаторы разбиты на две группы, в которых регистрируются соответственно координаты X и Y. На рис. 2 показано по 1 из 32 каналов каждой группы. К каждому конденсатору подсоединен сток полевого транзистора КПЗ01Б /с изолированным затвором и индуцированным каналом p-типа/. Эти транзисторы играют роль линейных ключей; в закрытом состоянии они имеют сопротивление канала более 10^{10} ом, а в открытом - около 1000 ом. Все истоки полевых транзисторов каждой группы объединены вместе и через сопротивление 2 Мом соединены с землей. Поскольку отношение внутреннего сопротивления открытого ключа к истоковому сопротивлению имеет порядок 10^{-3} , то напряжение, накопленное на конденсаторе, будет практически полностью передаваться на истоковое сопротивление. Подложка транзисторов оставлена неподключенной, что увеличивает линейный диапазон работы ключей, который нахо-

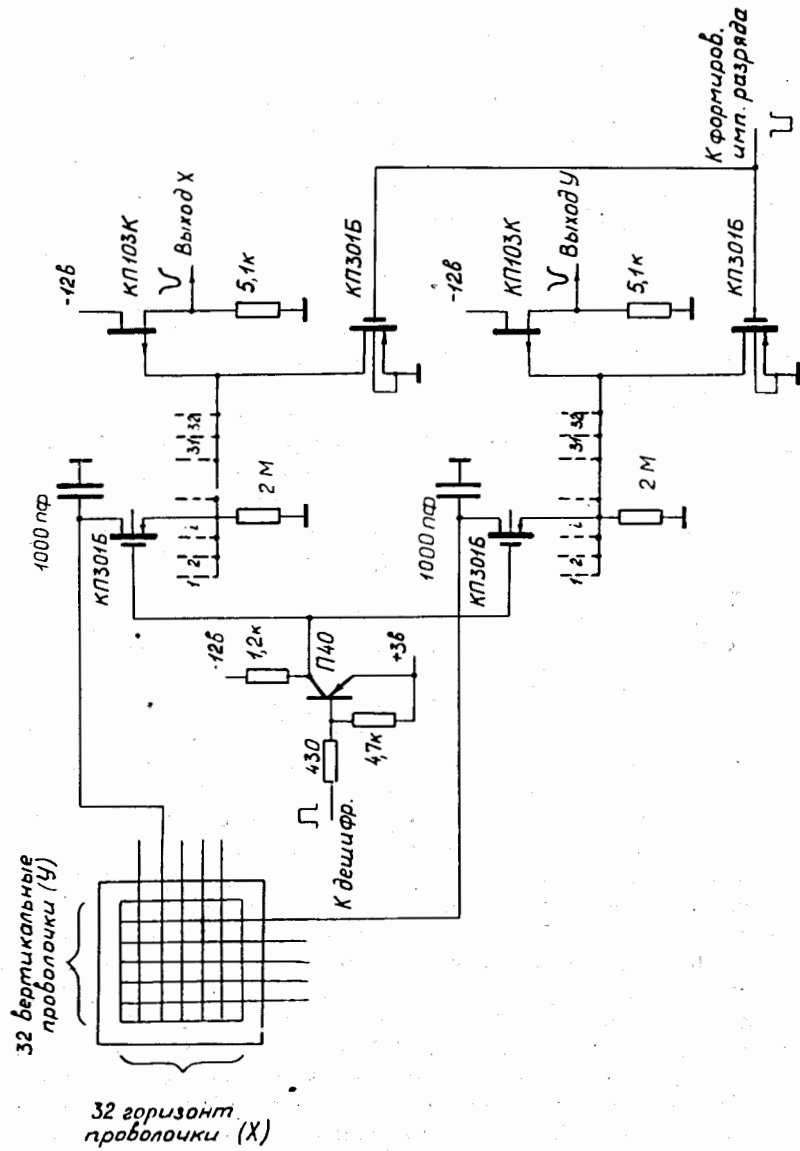


Рис. 2. Принципиальная схема линейной части устройства для определения профиля пучков частиц.

дится в пределах от 0 до -6в. Разброс токов, текущих в одинаковых условиях через открытые ключи, обычно имеет порядок 0,1% при комнатной температуре и не превышает 1% при повышении температуры до 50° С.

На затворы полевых транзисторов каждой группы, имеющих один и тот же номер, подается напряжение с соответствующего транзистора П40. Нормально эти транзисторы открыты, и их выходное напряжение, равное +3в, удерживает линейные ключи на полевых транзисторах в закрытом состоянии. При подаче на вход транзистора П40 положительного импульса с дешифратора он запирается, напряжение на его выходе делается равным -12в, и соответствующие линейные ключи открываются.

Напряжение с общего истокового сопротивления каждой группы передается на затвор истокового повторителя, собранного на полевом транзисторе КП103К /ср-п переходом и каналом р-типа/. Характеристики этого транзистора таковы, что он находится в открытом состоянии при нулевом напряжении на затворе. Напряжения с обоих истоковых повторителей подаются на выход устройства. В те интервалы времени, когда все линейные ключи закрыты, в открытом состоянии находятся общие для каждой группы ключи разряда, собранные на полевых транзисторах КП301Б, которые шунтируют сопротивление 2 Мом и поддерживают на нем напряжение, равное нулю. Для быстрого разряда накопительных конденсаторов на затворы всех линейных ключей подаются открывающие импульсы сброса при открытых ключах разряда.

Логику работы схемы можно проследить по рис. 3. Время накопления заряда на конденсаторах определяется частотой работы генератора цикла, которая может быть выбрана в пределах 1-30 гц. Вместо импульса генератора может быть использован внешний запускающий импульс. Запускающим импульсом сбрасывается в нуль двоичный счетчик. При переходе в состояние "0" последнего триггера этого счетчика снимается блокировка с генератора опроса, который начинает выдавать прямоугольные импульсы с периодом 50 мксек. Этим интервалом определяется время, отводимое для опроса каждого конденсатора.

Во время импульса генератора опроса на одной из 32 выходных шин дешифратора, определяемой состоянием счетчика, возникает разрешающий импульс длительностью 25 мксек. Этот импульс открывает соответствующий ключ на полевом транзисторе КП301Б в обеих группах, благодаря чему напряжения с выбранных конденсаторов передаются на выходы X и Y. После окончания импульса генератора подается сигнал на вход счетчика, переводящий его в следующее состояние. В интерва-

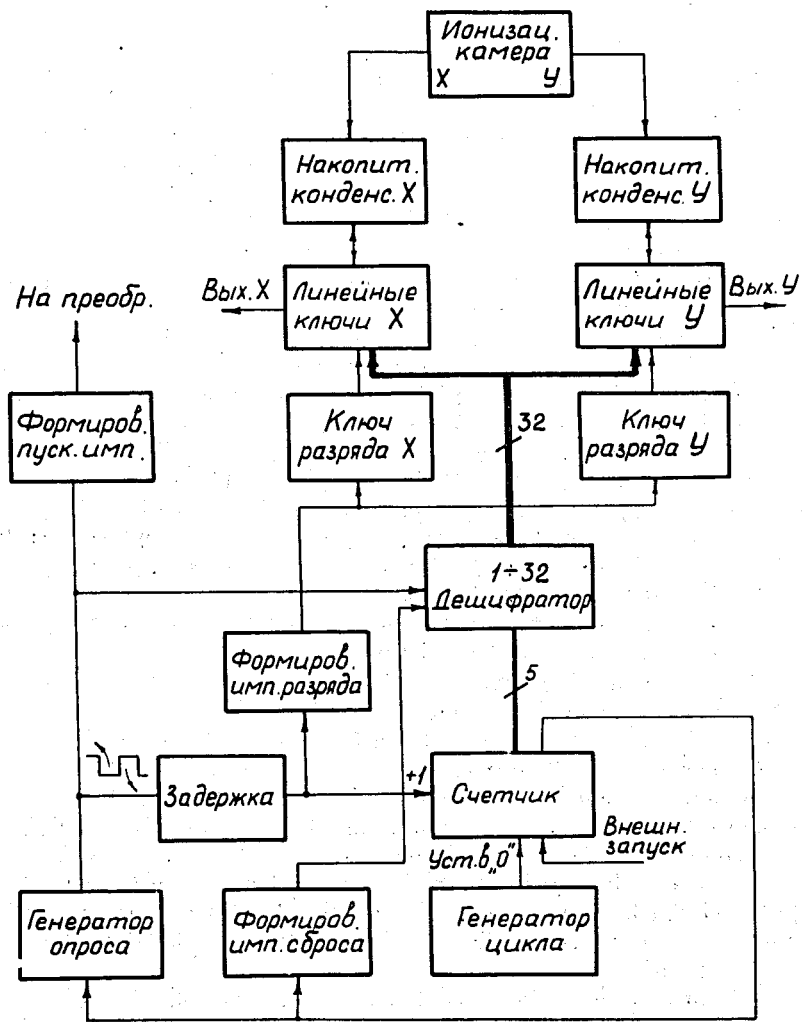


Рис. 3. Блок-схема устройства для определения профиля пучков частиц.

лах времени между импульсами генератора держится открытым ключ разряда.

После окончания опроса всех 32 конденсаторов переходит в состояние "1" последний триггер счетчика, что вызывает блокировку генератора опроса, а также формирование импульса сброса длительностью около 1 мсек. Импульс сброса открывает все 32 выхода дешифратора и осуществляет одновременный разряд всех конденсаторов, поскольку при блокировке генератора опроса ключи разряда держатся открытыми. После окончания импульса сброса возобновляется заряд накопительных конденсаторов токами, текущими через соответствующие проволоки. Следующий опрос конденсаторов начнется при приходе очередного запускающего импульса.

К выходам X и Y устройства подключаются входы двухлучевого осциллографа, на экране которого можно одновременно наблюдать обе проекции профиля пучка. При малой частоте следования запускающих импульсов удобнее применять осциллограф, имеющий трубку с большим временем послесвечения. К выходам устройства можно также подключать преобразователи амплитуда-код и записывать результаты измерений последовательно в каналы накопительного устройства многоканального анализатора. Для пуска преобразователей используется схема формирования пусковых импульсов.

Логическая часть устройства выполнена на интегральных схемах типа ТТЛ. Все электронные схемы размещены в корпусе стандарта "Вишня" и занимают 12 блокчей размером 160x40 мм.

Разработанная система позволяет как вести непрерывное визуальное наблюдение за профилем пучка, так и получать о нем за время порядка 1 мин документальные данные, из которых можно определить координаты среднего значения и полуширины распределений плотности пучка с точностью 1,5 - 2 мм.

На рис. 4 приведена сфотографированная с экрана осциллографа типичная картина обеих проекций профиля выведенного протонного пучка синхроциклотрона ОИЯИ при энергии протонов 670 Мэв и интенсивности 10^{12} протонов/сек. Импульс на обеих проекциях в правой части фотографии соответствует разряду запоминающих емкостей при подаче импульса сброса.

На рис. 5 приведены изображения профилей того же пучка синхроциклотрона, зарегистрированных с помощью анализатора АИ-4096. Ионизационная камера устанавливалась в трех различных сечениях пучка /схемы пучков приведены в работе ¹³//; а/ на входе фокусирующей магнитной квадрупольной линзы МЛ-3, расположенной в 3,5 м от камеры ускорителя; б/ в плос-

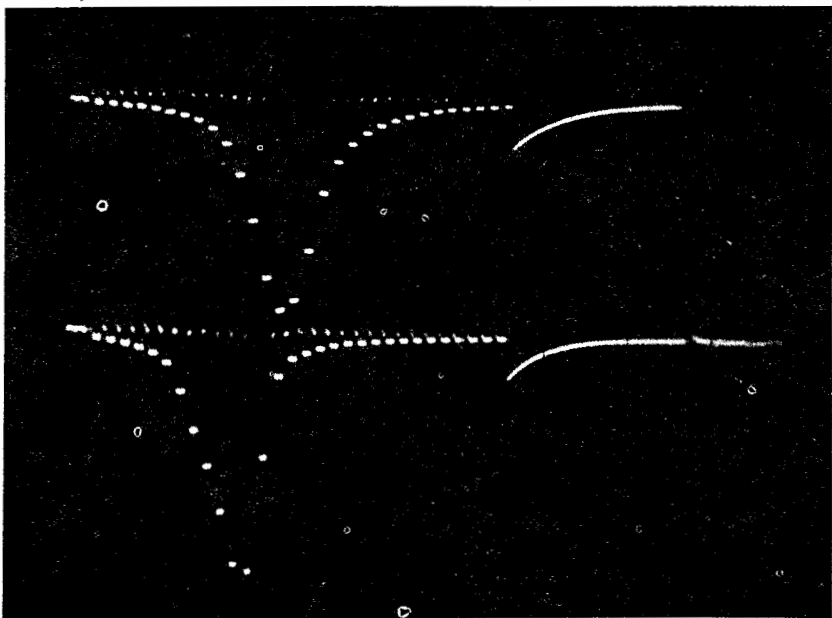


Рис. 4. Типичная картина профиля выведенного протонного пучка синхроциклотрона, сфотографированная с экрана осциллографа.

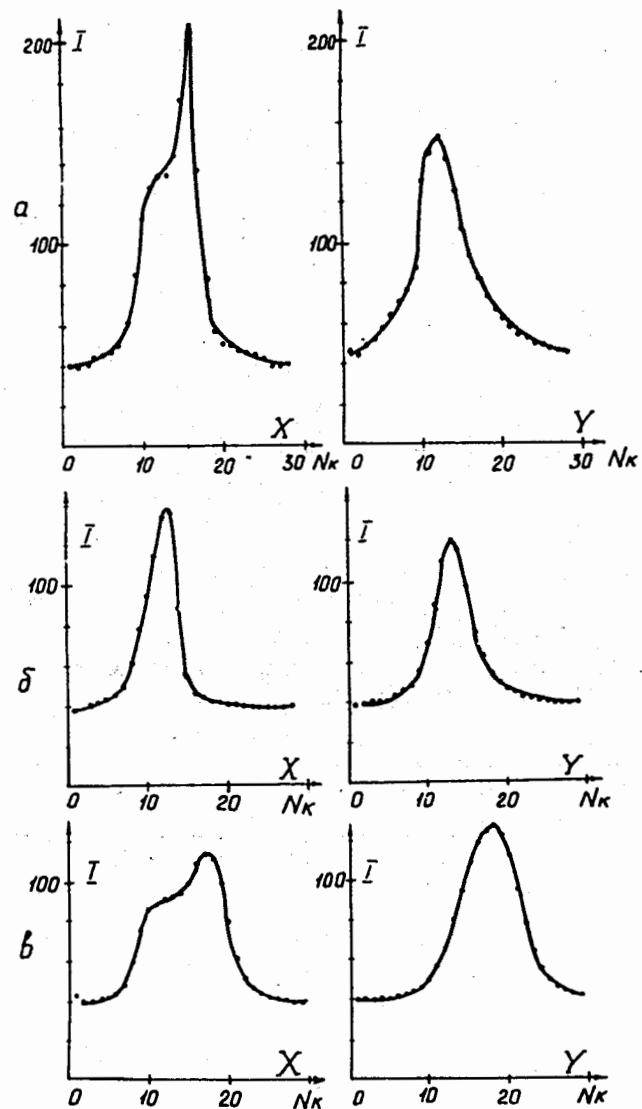


Рис. 5. Профили выведенного протонного пучка синхроциклотрона в его различных сечениях, зарегистрированные с помощью анализатора АИ-4096 /пьедестал составляет около 40 относительных единиц/.

кости фокусировки этой линзы на расстоянии 1,7 м от полюса ее выходной секции при токах возбуждения -200 а и +300 а; в/ вблизи отклоняющего магнита СП-37. Изменение напряжения на ионизационной камере в пределах 1,0 - 1,6 кв, а также трехкратное уменьшение интенсивности пучка практически не изменяет вида наблюдаемых профилей пучка.

Авторы благодарны В.Г.Зинову за полезные дискуссии, а также Б.Ю.Семенову и В.А.Антюхову за помощь при измерениях с преобразователем амплитуда - код.

Литература

1. J.Solomon, S.Andreae. RSI, 34, 1126, 1963.
2. А.С.Гаврилов, И.А.Голутвин, Ю.В.Заневский и др. ОИЯИ, 13-3503, Дубна, 1967.
3. В.Г.Лапшин, В.И.Петрухин, В.И.Рыкалин, Д.М.Хазинс, З.Цисек. ОИЯИ, Р13-3549, Дубна, 1967.
4. А.В.Демьянов, А.А.Кропин, В.С.Роганов. ОИЯИ, 1-4156, Дубна, 1968.
5. R.Gilmer, F.Neu, R.Sprakfa, J.Stropole. RSI, 38, 375, 1967.
6. H.Weisberg, V.Perez - Mendez. NIM, 46, 223, 1967.
7. В.В.Вишняков, А.В.Демьянов, В.С.Роганов, А.А.Сафрошкина, А.Н.Синаев. ПТЭ, №2, 32, 1970.
8. G.Amato, G.Petrucchi. CERN, 68-33, Geneva, 1968.
9. Ю.В.Заневский, В.Д.Пешехонов, В.Н.Рамжин, Б.С.Шировков. ОИЯИ, 13-6758, Дубна, 1972.
10. F.Horstra, J.Simanton. NIM, 68, 138, 1969.
11. J.Simanton, R.Marquardt, F.Horstra. NIM, 68, 209, 1969.
12. F.Horstra, J.Simanton. NIM, 77, 303, 1970.
13. В.С.Роганов. ОИЯИ, Б1-9-4707, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 февраля 1973 года.