

С 345  
И-889

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 4856

И.Б. Иссинский

**БЫСТРЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫВОД  
ПРОТОННОГО ПУЧКА ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ**

Специальность 280 - электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Дубна 1969 г.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор технических наук Л.П. Зиновьев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В.В. Кольга

доктор физико-математических наук В.П. Саранцев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова.

Автореферат разослан 19 г.

Защита диссертации состоится 1970 г.  
на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий.

Адрес: г. Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Ученый секретарь Совета

С.В. Мухин

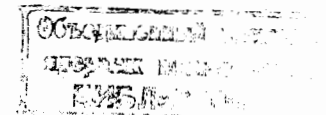
6570 89

И.Б. Иссинский

БЫСТРЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫВОД  
ПРОТОННОГО ПУЧКА ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность 280 - электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук



Одним из путей наиболее значительного расширения возможностей ускорителей высоких энергий и повышения продуктивности физических исследований является вывод и использование первичных пучков. При наличии интенсивного наружного пучка можно применять внешние мишени, позволяющие расширить круг экспериментов с короткоживущими частицами, увеличить телесные углы вторичных пучков, получать с одной мишени положительные и отрицательные частицы и т.д. Кроме того, вывод первичного пучка с высокой эффективностью предохраняет ускоритель от повышенной активации, которая становится серьезной проблемой при большой интенсивности.

Поскольку полное решение вопросов, связанных с выводом протонного пучка из синхрофазотрона, представляет собой обширную и сложную проблему, на первом этапе была поставлена задача осуществления быстрого вывода пучка с использованием полупевого резонанса радиальных бетатронных колебаний за время порядка  $10^{-4}$  сек при эффективности 70-80%. При этом предполагалось проведение инженерных работ на ускорителе с минимальными затратами средств и времени, необходимого для монтажа оборудования выводной системы. Быстрый вывод протонного пучка из синхрофазотрона был осуществлен в 1967 г.

Настоящая диссертация посвящена вопросам разработки метода, созданию аппаратуры и осуществлению быстрого резонансного вывода протонного пучка из синхрофазотрона ОИЯИ.

Диссертация написана на основе работ, выполненных в Лаборатории высоких энергий в период с 1963 по 1969 гг. Из числа публикаций по тематике вывода /3-5,8-10,12-15,17/ в основу ее положены работы /5,8,14,15/.

Диссертация состоит из четырех глав.

В первой главе проведено рассмотрение и сравнение различных методов вывода первичного пучка из протонных синхротронов. Показано, что наиболее перспективными и универсальными являются способы, использующие для заброса циркулирующих частиц в зазор выводного устройства резонансы бетатронных колебаний. При проектировании выводной системы на синхрофазотроне был выбран резонансный метод, главные преимущества которого состоят в следующем:

- 1) высокая эффективность, значительно превышающая эффективность метода мишень-магнит;
- 2) при выводе для всех частиц сохраняется достаточно узкий энергетический спектр ускоренного пучка (для синхрофазотрона  $\Delta E/E \approx 10^{-4}$ ), что имеет большое значение как для физических экспериментов, так и для облегчения транспортировки выводимого пучка;
- 3) широкий диапазон длительностей вывода от  $\sim 10^{-5}$  до  $\sim 10^{-1}$  сек. Длительность может изменяться в зависимости от факторов, определяющих резонансные условия;
- 4) узкий угловой разброс частиц, попадающих в выводное устройство.

Во второй главе рассмотрены основные особенности полуполого резонанса радиальных бетатронных колебаний, возбуждаемого в синхрофазотроне с целью заброса ускоренного пучка в выводной магнит (или септум-магнит). Представлена общая картина, иллюстрирующая поведение частиц при полуполом резонансе.

Из решений, использующих метод усреднения, следует /1,2/, что для частоты радиальных бетатронных колебаний  $\nu_x = 1/2$ ,

среднее значение  $n = 0,79$ . Невозмущенная (рабочая) величина показателя поля на центральной орбите синхрофазотрона составляет  $n = 0,67$ , поэтому добавочное значение  $n$ , необходимое для осуществления резонансных условий, с учетом первой гармоники возмущения должно вводиться в два соседних квадранта ускорителя путем увеличения показателя поля на  $\Delta n = 0,22-0,24$  /3,4/.

На основании численных расчетов, проделанных на ЭВМ, в группе вывода пучков были получены характеристики поведения протонов в процессе развития резонансов и заброса в отклоняющий магнит /5/. При расчетах использовались реальные характеристики и структура магнитного поля синхрофазотрона /6/, а также исходное распределение частиц по амплитудам /7/ и фазам радиальных бетатронных колебаний. Изменение поля в возмущенных квадрантах при включении импульса тока в полюсные обмотки задавалось в соответствии с ростом  $\Delta n$  за время около 300 мксек (450 оборотов циркулирующего пучка).

Расчеты показали, что наиболее приемлемыми для дальнейшей транспортировки являются характеристики пучка, попадающего в зазор септум-магнита, расположенного в конце возмущения на расстоянии 20 см от центральной орбиты ускорителя при величине  $\Delta n = 0,22$ .

Для выбора направления пучка после его выхода из ускорителя были приняты во внимание следующие факторы:

- а) требование к оптическим характеристикам пучка;
- б) наличие технологического оборудования, размещенного в прямолинейных промежутках и вблизи них;
- в) обширный комплекс физических исследований, проводимых на вторичных пучках синхрофазотрона.

Это определило трассу пучка и схему вывода /5/, позволяющую максимально использовать экспериментальное оборудование на ускорителе.

Обмотки, с помощью которых обеспечиваются резонансные условия, в этом случае должны располагаться в I и II квадрантах синхрофазотрона, а септум-магнит (M-1) должен

быть помещен в области максимального отклонения частиц от центральной орбиты ускорителя, т.е. между II и III квадрантами. После отклонения в магните М-1 пучок, пройдя III квадрант, выходит из ускорителя и попадает во второй отклоняющий магнит М-2, за которым располагается канал транспортировки пучка к измерительной площадке.

На основе анализа расчетных характеристик пучка и предварительных экспериментальных исследований в третьей главе сформулированы требования к элементам системы вывода и выполнен расчет аппаратуры, входящей в эту систему.

Предложено применить отклоняющие магниты с градиентной фокусировкой и тем самым значительно сократить вес и габариты их конструкций. Разработанная методика расчета, учитывающая в уравнениях движения частиц нелинейные члены второго порядка, позволила при больших значениях градиента избежать нежелательного влияния нелинейностей путем наложения определенных условий на закон изменения магнитного поля /8/. В результате проведенных расчетов было найдено, что влияние нелинейных членов второго порядка в таких магнитах пренебрежимо мало при условии изменения вертикальной компоненты магнитного поля  $B_z$  по закону:

$$B_z = B_0 (1 - n_0 \rho / R_0 + n_0 \rho^2 / 2R_0^2), \quad (1)$$

где  $B_0$  - вертикальная компонента поля на радиусе равновесной орбиты  $R_0$  при  $z=0$ ,  $\rho$  - отклонение от равновесной орбиты в радиальной плоскости,  $n_0 = -\frac{R_0}{B_0} \left( \frac{\partial B_z}{\partial R} \right) \Big|_{R=R_0, z=0}$ .

Форма полюсов септум-магнита /9/, обеспечивающая выполнение в зазоре закона (1), вычислена в предположении эквипотенциальности поверхности полюсов ( $\mu_r \gg 1$ ). Полученная зависимость вертикального размера зазора  $\delta$  от радиальной координаты имеет вид:

$$\delta = \delta_0 / (1 - n_0 \rho / R_0 + n_0 \rho^2 / 2R_0^2) \quad (2)$$

(здесь  $\delta_0$  - размер зазора при  $\rho=0$ ).

Возможность изменения  $n_0$  в процессе коррекции и настройки предусмотрена с помощью ленточных проводников с током, проложенных на полюсах магнита. Полученный закон изменения градиентного тока  $I_g$  в радиальном направлении определяется зависимостью:

$$I_g = -\Delta n_0 \frac{I_0}{R_0} \frac{\rho (1 - \rho / 2R_0)}{1 - n_0 \rho / R_0 + n_0 \rho^2 / 2R_0^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta n_0$  - заданное изменение показателя поля за счет тока в полюсных обмотках,  $I_0$  - ток возбуждения в основной обмотке.

С помощью предложенной методики расчетов, характеризующих поведение пучка на выходе из ускорителя, определены допуски на поле и на форму полюсов магнита. Критерием допустимых изменений оптимальных расчетных параметров  $B_0$ ,  $n_0$

и  $n_1$  [  $n_1 = \frac{R_0}{B_0} \left( \frac{\partial^2 B_z}{\partial R^2} \right) \Big|_{R=R_0, z=0}$  ] служило поведение частиц

на входе в канал транспортировки, прошедших септум-магнит и квадрант ускорителя. Отклонение оси пучка или его расширение в горизонтальной плоскости в конце квадранта на 1,5-2 см (при полном размере в этом месте 20 см и ядре пучка 16 см) считалось допустимым.

С помощью полученной зависимости между магнитным полем и изменениями параметров  $\Delta B_0$ ,  $\Delta n_0$  и  $\Delta n_1$  показано, что в септум-магните удовлетворительным является поле, поддерживаемое в пределах  $\pm (0,2+0,3)\%$  от оптимального.

Определенные аналогичным образом допуски на размер зазора при изготовлении магнита были заданы в пределах  $\pm 0,05$  мм.



По той же методике выполнен расчет магнита М-2, который по технологическим соображениям изготовлен из двух секций по 1,5 м каждая. Магнит предназначен для отклонения пучка на  $5^\circ$ . Величина показателя поля в нем составляет  $n_0 = -140$ , номинальное значение  $B_0 = 1,02$  тл, допустимое отклонение магнитного поля составляет  $\pm 0,3\%$ . Такие расчеты могли быть достоверными только при наличии достаточно точно измеренного магнитного поля ускорителя, включая его нерабочую область и поля рассеяния, пересекаемые выведенным пучком. С этой целью была разработана аппаратура и проведены измерения магнитного поля синхрофазотрона при индукции 1,23 тл с точностью не хуже  $\pm 0,3\%$  /10/.

В четвертой главе дано описание разработанной аппаратуры, изложена методика настройки системы и приведены экспериментальные результаты при выводе пучка за пределы камеры ускорителя.

Питание проводников возбуждения резонанса осуществляется разрядкой батареи конденсаторов. Амплитудное значение тока для максимальной энергии выведенного пучка составляет 400 а при напряжении  $\approx 4$  кв. Длительность нарастания импульса тока - 300 мксек. Конструктивно полюсные проводники представляют собой медную шину с поперечным размером  $5 \times 25$  мм<sup>2</sup>, установленную на стеатитовых изоляторах на расстоянии  $\pm 100$  мм от центрального радиуса ускорителя.

Септум-магнит /9/ показан на рис. 1. Сердечник его длиной 62 см собран из штампованной трансформаторной стали толщиной 0,35 мм с изолирующим покрытием. Размер зазора -  $44 \times 120$  мм<sup>2</sup>. Склейка листов в блоках выполнена клеем БФ-4 по стандартной технологии. Для межблочных соединений применен эпоксидный компаунд.

Найдена конфигурация септума, позволяющая при наличии изоляции между обмоткой и сердечником обеспечить: а) однородность рабочего поля в зазоре, б) достаточно малое рассеянное поле перед септумом, в) эффективный отвод тепла от токонесущей части септума, г) механическую прочность при ударных нагрузках.

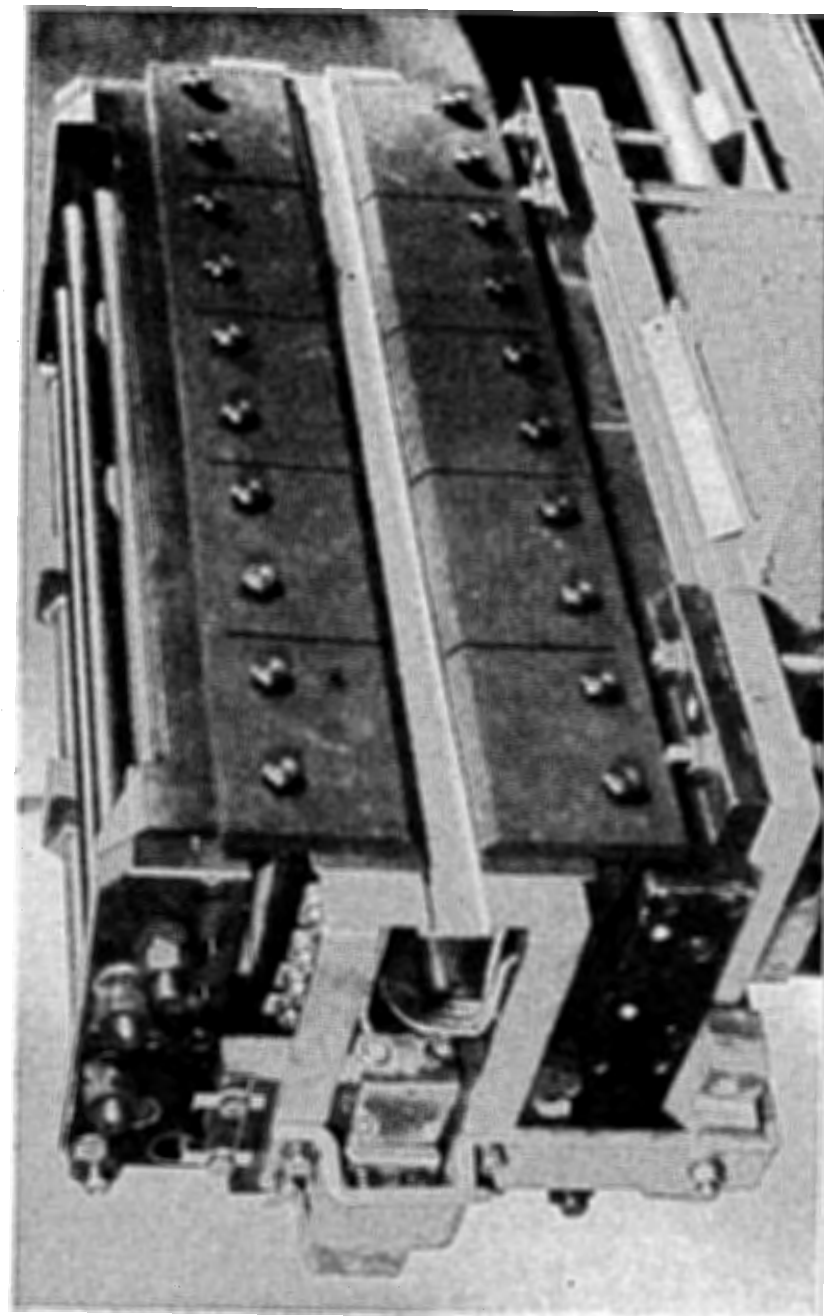


Рис.1. Общий вид септум-магнита М-1.

Ленточные проводники градиентной обмотки заформованы в эпоксидном компаунде с дополнительной изоляцией из стеклоткани. Форма компаундированного элемента обмотки соответствует конфигурации полюсов сердечника.

Короткое время вывода позволяет использовать для питания обмоток возбуждения септум-магнита схему с емкостным накопителем. Длительность импульса тока - 3 мсек, амплитуда - 36 ка. Разработана схема привязки отклоняющего поля септум-магнита к импульсу выводимых протонов. Это исключает влияние нестабильности амплитуды разрядного тока и дает возможность отклонять пучок на заданный угол с точностью  $\pm 10^{-2}$  мрад. Предусмотрено включение тракта управления выводом в общую систему программирования синхрофазотрона /11/.

Измерения магнитных полей септум-магнита показали, что при выбранной форме полюсов и конфигурации септума имеет место соответствие полученного поля заданному закону (1), отклонение от которого составляет не более  $\pm 0,15\%$ . На рис. 2 показана зависимость эффективного значения  $B_z/B_0$  от радиальной координаты при  $B_0 = 1$  тл. Измерения выполнены с помощью катушек, длина которых превышала длину магнита.

Аналогичный результат получен для градиентного поля. Как и в предыдущем случае, распределение поля в зазоре подчиняется закону, близкому к линейному.

Для перемещения магнита М-1 в рабочее положение применен гидравлический механизм с вертикальным возвратно-поступательным движением. Время перемещения магнита, имеющего вес  $\approx 300$  кг, составляет 0,8 сек /12/.

Эксперименты по определению размеров пучка, получившего резонансную раскачку, производились с помощью фотопленок, вводимых внутрь камеры синхрофазотрона посредством плунжерных механизмов /13/. Для измерения распределения интенсивности пучка, попадающего в зазор магнита, использовалась ядерная фотоэмульсия.

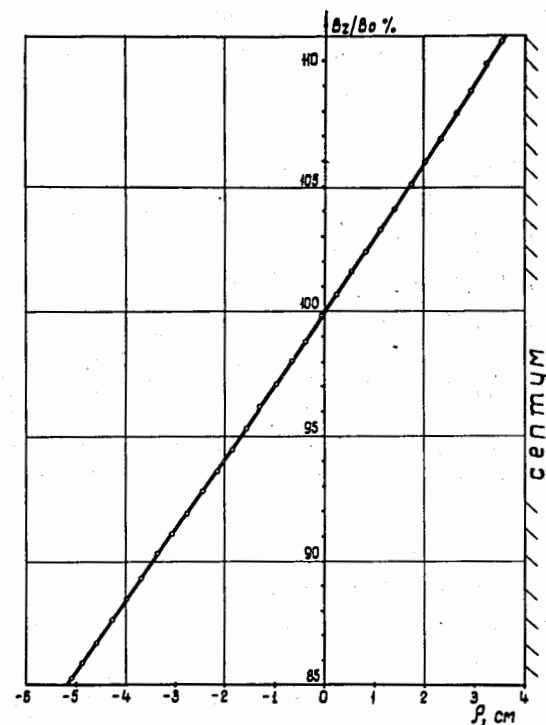


Рис.2. Распределение эффективного поля в зазоре септум-магнита.

Сравнение облучений, проведенных при различных условиях, показало, что близким к наиболее выгодному с точки зрения заброса частиц является случай расположения края фотопленки на расстоянии от центральной орбиты в пределах  $20 \pm 22$  см при возмущении  $\Delta p = 0,22$ . Эмитанс пучка в этом случае достаточно мал, а рост амплитуды колебания превышает 10 см. Это соответствует также оптимальным условиям, полученным при расчетах. Гистограмма радиального распределения частиц на ядерной фотоэмульсии для указанного случая приведена на рис. 3.

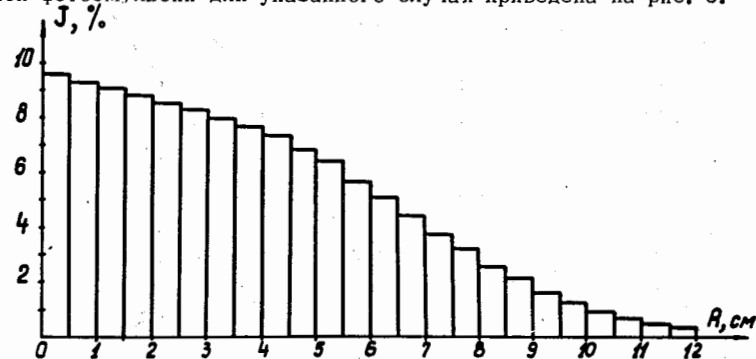


Рис.3. Гистограмма распределения интенсивности пучка в радиальном направлении. Расстояние отсчитывается от края фотоэмульсии.

Эксперименты показали, что допустимое смещение циркулирующего пучка в радиальном направлении при включении резонансной системы составляет  $\pm 1$  см от центральной орбиты ускорителя.

Схема расположения аппаратуры во время настройки системы и получения выведенного пучка /14,15/ дана на рис. 4. Плунжерные механизмы мишеней ПМ-1 и ПМ-2 помещены в окна магнита ускорителя №24 и №26. Мишень для измерения пучка, получившего отклонение в М-1, установлена в окне №33 перед выходом частиц из камеры ускорителя. Сцинтилляционные экраны и передающие телевизионные камеры для наблюдения за пучком размещены: ТК-1 в смотровом окне прямолинейного промежутка вакуумной камеры, напротив септум-магнита; ТК-2 - в

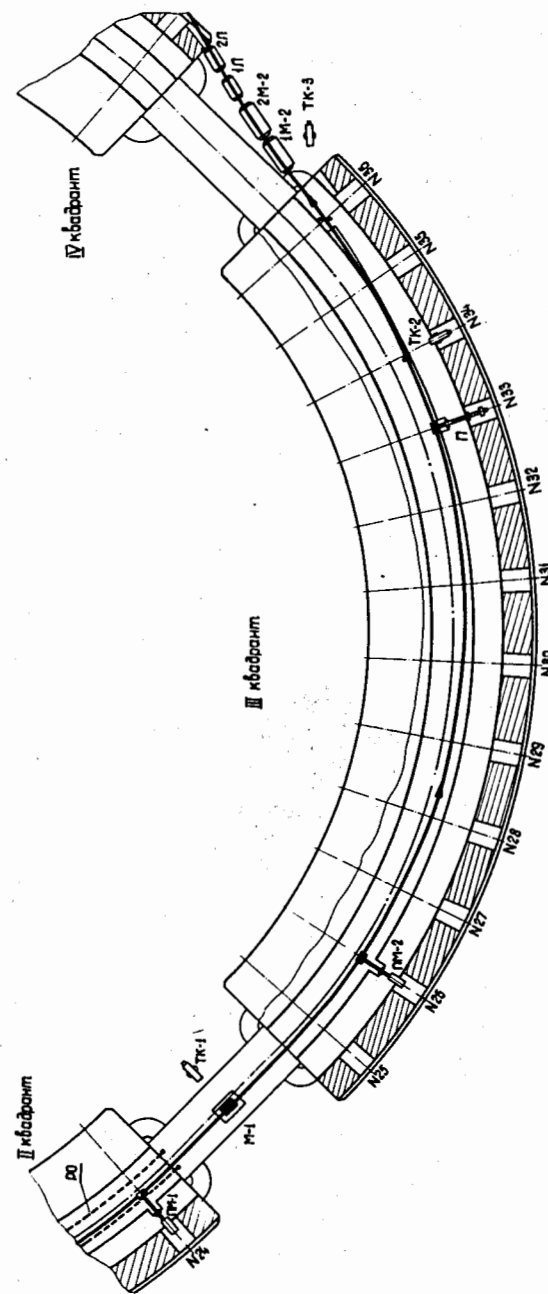


Рис.4. Схема расположения аппаратуры системы вывода в районе III квадранта.



окне №34, на выходе пучка из камеры; ТК-3 - в конце III квадранта после выхода пучка из камеры ускорителя. Для передачи изображения на пульт зала управления используется многоканальная установка ПТУ-102.

На рис. 5 показана фотография пучка при выходе из камеры, полученная на фотопленке, облученной с помощью мишени, расположенной в окне №33 при оптимальном показателе поля в септум-магните  $\mu_0 = -70$ . Как и ожидалось, дополнительный эффект сжатия пучка по радиусу дало уменьшающееся во времени поле в септум-магните. Полученный при этом размер пучка составляет  $\approx 2,5 \times 3 \text{ см}^2$ , что находится в хорошем соответствии с результатами расчетов ( $2,4 \times 2,5 \text{ см}^2$ ).

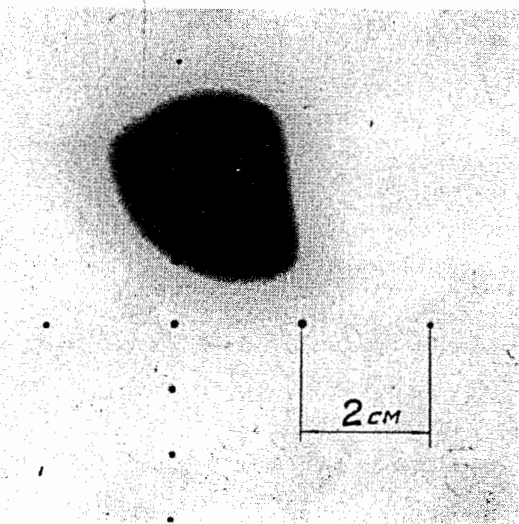


Рис.5. Фотография протонного пучка на азимуте окна №33 при показателе поля в септум-магните  $\mu_0 = -70$ .

Эффективность данной системы вывода определяется, главным образом, эффективностью септум-магнита, так как потери на остальной трассе пучка не являются неизбежными, и выбором соответствующих апертур могут быть сведены до несущественных величин. Поэтому при настройке системы основное внимание уделялось уменьшению потерь в септум-магните.

При измерениях эффективности прохождения пучка через септум-магнит был использован эффект эмиссии дельта-электронов. Этот способ мониторинга обладает линейной зависимостью от числа первичных частиц и хорошей воспроизводимостью результатов <sup>1/16</sup>. Эффективность, определяемая как отношение интенсивности выведенного пучка к интенсивности циркулирующего, составила 84% при общей погрешности измерений, не превышающей +10%. Этот результат находится в хорошем соответствии со значением эффективности, которую можно ожидать на основании распределения, полученного при облучении ядерной фотоэмульсии во время предварительных экспериментов (рис.3). Потери частиц на септуме, имеющем толщину в средней части 4 мм, должны составлять около 10%. Еще несколько процентов частиц может теряться на вертикальных краях зазора магнита.

Вывод пучка произведен в диапазоне энергий от 7,5 до  $\approx 10$  Гэв.

Экспериментальные результаты и, в частности, высокая эффективность, полученная при быстром выводе, дают основание для рассмотрения возможности использования резонанса бетатронных колебаний в свете перспектив дальнейшего развития работ по выводу пучка из синхрофазотрона и, прежде всего, создания системы с длительностью вывода до нескольких десятых секунды.

Высокую эффективность может дать использование в системе двух внутренних магнитов, что позволяет уменьшить угол отклонения в первом магните, а следовательно, количество потерянных частиц по сравнению с одномагнитным вариантом.

В работе /17/ показано, что для двухмагнитного варианта медленного вывода шаг нарастания амплитуд, как и в случае быстрого вывода, достаточно велик и превышает 12-14 см за два оборота в зависимости от величины и расположения возмущения, а также степени подавления нелинейностей в компонентах рабочего поля ускорителя. Угловой разброс траекторий на координате первого септум-магнита лежит при этом в пределах 1-2 мрад, что, согласно произведенным оценкам, должно дать эффективность вывода не менее 80%. При такой эффективности значительно упрощается решение проблемы биологической защиты корпуса синхрофазотрона после введения в строй нового инжектора. В этом случае будет допустимо увеличивать интенсивность ускоренного пучка на порядок, применив для уменьшения радиационного излучения за пределами здания ускорителя сравнительно легкую защиту.

Основные результаты работ, на основе которых написана диссертация, состоят в следующем:

1. Проведено сравнение различных способов вывода первичных пучков, позволившее выбрать для синхрофазотрона полукельский резонанс радиальных бетатронных колебаний, анализ свойств которых показал, что этому резонансу следует отдать предпочтение для получения выведенного пучка с длительностью  $\approx 10^{-4}$  сек.

2. На основании расчетов, характеризующих движение протонов при резонансных условиях в синхрофазотроне, сформулированы требования к элементам системы, сделан выбор направления выведенного пучка и определена схема расположения оборудования системы, позволившая осуществить вывод без проведения на ускорителе больших инженерных работ и капитальных затрат.

3. Произведен расчет аппаратуры системы. В примененных магнитах с градиентной фокусировкой найдены пространственный закон изменения поля, соответствующая ему форма полюсов и зависимость корректирующего градиентного тока от поперечной координаты, позволяющие устранить влияние нелиней-

ностей второго порядка на характеристики пучка, проходящего через такие элементы.

4. Предложена методика расчета и сделана оценка допусков на величины параметров магнитов, применяемых в системе вывода.

5. Разработана и введена в действие аппаратура системы. Полученные при измерениях характеристики аппаратуры удовлетворяют расчетным требованиям.

6. Экспериментально исследовано поведение протонов при условиях возбуждения в синхрофазотроне полукельского резонанса, измерены характеристики пучка, получившего резонансную раскучку. Выполнена наладка системы и осуществлен вывод первичного пучка из ускорителя с энергией 10 ГэВ.

7. Получена эффективность вывода  $\approx 80\%$ . Этот результат является рекордным для ускорителей со слабой фокусировкой.

#### Л и т е р а т у р а

1. М.С. Рабинович. Труды ФИАН, т.Х, 23 (1958).
2. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей, Москва, Физматгиз, 1962.
3. Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, В.И. Котов, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Н.И. Павлов. Препринт ОИЯИ 1393, Дубна 1963.
4. Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, В.И. Котов, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Н.И. Павлов. IV Международная конференция по ускорителям, 693, Дубна, 1963.
5. Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, В.И. Котов, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Н.И. Павлов. Препринт ОИЯИ Р-2387, Дубна, 1965.
6. А.А. Журавлев, Е.Г. Комар, И.А. Мозалевский, Н.А. Монозон, А.М. Столов. Приложение №4 к журналу АЭ за 1967г., стр.15.
7. А.Б. Кузнецов, К.П. Мызников. АЭ 12, 373, 1962.

8. I.B. Issinsky, V.I. Kotov, E.M. Kulakova, K.P. Myznikov and L.A. Smirnova. Nucl.Instr. and Meth. , 48, 147 (1967).
9. И.Б. Иссинский, И.И. Карпов, Е.М. Кулакова. Депонированное сообщение ОИЯИ, Б2-9-4095, Дубна, 1968.
10. Е.А. Деменцьев, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, М. Полак, Ф. Хованец. Препринт ОИЯИ, Р-2828, Дубна, 1966.
11. И.Б. Иссинский, Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, К.П. Мызников, Б.Д. Омельченко, А.П. Царенков. ПТЭ, №6, 23, 1965.
12. Н.Г. Борисов, Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, В.Н. Лысяков: С.А. Новиков, Н.И. Павлов, П.М. Тараканов. Препринт ОИЯИ 9-3924, Дубна, 1968.
13. Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, В.Н. Лысяков, К.П. Мызников, Н.И. Павлов, Н.М. Тараканов. Совещание по формированию пучков заряженных частиц. Сообщение ОИЯИ, 9-3582, Дубна, 1967.
14. I.B. Issinsky, E.M. Kulakova, V.N. Lysyakov, K.P. Myznikov, N.I. Pavlov, N.M. Tarakanov and L.P. Zinoviev. VI Int. Conf. on High Energ. Accel., Cambridge, Sept.1967, 336.
15. В.П. Заболотин, Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, С.А. Новиков. Сообщение ОИЯИ 9-4749, Дубна, 1969.
16. K. Budal. CERN 67-17.
17. Б.В. Василишин, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, Депонированное сообщение ОИЯИ Б2-9-4729, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 декабря 1969 года.