

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



6973

Колл/21

P9 - 6973

Экз. чит. зала

Б.В.Василишин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев,  
И.Б.Иссинский, С.В.Каленов, С.А.Новиков,  
Б.Д.Омельченко, Н.И.Павлов, В.Ф.Сиколенко

МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПУЧКА  
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ  
(наладка и исследование системы)

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P9 - 6973

Б.В.Василишин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев,  
И.Б.Иссинский, С.В.Каленов, С.А.Новиков,  
Б.Д.Омельченко, Н.И.Павлов, В.Ф.Сиколенко

МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПУЧКА  
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ  
(наладка и исследование системы)

Направлено в журнал "Particle Accelerators"

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

## ВВЕДЕНИЕ

Запуск в 1972 г. системы медленного вывода пучка из синхрофазотрона, в которой используется резонанс  $\nu_x = 2/3$ , показал хорошее соответствие ее параметров с результатами расчетов, полученными в работе /1/. Система обладает эффективностью, превышающей 90%, и позволяет свести к минимуму нелинейные искажения эмиттанса при транспортировке пучка в краевом поле ускорителя.

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Резонансное квадратичное возмущение вводится в магнитное поле ускорителя с помощью полюсной обмотки P2, проводники которой расположены на  $R_0 \pm 20$  см /P2-A/ и  $R_0 \pm 40$  см /P2-B/ /  $R_0 = 28$  м - центральный радиус в квадранте ускорителя/. Изменение среднего значения показателя поля производится системой проводников, расположенных на  $R_0 \pm 10$  см и  $R_0 \pm 30$  см /обмотка P1/.

При введении пучка в резонанс вначале создается квадратичное возмущение, а затем, в момент перехода к режиму стола главного магнитного поля, включается ток  $i_n$  в обмотке P1. Во время его нарастания /  $\approx 50$  мсек / до значения, при котором начинается вывод, в столе главного поля заканчиваются переходные процессы. Дальнейший рост  $i_n$  происходит со скоростью, позволяющей использовать для вывода пучка весь рабочий участок стола /  $\approx 450$  мсек/.

К началу вывода септум-магнит ( $FM$ ) и следующая за ним линза ( $FL$ ) /рис. 1/ - первая ступень внутренней транспортировки пучка - с помощью пневматического механизма вводятся в рабочее положение в 35 сантиметрах от оси прямолинейного промежутка. Требуемая глубина заброса пучка в зазор магнита  $FM$  в процессе резонансной раскочки задается величиной токов ( $i_{2A}, i_{2B}$ ) в обмотке P2.

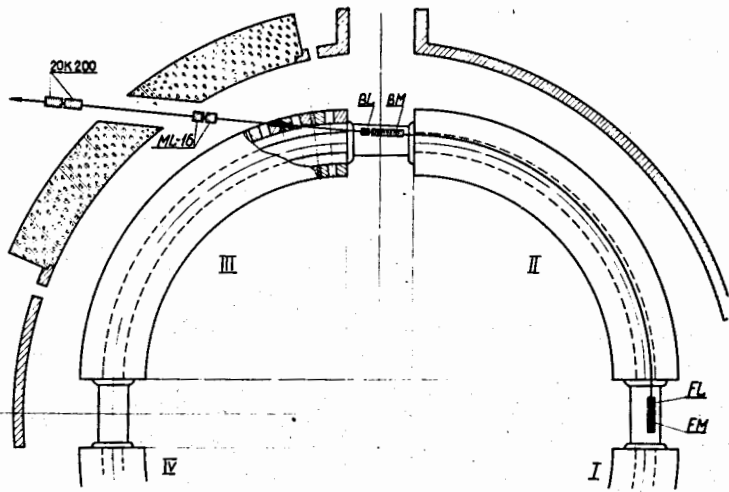


Рис. 1. Схема расположения оборудования системы медленного вывода.  $FM, FL$  - магнит и линза первой ступени внутренней транспортировки,  $BM, BL$  - магнит и линза второй ступени,  $ML-16, 20K200$  - квадрупольные линзы системы внешней транспортировки, I ÷ IV - квадранты ускорителя.

Пучок, отклоненный магнитом  $FM$  на  $\approx 12$  мрад, входит во вторую ступень внутренней транспортировки, расположенную в следующем прямолинейном промежутке. Режим перефокусировки, позволяющий в значительной степени скомпенсировать влияние нелинейностей краевого поля II квадранта, осуществлен с помощью линзы  $FL$ .

Неподвижная вторая ступень расположена в "тени" инфлектора /на расстоянии 70 см от оси прямолинейного промежутка/ и состоит из магнита ( $BM$ ) и линзы ( $BL$ ). Пройдя вторую ступень и получив отклонение  $\approx 100$  мрад, пучок выходит из камеры ускорителя, проходит через отверстия с блоках магнита, и далее, с помощью двух дублетов линз, транспортируется к первой мишени.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

Диапазон амплитуд радиальных бетатронных колебаний частиц, находящихся в условиях устойчивого движения, является функцией тока  $a = a(i_n)$ , означающей, что при данном значении тока  $i_n$  устойчивы все частицы с амплитудами от 0 до  $a(i_n)$  /см. рис. 5 работы [1]/.

Распределение частиц циркулирующего пучка по амплитудам описывается функцией  $f(a)$ , близкой к функции распределения Релея.

Для поддержания тока пучка

$$I(t) = -N_0 f(a) \frac{da(i_n)}{di_n} \frac{di_n}{dt} \quad /1/$$

$N_0$  - количество частиц циркулирующего пучка/ постоянным в процессе вывода в цепь питания обмотки P1 введена обратная связь, представляющая собой аналоговую систему непрерывного регулирования /рис. 2/.

В качестве опорного напряжения в этой системе используется величина, пропорциональная интенсивности  $N_0$  циркулирующего

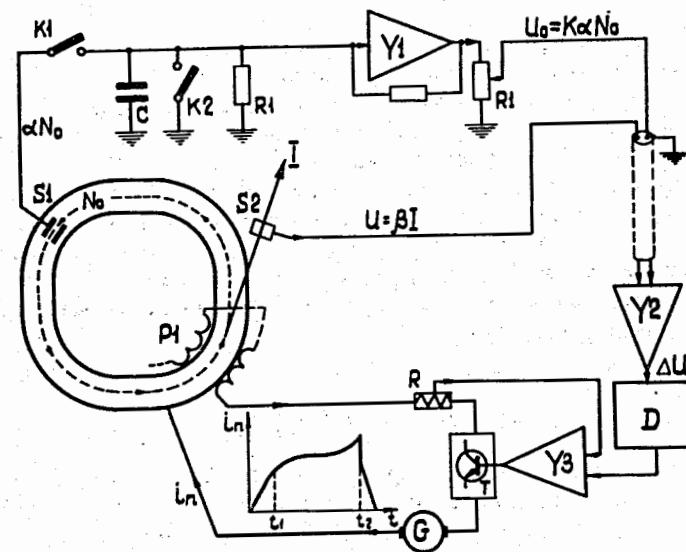


Рис. 2. Блок-схема обратной связи по току выведенного пучка.

пучка, измеряемой непосредственно перед выводом датчиком  $S1$  /индукционные электроды/. Это обеспечивает получение равномерного вывода в течение всего заданного интервала времени независимо от интенсивности ускоренного пучка. Напряжение  $aN_0 / a$  - передаточный коэффициент датчика  $S1$  /запоминается с помощью ячейки аналоговой памяти, состоящей из ключей  $K1, K2$ , емкости  $C$  и усилителя  $Y1$  с высоким входным сопротивлением /  $R_i = 40$  мом/. Регулировка опорного напряжения  $U_0 = Ka N_0$ , а, следовательно, длительности вывода  $\tau$  осуществляется с помощью потенциометра  $R1$ . Напряжение  $U = \beta I(t)$  снимается с датчика тока пучка  $S2$ . С целью исключения синфазных помех, возникающих на сравнительно протяженной линии связи /  $\approx 400$  м/, дифференциальный усилитель  $Y2$ , вырабатывающий сигнал ошибки  $\Delta U = U - U_0$ , расположен в непосредственной близости от исполнительных устройств, а линия связи выполнена двухпроводной.

Из соотношения /1/ видно, что регулирование тока выводимого пучка может быть осуществлено путем изменения скорости нарастания тока  $i_n$ . Сигнал ошибки  $\Delta U$  с выхода дифференциального усилителя  $Y2$  поступает на блок  $D$  формирования тока  $i_n$ . Выходное напряжение блока

$$U_D = \frac{aN_0}{\tau} t - \gamma \int_0^t \Delta U dt$$

сравнивается дифференциальным усилителем  $Y3$  с падением напряжения на шунте  $R$ , пропорциональным рабочему току в обмотках  $P1$ . Результат сравнения поступает на транзисторный регулятор  $T$ , корректирующий соответствующим образом форму рабочего тока  $i_n$  в течение вывода ( $t_1 - t_2$ ).

Медленное уменьшение в процессе вывода среднего угла пучка на входе в 1 ступень, составляющее  $\approx 0,9$  мрад, компенсируется изменением поля магнита  $FM$  с помощью обратной связи, позволяющей поддерживать постоянным угол пучка на выходе первой ступени, а, следовательно, его пространственное положение на входе  $BM$ .

### МАГНИТЫ И ЛИНЗЫ

Магнит  $FM$  /2/ с апертурой зазора  $65 \times 220$  мм<sup>2</sup> имеет длину 1,7 м. Толщина септума 2 мм. Максимальное рабочее поле в зазоре составляет 2,5 кгс. Неоднородность поля внутри зазора лежит в пределах  $\pm 0,2\%$ .

Линза  $FL$  длиной около 1 м представляет собой "полулин-

зу" с прямоугольной апертурой, имеющую нейтральный полюс в виде тонкой стальной пластины толщиной 0,35 мм - магнитный септум.

Магнит  $BM$  длиной 3 м имеет апертуру  $65 \times 190$  мм<sup>2</sup>. Толщина септума - 25 мм. Максимальная индукция в зазоре 13 кгс.

В рабочей части зазора /90% поперечного размера/ неоднородность магнитного поля лежит в пределах  $\pm 0,2\%$ .

Линза  $BL$  /линза Пановского/ имеет длину 0,7 м и апертуру  $65 \times 216$  мм<sup>2</sup>.

Охлаждение обмоток магнитов и линз - водяное.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В силу того, что величина показателя поля несколько меняется с радиусом в рабочей области ускорителя /см. рис. 2 работы /1/ /, радиальное положение пучка оказалось критично к значению тока  $i_{on}$ , соответствующему началу вывода. Установлено, что изменение положения центра тяжести пучка на  $\pm 4$  см относительно  $R_0$  требует изменения  $i_{on}$  на  $\pm 5$  а. Для уменьшения уходов по радиусу была использована система, позволяющая устанавливать заданное положение центра тяжести пучка к началу вывода с точностью  $\pm 0,2$  см.

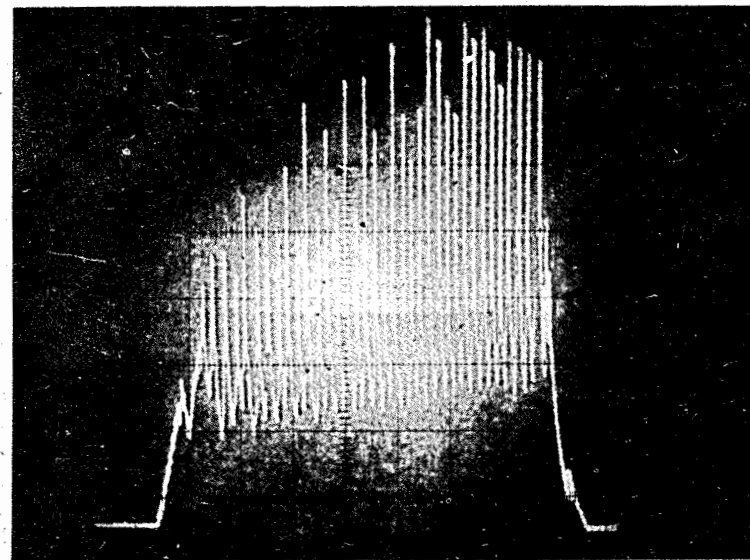


Рис. 3. Осциллограмма тока выведенного пучка. Масштаб времени: 50 мсек на деление.



Развитие резонанса оказалось чувствительным к соотношению токов в ветвях P2-A и P2-B. Найдено, что его оптимальное значение составляет 0,42. Постоянство этого соотношения обеспечивается питанием ветвей обмоток от общего источника. Осциллограмма на рис. 3 иллюстрирует действие обратной связи по току пучка. Время вывода составляет  $\approx 375$  мсек. Наблюдаемая модуляция вызвана пульсациями тока питания обмотки P1. В настоящее время разрабатываются методы подавления этой модуляции.

Настройка глубины заброса частиц в зазор септум-магнита осуществлялась регулировкой токов в обмотке P2. Наблюдение за пучком производилось с помощью сцинтилляционного экрана, установленного на входе FM, и телекамеры, позволяющей оценить горизонтальный размер пучка с точностью  $\approx 0,5$  см. Для поля ускорителя 10 кгс номинальная глубина заброса 17 см получена при общем токе в обмотке P2, равном 212 а/расчетное значение составляет 210 а/.

На рис. 4 представлена фотография пучка на выходе FM, темная полоса на которой является проекцией септума. При этом ток в FM был выключен, что дало возможность оценить эффективную толщину септума, которая составила  $\approx 5$  мм. Увеличение на 3 мм эффективной толщины определяется в основном неточностями изготовления септума и погрешностями установки магнита.

Изменение тока FM лежит в пределах от 10,7 ка /2060 гс/ в начале вывода до 11,4 ка /2200 гс/ в конце, что приблизительно на 20% превышает расчетное значение и может объясняться существующими искажениями магнитного поля в ускорителе.

Устранение искажений, вносимых в фазовые характеристики пучка нелинейностями краевого поля, осуществляется настройкой режима первой ступени, позволяющего получить горизонтальное промежуточное изображение во II квадранте. На рис. 5 дана фотография пучка на входе в магнит BM, полученная в режиме недофокусировки /градиент линзы  $G_F = 86$  гс/см/. Несимметричная форма пучка вызвана различной ориентацией вертикальных фазовых эллипсов для внутренних и внешних траекторий, как и было предсказано расчетами. Фотография пучка на рис. 6 иллюстрирует компенсацию этого эффекта в режиме перефокусировки /  $G_F = 102$  гс/см/. Фотография пучка на внешней мишени показана на рис. 7. Коэффициент линейного увеличения второго дублета линз составляет по горизонтали 0,122, по вертикали - 0,0877. Измерения эмиттанса дали значения  $95 \pi$  мм·мрад для горизонтали и  $50 \pi$  мм·мрад для вертикали, что соответственно в 3 и 1,3 раза превышает расчетные зна-

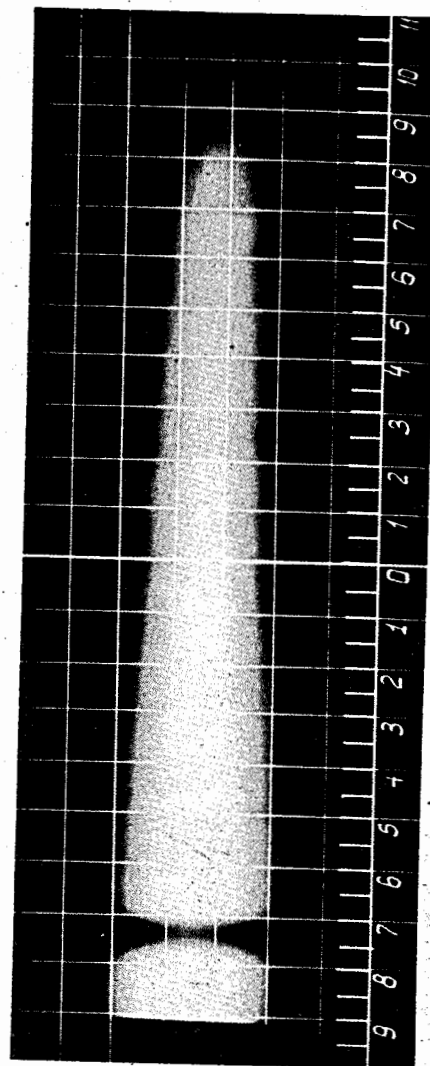


Рис. 4. Фотография пучка на выходе магнита FM Шкалы в см.

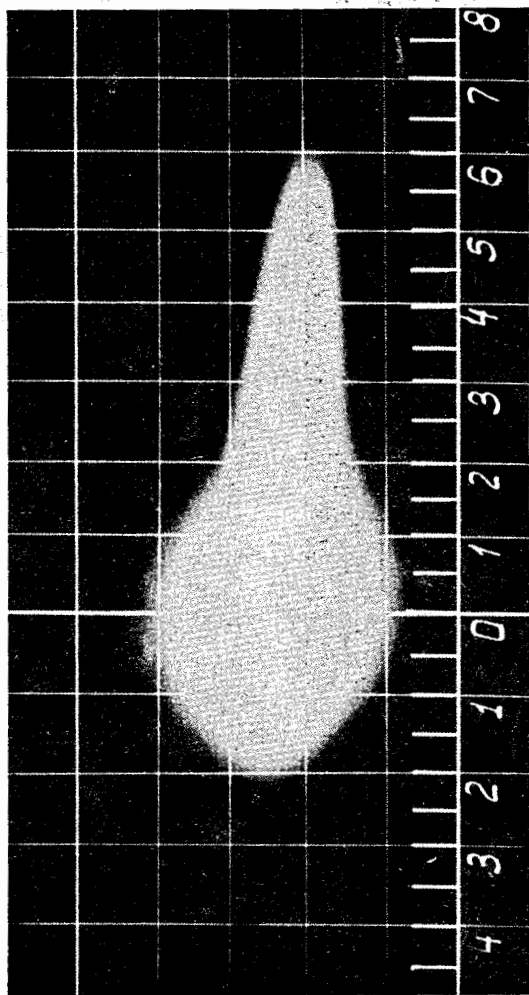


Рис. 5. Фотография пучка на входе магнита *ВМ* /режим недофокусировки/. Шкалы в см.

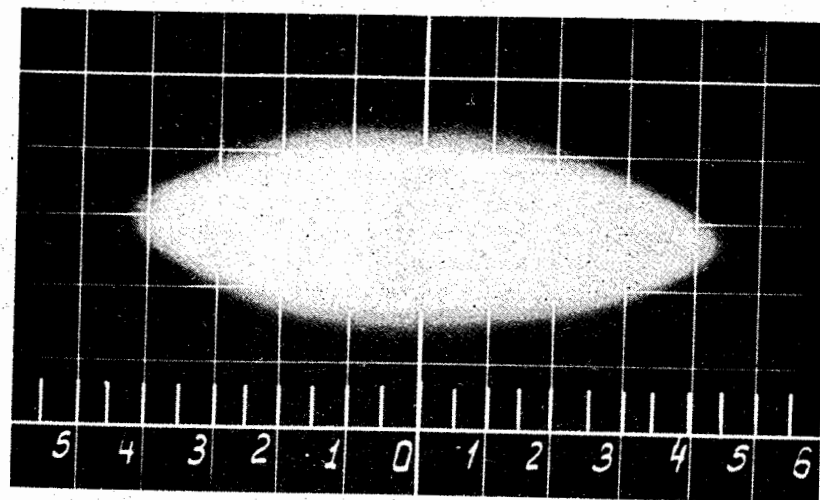


Рис. 6. Фотография пучка на входе магнита *ВМ* /режим перефокусировки/. Шкалы в см.

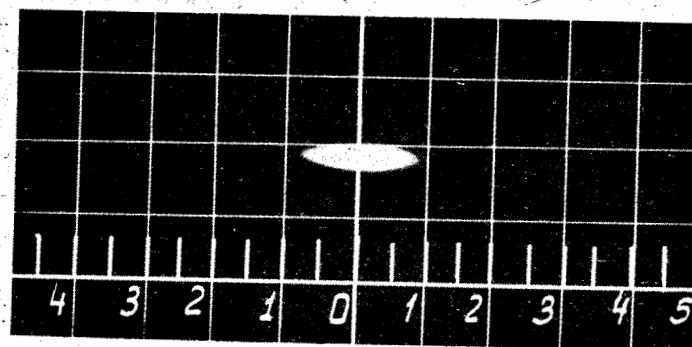


Рис. 7. Фотография пучка на внешней мишени. Шкалы в см.

чения. Полученное отличие от расчетных величин обусловлено дрожанием пучка в процессе вывода, вызванным пульсациями в системе питания магнита FM. Применение быстродействующей обратной связи с использованием регулятора в силовой цепи питания магнита FM позволит свести этот эффект к минимуму.

Потери частиц при выводе определяются в основном прохождением части пучка через септум магнита FM, так как достаточный запас по апертурам позволяет исключить появление потерь из-за нестабильности работы элементов выводной системы. Некоторый дополнительный вклад в потери обусловлен прохождением пучка через индикационные  $\delta$ -пластины, установленные на входе магнита VM. Предварительные измерения эффективности были выполнены с использованием метода наведенной активности /реакция  $C_{12}(p, pn)C_{11}$ /. Результаты показали, что эффективность вывода составляет не менее 90%. Более точные измерения произведены путем регистрации потоков вторичных частиц, пропорциональных числу протонов, оставшихся в вакуумной камере ускорителя. По соотношению потоков в режимах работы с выводом и без него была определена эффективность, составляющая  $94 \pm 0,5\%$ .

В заключение авторы выражают свою признательность А.М.Балдину и И.Н.Семенюшкину за постоянный интерес, активное внимание и содействие в осуществлении работы. Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность коллегам, участвовавшим в создании и наладке системы: В.Н.Булдаковскому, В.П.Заболотину, А.И.Крюкову, Ю.Ф.Кусагину, В.С.Миронову, О.Н.Цисляку, В.И.Черникову, а также С.А.Аверичеву, И.А.Елисейевой, Л.А.Леонову, В.П.Матвеевой, Е.А.Матюшевскому, А.А.Смирнову, принимавшим участие в работе на разных ее этапах. Авторы признательны А.П.Царенкову за предоставленную возможность использования разработанной им аппаратуры удержания пучка с большой точностью на заданном радиусе.

#### Литература

1. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова. Сообщение ОИЯИ, Р9-6972, Дубна, 1973.
2. Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, В.С.Миронов, С.А.Новиков, В.И.Черников. Сообщение ОИЯИ, 9-6537, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 февраля 1973 года.