

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-87-299

С.А.Ракитянский

**ГЕОМАГНИТНОЕ СМЕЩЕНИЕ
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В УСКОРИТЕЛЕ ЛИУ-30**

1987

Любые нарушения аксиальной симметрии при распространении интенсивного электронного пучка в цилиндрическом линейном вакуумном канале приводят к поперечному смещению пучка и развитию его поперечных когерентных колебаний. При достаточно большой длине канала нарастание амплитуды последних может вызывать потери пучка. Таким образом, допустимая длина канала оказывается в прямой зависимости от достижимой точности юстировки его оптических элементов^{1/}.

К факторам, нарушающим аксиальную симметрию, относится и магнитное поле Земли. Его величина не превышает 0,5 Гс. Однако если направление канала составляет с вектором поля угол, близкий к $\pi/2$, то при отсутствии магнитных экранов его влияние на пучок на большой длине может оказаться существенным.

Рассмотрим участок дрейфа пучка длиной в 1 м. Пусть фокусирующая система представлена двумя полубесконечными соленоидами, между концами которых в середине рассматриваемого участка имеется зазор длиной λ . Предположим, что на всем участке имеется однородное, перпендикулярное тракту магнитное поле.

Варируя λ и энергию пучка, в этой простой модели можно получить наглядную картину влияния поля Земли и оценить роль структурных неоднородностей фокусирующей системы.

Задачу о движении пучка будем решать численно, предполагая его стационарным. По причинам, которые подробно изложены в работе^{1/}, примем для описания его динамики представление в виде одной макрочастицы, т.е. будем считать пучок нитеобразным. Тогда исключение времени из уравнения движения в декартовых координатах сводит задачу к системе двух дифференциальных уравнений второго порядка для функций $x(z)$ и $y(z)$, описывающих когерентную траекторию.

При интегрировании этих уравнений будем учитывать также весьма существенные для когерентной динамики силы, обусловленные возникновением электрического и магнитного изображений пучка в проводящих поверхностях вакуумной камеры. Эти уравнения вместе с простой схемой вычисления сил изображения приведены в работе^{1/}.

Для определенности будем считать вакуумную камеру рассматриваемого участка хорошо проводящей металлической трубой с радиусом 3,5 см. Это соответствует дрейфовым промежуткам ускорителя ЛИУ-30. Ток пучка возьмем равным 200 А. Опыт работы ин-

жекторного участка ЛИУ-30, а также теоретические оценки показывают, что надежное удержание радиальных размеров пучка с такой интенсивностью в пределах апертуры требует продольного фокусирующего магнитного поля со средним значением напряженности 300 Гс. Поэтому плотность токов в соленоидах, имеющих большой и малый радиусы соответственно 20 см и 10 см, выберем такой, чтобы вдали от зазора напряженность поля равнялась 300 Гс.

Глубина провала поля в зазоре будет определяться величиной λ . Так, при $\lambda = 10$ см продольное поле в центре зазора падает до величины 203 Гс. Проекция когерентных траекторий на перпендикулярную оси канала плоскость для этого случая представлены на рис.1. Цифры у кривых обозначают энергию пучка в МэВ. Точки, соединенные звеньями ломаных, соответствуют положениям пучка через каждые 5 см по оси z , которая образует с x и y правую тройку и направлена в сторону движения пучка. Поперечное поле 0,4 Гс направлено здесь по оси x .

Видно, что при низких энергиях провал магнитного поля в сочетании с небольшой его поперечной компонентой делает траекторию весьма замысловатой. Если при этом таких провалов будет несколько, то в функциональной зависимости величины смещения от энергии или продольного поля следует ожидать наличия резонансов. Резонансную структуру, как видно из рисунка, нетрудно смоделировать, подбирая подходящее поле в соответствующих фазовых состояниях пучка на плоскости $xу$.

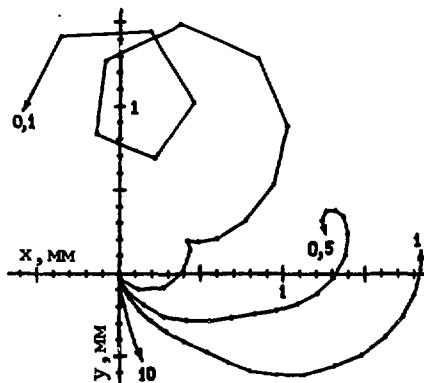


Рис. 1

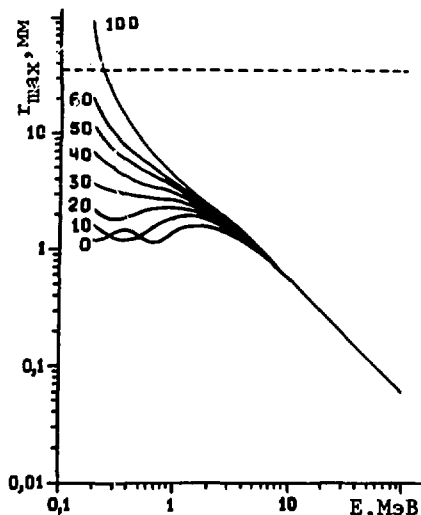


Рис. 2

С ростом энергии провал магнитного поля оказывает все менее заметное влияние. Смещение же пучка с оси сначала увеличивается, благодаря росту поперечной силы Лоренца, а затем уменьшается вследствие релятивистского увеличения массы и практически неизменного импульса силы после достижения электронными скоростями, сравнимых со скоростью света.

На рис.2 показаны энергетические зависимости величины максимального удаления пучка от оси r_{\max} на рассматриваемом метровом участке дрейфа для различных значений λ . Величины λ в сантиметрах указаны цифрами у кривых. Они соответствуют глубинам провала поля в центре зазора до 300, 203, 132, 87, 60, 43 и 13 Гс. Пуанктиром отмечен радиус апертуры. Тенденция к ослаблению с ростом энергии влияния провала продольного поля находит здесь явное выражение в слиянии всех кривых в правой части рисунка. Зависимость тут оказывается практически линейной и от энергии, и от величины поперечного поля, и от длины участка.

Анализ движения на простом участке дрейфа уже позволяет делать некоторые предположения о том, как поведет себя пучок в той или иной реальной ускорительной структуре. В качестве конкретного примера рассмотрим инжекторный участок ускорителя ЛПУ-30.

Он представляет собой последовательность из 12 полутораметровых ускорительных секций, каждая из которых первоначальную энергию пучка 300 кэВ увеличивает на 250 кэВ.

Дрейфовые промежутки между секциями слегка различаются и в среднем имеют длину 50 см, так что общая длина структуры 24,5 м.

Фокусирующая система создает продольное магнитное поле, величина которого внутри секции колеблется с периодом в 12,5 см и отклонением от среднего значения ~ 5%. Между секциями продольное поле имеет провалы с глубиной ~ 60%.

Измерения показали²¹, что пермаллоевые сердечники индукторов практически полностью экранируют внутрисекционные области от проникновения в них поля Земли.

Поэтому будем считать, что поперечное поле 0,4 Гс действует только в дрейфовых промежутках.

Результаты, полученные нами для модельного участка дрейфа, позволяют предположить, что основной вклад в смещение пучка будут вносить только первые несколько таких промежутков. А устранение поперечного поля в них с помощью магнитных экранов или путем его компенсации должно существенно уменьшать смещение. Уменьшится оно и при сглаживании неоднородностей продольного поля.

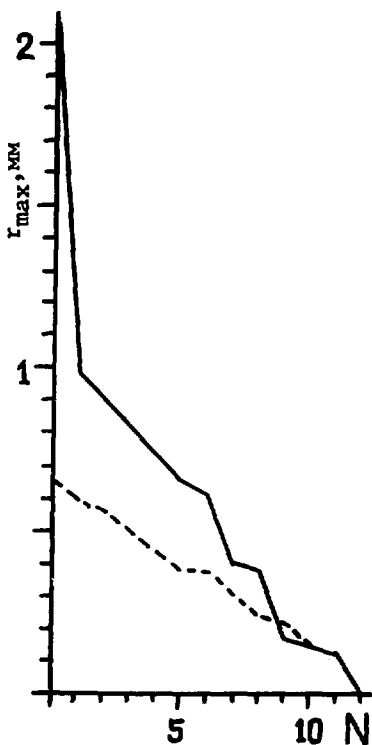


Рис. 3

Расчеты подтверждают эти предположения. На рис. 3 представлены графики зависимости r_{\max} от N , где N - номер той секции, вплоть до которой устранено поперечное поле. Иными словами, N - это число расположенных в начале дрейфовых промежутков, в которые поле Земли не проникает.

Пунктирная кривая соответствует некоей гипотетической фокусирующей системе, которая на всей длине 24,5 м создавала бы такое же продольное поле, как внутри секций, т.е. без глубоких провалов в зазорах. Эта кривая демонстрирует влияние неоднородностей продольного поля.

Таким образом, магнитное поле Земли, как видно на примере ЛИУ-30, может приводить к значительным смещениям электронного пучка с оси симметрии. Поэтому представляется целесообразным каналы коротких ускорителей /до 10 м/ располагать под углом к горизонту вдоль силовых линий геомагнитного поля. Большие же машины следует строить параллельно его горизонтальной со-

ставляющей и устранять вертикальную составляющую в начальной их части. Кроме того, желательно избегать неоднородностей в продольном фокусирующем магнитном поле.

В заключение автор благодарит И.М.Матору за интерес к работе и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракитянский С.А. ОИЯИ, Р9-87-55, Дубна, 1987.
2. Анцулов П.С., Матора И.М., Меркулов Л.А. ОИЯИ, Р9-4498, Дубна, 1969.

Ракитянский С.А.

P9-87-299

Геомагнитное смещение электронного пучка
в ускорителе ЛМУ-30

Численно исследовано влияние слабого поперечного магнитного поля на движение интенсивного электронного пучка в линейном цилиндрическом вакуумном канале. Задача решалась в рамках простой модели с нитеобразным пучком. При этом учитывались заряды и токи изображения, наводимые в проводящей поверхности вакуумной камеры. Исследована зависимость смещения пучка с оси канала, вызванного поперечным магнитным полем, от энергии и от степени неоднородности продольного фокусирующего поля. Выполнены расчеты смещения пучка для ускорительной структуры ЛМУ-30. На этом примере показано, что магнитное поле Земли может приводить к значительным смещениям. Показано также, что сглаживание неоднородностей продольного поля уменьшает смещение в несколько раз. Сделан вывод о целесообразности ориентации коротких ускорителей вдоль силовых линий геомагнитного поля и необходимости его устранения в начальной части больших машин.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод автора

Rakityansky S.A.

P9-87-299

Geomagnetic Displacement of the Electron Beam
in the LIU-30 Accelerator

An influence of a weak lateral magnetic field upon the motion of the intense electron beam inside a linear cylindrical vacuum channel is numerically explored. The problem is solved in the framework of a simple model with a thread-like beam. It also takes into account the charge and current of the image, induced in conducting surface of the vacuum tube. The dependence of the beam displacement from the axis, caused by the lateral magnetic field, on the energy and on the degree of nonuniformity of the longitudinal focusing field is explored. A calculation of the beam displacement for the LIU-30 accelerating structure is performed. It is shown by this example that the earth magnetic field may cause a significant displacement. It is also shown that a smoothing away of the longitudinal field nonuniformities reduces the displacement by some times. A conclusion about advisability of orientation of the short accelerators along the geomagnetic lines and about indispensability of a removal of geomagnetic field in beginning parts of the long machines is made.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1987

8 коп.

Редактор М.И. Зарубина. Макет Р.Д. Фоминой.
Набор Л.В. Пахомовой.

Подписано в печать 11.06.87.

Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,53.

Тираж 305. Заказ 39199.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Дубна Московской области.