

69225

С 345
К-90

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 5204

Е.М. Кулакова

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОТОНОВ
ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ВЫВОДЕ ПУЧКА
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Специальность 041 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник Л.П. Зиновьев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

В.В. Кольга,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Н.Б. Рубин

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт теоретической и экспериментальной физики.

Автореферат разослан " " 1970 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 ЛВЭ.

Учёный секретарь Совета

С.В. Мухин

9 - 5204

Е.М. Кулакова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОТОНОВ
ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ВЫВОДЕ ПУЧКА
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ**

Специальность 041 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

4034 в.р.
4034

ОБЩЕУЧЕБНЫЙ ЦЕНТР
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Значительный рост энергий и интенсивностей пучков, получаемых на современных ускорителях, приводит к необходимости вывода первичных частиц с максимально достижимой эффективностью. Вывод первичного пучка высокой энергии и получение хороших оптических характеристик внешнего пучка — достаточно сложная физическая и инженерная задача. Метод вывода выбирается в зависимости от физических проблем лаборатории, от энергии, типа и специфических особенностей ускорителя^{/1/}. Диапазон длительностей вывода очень широк — от долей мксек (быстрый однооборотный вывод) до сотен мксек (медленный вывод). Наибольшая эффективность вывода пучка, растянутого во времени, может быть достигнута при использовании резонанса радиальных бетатронных колебаний как механизма заброса частиц циркулирующего пучка в зазор септум-магнита.

На дубненском синхрофазотроне с 1962 г. начато выполнение обширной программы работ по выводу протонного пучка. Вывод основан на полуцелом резонансе радиальных бетатронных колебаний и производится по следующей схеме^{/2,3/}:

- 1) резонансная раскочка колебаний и заброс протонов в зазор септум-магнита;
 - 2) отклонение и фокусировка пучка при движении его в поле септум-магнита и квадратов синхрофазотрона;
 - 3) транспортировка выведенного пучка к внешним мишеням.
- При этом в зависимости от способа введения пучка в резонансные условия может быть получена длительность вывода от

30 мксек до нескольких сот мсек. Вывод протонов за время 30+100 мксек (т.н. быстрый вывод), который произведен в 1967 году, завершил первый этап этой программы. Второй этап – медленный вывод протонов с высокой эффективностью – особенно актуален для синхрофазотрона ЛВЭ при повышении интенсивности пучка до 10^{12} протонов/импульс. В этом случае пучок используется на внешних мишенях, что облегчает радиационную защиту ускорителя и расширяет возможность проведения на нем экспериментов.

Реферлируемая диссертация посвящена исследованию динамики пучка в процессе резонансного вывода и расчёту систем вывода протонов на синхрофазотроне ОИЯИ, включая внешние тракты транспортировки. В основу диссертации легли работы /2-8/, выполненные автором или при его участии в 1963-1969 г.г. в ОИЯИ.

Диссертация состоит из четырех глав, приложений и заключения.

В первой главе приведен краткий обзор и сравнительный анализ существующих и проектируемых систем вывода первичных пучков на ряде крупнейших ускорителей мира и показано, что наиболее универсальными являются резонансные методы, которые применимы как на слабо, так и на жесткофокусирующих машинах, позволяют получить высокую эффективность вывода (до 90%), малый эмиттанс и незначительный энергетический разброс циркулирующего пучка. Здесь же рассмотрены некоторые методы расчёта систем вывода. Указанные расчёты выполняются в основном на ЭВМ, что позволяет проводить их быстро и оперативно, а также обеспечивает необходимую точность и надежность результатов.

Во второй главе рассмотрено движение протонов в магнитном поле синхрофазотрона ОИЯИ при полупелом резонансе /2-4/, для возбуждения которого необходим сдвиг частоты радиальных бетатронных колебаний на оборот ν_R до величины 1/2 и вве-

дение первой гармоники Δn в показатель поля n . На синхрофазотроне ОИЯИ эти условия создаются с помощью четырех проводников полюсных обмоток, проложенных в I и II квадрантах /2,4/.

Для вывода протонов за время 30 + 100 мксек раскачка радиальных бетатронных колебаний производится путем возбуждения резонанса в центральной части рабочей области синхрофазотрона, где происходит ускорение протонов. Гармоника показателя поля Δn должна нарастать до рабочей величины за время ≈ 300 мксек.

Показано, что при введении нелинейной зависимости $n+\Delta n$ от радиуса полупелый резонанс может быть использован для вывода длительностью до 300 мсек /3,4/. Растяжка протонов во времени достигается за счёт медленного смещения пучка в наружную часть камеры, где резонансные условия созданы заранее и не изменяются в процессе вывода. Длительность вывода определяется скоростью смещения пучка в область резонанса, величиной Δn , начальным радиальным размером и импульсным разбросом пучка. В нашем случае это смещение производилось за счёт уменьшения поля ускорителя во времени ($\dot{B} < 0$).

Для расчёта радиальных проекций траектории x' протонов в условиях резонанса использованы полные уравнения движения в цилиндрической системе координат квадрантов ускорителя (рис. 1) с дифференцированием по времени:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{e}{mc} \frac{d\phi}{dt} R B_z + \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 R, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} = - \frac{e}{mc} \frac{dR}{dt} \frac{B_z}{R} - 2 \frac{d\phi}{dt} \frac{dR}{dt} \frac{1}{R}.$$

^{x/} Полупелый резонанс не оказывает заметного влияния на вертикальное движение протонов, что проверено экспериментально.

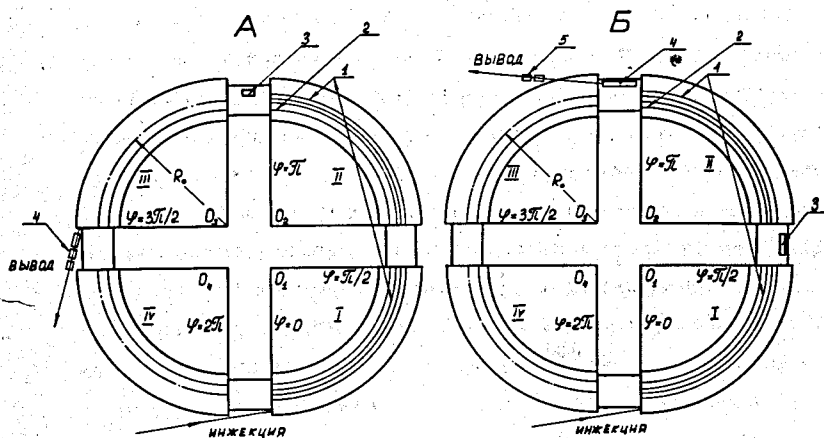


Рис. 1. Схемы резонансного вывода протонного пучка на синхрофазотроне ОИЯИ. А. Схема вывода с одним септум-магнитом: 1 - полюсные обмотки возбуждения резонанса, 2 - проводник системы коррекции показателя поля на высоких индукциях; 3 - септум-магнит; 4 - первая ступень системы транспортировки пучка протонов. Б. Схема вывода с двумя септум-магнитами: 1 - полюсные обмотки возбуждения резонанса; 2 - проводник системы коррекции показателя поля на высоких индукциях; 3 - первый септум-магнит (формагнит); 4 - второй септум-магнит (основной магнит); 5 - первая ступень системы транспортировки. O_1, O_2, O_3, O_4 - центры полярных систем координат квадрантов ускорителя, R_0 - центральный радиус ускорителя.

Здесь R и ϕ - полярные координаты, V_z - вертикальная компонента поля ускорителя, m и e - масса и заряд протона, c - скорость света $\times /$. Поле ускорителя в квадрантах принято азимутально-однородным с эффективной длиной по азимуту $\pi/2$, поле в прямолинейных секциях отсутствует. По радиусу поле синхрофазотрона описано через функции $n(R)$ и $n(R) + \Delta n(R)$. При быстром выводе $V_z(R, N)$ в I и II квадрантах имеет вид:

$$V_z(R, N) = V_{z0} e^{-\int_{R_0}^R \frac{n(R) + \Delta n(R, N)}{R} dR} \quad (2)$$

где V_{z0} - поле на центральном радиусе ускорителя R_0 , N - номер оборота частицы (время), нарастание $\Delta n(N)$ происходит по синусоидальному закону. При медленном выводе основное поле ускорителя - функция от времени, $\Delta n(N) = \text{const}$. Теперь $V_z(R, N)$ в I и II квадрантах описано следующим образом:

$$V_z(R, N) = V_{z0} \left\{ e^{-\int_{R_0}^R \frac{n(R)}{R} dR} (1 + \gamma N) + \left(e^{-\int_{R_0}^R \frac{n(R) + \Delta n(R)}{R} dR} - e^{-\int_{R_0}^R \frac{n(R)}{R} dR} \right) + D \right\} \quad (3)$$

Здесь $\gamma = -\frac{dV_z}{dt} \frac{r}{V_{z0}}$ - безразмерная скорость изменения поля за оборот, r - период обращения протона, D - константа, характеризующая азимутальную асимметрию поля во внутренней части камеры, величина которой зависит от способа созда-

$\times /$ Для сокращения времени счёта при медленном выводе сделан переход к дифференцированию по ϕ и система (1) заменена одним уравнением.

ния Δn . Поле в III и IV квадрантах описывается при быстром и медленном выводе формулами (2) и (3), соответственно, для $\Delta n = 0$. Интегрирование уравнений (1) производилось методом Рунге-Кутты на ЭВМ (М-20, БЭСМ-4 и БЭСМ-6). Расчёт траектории заканчивался, когда частица достигала заданного радиуса на $\phi = \pi/2$ или π .

В результате расчётов траекторий протонов с различными начальными амплитудами и фазами, радиальных бетатронных колебаний были получены характеристики совокупности частиц после прохождения резонанса на требуемом R и ϕ ускорителя. Анализ этих данных позволил выбрать оптимальные резонансные условия в ускорителе, положение септум-магнита и получить фазовую картину пучка на его входе.

При быстром выводе лучшие характеристики пучка получены для положения проводников резонансной обмотки в камере на $R_0 + 10$ и $R_0 - 10$ см, величине $\Delta n = 0,2$ и координатах септум-магнита $R_0 + 20$ см, $\phi = \pi$. В этом случае угловой растрouser пучка на входе септум-магнита минимален, $\Delta \alpha = 0,6$ мрад, глубина заброса $\Delta \rho = 10$ см (рис. 2). Расчётная эффективность вывода с учётом потерь на септуме толщиной 0,5 см составляет $\approx 90\%$. Смещение септума на радиусы, меньшие и большие указанного, приводит или к снижению эффективности за счёт уменьшения шага нарастания амплитуд, или к ухудшению фазовой картины пучка.

Измеренная эффективность быстрого вывода $\approx 84\%$ [9].

Для вывода длительностью до 300 мсек лучшие характеристики пучка получены при расположении проводников резонансной обмотки на R_0 и $R_0 + 10$ см, величине $\Delta n = 0,3$, отсутствии азимутальной асимметрии и коррекции показателя поля на величину 0,2 во внутренней части камеры (рис. 3). Если септум-магнит расположен на координатах ($R_0 + 20$, $\phi = \pi$), пучок на его входе имеет глубину заброса $\Delta \rho = 18$ см, средний угол протонов α (N) изменяется за время вывода от 0

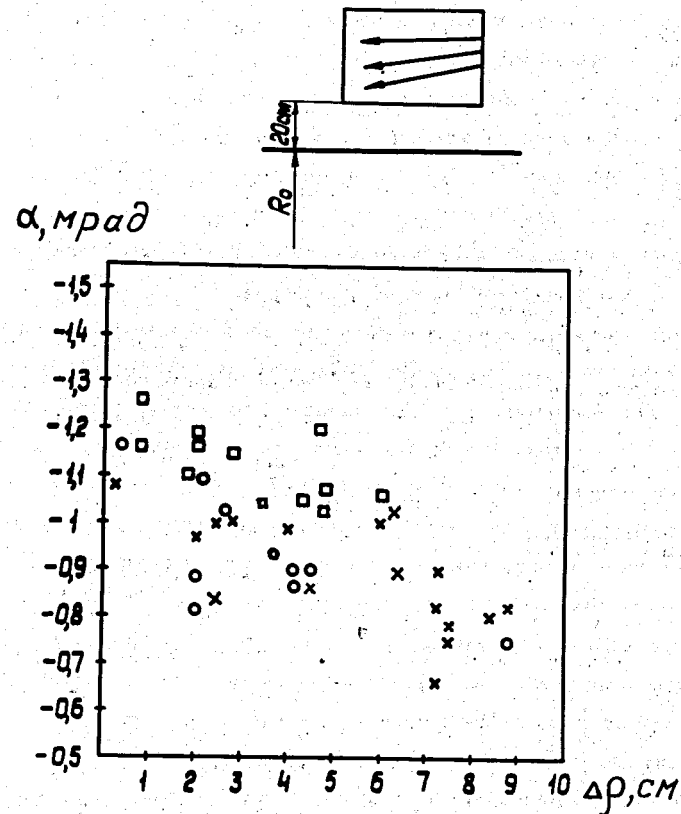


Рис. 2. Фазовая картина пучка, заброшенного в зазор септум-магнита при быстром выводе ($\Delta \rho$ расстояние от края септума). Частицы с различными начальными амплитудами обозначены: x - 0-2 см; o - 2 + 4,5 см; □ - 4,5 + 7 см.

до 1 мрад, $\Delta\alpha(N) = 0,6$ мрад и от времени не зависит (рис.4). Для координат септум-магнита ($R_0 + 16$ см, $\pi/2$) глубина заброса $\Delta\rho = 12$ см, угол $\alpha(N)$ растет за время вывода от 1,2 до 2,5 мрад, $\Delta\alpha \approx 0,7$ мрад и от N не зависит. Потери на септуме толщиной 1 см в первом случае составляют 8%, во втором - 12%. Длительность вывода с учётом импульсного разброса $\pm 1 \text{ МэВ/с}^{10/}$ составляет ≈ 200 мсек при $\dot{V} = 30$ гс/сек. При увеличении начального радиального размера пучка за счет азимутальной асимметрии поля эта величина возрастает до ≈ 300 мсек. Как показали расчёты, фазовые характеристики пучка на входе септум-магнита при прочих равных условиях практически не изменяются в пределах длительностей вывода $0,7 + 300$ мсек^{14/}. Плотность выведенных протонов во времени для выбранных резонансных условий неравномерна: она определяется исходным распределением протонов циркулирующего пучка по амплитудам свободных колебаний.

Чтобы избежать модуляции интенсивности выведенного пучка, необходимо подавление пульсаций поля ускорителя на "столе" тока^{11/}. Например, при 10-процентной модуляции пучка для гармоники с частотой $f = 50$ гц отношение ее амплитуды к V_{z0} ускорителя должно составлять $8,10^{-7}$.

В третьей главе диссертации рассмотрен следующий этап процесса вывода первичного пучка - отклонение и фокусировка его в поле септум-магнита и квадрантов ускорителя^{2,4,6,8,12/}. При выводе протонов из синхрофазотрона трасса вывода обычно на большом протяжении пересекает рассеянное поле ускорителя, которое существенно дефокусирует пучок в горизонтальном направлении. Для компенсации этого эффекта септум-магниты имеют жесткую фокусировку в горизонтальной плоскости. Применение двух внутренних магнитов для последовательного отклонения пучка при медленном выводе позволяет: 1) уменьшить угол отклонения и толщину септума в первом магните и тем самым снизить потери на нем; 2) сделать второй магнит

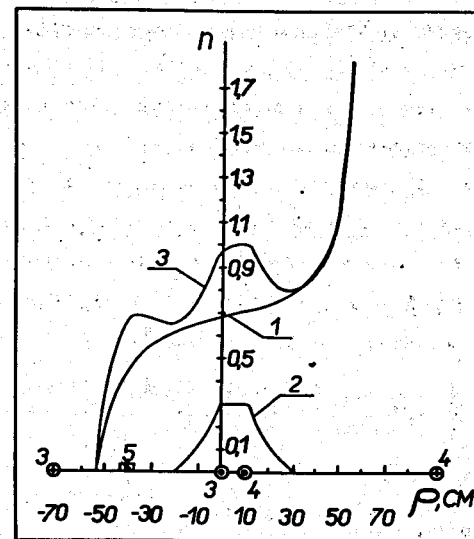


Рис. 3. Зависимость $n(\rho)$ в ускорителе при индукции 12600 гс (кривая 1). Зависимость $\Delta n(\rho)$ в I и II квадрантах, когда проводники резонансной обмотки находятся на R_0 и $R_0 + 10$ см (кривая 2). Зависимость $n(\rho) + \Delta n(\rho) + \Delta n \text{ кор}(\rho)$, где $\Delta n \text{ кор}(\rho)$ определяется током в проводнике (5) системы коррекции. Здесь $\rho = R - R_0$.

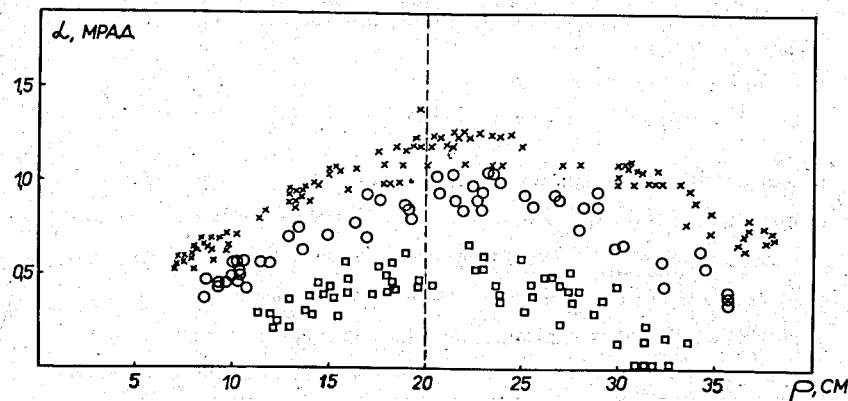


Рис. 4. Фазовые координаты протонов на двух последовательных оборотах до и после заброса в зазор септум-магнита при медленном выводе. Пунктиром показан край септума. Обозначения частиц те же, что и на рис. 2.

неподвижным^{x/} с большим углом отклонения, что сократит путь пучка в дефокусирующем краевом поле синхрофазотрона. Расчёт трассы вывода и фокусировки пучка выполнен с использованием полных уравнений движения и описанием поля септум-магнитов аналитически с точностью до величин второго порядка. Распределение вертикальной компоненты поля ускорителя задано двумерными таблицами с шагом 10 см^{13/}. В данном случае рассчитывались обе проекции траекторий. Нахождение компонент поля ускорителя $B_z(R, \phi, z)$, $B_R(R, \phi, z)$ и $B_\phi(R, \phi, z)$ производилось по известной величине $B_z(R, \phi, 0)$:

$$B_z(R, \phi, z) = B_z(R, \phi, 0) - \frac{z^2}{2} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial B_z(R, \phi, 0)}{\partial R} + \frac{\partial^2 B_z(R, \phi, 0)}{\partial R^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 B_z(R, \phi, 0)}{\partial \phi^2} \right],$$

$$B_R(R, \phi, z) = \frac{\partial B_z(R, \phi, 0)}{\partial R} z,$$

(4)

$$B_\phi(R, \phi, z) = \frac{1}{R} \frac{\partial B_z(R, \phi, 0)}{\partial \phi} z.$$

Формулы (4) получены из условий $\text{rot } \mathbf{B} = 0$, $\text{div } \mathbf{B} = 0$. В качестве начальных данных для настоящего расчёта использовались радиусы и углы протонов в горизонтальной плоскости, полученные в результате анализа их движения в условиях резонанса. Последовательный расчёт совокупности траекторий через септум-магнит и поле ускорителя позволил выбрать угол

^{x/} Внутренние магниты делаются, как правило, подвижными, чтобы избежать потерь пучка на них во время инжекции.

отклонения и показатель поля в септум-магнитах, обеспечивающих минимальные размеры пучка, выходящего по заданному направлению.

Для быстрого вывода рассчитана система внутренней фокусировки с использованием одного септум-магнита, расположенного на азимуте π (рис. 1А). Определен угол отклонения β_s и показатель поля n_s этого магнита, при которых выходящий пучок может транспортироваться без реконструкции магнита синхрофазотрона. На рис. 5 показана зависимость радиального размера пучка ΔR на азимуте $3/2 \pi$ от n_s в септум-магните при $\beta_s = 55'20''$. Полный горизонтальный размер пучка составляет 20 см, полный угловой разворот $\Delta \alpha = \pm 17$ мрад, 95% пучка сосредоточены в 14 см. Вертикальный размер пучка Δz не превышает 1 см, вертикальный угловой разворот $\alpha_z = \pm 1,6$ мрад. Расчётный горизонтальный эмиттанс пучка $\epsilon_R = 26 \pi$ мм мрад, вертикальный $\epsilon_z = 8,3 \pi$ мм мрад.

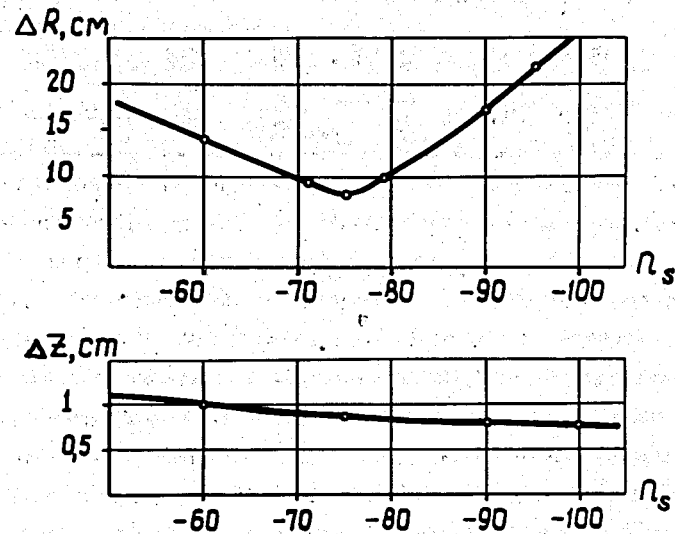


Рис. 5. Зависимость размеров выходящего пучка ΔR и Δz от показателя поля n_s в септум-магните при быстром выводе.

Параметры септум-магнита и характеристики пучка при настройке быстрого вывода хорошо совпали с расчётными^{/9/}.

При медленном выводе была исследована фокусировка для следующих вариантов: 1) используется один септум-магнит на координатах $(R_0 + 20 \text{ см}, \pi)$, и пучок выходит из ускорителя в конце III квадранта (рис. 1А); 2) используются два септум-магнита, расположенные на координатах $(R_0 + 16 \text{ см}, \pi/2)$ и $(R_0, \pi + 70 \text{ см})$, последовательно отклоняющие пучок, который выходит из ускорителя в начале III квадранта (рис. 1Б). В первом случае учитывалось изменение угла протонов на входе магнита во времени. Для септум-магнита длиной 80 см получены следующие характеристики выходящего пучка на $\phi = 3/2 \pi$:

Таблица 1

	β_s , мрад	n_s	ΔR см	$\Delta \alpha$, мрад	z , см	α_{\perp} , мрад	ϵ_R , мм мрад
Начало вывода	14,8	-100	12	$\pm 11,5$	$\pm 0,2$	$\pm 3,6$	16 π
Конец вывода	13,9	-110	10	± 8	$\pm 0,2$	$\pm 3,6$	13 π

Во втором случае выходящий пучок проходит меньшее дефокусирующее поле ускорителя, поэтому β_s и n_s во времени не изменялись. При β_{s1} и n_{s1} в первом магните 10 мрад и -850 соответственно (длина магнита 400 см), пучок на входе второго магнита сфокусирован до размера $\Delta R = 9 \text{ см}$, при угловом растворе $\Delta \alpha \approx 0$. После отклонения во втором магните на угол 0,107 рад (длина магнита 300 см, $n_{s2} = -28$) пучок выходит из ускорителя на азимуте $\pi + 0,33 \text{ рад}$ и имеет следующие характеристики: $\Delta R = 7,5 \text{ см}$, $\Delta \alpha = \pm 3 \text{ мрад}$, $\Delta z = 1,7 \text{ см}$; $\alpha_{\perp} = \pm 2,2 \text{ мрад}$. Угол отклонения в первом магните можно уменьшить, если сместить проводники резонансной обмотки и этот магнит на расстояние $30 + 40 \text{ см}$ от R_0 .

Все расчёты проведены при компенсации нелинейных эффектов в септум-магнитах^{/14/}. Учёт импульсного разброса пучка $\Delta p = \pm 1 \text{ МэВ/с}$ даёт увеличение ΔR и $\Delta \alpha$, не превышающее во всех случаях 10%.

Экспериментальная проверка применяемой методики расчётов показала, что их точность составляет $\sim 1\%$ ^{/15/}.

В четвертой главе приведен расчёт некоторых вариантов систем транспортировки протонного пучка при быстром и медленном выводе, получены параметры элементов систем, размеры и угловая расходимость пучка на внешних мишенях^{/2,4,7,8/}.

Расчёт систем транспортировки выполнен в линейном приближении с использованием матричного формализма и понятий геометрической оптики. Поворотные-фокусирующие системы, включающие в себя магниты с жесткой фокусировкой, а также ахроматическая часть системы рассчитывались как графоаналитическим способом, так и на ЭВМ.

Общий вид системы транспортировки, вторая ступень которой является ахроматической, показан на рис. 6. Первая ступень отклоняет выведенный пучок на 5° и формирует первое стигматическое изображение F_1 в пределах зала ускорителя. Головным элементом этой системы является магнит M2, который, кроме отклонения пучка, фокусирует его в горизонтальной плоскости, что упрощает дальнейшую транспортировку пучка. Параметры магнита M2 и следующих за ним квадрупольных линз подбираются таким образом, чтобы протонный пучок был сфокусирован в обеих плоскостях на требуемом расстоянии. В точке F_1 может быть помещена мишень, проходя через которую, первичный пучок получает дополнительный разброс по углам и энергиям. Чтобы избежать связанного с этим увеличения размеров изображения в F_3 , вторая ступень, кроме фокусировки пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях, должна компенсировать дисперсию в поворотных магнитах M_3 и M_4 , вызванную дополнительным импульсным разбросом частиц Δp . Влияние энергетического разброса исключается с помощью линзы Q_5 ;

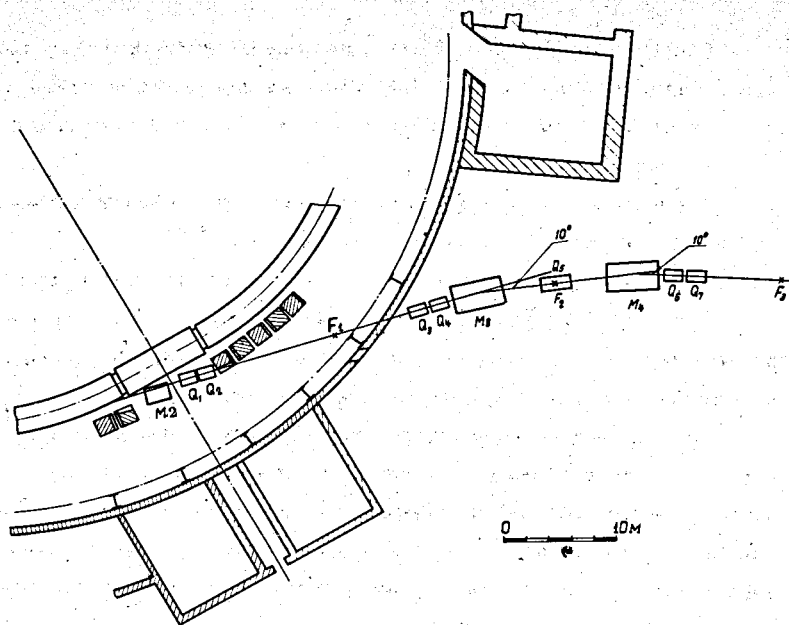


Рис. 6. Общий вид системы транспортировки. Расстояние от выхода Q_2 до F_1 - 11 м, от F_1 до входа Q_3 - 7 м, от выхода Q_4 до входа Q_5 - 12 м. Вторая ступень системы является ахроматической.

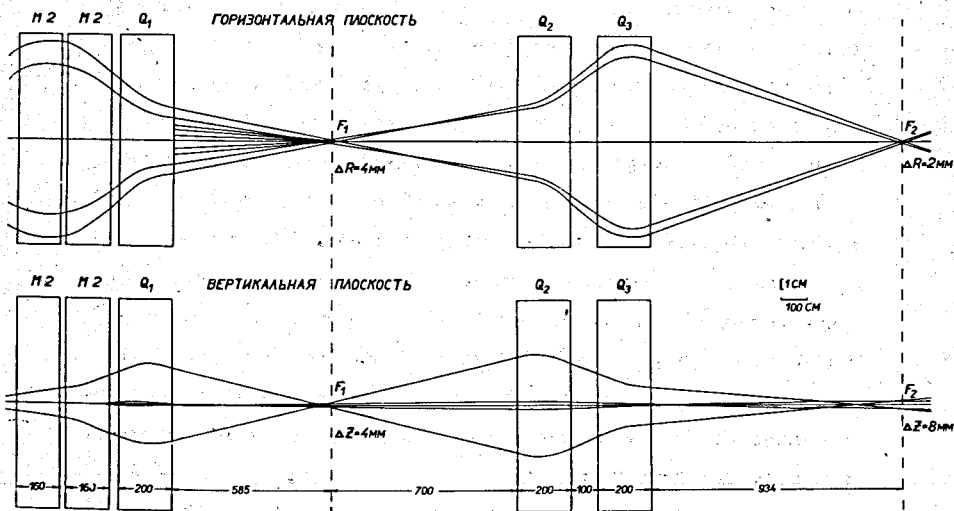


Рис. 7. Ход крайних траекторий в системе транспортировки пучка при медленном выводе.

фокусирующей в горизонтальной плоскости. Трехмерные матрицы преобразования координат, углов и $\Delta p/p$ - частиц от точки F_1 до точки F_3 /16/ для горизонтальной плоскости:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

для вертикальной плоскости:

$$N = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & 0 \\ n_{21} & n_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Чтобы получить в точке F_3 стигматическое изображение пучка, размер которого не зависит от импульсного разброса $\Delta p/p$, необходимо выполнить условия:

$$\begin{aligned} m_{12} &= 0 ; & n_{12} &= 0 ; \\ m_{13} &= 0 ; & n_{23} &= 0 . \end{aligned} \quad (7)$$

При выбранных углах отклонения пучка в магнитах M_3 и M_4 расчёт данной части тракта транспортировки сводится к расчёту дублетов квадрупольных линз $Q_3 - Q_4$, $Q_6 - Q_7$ и выбору параметров линзы Q_5 . Размеры и угловая расходимость пучка в точках F_1 , F_2 и F_3 такой системы при быстром выводе протонов приведены в таблице II. В данном случае вторая половина системы от точки F_2 до F_3 является зеркальным отображением первой.

Для медленного вывода протонов при выходе пучка в конце III квадранта ускорителя был рассчитан тракт транспортировки, первая ступень которого подобна вышеописанной, а вто-

рая состоит из дублета квадрупольных линз. Крайние траектории для моноэнергетического пучка протонов, просчитанные через эту систему, приведены на рис. 7, размеры и угловая расходимость пучка - в таблице III.

Таблица II

Обозначения точки		F_1	F_2	F_3
Горизонтальная плоскость	Размер, см	1,3	4	1,3
	Угловая расходимость, мрад	± 4	$\pm 1,5$	$\pm 5,2$
Вертикальная плоскость	Размер, см	2	1,4	2
	Угловая расходимость, мрад	1,6	$\pm 2,3$	$\pm 2,1$

Таблица III

Обозначения точки		F_1	F_2
Горизонтальная плоскость	Размер, см	0,4	0,2
	Угловая расходимость, мрад	$\pm 4,5$	$\pm 9,5$
Вертикальная плоскость	Размер, см	0,4	0,8
	Угловая расходимость, мрад	$\pm 6,2$	$\pm 2,4$

Искажения, вносимые в первое изображение F_1 дисперсией за счёт импульсного разброса 0,01%, составляют $\approx 4\%$. Изменение изображения за счёт хроматических aberrаций в этом случае пренебрежимо мало. Форма полюсов магнита M-2 выбрана так,

чтобы свести к минимуму нежелательное влияние нелинейностей его поля, которые нарушают стигматизм и увеличивают размер первого изображения.

Расчитаны также размеры пучка в месте первого изображения при медленном выводе протонов в начале III квадранта. В качестве первой ступени в данном случае использован дублет квадрупольных линз. При расстоянии до изображения ≈ 3 м пятно пучка в указанной точке имеет площадь: $3 \times 0,3 \text{ см}^2$.

Результаты расчётов, изложенные в настоящей диссертации, легли в основу разработки систем резонансного вывода протонного пучка на синхрофазотроне ОИЯИ.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработана методика расчёта траекторий протонов в магнитном поле синхрофазотрона ОИЯИ при полуволновом резонансе.
2. Расчёт и анализ динамики частиц в условиях резонанса позволил выбрать оптимальные резонансные условия, определить положение септум-магнитов и получить фазовую картину пучка на их входе в пределах длительностей вывода 30 мксек-300 мксек.
3. Предложена и разработана методика расчёта траекторий заряженных частиц в септум-магнитах и краевом неоднородном поле ускорителя.
4. Произведен расчёт трасс вывода, углов и градиентов септум-магнитов и характеристик пучка на выходе из ускорителя.
5. Сделан выбор структуры нескольких вариантов трактов транспортировки протонных пучков.
6. Расчитаны параметры элементов этих трактов, размеры и расходимость пучка на внешних мишенях.

Л и т е р а т у р а

1. M.Q. Barton, J.E.E.E. Transaction on Nuclear Science NS-14, No 3, June (1967).
2. Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, В.И. Котов, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Н.И. Павлов. Препринт ОИЯИ P-2387, Дубна, 1965.

3. Б.В. Василишин, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Л.М. Панченко, Р.Н. Федорова. Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. ВИНТИ, т. II Москва (1970).
4. Б.В. Василишин, Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Н.И. Павлов. Сообщение ОИЯИ 9-5064, Дубна, 1970.
5. Б.В. Василишин, Е.М. Кулакова, Л.М. Панченко, Р.Н. Федорова. Препринт ОИЯИ 9-4223, Дубна, 1968.
6. Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Л.А. Смирнова, Б.В. Феоктистов. Препринт ОИЯИ Р-2880, Дубна, 1966. Совещание по формированию пучков заряженных частиц высоких энергий. Препринт ОИЯИ 9-3582, Дубна, 1967.
7. Е.М. Кулакова. Сообщение ОИЯИ 9-4386, Дубна, 1969.
8. Б.В. Василишин, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова. Сообщение ОИЯИ 9-4385, Дубна, 1969.
9. В.П. Заболотин, Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, С.А. Новиков. Сообщение ОИЯИ 9-4749, Дубна, 1969.
10. Г.С. Казанский, А.П. Шаренков. Препринт ОИЯИ 2491, Дубна, 1965.
11. Л.Н. Беляев, А.А. Смирнов. Сообщение ОИЯИ 9-4387, Дубна, 1969.
12. Б.В. Василишин, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова. Депонированное сообщение ОИЯИ Б2-9-4729, Дубна, 1969.
13. Е.А. Дементьев, И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, М. Полак, Ф. Хованец. Препринт ОИЯИ Р-2818, Дубна, 1966.
14. И.Б. Иссинский, Е.М. Кулакова, К.П. Мызников, Л.А. Смирнова. Препринт ОИЯИ 2326, Дубна, 1965.
Nuclear Instr. and Methods, 147-150, 48 (1967).
15. А.С. Вовенко, Т. Добровольский, М.Ф. Лихачев, Ю.А. Матуленко, В.С. Ставинский. Препринт ОИЯИ 13-3319, Дубна, 1967.
16. S. Penner. Rev. Scient. Instr., 32, 150 (1961).

Рукопись поступила в издательский отдел
25 июня 1970 года.