

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ45e3
В-19

28/x-74

9-8049

4241/2-74

Б.В.Василишин

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РАЗБРОСА ПУЧКА
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ НА ЕГО ЭМИТТАНС
ПРИ ВЫВОДЕ**

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9-8049

Б.В.Василишин

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РАЗБРОСА ПУЧКА
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ НА ЕГО ЭМИТТАНС
ПРИ ВЫВОДЕ**

**Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА**

I. Введение

В работах /1-3/ приведены результаты численного расчета характеристик выведенного пучка. При этом циркулирующий пучок предполагался моноэнергетическим. Однако в /3,4/ показано, что при импульсном разбросе $\Delta p/p_0 \geq 0,01\%$ и длительности вывода $\tau \geq 0,1$ сек даже для машины с постоянным по радиусу значением показателя поля величина мгновенного горизонтального эмиттанса на входе FM определяется уже не скоростью изменения μ , как для моноэнергетического пучка, а величиной импульсного разброса. Увеличение эмиттанса объясняется тем, что частицам с импульсом, отличным от равновесного, соответствуют также отличные значения секступольного коэффициента k_2 . Зависимость показателя поля от радиуса еще более усиливает зависимость эмиттанса на входе FM от величины импульсного разброса, так как равновесным орбитам частиц с различными импульсами соответствуют различные значения расстройки Δn , а следовательно, согласно /4/, различные значения углов на входе FM. Кроме того, так как равновесные орбиты, соответствующие частицам различных импульсов, неодинаково удалены от септума FM, глубина заброса в зазор различается для частиц с разными импульсами, что несколько снижает эффективность вывода. Зависимость расстройки Δn от радиального положения пучка, возникающая вследствие зависимости $n(R)$, накладывает очень жесткие требования /3,5/ на стабильность стола ведущего магнитного поля, особенно в режиме вывода с отключенным высокочастотным напряжением.

В настоящей работе рассматривается влияние импульсного разброса на эмиттанс выведенного пучка. Исследована возможность его уменьшения при выводе с помощью коррекции показателя магнитного поля, выполняемой подбором определенного соотношения токов в различных ветвях обмотки P1. Рассмотрен также подбор соотношения этих токов, позволяющий максимально снизить требования на стабильность стола ведущего магнитного поля.

II. Характеристики выведенного пучка при равных значениях токов в проводниках P1

Расчеты проводились по методике, рассмотренной в /1-3/, для частиц с импульсами $p_0 + \Delta p$, p_0 и $p_0 - \Delta p$. Значение $\Delta p / p_0$ бралось равным 0,02% в соответствии с /6/. Расчеты выполнялись при индукции $B_0 = 10$ кГс.

На рис. 1 показана зависимость границ устойчивых амплитуд от тока в обмотке P1 для частиц различных импульсов при величине $I_2 = 210$ А. Вначале выводятся частицы с максимальной амплитудой и импульсом $p_0 - \Delta p$ / $I_1 = 38,36$ А /. В процессе вывода импульсный разброс выводимого пучка увеличивается, и, начиная со значения $I_1 = 42,28$ А, выводятся одновременно частицы всех импульсов от $p_0 - \Delta p$ до $p_0 + \Delta p$. При $I_1 = 45,64$ А область устойчивости для частиц с $p_0 - \Delta p$ достигает минимума, и при дальнейшем увеличении тока I_1 импульсный разброс выводимого пучка уменьшается до нуля, при значении $I_1 = 50,7$ А, соответствующем минимуму области устойчивости для частиц с импульсом $p_0 + \Delta p$.

Изменение угловых характеристик частиц на радиусе септума FM в процессе вывода показано на рис. 2. Величина мгновенного углового разброса при данном значении тока I_1 определяется из рисунка отрезком вертикальной прямой между линиями, соответствующими импульсам $p_0 + \Delta p$ и $p_0 - \Delta p$, либо между одной из этих линий и пунктирной кривой на рисунке. Средний угол входа частиц в FM на радиусе септума уменьшается от 2,15 мрад при $I_1 = 38,36$ А / начало вывода для частиц с импульсом

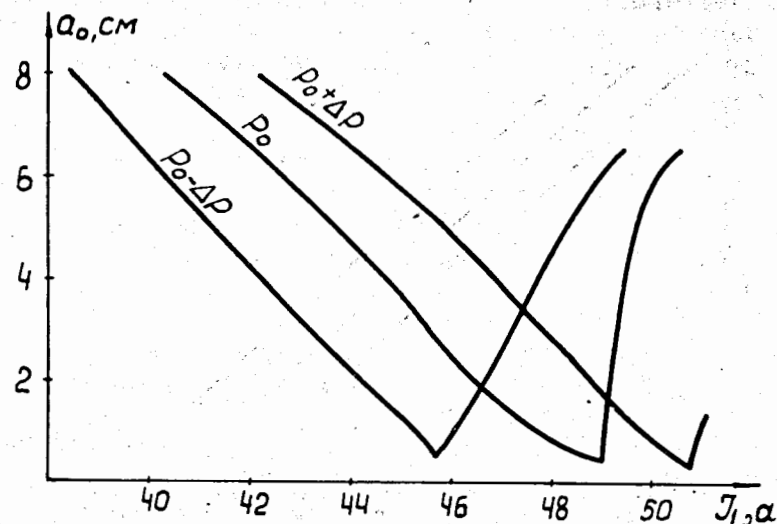


Рис. 1. Зависимость границ устойчивых амплитуд от тока в обмотке P1 для частиц с импульсами $p_0 + \Delta p$, p_0 и $p_0 - \Delta p$. $\frac{\Delta p}{p_0} = 0,0002$, 10 кГс, $I_1 = 210$ А.

$p_0 - \Delta p$ / до 0,4 мрад при $I_1 = 50,7$ А / конец вывода для частиц с импульсом $p_0 + \Delta p$ /. Величина мгновенного углового разброса вначале увеличивается до 0,5 мрад / $I_1 = 42,28$ А /, затем остается приблизительно постоянной до значения $I_1 = 45,64$ А, и при дальнейшем увеличении тока I_1 уменьшается до минимального значения, достигаемого в конце вывода / $I_1 = 50,7$ А /.

На рис. 3 показано изменение горизонтального эмиттанса пучка на входе FM. Верхняя кривая показывает ход фазовых траекторий при значении $I_1 = 38,36$ А, когда выводятся частицы максимальной амплитуды с импульсом $p_0 - \Delta p$. Эмиттанс пучка в этот момент минимален и увеличивается вначале с ростом I_1 . Фазовая область на входе FM, соответствующая наименьшему значению тока I_1 , при котором выводятся частицы всех импульсов от $p_0 - \Delta p$ до $p_0 + \Delta p$ / $I_1 = 42,28$ А /, показана на рисунке кривой штриховкой. При увеличении I_1 от 42,28 А до 45,64 А эмиттанс

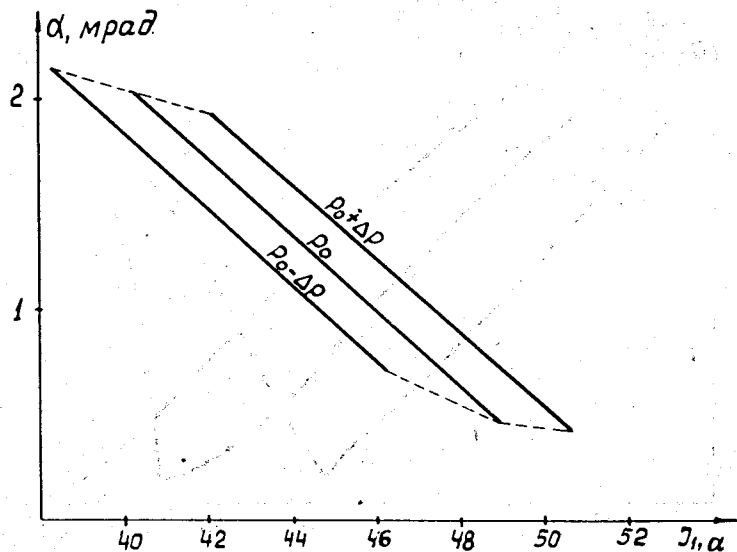


Рис. 2. Изменение угла на входе FM в процессе вывода для частиц с импульсами $p_0 + \Delta p$, p_0 и $p_0 - \Delta p$.

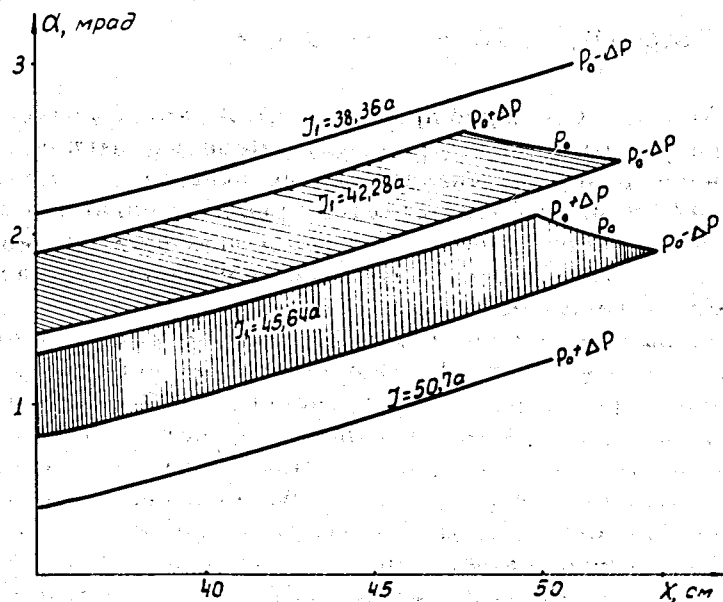


Рис. 3. Фазовые характеристики пучка на входе FM.

пучка за счет возрастания глубины заброса в FM слегка увеличивается. Область с вертикальной штриховкой на рисунке представляет эмиттанс на входе FM при $I_1 = 45,64$ А /минимум области устойчивости для частиц с импульсом $p_0 - \Delta p$ /. При дальнейшем увеличении I_1 эмиттанс уменьшается и достигает минимального значения при $I_1 = 50,7$ А. Ход фазовых траекторий в этот момент соответствует нижней кривой рисунка.

Зависимость глубины заброса в зазор FM для частиц с рассматриваемыми импульсами от тока I_1 показана на рис. 4. С учетом этой зависимости, распределения частиц по амплитудам бетатронных колебаний /7/ и того, что частицы с амплитудой, меньшей 0,4 см, не выводятся, было получено значение эффективности вывода $\epsilon_f = 0,94$. При этом предполагалось, что импульсы частиц циркулирующего пучка равномерно распределены между значениями $p_0 + \Delta p$ и $p_0 - \Delta p$.

В качестве начальных условий для расчета системы транспортировки выведенного пучка были взяты на азимуте FM по три точки на каждой из горизонтальных фазовых траекторий, представляющих частицы с импульсами $p_0 + \Delta p$, p_0 и $p_0 - \Delta p$, при токе в обмотке P1, равном 45,64 А /см. рис. 3/. Соответствующие точки на фазовой плоскости азимута VM приведены на рис. 5. Присептумная, промежуточная и наиболее удаленная от септума FM частицы с импульсом $p_0 - \Delta p$ изображены на рисунке точками 1, 2, 3. Точки 4, 5, 6 и 7, 8, 9 представляют соответствующие частицы с импульсами p_0 и $p_0 + \Delta p$. Значение градиента FL составляет 86,6 Гс/см и выбиралось из требования, чтобы вертикальные фазовые эллипсы, относящиеся к различным начальным условиям в горизонтальной плоскости, имели наиболее близкую друг к другу ориентацию /2/.

Изменение угла входа пучка в FM в процессе вывода компенсируется соответствующим изменением поля FM так, что фазовые области, занимаемые пучком на входе VM в различные моменты вывода, совмещаются.

Используя найденную зависимость поля FM от I_1 и принимая в качестве начальных условий в горизонтальной плоскости фазовые характеристики на входе FM в различные моменты вывода и в вертикальной плоскости - фазо-

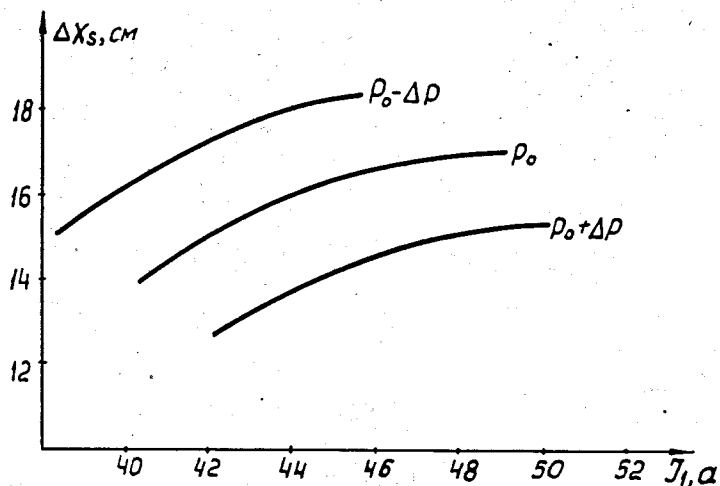


Рис. 4. Зависимость глубины заброса в FM от тока в P1 для частиц с различными импульсами.

вые эллипсы циркулирующего пучка, мы получили горизонтальную и вертикальную фазовые картины пучка на входе во вторую ступень системы транспортировки, приведенные на рис. 6 и 7. Точки на рис. 6, обозначенные индексами +, 0 и -, представляют частицы с импульсами $P_0 + \Delta P$, P_0 и $P_0 - \Delta P$ соответственно. Более точного совмещения горизонтальных фазовых областей на входе ВМ в различные моменты времени можно добиться, увеличивая на ~1,5% градиент линзы FL в процессе вывода. На рис. 7 приведены вертикальные фазовые эллипсы на входе ВМ, соответствующие различным точкам рис. 5. Из рис. 7 видно, что в результате импульсного разброса и влияния нелинейностей краевого поля квадранта эффективный вертикальный эмиттанс увеличивается более чем в 2 раза.

Значение градиентов в дублете квадрупольных линз 2OK200 системы внешней транспортировки подбиралось так, чтобы получить минимальный размер пучка в обеих плоскостях на расстоянии 1,5 м от выхода из второй линзы. Горизонтальная и вертикальная фазовые картины

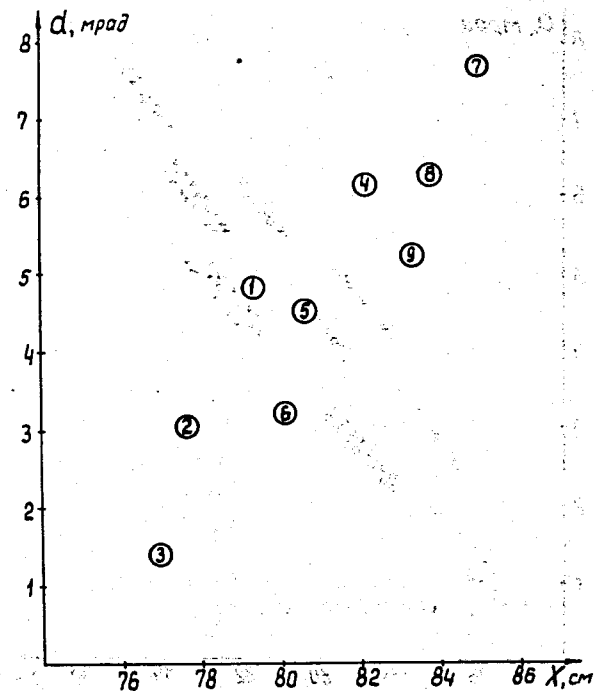


Рис. 5. Горизонтальные фазовые траектории на входе ВМ при $I_1 = 45,6$ А.

пучка в этом месте приведены на рис. 8 и 9. Индексы +, 0 и - соответствуют частицам с импульсами $P_0 + \Delta P$, P_0 и $P_0 - \Delta P$. Горизонтальный размер пучка составляет 19,5 мм, горизонтальный эмиттанс - 63,7 π мм.град. Вертикальный размер равен 3,2 мм, а эмиттанс в вертикальной плоскости составляет 53 π мм.град. Из рисунков видно, что из-за наличия импульсного разброса в циркулирующем пучке эмиттанс на выходе значительно увеличивается.

III. Коррекция показателя магнитного поля

Указанные выше эффекты, связанные с зависимостью $n(R)$ и наличием импульсного разброса в циркулирующем

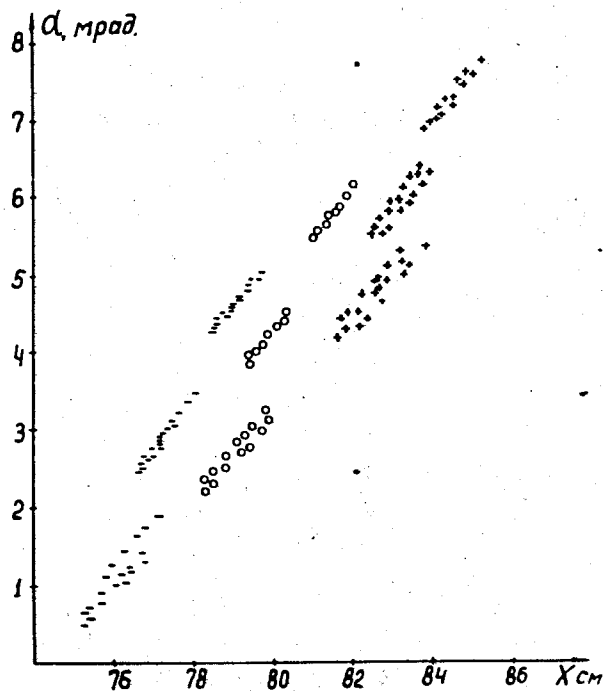


Рис. 6. Горизонтальная фазовая картина пучка на входе ВМ.

пучке, можно свести к минимуму путем коррекции зависимости показателя поля от радиуса, задавая ток в проводниках обмотки P_1 , расположенных на $R_0 + 10$ см, большим, чем в проводниках, расположенных на $R_0 - 10$ см.

На рис. 10 приведена зависимость границы устойчивых амплитуд от соотношения токов в проводниках P_1 , расположенных на $R_0 + 10$ см и $R_0 - 10$ см при трех значениях индукции, различающихся на $\pm 0,02\%$, что соответствует изменению радиуса равновесной орбиты на ± 1 см. При этом суммарное значение тока в проводниках, расположенных на $R_0 \pm 10$ см, составляет 90 А. Из рисунка видно, что наиболее слабая зависимость области устойчивости, а следовательно, и тока выведенного пучка наблюдается при соотношении токов $i(R - 10\text{ см})/i(R + 10\text{ см}) = 0,45$.

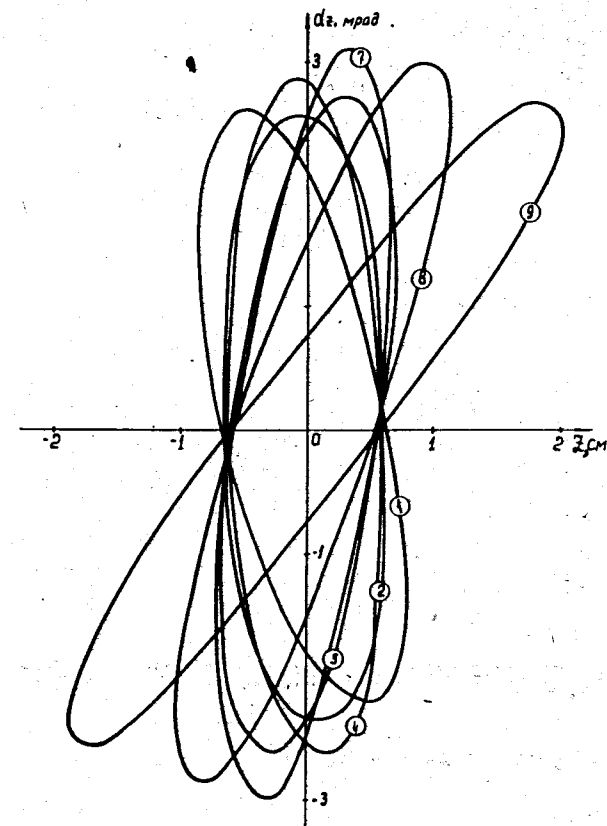


Рис. 7. Вертикальная фазовая картина пучка на входе ВМ.

При этом допуски на амплитуду пульсаций в столе магнитного ведущего поля будут наименее жесткими.

Предварительный расчет, выполненный по программе FORM⁸⁷ при индукции $B_0 = 10$ кГс, показал, что при существующем импульсном разбросе горизонтальный фазовый объем, занимаемый пучком в месте изображения, будет минимальным, если частицы с импульсом $p_0 + \Delta p$ будут иметь на входе FM угол, на $-0,2$ мрад меньший, чем частицы с импульсом $p_0 - \Delta p$. Этого можно достигнуть, снижая с помощью дополнительных токов показа-

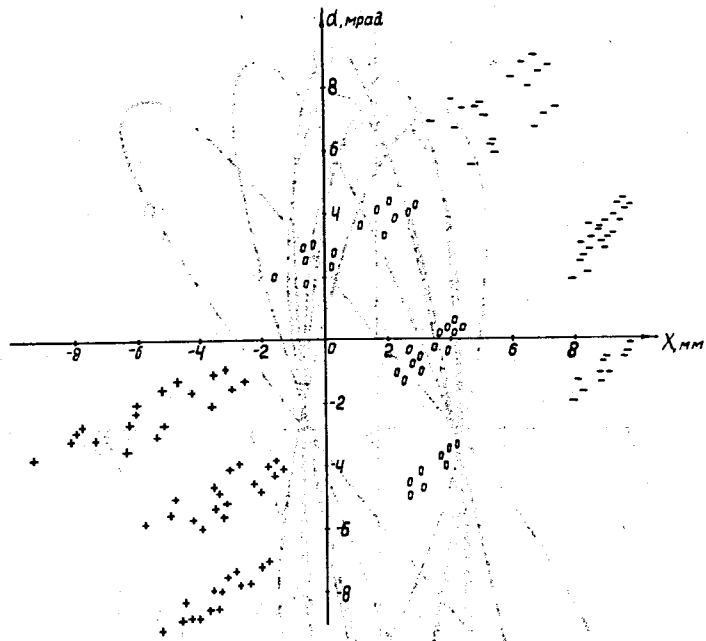


Рис. 8. Горизонтальная фазовая картина пучка в месте изображения.

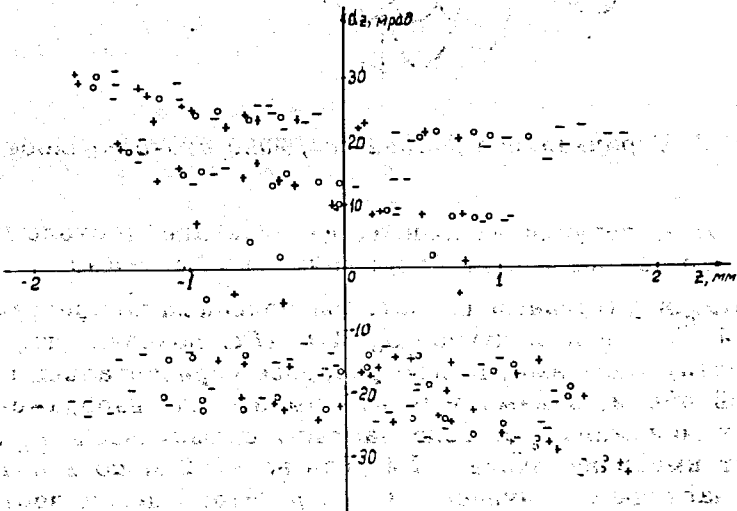


Рис. 9. Вертикальная фазовая картина пучка в месте изображения.

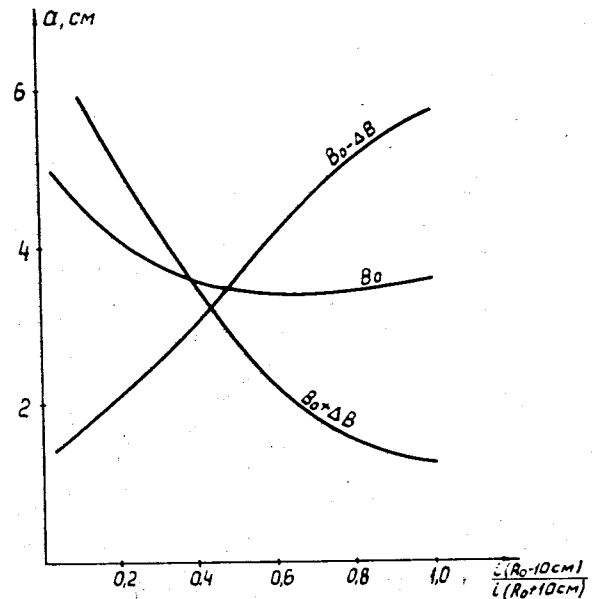


Рис. 10. Зависимость границы устойчивых амплитуд от соотношения токов $i(R_0 - 10 \text{ см}) / i(R_0 + 10 \text{ см})$ в проводниках обмотки P1 для индукций $B_0 + \Delta B$, B_0 и $B_0 - \Delta B$.

$$\frac{\Delta B}{B_0} = 0,0002, \quad i/R_0 + 10 \text{ см}/ + i/R_0 - 10 \text{ см}/ = 90 \text{ А.}$$

тель поля на радиусах $R > R_0$, причем, как показал расчет по программе MFIELD [9], чтобы поддерживать требуемую разность углов на входе FM для частиц с импульсами $p_0 + \Delta p$ и $p_0 - \Delta p$, значения токов в каждой ветви обмотки P1 должны изменяться в процессе вывода независимо, что значительно усложняет систему питания. Поэтому было исследовано влияние коррекции показателя магнитного поля с помощью различных значений токов в разных проводниках обмотки P1 но при постоянном соотношении этих токов в течение вывода. На рис. 11 показано изменение угла на входе FM в течение вывода для частиц с импульсами $p_0 + \Delta p$, p_0 и $p_0 - \Delta p$ при соотношении токов $i(R_0 - 10 \text{ см}) / i(R_0 + 10 \text{ см}) = 0,19$; $i/R_0 + 30 \text{ см}/ / [i/R_0 + 10 \text{ см}/ + i/R_0 - 10 \text{ см}/] = 1,3$ и $i(R_0 - 30 \text{ см}) /$

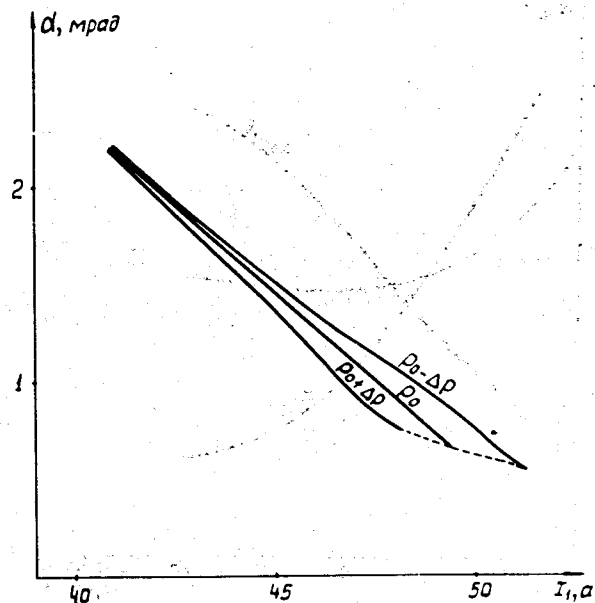


Рис. 11. Зависимость угла на входе FM от полусуммы токов $I_1 = \frac{i(R_0+10\text{см})+i(R_0-10\text{см})}{2}$ в проводниках, расположенных на $R_0+10\text{ см}$ и $R_0-10\text{ см}$, для импульсов $p_0 + \Delta p$, p_0 и $p_0 - \Delta p$ при соотношении токов: $i/R_0-10\text{ см} // i/R_0+10\text{ см} = 0,19$; $i/R_0+30\text{ см} // I_1 = 2,6$; $i/R_0-30\text{ см} // I_1 = 0,6$.

$[i/R_0+10\text{ см} // i/R_0-10\text{ см}] = 0,3$. По оси абсцисс отложено значение I_1 , полусуммы токов в проводниках, расположенных на $R_0+10\text{ см}$ и $R_0-10\text{ см}$. Требуемое значение разности углов для частиц с импульсами $p_0 + \Delta p$ и $p_0 - \Delta p$ достигается лишь при значении $I_1 = 48\text{ А}$. При этом граница устойчивых амплитуд сильнее зависит от импульса и от радиуса равновесной орбиты, чем для случая с $i/R_0-10\text{ см} // i/R_0+10\text{ см} = 0,45$, что накладывает соответственно более жесткие требования на стабильность стола главного тока, особенно в конце вывода, где эта зависимость сильнее.

На рис. 12 приведены фазовые характеристики пучка в различные моменты вывода, который начинается при $I_1 = 41\text{ А}$ практически одновременно для частиц со всеми значениями импульсов от $p_0 + \Delta p$ до $p_0 - \Delta p$. В процессе вывода угловой разброс на входе FM возрастает, причем частицам с большими значениями импульсов соответствуют меньшие углы. При $I_1 = 48,15\text{ А}$ /минимум области устойчивости для частиц с импульсом $p_0 + \Delta p$ / угловой разброс на входе FM максимален и составляет $\approx 0,2\text{ град}$.

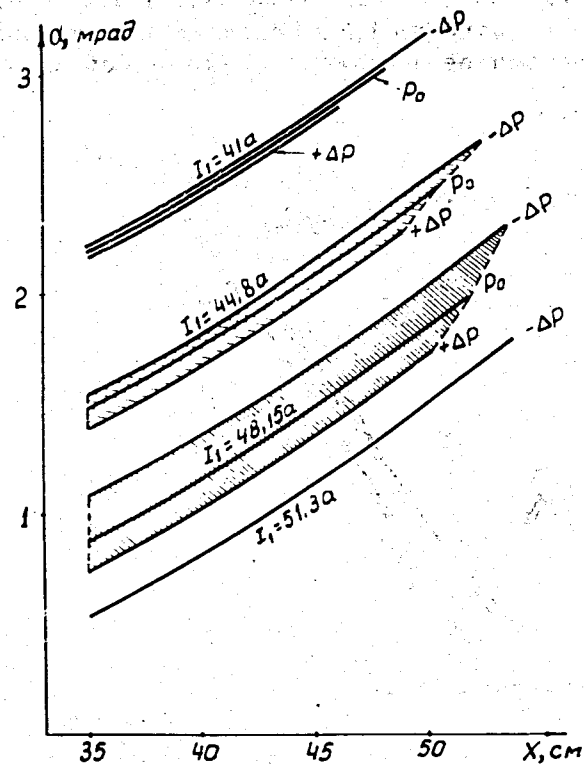


Рис. 12. Фазовые характеристики на входе FM в течение вывода. Условия те же, что и на рис. 11.

При дальнейшем возрастании тока угловой и импульсный разбросы уменьшаются до нуля в конце вывода. Вывод заканчивается при $I_1 = 51,3 \text{ А}$, что соответствует минимуму области устойчивости для частиц с импульсом $p_0 - \Delta p$.

Требуемая зависимость поля в магните F_M от тока I_1 практически линейна. Поле изменяется от $B_F = 1870 \text{ Гс}$ в начале вывода до $B_F = 2200 \text{ Гс}$ в конце. Горизонтальные фазовые траектории на входе ВМ в различные моменты вывода приведены на рис. 13. Из сравнения рис. 5 и 13 видно, что площадь фазовой области, занимаемой пучком на входе ВМ, значительно уменьшается. На рис. 14 изображены вертикальные фазовые эллипсы, соответствующие различным начальным условиям в горизонтальной плоскости. Обозначения 1, 2 и 3 соответствуют присептумной, промежуточной и наиболее удаленной от септума

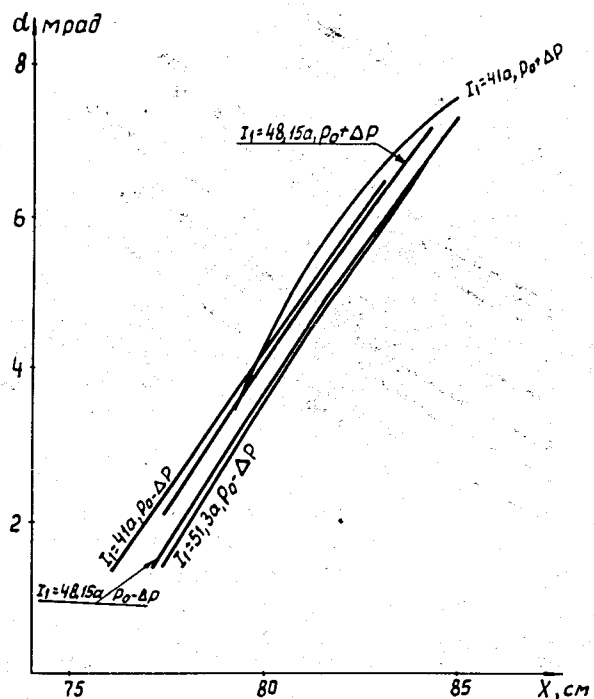


Рис. 13. Горизонтальные фазовые траектории на входе ВМ в течение вывода в режиме коррекции показателя поля.

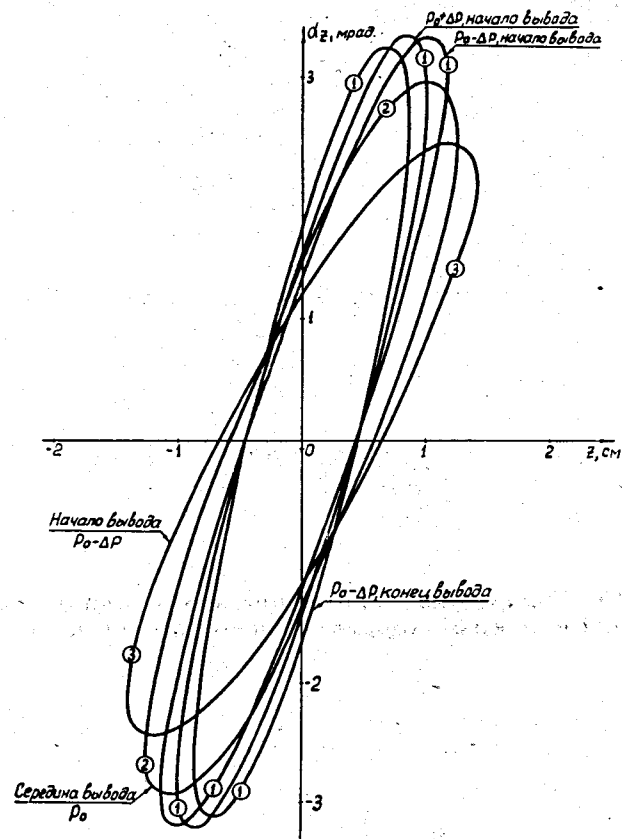


Рис. 14. Вертикальная фазовая картина на входе ВМ в режиме коррекции показателя поля.

FM частицам. Как видно из рисунка, вертикальные фазовые эллипсы имеют более близкую друг к другу ориентацию, по сравнению с режимом без коррекции показателя поля / см. рис. 7/, что также несколько уменьшает и вертикальный фазовый объем.

На рис. 15 и 16 изображены горизонтальная и вертикальная фазовые картины пучка в месте изображения. Горизонтальный эмиттанс равен $28,6 \pi \text{ мм.мрад}$, а вертикальный - $48,8 \pi \text{ мм.мрад}$, что дает размер изображения

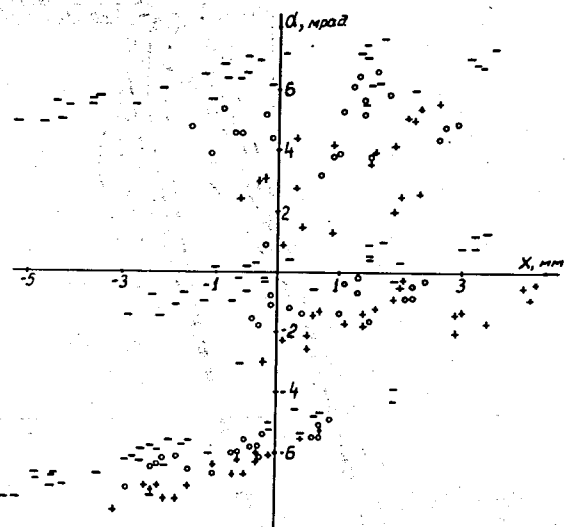


Рис. 15. Горизонтальная фазовая картина в месте изображения в режиме коррекции показателя поля.

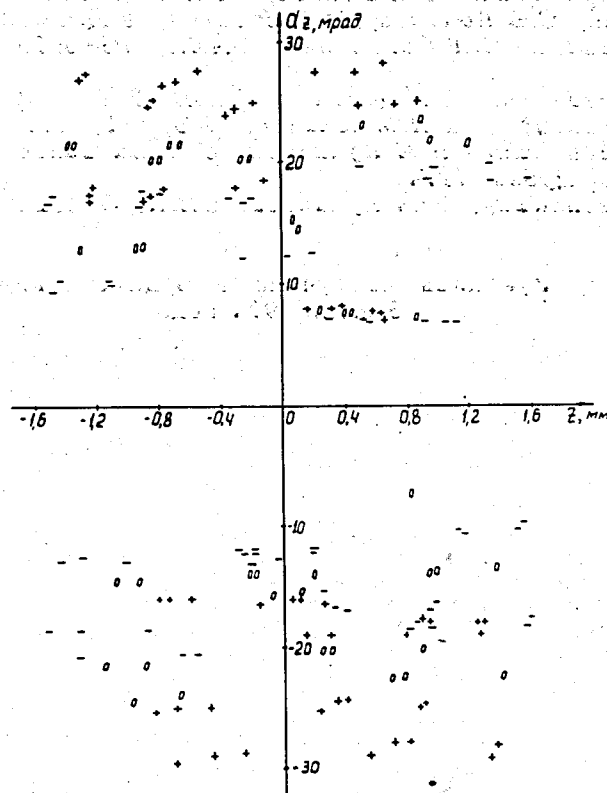


Рис. 16. Вертикальная фазовая картина в месте изображения в режиме коррекции показателя поля.

на расстоянии 1,5 м от выхода из дублета квадрупольных линз 3,6 мм по вертикали и 9 мм по горизонтали.

Таким образом, рассмотренный способ коррекции показателя магнитного поля уменьшает горизонтальный фазовый объем, занимаемый выведенным пучком в месте изображения, в 2,2 раза, а вертикальный - в 1,1 раза.

При расчете режима, наиболее оптимального с точки зрения требования к стабильности стола главного магнитного поля ($i(R_0 - 10 \text{ см}) / i(R_0 + 10 \text{ см}) = 0,45$), полученные значения горизонтального и вертикального фазового объема выведенного пучка в месте изображения составляют $39 \pi \text{ мм.град}$ и $50 \pi \text{ мм.град}$, соответственно.

Литература

1. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова, В.А.Михайлов. ОИЯИ, Б1-9-6536, Дубна, 1972.
2. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова. ОИЯИ, Р9-6972, Дубна, 1973.
3. 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.L.Volkov and L.P.Zinoviev. Particle Accelerators. Vol. 5, No. 4, 1973.
4. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, В.А.Михайлов. ОИЯИ, 9-7498, Дубна, 1973.

5. Б.В.Василишин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев, И.Б.Исинский, С.В.Каленов, С.А.Новиков, Б.Д.Омельченко, Н.И.Павлов, В.Ф.Сиколенко. ОИЯИ, Р9-6973, Дубна, 1973.
6. Г.С.Казанский, А.П.Царенков. ОИЯИ, 2491, Дубна, 1965.
7. А.Б.Кузнецов, К.П.Мызников. АЭ, 12, 373 /1962/.
8. Б.В.Василишин, Е.М.Кулакова, В.А.Михайлов. ОИЯИ, 9-7670, Дубна, 1974.
9. Б.В.Василишин, Е.М.Кулакова. ОИЯИ, 9-6720, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июля 1974 года.