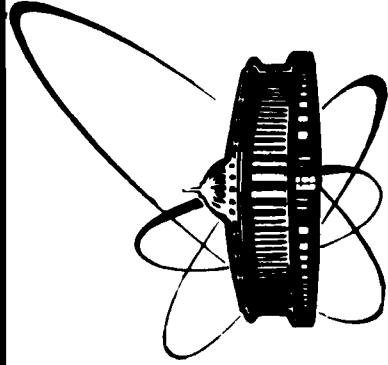


89-154



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

9-89-154

Г. В. Долбилов, Н. Ю. Казаринов, Н. И. Лебедев,  
В. А. Петров, А. П. Сумбаев, А. А. Фатеев

**КОРРЕКЦИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ  
УСКОРИТЕЛЯ СИЛУНД-20**

Направлено в Оргкомитет XI Всесоюзного семинара  
по линейным ускорителям заряженных частиц,  
Харьков, июнь 1989 г.

**1989**

В результате измерений, выполненных в <sup>1-3/</sup>, установлено, что пучок электронов ускорителя СИЛУНД-20 обладает рядом особенностей: 1/ имеет частичную замагниченность катода; 2/ имеет нарастающее по тракту ускорения когерентное смещение /поперечный дрейф, достигающий 8÷10 мм/, направление которого сохраняется; 3/ центр масс пучка прецессирует вокруг смещенной оси; радиус прецессии не превышает 2÷3 мм.

Вследствие этих факторов пучок на выходе из продольного фокусирующего магнитного поля приобретает когерентный угол, а его эффективный эмиттанс увеличивается.

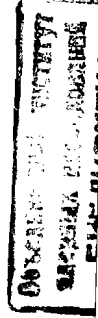
Из расчетных и экспериментальных исследований следует, что оптимальным вариантом системы транспортировки такого пучка для его инжекции в компрессор /адгезатор/ коллективного ускорителя КУТИ-20 <sup>4/</sup> является фокусирующий канал с непрерывным продольным солениодальным магнитным полем. При определенном проигрыше в энергетике источников питания по сравнению с системой транспортировки дискретными магнитными линзами канал с непрерывным магнитным полем обладает меньшей избирательностью и большей пропускной способностью для пучков с конечным значением фазового объема, имеющих отклонение центра масс от оси канала.

Наличие у пучка когерентных углов и смещений, сравнимых с собственными размерами, вызывает необходимость в коррекции пучка по положению и в минимизации угловых отклонений пучка от продольной оси инжекции. Опыт подобной работы на ускорителях СИЛУНД <sup>5/</sup> и СИЛУНД-20 <sup>1/</sup> показал, что эффективность коррекции пучка с помощью коротких дипольных линз с поперечным магнитным полем недостаточна высока. Практически не удается реализовать одновременную коррекцию угла и смещения во всем диапазоне рабочих режимов ускорителя.

В данной работе использована система коррекции пучка ускорителя с помощью протяженных участков с поперечным магнитным полем и коррекции магнитного поля в области эмиссии пучка на катоде.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЗАМАГНИЧЕННОСТЬЮ ЭМИТТЕРА

При незначительных смещениях центра масс от оси системы / $a_{1,2} \ll R_k$ , где  $a_1$  и  $a_2$  - радиус прецессии и величина смещения



центра масс,  $R_k$  - радиус канала/ для анализа поведения пучка с размерами  $I_0 \ll R_k$  в канале с соленоидальным магнитным полем взаимодействием со стенками канала можно пренебречь и воспользоваться уравнением для среднеквадратичных параметров осесимметричного пучка, распространяющегося вдоль оси  $z$  в однородном магнитном поле  $B_z$  /6,7/:

$$\frac{d^2 r_0}{dz^2} + \frac{\omega_h^2}{c^2} r_0 - \frac{Q^2}{r_0} - \frac{\epsilon^2}{r_0^3} = 0, \quad /1/$$

где:  $r_0 = \sqrt{r^2}$  - среднеквадратичный радиус,  $\omega_h = \frac{eB_z}{2\pi\gamma}$  - лармовская частота,  $Q^2 = 2I/\beta^3 \gamma I_0$ ,  $I$  - ток пучка,  $I_0 = 17$  кА - стандартная величина тока /8/,  $\epsilon_3$  - среднеквадратичный эмиттанс пучка. В общем случае величина  $\epsilon_3$  определяется соотношением /6,7/:

$$\epsilon_3^2 = \epsilon_c^2 + M^2 - J^2, \quad /2/$$

где  $\epsilon_c$  - собственный среднеквадратичный эмиттанс пучка /при движении пучка без магнитного поля/,  $J$  - среднее значение азимутального механического момента импульса,  $M = \text{const}$  /теорема Буша/ - обобщенный азимутальный момент импульса.

В случае связанного движения в продольном магнитном поле для пучка, образованного частично замагниченным эмиттером,

$$\epsilon_3^2 = \epsilon_c^2 + \left[ \frac{e(\psi_k - \psi_0)^2}{2\pi\gamma} \right], \quad /3/$$

где  $\psi_0$  и  $\psi_k$  - потоки магнитной индукции, проходящие через концы пучка в канале и на катоде, эмиттанс  $\epsilon_c$  не является интегралом движения, а определяется величиной поля в области, занятой пучком /7/. Таким образом, при изменении потока индукции магнитного поля на катоде появляется дополнительная возможность варьирования величины эмиттанса при инжекции пучка в канал транспортировки.

Для исследования пучка с замагниченным эмиттером на ускорителе СИЛУНД-20 установлен новый анодно-катодный узел. В отличие от прежнего варианта /3/ он установлен внутри первой межсекционной камеры ускорителя /рис.1/. Анод /А/ нового варианта - полая обойма, изготовленная из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, отверстие которой / $\phi$  40 мм/ затянута параллельными проволочками из вольфрама  $\phi$  0,1 мм с шагом 1 мм. Катодом /К/ служит таблетка  $\phi$  10 мм из электротехнического графита, укреплен-

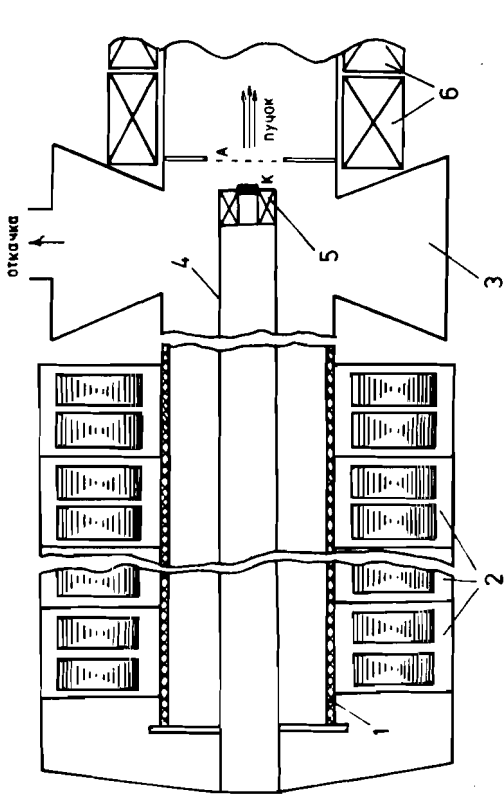


Рис.1. Конструктивная схема анодно-катодного узла. К - катод, А - анод, 1 - разрядная трубка, 2 - индукторы, 3 - межсекционная камера, 4 - катодный шток, 5 - прикатодная линза, 6 - линзы фокусирующей системы ускорительного тракта.

ная на катодном штоке 4 на расстоянии  $10 \pm 5$  мм от анода. Катодный шток представляет собой трубку из нержавеющей стали  $\phi$  30 мм. На конце трубки в области, прилегающей к катоду, в катодный шток вмонтирована короткая линза 5 со средним диаметром  $d = 20$  мм, компенсирующая магнитное поле на катоде. Все металлические детали узла "прозрачны" для импульсного магнитного поля с длительностью импульса  $\geq 500$  нс. Магнитное поле в межэлектродном зазоре формируется с помощью первой линзы фокусирующей системы ускорительного тракта 6 и прикатодной линзы 5, включенной встречно основному фокусирующему полю. Топография поля /рис.2/ выбрана так, что при изменении тока в прикатодной линзе  $I_{кп} = I_{1,2,3}$  можно получать на поверхности катода  $/z = 0/$  поле  $B_z$  любого знака, либо область реверса  $/B_z = 0/$ . При этом поле резко нарастает в сторону анода и в плоскости анода достигает номинальной величины, равной полю в ускорительном тракте  $B_{z0}$ .

Влияние изменения поля на замагниченность пучка изучалось по изменению угла поворота автографа дифрагмированного щелью пучка, распространяющегося в пространстве Дрейфа  $/B_z = 0/$ . Используя теорему Буша в форме, представленной в /9/, можно получить связь между углом поворота  $\Delta\theta$  автографа относительно щели и величиной потока магнитной индукции на катоде  $\psi_k$ :

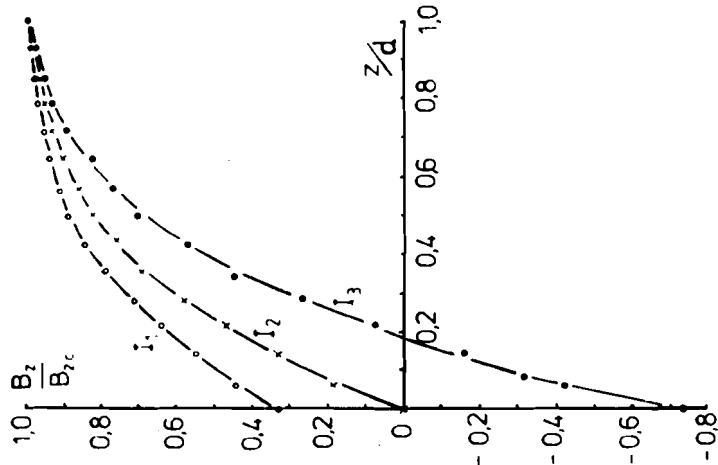


Рис.2. Топография магнитного поля в межэлектродном зазоре источника электронов.

$$\Delta\theta = \frac{\psi_k e L_d}{2 \pi m \gamma c^2} \quad /4/$$

где  $L_d$  - длина участка дрейфа. Диафрагма со щелью шириной  $\delta_0 \approx r_0/4$  устанавливалась на участок в начале пролетного участка  $L_d = 30$  см, в конце которого анализировались автографы пучка, полученные на винипрозе. Зависимость угла поворота автографа относительно положения щели от величины тока прикатодной линзы  $I_{кл}$  /в относительных единицах/, определяющего поле на катоде, представлена на рис.3. Из рисунка видно на качественно линейная зависимость этих величин, согласующаяся с выражением /4/.

В результате замены анодно-катодного узла и использования на катоде регулируемого поля при настройке фокусирующей системы ускорительного тракта максимальный ток пучка на выходе ускорителя может быть увеличен по сравнению с достигнутым в /3/ до  $I_B = 600$  А. Измерение нестабильности величины токов пучка за анодом  $I_A$  и на выходе последней секции ускорителя  $I_B$  показало, что наилучшая стабильность, достигаемая при  $I_B = 500$  А:  $\Delta I_A/I_A = 4 \div 5\%$ ,  $\Delta I_B/I_B = 4 \div 5\%$ , не хуже, чем при работе углеводородного катода /3/.

На рис.4 представлены результаты измерений эмиттансных характеристик пучка, полученные щелевой методикой /10/, системой ламельных коллекторов /11/ в конце соленоидального канала транспортировки длины

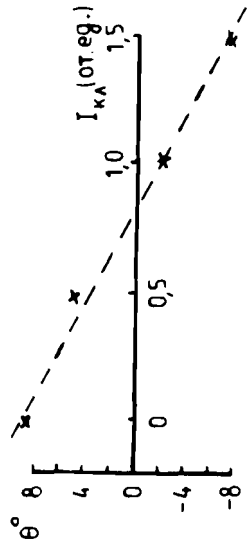


Рис.3. Зависимость угла поворота автографа пучка от тока прикатодной линзы.

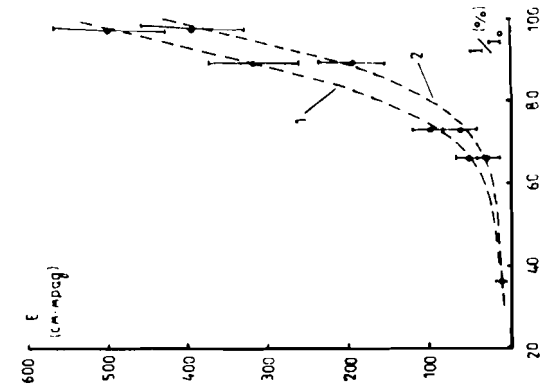


Рис.4. Эмиттансные характеристики пучка электронов: 1 - без компенсации магнитного поля на катоде, 2 - с компенсацией.

ной 190 см на участке дрейфа длиной 15 см. Измерения выполнены в стробируемом режиме с длительностью стробирующего импульса 15 нс. Результаты, представленные на рис.3 и 4, показывают, что включение компенсирующей прикатодной линзы и соответствующий выбор режима ее питания обеспечивают регулирование замагниченности катода и варьирование эмиттанса пучка при транспортировке и инжекции в адгезатор.

### КОРРЕКЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ПУЧКА

Рассмотрим возможности коррекции положения пучка поперечным магнитным полем  $B_{\perp}$  с помощью уравнения движения центра масс в суперпозиционном поле  $B_z$  и  $B_{\perp}$  /12/:

$$\frac{d}{dz} P_z \frac{d\xi}{dz} + ie B_z \frac{d\xi}{dz} = ie B_{\perp} \quad /5/$$

Здесь  $\xi = \bar{x} + i\bar{y}$  - комплексная координата центра масс пучка,  $B_{\perp} = B_x + iB_y$  - компоненты индукции поперечного поля,  $P_z = mv_z$  - продольный импульс частиц. Представляя решение /5/ в виде /12/

$$\xi = a_1(z) e^{-i\phi(z)} + a_2(z) \quad /6/$$

где  $\phi = \int_0^z k(z') dz'$ ,  $k(z) = \frac{e B_z}{P_z}$  - модуль волнового вектора, найдем скорость изменения амплитуд  $a_{1,2}(z)$  в области действия поперечного поля:

$$\frac{da_1}{dz} = - \frac{B_{\perp}}{B_z} e^{i\phi(z)}, \quad \frac{da_2}{dz} = \frac{B_{\perp}}{B_z} \quad /7/$$

После прохождения центром масс пучка области коррекции длиной  $L_k$  комплексные амплитуды изменяются следующим образом:

$$a_2 = a_2^0 + \Delta a_2 = a_2^0 + \frac{V_{\perp}}{V_z} L_k, \quad /8/$$

$$a_1 = a_1^0 - \Delta a_2 \frac{1 - e^{i\phi}}{i\phi}.$$

Здесь  $\phi$  - набег фазы колебаний центра масс пучка на длине коррекции; индексом "0" отмечены значения величин на входе в область коррекции.

Из выражения /8/ можно определить величину индукции дипольной составляющей  $|V_{\perp k}|$ , необходимую для устранения смещения центра масс пучка:

$$|V_{\perp k}| = |a_2^0| \frac{V_z}{L_k}. \quad /9/$$

Нарушение азимутальной симметрии магнитного поля в области коррекции приводит к изменению обобщенного момента импульса:

$$M = \frac{1}{2I} [m\gamma (\xi^* \cdot \xi - \xi \cdot \xi^*)] + \frac{e}{2} V_z |\xi|^2, \quad /10/$$

которое однозначно связано с изменением квадратов модулей амплитуд  $a_{1,2}$  /12/

$$M + \frac{e}{2} V_z (|a_1|^2 - |a_2|^2) = const. \quad /11/$$

Предположим, что пучок на выходе из ускорителя смещен, но не прецессирует, что приблизительно соответствует реальной ситуации, т.к.  $a_1^0 \ll a_2^0 = \bar{x}_0 + i\bar{y}_0$ . Тогда без коррекции когерентный угол пучка при выходе из магнитного поля будет равен, согласно /11/,

$$|a_0| = \frac{1}{2} k \sqrt{\bar{x}_0^2 + \bar{y}_0^2}. \quad /12/$$

С учетом действия корректора он будет равен

$$|a| = |a_0| \frac{\sin \phi/2}{\phi/2}, \quad /13/$$

т.е. максимальное значение угла  $\alpha$  убывает как  $2/\pi k$ , где  $k$  - число периодов поперечных колебаний, совершенных в области коррекции.

Из выражений /9/, /12/ и /13/ вытекает принципиальная возможность одновременной коррекции смещения и угла с помощью участка суперпозиционного поля протяженностью, кратной длине полупериода поперечных колебаний пучка

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{2\pi m\gamma c}{eV_z}, \quad /14/$$

что при заданных параметрах пучка  $\gamma = 6/$  и индукции ведущего магнитного поля  $V_z \approx 0,1$  Т/ составляет  $\approx 65$  см.

Система коррекции положения пучка выполнена с учетом особенностей конструкции канала транспортировки. Канал представляет собой вакуумный электропровод /тонкостенная титановая труба  $\phi 100$  мм/, размещенный внутри пассивной секции из 24 стандартных индукторов ускорителя СИПНД-20 /13/, исползованных без витков возбуждения. Короткие соленоидальные катушки индукторов, включенные согласно, образуют единую фокусирующую систему канала с непрерывным соленоидальным магнитным полем, а ферритовые экранники и толстые металлические корпуса обеспечивают надежное экранирование канала от внешних импульсных и статических электромагнитных полей.

Система состоит из двух магнитов, создающих поперечное поле в двух взаимно перпендикулярных направлениях на длине  $L_k = 156$  см ( $\approx \lambda$ ). Каждый магнит образован 24 парами обмоток, намотанных на кольцевые ферритовые сердечники индукторов /К250х170х25 200НН2/. Размещение и соединение двух отдельных пар катушек представлено на рис. 5. В каждой паре ( $L_{x1} - L_{x2}$ ,  $L_{y1} - L_{y2}$ ) об-

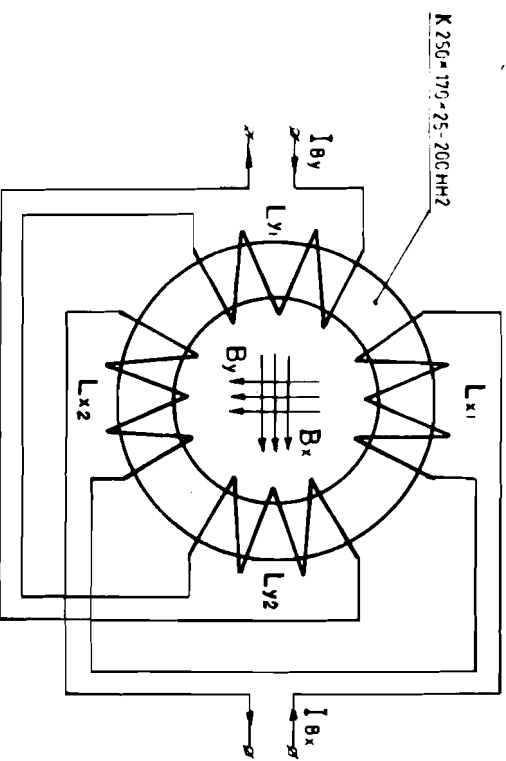


Рис. 5. Схема отдельных катушек магнитов системы коррекции.

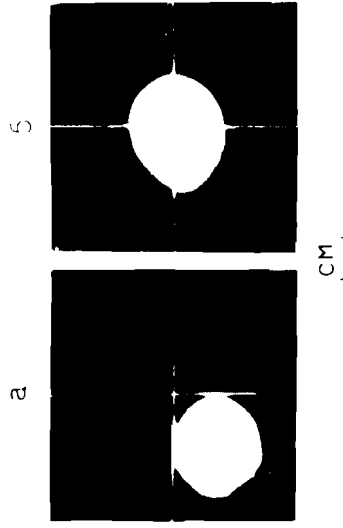


рис.7. Результат воздействия на пучок корректоров положения: а - корректоры выключены, б - включены.

ной. В измерениях проявляется увеличение "жесткости" пучка при увеличении ведущего магнитного поля ( $B_{z2} > B_{z1}$ ), что согласуется с выражением /9/. На рис.7

представлен результат воздействия на пучок корректоров при регистрации автографа на винипрозе за несколько циклов.

Измерения положения пучка, выполненные на расстоянии 40 см от конца участка коррекции, показали, что скорректированный пучок может иметь когерентный угол, величина которого изменяется при изменении поперечного поля или ведущего магнитного поля. Варьируя эти величины, можно свести смещение и угловые отклонения до минимальных значений  $\leq 1$  мм и  $\leq 10$  мрад соответственно, что подтверждает характер зависимостей, определяемых выражениями /9, 12, 13, 15/.

Изучением эммитансных характеристик пучка, измеренных в процессе дрейфа после участка транспортировки с коррекцией, установлено, что включение и воздействие на пучок корректоров не меняет ни характера распределения частиц по площади проекции поперечного фазового объема, ни величины полного эммитанса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты расчетно-теоретических /15/ и экспериментальных /1-8, 16/ исследований, реальным пучкам линейных индукционных ускорителей /ЛИУ/ в процессе транспортировки и ускорения в продольном магнитном поле, как правило, присущи поперечные когерентные колебания и поперечный дрейф. При использовании ЛИУ в качестве инжекторов во внешние установки или устройстве требования на качество пучка существенно возрастают, и значение проблемы коррекции пучков при их ускорении и транспортировке увеличивается. С этой точки зрения основные итоги работы состоят в следующем:

- 1/ Предложен и исследован вариант канала транспортировки электронного пучка индукционного ускорителя СИЛУНД-20, совмещающий систему фокусировки непрерывным продольным магнитным полем с системой коррекции положения поперечным магнитным по-

мотки включаются последовательно таким образом, что основная часть созданных ими в сердечнике встречных магнитных потоков замыкается через центральную, занятую пучком область, образуя в ней поперечные к оси пучка поля  $B_x$  и  $B_y$  с хорошей однородностью в области, занятой пучком  $\Delta B_{x,y} / B_{x,y} \leq 2,5\%$ . Параметры обмоток находятся из условия обеспечения индукции коррекционной дипольной составляющей  $|B_{\perp}|_k$ , необходимой для устранения смещения  $|a_2^0| \sim 10$  мм на длине  $L_k = 156$  см в присутствии ведущего магнитного поля  $B_z \sim 0,1$  Т:

$$nI_k = \frac{\bar{l} |B_{\perp}|_k}{2\mu_0}, \quad /15/$$

где  $I_k$  и  $n$  - ток и число витков отдельной обмотки,  $\bar{l} \approx 12$  см - средний размер окна ферритового кольца,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума. Подставляя в /15/  $|B_{\perp}|_k$  из /9/, получаем, что каждая обмотка должна иметь по  $\approx 30$  ампервитков. Катушки каждого из корректирующих магнитов, выполненные на основании подобных расчетов, содержат по 100 витков, соединены последовательно и подключены к независимым источникам постоянного тока.

Воздействие корректоров на пучок изучалось по регистрации автографа пучка на винипрозе интегрально /за несколько циклов/ и от цикла к циклу с помощью сцинтилляционного экрана и телевизионной системы с цифровой регистрацией видеосигналов /14/.

На рис.6 представлены измеренные зависимости величины смещения центра масс пучка по одной из поперечных координат от величины тока в одном из корректирующих магнитов при двух различных значениях ведущего магнитного поля, полученные непосредственно в центре участка коррекции.

Как следует из рисунка, зависимость величины смещения от тока в обмотках близка к линейной.

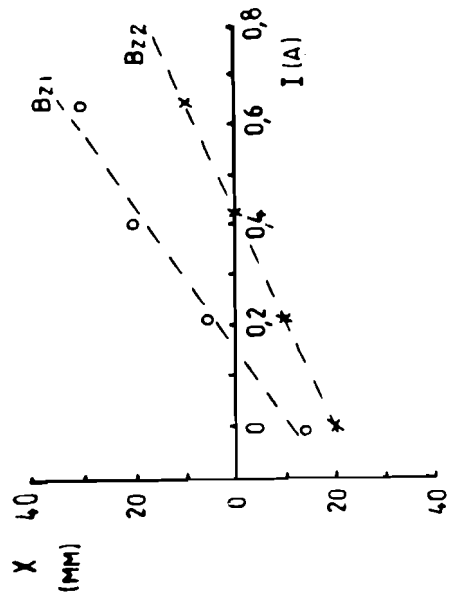


Рис.6. Зависимость величины смещения центра масс пучка от тока корректирующего магнита.

лем на длине, кратной половине периода поперечных колебаний пучка.  
2/ Эффективность коррекции положения пучка поперечным дипольным магнитным полем в присутствии продольного ведущего магнитного поля пропорциональна величине поперечного поля и длине коррекции. Эффективность коррекции когерентных углов повышается с увеличением числа периодов поперечных колебаний на длине участка коррекции.

3/ Предложен и исследован анодно-катодный узел источника электронов с компенсацией магнитного поля в области эмиссии, позволяющий корректировать эмиттанс пучка для его транспортировки.

4/ Использование исследованных систем на ускорителе расширяет возможности транспортировки и упрощает процедуру настройки пучка при его инжекции в адгезатор коллективного ускорителя КУТИ-20 или иное внешнее устройство.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В. и др. - Сообщение ОИЯИ Р9-83-307, Дубна, 1983.
2. Долбилов Г.В. и др. - Сообщение ОИЯИ Р9-84-631, Дубна, 1984.
3. Азорский Н.И. и др. - В сб.: VII Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. Часть I, Томск, ИСЭ СОАН СССР, 1988, с.55.
4. Александров В.С. и др. - ОИЯИ 9-83-613, Дубна, 1983.
5. Саранцев В.П. и др. - Сообщение ОИЯИ Р9-10053, Дубна, 1976.
6. Kazarinov N.Yu., Perelstein E.A., Shevtsov V.F. - Part. Acc., 1980, vol.10, p.181.
7. Перельштейн Э.А. Метод моментов в теории ускорителей. - В сб.: Международная школа молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. - ОИЯИ Д9-84-817, Дубна, 1984.
8. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. - Атомиздат, М., 1966.
9. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.
10. Александров В.С. и др. - Сообщение ОИЯИ 9-82-709, Дубна, 1982.
11. Азорский Н.И. и др. - Сообщение ОИЯИ Р10-87-163, Дубна, 1987.
12. Казаринов Н.Ю., Казача В.И. - Сообщение ОИЯИ Р9-87-24, Дубна, 1987.
13. Долбилов Г.В., Петров В.А., Фатеев А.А. - Сообщение ОИЯИ Р9-86-290, Дубна, 1986.

14. Лебедев Н.И. и др. - В сб.: Одинадцатое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. ОИЯИ, Р9-88-738, Дубна, 1988, с.24.
15. Плотников В.К. - Препринты ИТЭФ 86-62, 86-63, 86-64. Москва, ЦНИИатоминформ. 1986.
16. Ананьев В.Д. и др. - В сб.: Одинадцатое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. ОИЯИ, Р9-88-738, Дубна, 1988, с.138.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 марта 1989 года.