

242/83



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

10/1-83

P9-82-676

Ю.Б.Викторов, И.И.Голубев, И.Н.Иванов,
А.М.Каминская, А.К.Каминский, В.М.Лачинов,
В.К.Маковеев, В.Н.Мамонов,
В.П.Рашевский, А.П.Сергеев

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПРИ ВЫВОДЕ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА
НА МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1982

ВВЕДЕНИЕ

Специфика адгезаторов коллективных ускорителей такова, что начальное ускорение электронных колец осуществляется в спадающем вдоль оси вывода магнитном поле ^{1,2/}. В модели коллективного ускорителя ^{3,4/} суммарная длина ускоряющего участка составляет 3 м, причем на расстоянии 1,9 м от медианной плоскости кольцо попадает в высокочастотный ускоряющий резонатор. Схема установки показана на рис.1.

Настоящая работа посвящена проблемам, возникшим при формировании выводного магнитного поля модели коллективного ускорителя, и включает в себя следующие вопросы:

- соответствие расчетных и измеренных распределений магнитного поля ступеней сжатия при раздельном включении и их влияние друг на друга при совместной работе;
- обеспечение механической и электрической прочности ступеней;
- особенности выводного и ускоряющего участков;
- обсуждение результатов формирования магнитного поля при выводе.

СООТВЕТСТВИЕ РАСЧЕТОВ И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАЗДЕЛЬНОЙ И СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ СТУПЕНЕЙ

Расчет магнитной системы модели коллективного ускорителя, обеспечивающей на длине вывода магнитное поле $B_z \approx 13500$ Гс, однородное с точностью $\Delta B_z = \pm 30$ Гс, приведен в ^{3/}. Магнитное поле в каждый момент времени вычислялось в виде суммы полей работающих ступеней и полей вихревых токов, наведенных в стенках камеры адгезатора. Временная зависимость токов во всех ступенях выбиралась в виде полусинусоиды. При создании магнитной системы модели коллективного ускорителя координаты R_i, Z_i центров катушек, число витков W_i и амплитуды токов I_{0i} , длительность импульсов τ_i и время включения t_i выбирались в соответствии с требованиями ^{3/} и ограничениями на амплитуды токов $I_{0i} \leq 30$ кА и напряжений $U_{0i} \leq 30$ кВ, обусловленными, в основном, возможностями коммутаторов тока.

При подготовке работы по формированию магнитного поля при выводе были проведены измерения магнитного поля всех ступеней при их раздельном включении с целью определения соответствия их расчетным распределениям, т.к. наличие толстых стенок камеры могло внести значительные коррективы в ожидаемые режимы вывода.

На рис.2 показаны расчетные и измеренные распределения полей

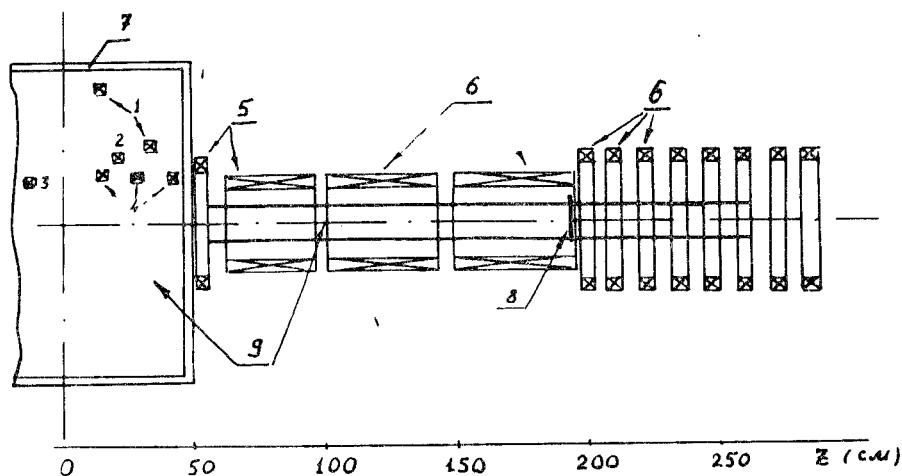


Рис.1. Блок-схема установки: 1-6 - токовые катушки шести ступеней магнитной системы; 7 - камера адгезатора; 8 - ВЧ резонатор; 9 - вакуумный объем.

на радиусе вывода кольца для трех ступеней магнитной системы адгезатора. Для удобства сравнения расчетные кривые нормированы на измеренные в максимуме поля. Из рисунка видно, что отличие экспериментальных результатов от расчетных не превышает 10% даже в области стенки камеры. Аналогичное согласие получается и для других ступеней. Основываясь на результатах этих измерений, можно сделать вывод, что значительных отличий токов от значений, приведенных в работе ^{1/3/}, не ожидается, и радиальное магнитное поле близко к расчетному. Кроме того, эти измерения позволили сделать абсолютную калибровку измерителей токов в ступенях.

Однако при измерении суммарного поля в области вывода кольца при напряжениях на ступенях, соответствующих токовым режимам ^{1/3/} и полученным калибровкам, выяснилось, что локальные отличия поля от однородного достигают 10%. Причина расхождений измеренных и расчетных распределений поля состоит в том, что при совместной работе ступеней из-за сильной связи между ними заметно изменяются амплитудные и временные зависимости токов в ступенях. Для примера на рис.3 показано влияние первой и третьей ступеней на работу второй ступени, для которой это влияние наиболее заметно. Из сравнения кривых 2,3 и 4 с кривой 1 видно, что величина тока второй ступени в рабочем режиме в момент вывода $t = 410$ мкс/ отличается почти на 20% от значения тока при работе второй ступени

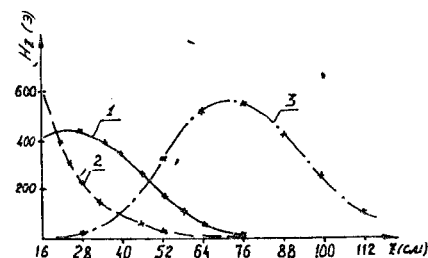


Рис.2. Сравнение расчетных и измеренных распределений магнитного поля ступеней адгезатора при их раздельном включении: кривые 1,2,3 - расчетные распределения полей первой, третьей и пятой ступеней; крестики - соответствующие измеренные значения.

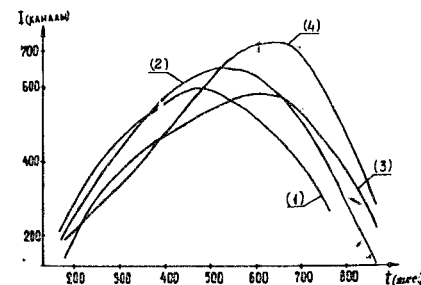


Рис.3. Влияние первой и третьей ступеней на форму импульса тока второй ступени: 1 - вторая ступень в одиночном режиме $U_2 = 3,5$ кВ; 2 - включены вторая и первая ступени $U_2 = 3,5$ кВ, $U_1 = 4,9$ кВ; 3 - включены вторая и третья ступени $U_2 = 3,5$ кВ, $U_1 = 5,0$ кВ; 4 - включены вторая, первая и третья ступени $U_2 = 3,5$ кВ, $U_1 = 4,9$ кВ, $U_3 = 5,0$ кВ.

пени в одиночном режиме, причем величина этого отличия зависит от времени. Из этих измерений следует, что коррекция напряжения в одной из ступеней может привести к ощутимому перераспределению токов в других ступенях.

Для устранения возникшей неопределенности в выборе режима вывода необходимо иметь возможность контроля токов /достаточно в относительных единицах/ в заданный момент времени. С этой целью на всех ступенях были внедрены системы импульсных измерений токов в момент времени, задаваемый стробирующим импульсом. Значения токов измерялись 1024-канальными кодировщиками и выдавались в цифровом виде.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КАТУШЕК МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Катушки магнитной системы адгезатора намотаны из медной квадратной трубки 8x8 мм. Витки катушек изолированы между собой десятью слоями стекломикаленты. После намотки все катушки испытывались статическим и импульсным напряжениями, в полтора-два

раза превышающими рабочее напряжение. Перед установкой в камеру адгезатора катушки были залиты эпоксидной смолой. Однако при электрическом испытании магнитной системы в вакууме $P \approx 6 \cdot 10^{-6}$ Тор/ некоторые катушки пробивались при напряжении /10-15/ кВ. Таким образом возникла проблема ввода больших электрических мощностей $U \approx 30$ кВ, $I \approx 30$ кА/ к индуктивной нагрузке, находящейся в вакууме. Механизм пробоя при таком довольно низком напряжении обусловлен, по-видимому, следующим^{15/}: электроны, эмиттируемые с проводящих поверхностей, движутся в электрическом и магнитном полях вдоль силовых линий последнего, а так как пробег электронов в вакууме достаточно велик, то происходит ионизация значительных объемов остаточного газа. Образовавшиеся каналы могут стать проводниками, и пробой происходит как между близко расположенными токовыми подводами, так и с одного из них на достаточно удаленные металлические стенки камеры. Так как при пробоях обеспечивается значительное энерговыделение, то изоляторы и сами катушки разрушаются практически за один-два пробоя. Кроме того, пагубное влияние пробоев значительно увеличивается разрушениями, связанными с большими импульсными усилиями между катушками /до 15 тонн/ и между подводами от текущих по ним токов. Для ликвидации пробоев необходимо было обеспечить надежную вакуумную изоляцию, механическую прочность подводов, сохраняя искажения магнитного поля минимально возможными.

С учетом указанных требований была выбрана бессиловая коаксиальная конструкция, в которой обеспечивается довольно однородное электрическое поле без сильных градиентов. Все токоведущие элементы подводов внутри камеры /особенно наружная оболочка коаксиала/ были покрыты несколькими слоями стеклотенты, пропитанной эпоксидной смолой. Основные конструктивные элементы токового ввода показаны на рис.4.

Проведенные впоследствии электрические испытания катушек в вакууме показали значительное увеличение их электрической прочности и надежную работу экспериментальной установки.

СТРУКТУРА ВЫВОДНОГО И УСКОРЯЮЩЕГО УЧАСТКОВ МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Рассмотрим эти участки, следуя по траектории вывода кольца, взяв за начало точку старта - снятия магнитной ямы на $z = 13$ см от медианной плоскости адгезатора.

$13 \text{ см} \leq z \leq 35 \text{ см}$. Здесь выделен участок вывода внутри камеры адгезатора, где влияние вихревых токов, наведенных в стенках камеры, сказывается слабо. Магнитное поле в этой области создается в основном катушками /1 ÷ 11/ четырех ступеней адгезатора, расположенными близко к медианной плоскости адгезатора и определяющими r - z траекторию кольца при сжатии. Поэтому изменение амплитуд

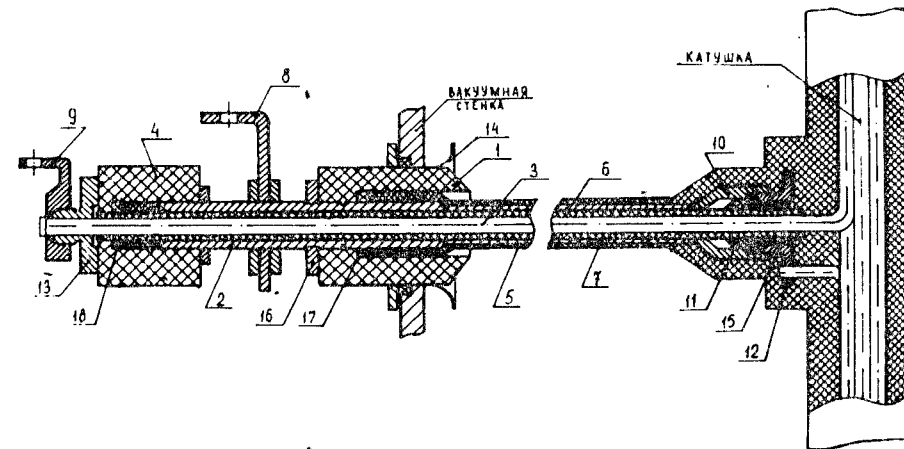


Рис.4. Конструкция токоввода. 1 - проходной изолятор; 2, 12 - коллекторы; 3 - внутренний проводник; 4 - изолятор; 5 - внешняя диэлектрическая оболочка; 6 - внутренняя диэлектрическая оболочка; 7 - внешний проводник; 8, 9 - ошиновки; 10 - конусная гайка; 11 - диэлектрическая втулка; 13 - цанга; 14 - экран; 15, 17, 18 - резиновые прокладки; 16 - уплотняющая гайка.

или временных зависимостей токов в этих катушках может заметно влиять на r -траекторию кольца.

$35 \text{ см} \leq z \leq 65 \text{ см}$. Здесь участок вывода проходит через отверстие в боковой стенке камеры адгезатора. Толщина стенки $d = 35$ мм/ значительно превышает скин-глубину для частот магнитной системы адгезатора и сравнима со скин-глубиной для частот магнитного поля ускоряющей системы. Магнитное поле создается в основном катушками четвертой и пятой ступеней. В этой области происходит также стыковка вакуумных объемов адгезатора и ускоряющей системы, и влияние металлических конструкций существенно сказывается на распределении поля. Для примера на рис.5 показано влияние тонкой $d = 0,5$ мм/ длинной металлической трубы диаметром 150 мм /кривая 2/ и фланца /кривая 3/ $\varnothing 220 \times \varnothing 150 \times 10$ мм, помещенного на $z = 60$ см, на распределение поля в этой области. Из сравнения кривых /1/ и /3/ видно, что подсадка поля составляет ~65%.

$65 \text{ см} \leq z \leq 100 \text{ см}$. На этом участке обеспечивается согласование спадов /краевых эффектов/ полей магнитных систем адгезатора и ускоряющей системы /шестой ступени/. Шестая ступень выполнена в виде соленоида, состоящего из большого числа последовательно

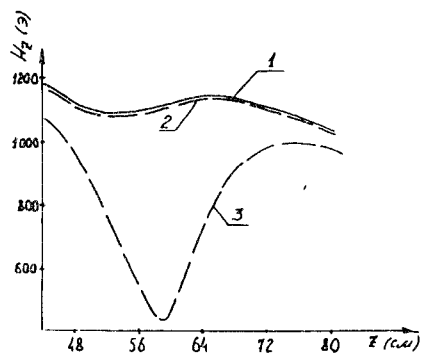


Рис.5. Влияние металлических конструкций на распределение поля на участке вывода кольца: 1 - поле без металлических конструкций; 2 - в области $50 \text{ см} \leq z \leq 100 \text{ см}$ помещена труба из нержавеющей стали; 3 - на $z = 60 \text{ см}$ помещен фланец из нержавеющей стали.

включенных многовитковых катушек. Такая схема удобна для формирования однородного поля внутри соленоида, однако при

формировании поля в данной области выяснилось, что даже значительные изменения тока в одной из катушек очень слабо влияют на характер спада поля. Следовательно, все коррекции поля на этом участке должны обеспечиваться за счет коррекций токов в катушках магнитной системы адгезатора.

$z > 100 \text{ см}$. В этой области поле создается катушками шестой ступени, объединенными в три группы. Две группы этих катушек выполнены в виде отдельных модулей, залитых эпоксидным компаундом, оставшиеся катушки жестко скреплены между собой. Для обеспечения механической прочности системы все три группы катушек закреплены на массивной станине из нержавеющей стали, которая может перемещаться в z -направлении. Исправление значительных локальных неоднородностей поля достигалось за счет изменения в системе запитки отдельных катушек. Точные коррекции поля осуществлялись путем отвлечения части тока от катушки /группы катушек/ в специально подобранную индуктивную нагрузку [8]. Такая система обеспечивает высокую точность при формировании требуемого распределения поля, однако ее неудобство состоит в том, что шунтирующие катушки должны быть изолированы на полное рабочее напряжение установки.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение магнитного поля в области $0 \leq z < 280 \text{ см}$ проводилось холловским магнитометром МИХ-2М [7]. Величина погрешности измерений, обусловленная нестабильностями в измерительной системе при измерении полей в несколько килогаусс, не превышает $0,1\%$ [7]. Система перемещения датчика на длине 300 см по конструкции близка к системе, использованной в измерениях на прототипе КУТИ [7]. Погрешность в установке датчика и его перемещении составляла величину $\Delta \leq 1 \text{ мм}$, а поскольку в интересующей нас области магнитное поле близко к однородному, можно считать, что погрешность в оп-

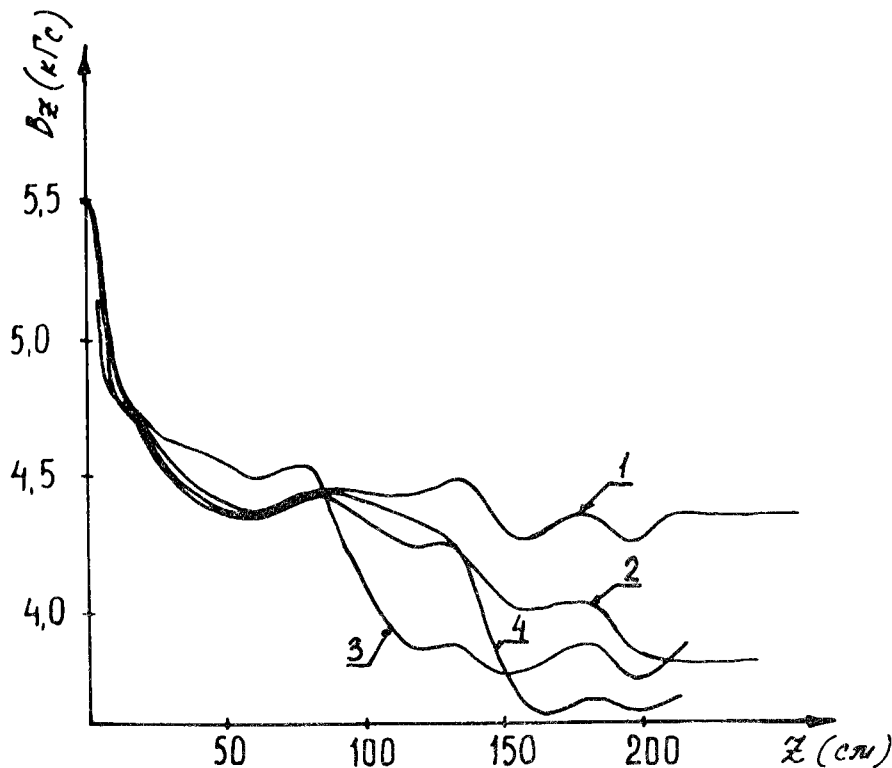


Рис.6. Измеренные распределения z -компоненты магнитного поля, обеспечивающие различные режимы вывода кольца.

ределении координаты датчика заметного вклада в суммарную ошибку измерений вносить не будет. Основным источником погрешностей измерений была недостаточная стабильность напряжений /токов/ в ступенях и грубые системы регулировки напряжений второй и пятой ступеней. Учитывая сложность контроля и коррекций токов во всех шести ступенях одновременно и основываясь на результатах измерений распределений полей от отдельных ступеней, мы на каждом участке измерений контролировали в основном токи тех ступеней, которые дают наибольший вклад в поле в данной области. Суммарная погрешность измерений поля не превышала $\pm 0,2\%$.

В результате магнитных измерений на модели коллективного ускорителя было сформировано магнитное поле, обеспечивающее несколько режимов вывода кольца на длине $L = 2,8 \text{ м}$. Основные результаты измерений показаны на рис.6. Кривая 1 дает распределение поля с малым средним градиентом ($\frac{\Delta B_z}{\Delta z} \approx 2 \text{ Гс/см}$). Кривая 2 показывает распределение поля, средний градиент которого со-

ставляет $\frac{\Delta B_z}{\Delta z} \approx 7$ Гс/см. В обоих случаях локальные градиенты поля не превышают 25 Гс/см. Кривые 3,4 характеризуют распределение поля, состоящее из двух участков с малым градиентом и области резкого регулируемого спада поля: $80 \text{ см} \leq z \leq 115 \text{ см}$ /кривая 3/ и $135 \text{ см} \leq z \leq 160 \text{ см}$ /кривая 4/.

Измерения поля по азимуту для трех значений z показали, что величина азимутальной неоднородности не превышает $\pm 0,2\%$.

Эксперименты с пучком по выводу электронных колец, выполненные в режиме с малым градиентом поля, позволили зафиксировать высадку кольца на мишень, помещаемую на $z_1 = 40 \text{ см}$, $z_2 = 70 \text{ см}$ и $z_3 = 240 \text{ см}$. Регистрация сигналов от кольца проводилась по свечению сцинтиллятора, наблюдаемого на экране телевизора, по сигналам с цилиндра Фарадея и с ФЭУ. На рис.7 показана осциллограмма сигнала с ФЭУ от высадки кольца на мишень, расположенную на $z = 240 \text{ см}$. Для уменьшения фона от тормозного излучения с линейного ускорителя и адгезатора ФЭУ был защищен толстым свинцовым экраном и с помощью коллимирующего отверстия в свинце направлен на мишень. Длительность импульса с ФЭУ на несколько порядков превышает время высадки кольца на мишень, которое можно ожидать при разумных z -размерах и z -скоростях электронного кольца. Причиной такого различия является медленное выполаживание магнитной ямы в области старта кольца на $z \approx 13 \text{ см}$, показанное на рис.8. Для устранения связанной с этим неопределенности во времени вывода кольца нужно обеспечить удержание кольца на $z \leq 13 \text{ см}$ до тех пор, пока не произойдет формирование требуемого распределения поля в

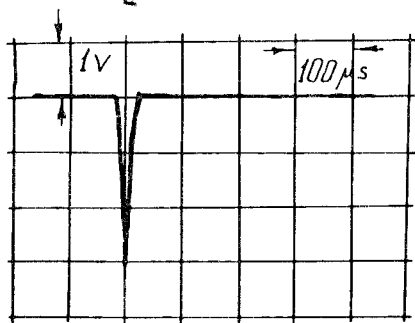


Рис.7. Осциллограмма импульса с ФЭУ от высадки выведенного кольца на мишень.

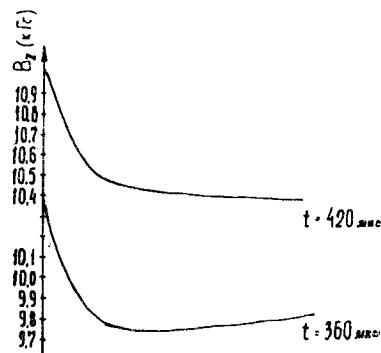
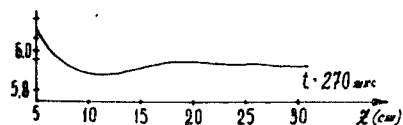


Рис.8. Динамика заполнения "магнитной ямы" на $z = 13 \text{ см}$.



области $z > 13 \text{ см}$ и затем быстро снять барьер в области старта кольца. Вопросы, связанные с работой системы быстрого вывода, будут рассмотрены отдельно.

В заключение авторы выражают благодарность Э.В.Волковыскому и В.И.Аверьянову за наладку системы контроля токов и всем сотрудникам отдела, принимавшим участие в подготовке и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
2. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-8753, Дубна, 1975.
3. Дерендяев Ю.С. и др. ОИЯИ, Р9-9140, Дубна, 1975.
4. Буланов В.А. и др. В кн.: Труды шестого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979, т. II, с. 54.
5. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. Атомиздат, М., 1972.
6. Мамонов В.Н., Иванов Г.А. Устройство для формирования импульсного магнитного поля. Авторское свидетельство СССР №476718 от 5.07.75 г. Бюллетень ОИПОТЗ, №25, 1975, с. 169.
7. Лачинов В.М. и др. ОИЯИ, Р9-12442, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 сентября 1982 года.

Викторов Ю.Б. и др.

P9-82-676

Формирование магнитного поля при выводе электронного кольца на модели коллективного ускорителя

Рассмотрены проблемы, возникшие при формировании магнитного поля модели коллективного ускорителя. Показано хорошее соответствие расчетных и измеренных распределений магнитного поля в толстостенной металлической камере при раздельном включении ступеней магнитной системы. Рассмотрено их влияние друг на друга при совместной работе. Приведена конструкция вакуумного токоввода, обеспечивающая достаточные электрическую и механическую прочность катушек. Экспериментально получены несколько распределений магнитного поля в области вывода кольца, что расширяет возможности исследований электронно-ионных колец.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Viktorov Yu.B. et al.

P9-82-676

Forming of Magnetic Field at the Electron Ring Extraction of the Collective Accelerator Model

The problems that arised at the magnetic field formation of collective accelerator model, are considered. An excellent agreement of the calculated and measured magnetic field distributions in a thick-walled metallic chamber at the separate switching of the magnetic system stages has are indicated. Their influence over each other at the joint work is considered. The construction of vacuum current input providing sufficient electric and mechanical strongness of the coils is presented. A few distributions of the magnetic field in the region of the ring extraction that expand the possibilities of the electron - ion rings, have been experimentally obtained.

The investigation has been performed at the Department of New Methods and Accelerations, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.