

B-19

9 - 8716

ВАСИЛИШИН
Богдан Владимирович

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат технических наук
старший научный сотрудник Игорь Борисович Иссинский.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических
наук старший научный сотрудник
Владимир Васильевич Кольга,
кандидат физико-математических
наук старший научный сотрудник
Игорь Александрович Шукейло.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ин-
ститут теоретической и экспериментальной физики /Моск-
ва/.

Автореферат разослан " " _____ 1975 г.
Защита диссертации состоится " " _____ 1975 г.
в " " часов на заседании Ученого совета Лаборатории
высоких энергий Объединенного института ядерных ис-
следований /г. Дубна, Московской области, ОИЯИ/.

Ученый секретарь
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

М. Ф. Лихачев

" " _____ 1975 г.

9 - 8716

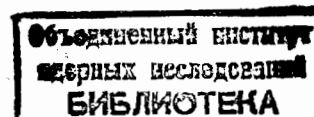
ВАСИЛИШИН
Богдан Владимирович

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Вывод первичных пучков позволяет, во-первых, благодаря применению внешних мишеней, значительно эффективнее использовать ускоренный пучок для физических экспериментов и, во-вторых, повышать интенсивность пучка без создания дополнительной дорогостоящей защиты. В результате проведенных на синхрофазотроне ОИЯИ работ к 1973 году была создана система медленного вывода пучка, позволяющая выводить первичный пучок с эффективностью более 90% за время от 50 до 500 мсек.

Настоящая диссертация посвящена исследованию динамики пучка в процессе резонансного вывода и расчету характеристик выводной системы. В основу диссертации легли работы /1-9/, выполненные автором или при его участии в ОИЯИ в 1968-1973 гг. Диссертация состоит из введения, четырех глав и приложения.

Во введении рассмотрены различные методы вывода первичных пучков и произведен сравнительный анализ свойств резонансов бетатронных колебаний с точки зрения применимости их для медленного вывода. На синхрофазотроне ОИЯИ ближайшими к рабочей точке ($n=0,67$) резонансами радиальных бетатронных колебаний являются $\nu_x = 1/2$ ($n = 0,79$) и $\nu_x = 2/3$ ($n=0,624$). При использовании для медленного вывода резонанса $\nu_x = 1/2$ /10/ приходится последовательно пересекать резонансы $2\nu_x + 2\nu_z = 3$ ($n=0,73$) и $2\nu_x + \nu_z = 2$ ($n=0,77$). Расчеты и эксперимент показали, что воздействие этих резонансов приводит к потере части пучка и величина потерь возрастает с уменьшением скорости изменения ν . Предпочтительнее в этом отношении резонанс $\nu_x = 2/3$, при подходе к которому не пересекаются опасные резонансы.

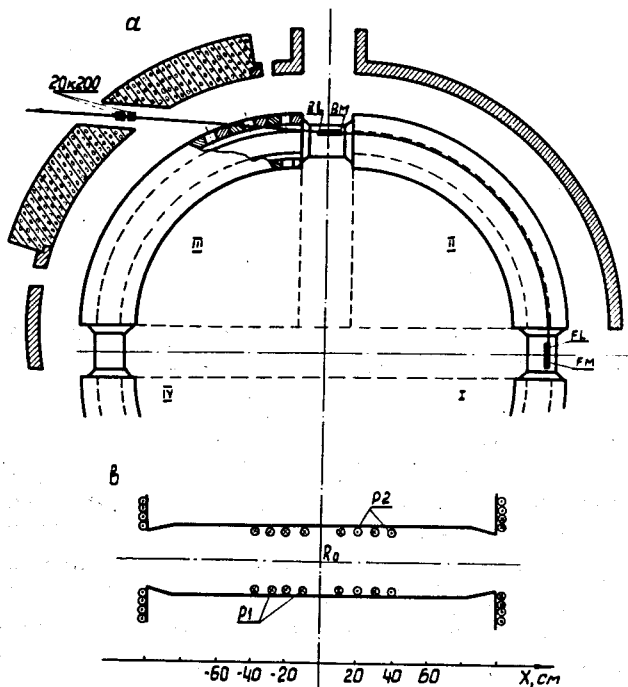


Рис. 1. Расположение оборудования системы медленного вывода пучка /а/ и проводников полюсных обмоток P1 и P2 /б/.

Высокая эффективность вывода достигается за счет большой глубины заброса пучка в зазор первого отклоняющего септум-магнита /15-20 см/, что возможно благодаря достаточной ширине рабочей области синхрофазотрона в конце ускорения и устранению влияния его нелинейностей /3/.

На рис. 1а показано расположение оборудования системы медленного вывода пучка. В промежутке между I и II квадрантами находится первый септум-магнит FM и горизонтально-фокусирующая линза FL, формирующие пучок на входе второй выводной ступени. Исходя из характеристик пучка при резонансе, связанных с нелинейностями поля, рабочее положение FM выбрано на рас-

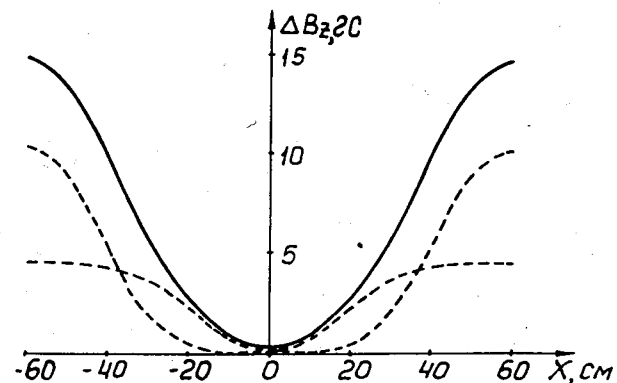


Рис. 2. Распределение возмущения $\Delta B_z(x)$, создаваемого токами обмотки P2. Пунктирными кривыми показан вклад в это распределение тока в каждом проводнике. Значения токов составляют: $i/x = \pm 20 \text{ см}/=65 \text{ А}$, $i/x = \pm 40 \text{ см}/=155 \text{ А}$.

стоянии $x_s = +35 \text{ см}$ от центра камеры, поэтому первая ступень должна быть подвижной. Положение второй ступени, также состоящей из магнита и горизонтально-фокусирующей линзы, выбрано на расстоянии $x = +70 \text{ см}$, что позволяет: во-первых, для обеспечения небольшой толщины септум-магнита FM отклонять в нем пучок на угол, не превышающий 14 мрад , и, во-вторых, сделать вторую ступень неподвижной, а также, поскольку в этом случае практически нет ограничений на ее вес, достаточно сильной для отклонения пучка на угол порядка $0,2-0,3 \text{ рад}$, чтобы обеспечить прохождение им минимального пути в нелинейном рассеянном поле III квадранта. Головная ступень внешней транспортировки рассматривалась состоящей из дублета квадрупольных линз.

Возбуждение резонанса производится с помощью двух полюсных обмоток /рис. 1в/. Обмотка P1, включающая в себя 8 проводников, расположенных на радиусах $R_0 \pm 10 \text{ см}$ и $R_0 \pm 30 \text{ см}$, изменяет показатель поля до резонансного значения. Обмотка P2 с проводниками, расположенными на $R_0 \pm 20 \text{ см}$ и $R_0 \pm 40 \text{ см}$, вводит вторую гармонику возмущения. Требуемая зависимость возмущения от радиуса формируется подбором соотношения токов в проводниках /рис. 2/. Обратные проводники обмоток проложены

так, что дипольная компонента поля на R_0 отсутствует.

Расчет производился как численными, так и аналитическими методами. На первом этапе с помощью аналитических методов были получены основные соотношения, характеризующие поведение пучка при резонансе, и приближенные значения параметров выводной системы. Затем с учетом полученных результатов было выполнено численное моделирование режимов вывода с использованием карты магнитного поля, полученной путем измерений.

Первая глава посвящена аналитическому исследованию поведения пучка при выводе в условиях резонанса $\nu_x = 2/3$. При этом использовалось гладкое приближение ^{/11/} и движение рассматривалось в плоскости $z=0$. Уравнение движения с учетом лишь членов, влияющих на резонанс ^{/5/}, принимает вид

$$x'' + (1 - n_0 - n_2 x^2 - \dots) I x = -(k_0 + k_2 x^2 + k_4 x^4) \sin 2\theta, \quad /1/$$

где $x = R_0 - R_c = R_0 - R_0 I$ - отклонение от сглаженного центрального радиуса, R_0 - центральный радиус в квад-

ранте ускорителя, $I = 1 + \frac{2L}{\pi R_0}$, L - длина прямолинейного

промежутка. Дифференцирование ведется по азимуту θ . Уравнение /1/ описывает движение в меданной плоскости ускорителя с показателем поля $n(x) = n_0 + n_2 x^2 + \dots$ при наличии 2-й азимутальной гармоники возмущения $\Delta B_z = b_0 + b_2 x^2 + b_4 x^4$, которую на синхрофазотроне ОИЯИ наиболее просто создать, чередуя знаки возмущения в соседних квадрантах. Связь между k_m и b_m / $m=0, 2, 4$ / дается выражением

$$k_m = \frac{4}{\pi} \frac{R_c}{B_c} b_m, \quad /2/$$

где $B_c = \frac{R_0 B_0}{R_c}$, B_0 - вертикальная проекция магнитного

поля на радиусе R_0 , а коэффициент $4/\pi$ получается из разложения ступенчатой формы возмущения в ряд Фурье.

Присутствие в возмущении дипольного члена k_0 приводит к искажению равновесной орбиты, которая в этом

случае с точностью до величин второго порядка описывается формулами

$$x_0 = \frac{k_0}{4 - (1 - n_0) I} \sin 2\theta, \quad x_0' = \frac{2k_0}{4 - (1 - n_0) I} \cos 2\theta, \quad /3/$$

и к изменению эффективных значений n_0, k_2, k_4, n_2 . В частности, эффективное значение n_0 изменяется на величину

$$\delta n = - \frac{k_0 k_2}{[4 - (1 - n_0) I] I} \quad /4/$$

С помощью первого приближения метода Крылова-Боголюбова ^{/12/} была получена система уравнений, описывающая движение на нормализованной фазовой плоскости $(x, u = 3/2 x')$ на азимуте $\theta = 0$ в декартовой системе координат

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{3}{16} k_2 (x^2 - u^2) + \frac{3}{64} k_4 (3x^4 + 6x^2 u^2 - 5u^4) - \frac{3}{4} I \Delta n u - \frac{9}{16} n_2 I u (x^2 + u^2), \quad /5/$$

$$\frac{du}{d\theta} = - \frac{3}{8} k_2 x u - \frac{3}{16} k_4 x u (u^2 + 3x^2) + \frac{3}{4} I \Delta n x + \frac{9}{16} n_2 I x (x^2 + u^2),$$

где x - отклонение от равновесной орбиты.

При $n_2 = 0$, $k_4 = 0$ /возмущение $b_2 x^2 \sin 2\theta$ / координаты особых точек системы /5/ равны

$$x_0 = 0, u_0 = 0; x_1 = 0, u_1 = - \frac{4\Delta n I}{k_2}; x_{2,3} = \pm 2\sqrt{3} \frac{\Delta n I}{k_2}, \quad /6/$$

$$u_{2,3} = \frac{2\Delta n I}{k_2}$$

Первая из этих точек является устойчивой особой точкой типа "центр", а остальные - неустойчивыми точка-

ми типа "седло". Прямые, соединяющие эти точки, являются одним из решений системы и определяют область устойчивости. Фазовые траектории, проходящие через точки вне этой области, уходят в этом случае в бесконечность. При $\Delta n \rightarrow 0$ площадь области устойчивости стремится к нулю. Полный эмитанс выведенного пучка определяется площадью, ограниченной разомкнутыми ветвями сепаратрисы в начале и в конце вывода. Для его уменьшения необходимо изменять угол поворота в FM так, чтобы компенсировать уменьшение угла входа частиц в FM в течение вывода. Мгновенный эмитанс выведенного пучка определяется величиной импульсного разброса и зависимостью n от радиуса /рис. 3/.

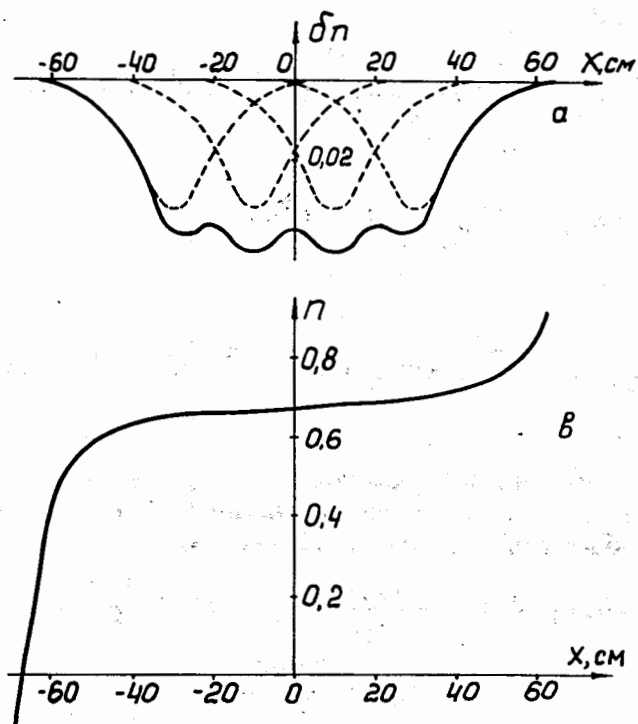


Рис. 3. Зависимость изменения показателя поля от x , создаваемая током 40А в обмотке P1 при индукции $B = 10$ кГс /а/, и зависимость $n(x)$ при $B_0 = 10$ кГс в отсутствие возмущения.

Из системы /5/ были получены выражения для глубины заброса в FM, начальной расстройки, эффективности вывода, а также для допусков на коэффициенты n_2 и k_4 , вызывающие, как это следует из /5/, стабилизацию движения. Величина k_4 минимальна, если в ветвях обмотки P2 выполнено следующее соотношение токов: $i(x = \pm 20 \text{ см}) / i(x = \pm 40 \text{ см}) = 0,42$. Присутствие в разложении показателя поля при резонансе члена $n_2 x^2$ приводит к стабилизации движения частиц с начальной амплитудой $a_0 < 4$ мм.

Пульсации в системах питания вызывают неравномерность тока выведенного пучка. Наиболее жесткие требования предъявляются к системам питания P1 /отношение амплитуды пульсаций к току должно быть меньше 0,004%/ и к столу главного тока /отношение амплитуды к полю меньше 0,003%/. Применение режима вывода с включенным ВЧ снижает требования к допускам на порядок. Влияние пульсаций можно в значительной степени скомпенсировать, меняя с помощью быстродействующей обратной связи скорость изменения тока в P1 пропорционально разности между заданной интенсивностью выведенного пучка и интенсивностью в данный момент.

Во второй главе приведены метод и результаты расчетов на ЭВМ резонансных условий и характеристик пучка на входе FM. Интегрировались полные уравнения движения при $z = 0$. Магнитное поле в пределах каждого квадранта принималось азимутально однородным, а его распределение по радиусу задавалось в соответствии с измерениями. Прямолинейные промежутки рассматривались как свободное пространство.

На рис. 4 показаны характеристики пучка при индукции $B_0 = 10$ кГс на входе FM в течение вывода. Величина импульсного разброса принималась равной $\frac{\Delta p}{p_0} = \pm 2 \cdot 10^{-4}$. Вначале /при токе в обмотке P1 $I_1 = 38,36$ А/ выводятся частицы максимальных амплитуд с импульсом $p_0 - \Delta p$. Эмитанс и импульсный разброс выводимого пучка в этот момент минимальные и увеличиваются с ростом I_1 . При $I_1 = 42,28$ А выводятся частицы всех импульсов от $p_0 - \Delta p$ до $p_0 + \Delta p$. Фазовая область, занимаемая при этом пучком, показана на рисунке кривой штриховкой. При уве-

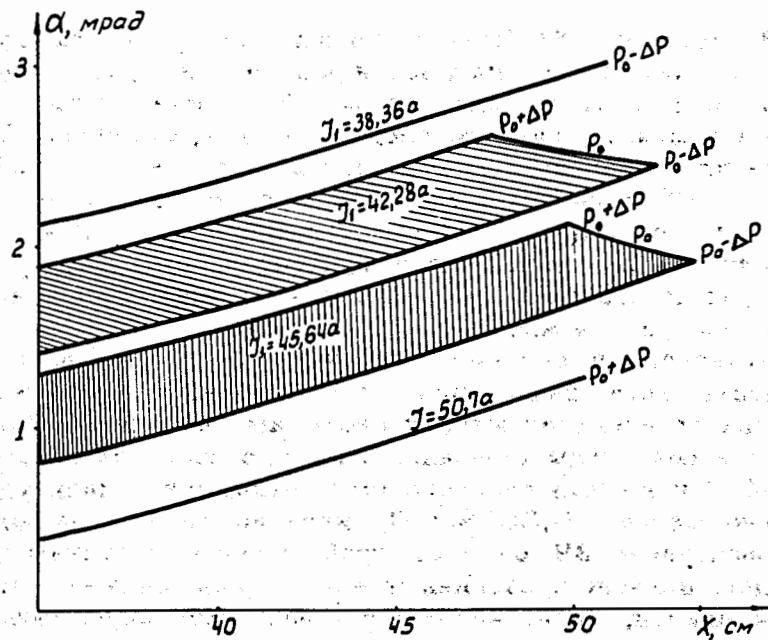


Рис. 4. Фазовые характеристики пучка на входе FM в течение вывода.

личении I_1 от 42,28А до 45,64А эмитанс несколько увеличивается. Фазовая область на входе FM, занимаемая пучком при $I_1 = 45,64$ А, показана на рисунке вертикальной штриховкой. При дальнейшем увеличении эмитанс и импульсный разброс уменьшаются до нуля при $I_1 = 50,7$ А.

В третьей главе изложены расчеты системы транспортировки выведенного пучка, которые производились на ЭВМ БЭСМ-6 и СДС-6200 по программе FORM^{7/} для поля в ускорителе, заданного на основании магнитных измерений. В качестве начальных условий в горизонтальной плоскости принимались фазовые координаты трех точек на азимуте FM, определяющие середину и края пучка. Для каждой из этих точек задавался набор начальных условий в вертикальной плоскости, соответствующий вертикальному эмитансу циркулирующего пучка.

Расчет производился как для режима с промежуточным изображением в горизонтальной плоскости /так

называемый режим перефокусировки/, так и для режима без такого промежуточного изображения /режим недофокусировки/. На рис. 5 показаны траектории частиц внутри II квадранта при этих режимах. В режиме недофокусировки разные траектории проходят области с различными значениями n , что приводит к существенному возрастанию эффективного эмитанса в обеих плоскостях. В режиме перефокусировки, начиная с азимута промежуточного изображения, крайние траектории меняются местами, что значительно выравнивает среднее значение

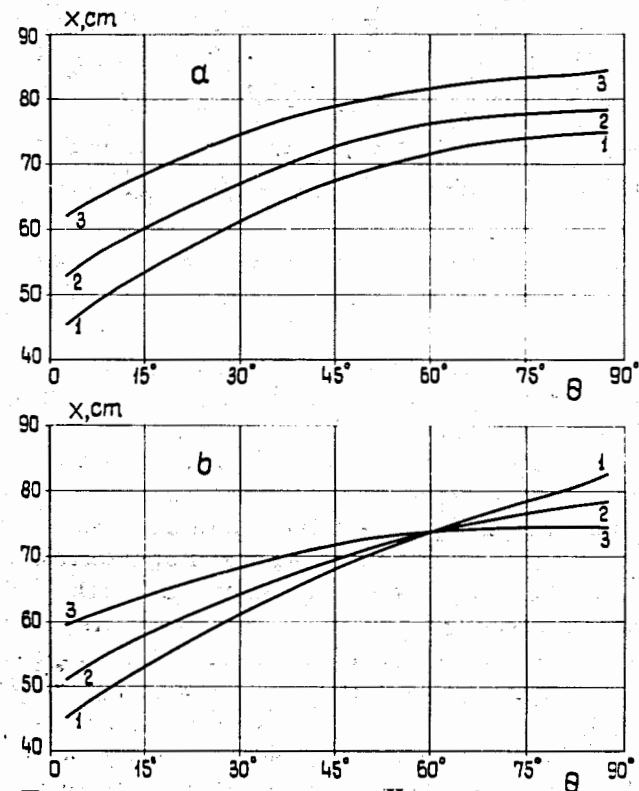


Рис. 5. Траектории протонов во II квадранте для режима недофокусировки /а/ и перефокусировки /б/. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют внутренней, центральной и наружной частицам на входе FM. По оси абсцисс отложен азимут θ в градусах.

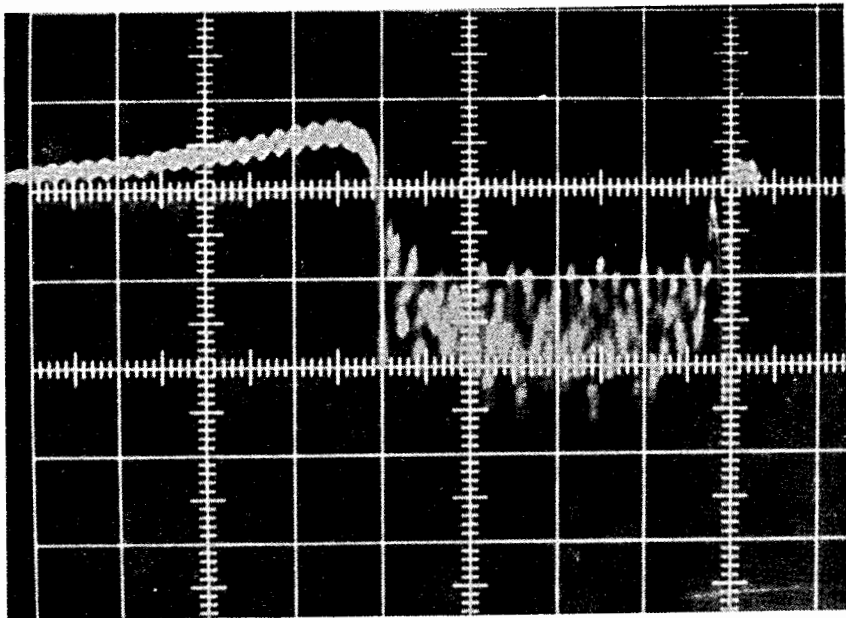


Рис. 6. Осциллограмма тока выведенного пучка. Масштаб времени: 100 мсек на деление.

п вдоль каждой из траекторий, вследствие чего влияние нелинейностей поля на эффективный эмитанс выведенного пучка в этом режиме значительно меньше.

Расчет, выполненный для режима перефокусировки и импульсного разброса $\pm 2 \cdot 10^{-4}$, дал следующие значения эмитанса на выходе из ускорителя; горизонтальный эмитанс составляет 64π мм.мрад; вертикальный 53π мм.мрад.

В четвертой главе приведены полученные в результате измерений параметры системы вывода, произведено их сравнение с расчетными, а также рассматриваются некоторые предложения по уменьшению эмитанса выведенного пучка и увеличению эффективности вывода.

Запуск системы медленного вывода показал хорошее соответствие полученных параметров с расчетными. Измеренная эффективность вывода составила 94%. На рис. 7 приведена фотография пучка на внешней мишени /на рас-

стоянии 1,5 м от выхода из внешнего дублета квадрупольных линз/. Размер пучка составляет: 20 мм по горизонтали и 5 мм по вертикали. Сравнение расчетных и полученных параметров при индукции $B_0 = 10$ кГс приведено ниже в таблице.

Из таблицы видно, что экспериментально полученное значение горизонтального эмитанса в 1,5 раза превосходит расчетное. Это объясняется дрожанием пучка в процессе вывода из-за нестабильностей в системе питания выводных магнитов. Ведущиеся в настоящее время работы по введению в цепь питания этих магнитов быстродействующей обратной связи позволят свести этот эффект к минимуму.

На рис. 6 показана осциллограмма тока выведенного пучка, полученная в режиме вывода с включенным ВЧ. Длительность вывода 350 мсек. Как видно из осциллограммы, модуляция интенсивности выведенного пучка не превышает 50% и вызвана главным образом пульсациями в системе питания P1 и в столе главного тока. Вве-

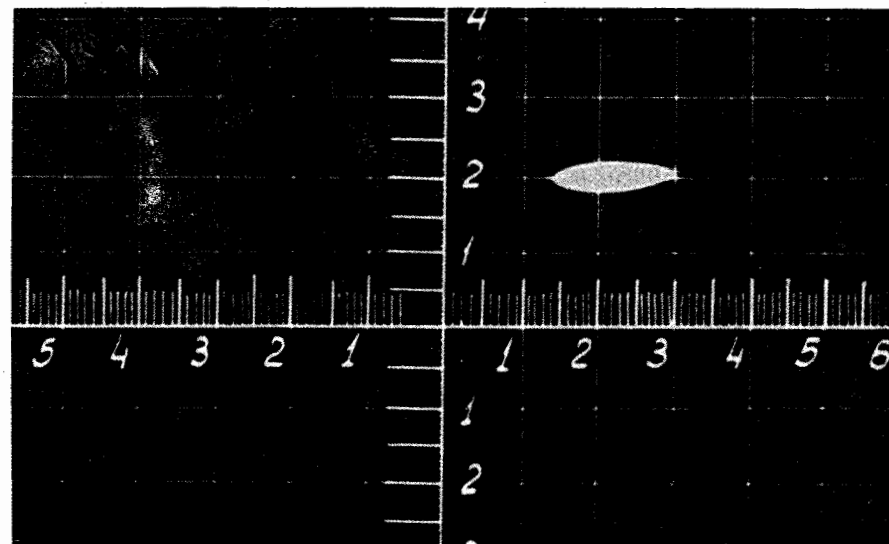


Рис. 7. Фотография пучка на внешней мишени. Шкалы - в см.

Расчетное значение	Экспериментальный результат
Значение тока в обмотке P2 ($4X_2 = I7cm$)	210A
Изменение тока в P1, необходимое для полного вывода пучка	9 A
Значение поля FM в момент начала вывода	2050 Гс
Значение поля FM в конце вывода	2200 Гс
Значение градиента линзы FL	100 Гс / см
Величина магнитного поля в FM	9500 Гс
Значение градиента линзы VL	340 Гс / см
Горизонтальный размер пучка в изображ.	22 мм
Горизонтальный эмитанс выведенного пучка	95 мм.мрад
Вертикальный размер пучка в изображении	4 мм
Вертикальный эмитанс выведенного пучка	50 мм.мрад
Эффективность вывода	94%

дение в цепь питания P1 быстродействующей обратной связи значительно уменьшит этот эффект и, возможно, позволит в качестве рабочего режима медленного вывода использовать режим с отключенным ВЧ. В настоящее время в этом режиме пучок выводится в виде последовательности сгустков.

Эмитанс выведенного пучка можно уменьшить, корректируя зависимость показателя поля от радиуса. Расчеты показали, что с помощью сравнительно простых коррекций можно добиться уменьшения горизонтального эмитанса более чем в 2 раза.

В приложении приведено описание программы, позволяющей рассчитывать горизонтальную и вертикальную проекции траекторий заряженных частиц в магнитном поле синхрофазотрона с учетом его рассеянных полей при различных значениях индукции.

Основные результаты изложенных в диссертации работ сводятся к следующему.

1. На основе анализа влияния резонансов, лежащих между $\nu_x = 1/2$ и $\nu_x = 2/3$, на динамику пучка показано, что для медленного вывода наиболее целесообразно использовать резонанс $\nu_x = 2/3$, при подходе к которому не пересекаются резонансы, заметно влияющие на динамику пучка.

2. С помощью метода Крылова-Боголюбова исследованы свойства резонанса $\nu_x = 2/3$ и рассмотрены особенности вывода при использовании возмущений $b_2 x^2 \sin 2\theta$ и $b_4 x^4 \sin 2\theta$. Изучено влияние стабилизирующих нелинейностей. Выбрана схема вывода, позволяющая получать высокую эффективность $\approx 94\%$ при достаточно малом эмитансе выведенного пучка. Исследовано влияние импульсного разброса. Оценены допуски на пульсации в системах питания. Произведен учет некоторых эффектов, связанных с нестационарностью показателя поля.

3. Выполнено численное моделирование на ЭВМ БЭСМ-6 и СДС-6200 движения пучка при выводе. В результате расчетов были получены требуемые значения резонансных токов и характеристики пучка на входе в FM в течение вывода.

4. Выполнен расчет параметров системы транспортировки выведенного пучка и получены его характеристики

в точке первого изображения. Показано, что нелинейные искажения в краевом поле минимальны, если пучок имеет внутри II-го квадранта промежуточное изображение в горизонтальной плоскости, что позволяет значительно уменьшить эмитанс выведенного пучка.

5. Произведено сравнение экспериментальных результатов с расчетными. Сравнение показывает хорошее совпадение расчетных и полученных в процессе настройки системы параметров. Эффективность вывода составляет 94%.

6. Показана возможность с помощью специально подобранного соотношения токов в проводниках P_1 уменьшить более чем в 2 раза горизонтальный эмитанс выведенного пучка. При этом значительно снижаются требования к стабильности стола главного тока.

7. Рассмотрена схема вывода с тремя отклоняющими магнитами, позволяющая повысить эффективность до $\approx 99\%$.

Литература

1. С.А.Аверичев и др. Всесоюзное совещание по ускорителям, т. II, стр. 104, Москва, Наука, 1973.
2. I.B.Issinsky, S.V.Kalyonov, E.M.Kulakova, S.A.Novikov, B.D.Omelchenko, N.I.Pavlov, V.F.Sikolenko, B.V.Vasilishin, V.I.Volkov and L.P.Zinoviev. Part. Accel., vol. 5, 1973, pp. 215-226.
3. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова. ОИЯИ, Р9-6972, Дубна, 1973.
4. Б.В.Василишин и др. ОИЯИ, Р9-6973, Дубна, 1973; 9-7498, Дубна, 1974.
6. Б.В.Василишин, Е.М.Кулакова. ОИЯИ, 9-6720, Дубна, 1972.
7. Б.В.Василишин, Е.М.Кулакова, В.А.Михайлов. ОИЯИ, 9-7670, Дубна, 1974.
8. Б.В.Василишин. ОИЯИ, 9-8049, Дубна, 1974.
9. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский. ОИЯИ, 9-8056, Дубна, 1974.
10. Б.В.Василишин и др. Всесоюзное совещание по ускорителям, т. II, Москва, Наука, 1970.
11. В.И.Котов, А.Б.Кузнецов, Н.Б.Рубин. ОИЯИ, Р-1331, Дубна, 1963.
12. Н.Н.Боголюбов, Ю.А.Митропольский. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Физматгиз, Москва, 1958.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 марта 1975 года.