

P9-2003-14

Н. А. Морозов, Л. М. Онищенко

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА
ИЗ ЦИКЛОТРОНА ЦИ-5 В ФАЗОТРОН ОИЯИ**

1. Введение

Фазотрон (ЛЯП ОИЯИ) [1] является основной базовой установкой Института для исследований в области физики промежуточных энергий. С целью существенного повышения качества проводимых на фазотроне физических исследований в Лаборатории ядерных проблем предложено [2, 3] повысить на порядок величину выведенного тока пучка протонов путем использования внешней инжекции и последовательной двухступенчатой перезарядки пучка H^- -ионов сначала в H^0 , а затем в H^+ . В качестве инжектора H^- -ионов рассматривается сильноточный циклотрон на энергию 5 МэВ с интенсивностью выведенного пучка 10 - 30 мА и с поперечным эмиттансом пучка $20\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ [4].

Данная работа посвящена разработке, расчетам и выбору параметров тракта пучка, транспортирующего пучок H^- -ионов от выхода канала вывода циклотрона-инжектора до перезарядной фольги (H^0/H^+), установленной в центре фазотрона на радиусе $R \sim 27$ см.

2. Схема тракта инжекции пучка в Фазотрон

Выбранная схема линии инжекции пучка из циклотрона ЦИ-5 в фазотрон показана на рис.1. Выбор параметров линии инжекции проводился на основании исходных данных, приведенных в табл.1. Отклоненный элементами системы вывода циклотрона (не показаны на рисунке) пучок поворачивается отклоняющим магнитом (ВМ-20) на угол 20° , проходит группирователь пучка, корректирующий магнит (КМ) (в вертикальном направлении), систему фокусировки из 4-х квадрупольных магнитов (Q1F – Q4F) и магнит-селектор (МС). После прохождения перезарядной камеры (H^-/H^0) нейтральный пучок дрейфует на длине 5 м до перезарядной фольги (H^0/H^+), установленной в точке инжекции в фазотрон. Для увеличения коэффициента захвата пучка в фазотрон в линию инжекции введены два устройства:

- группирователь пучка, который служит для уменьшения расстояния по фазе между центрами инжектируемых сгустков;
- магнит-селектор, который, используя введенный группирователем разброс по энергии между банчами пучка, производит их разделение в горизонтальной плоскости с целью их инжекции в фазотрон на равновесные орбиты, соответствующие их средней энергии.

3. Группирователь пучка

Группирователь пучка, взаимодействуя с каждой тройкой сгустков из циклотрона (частота 54,372 МГц), уменьшает расстояние по фазе между крайними сгустками после прохождения дрейфового промежутка (средний сгусток проходит группирователь в фазе нулевого напряжения на нем). Группирователь может работать на любой частоте, кратной частоте захвата в фазотрон (18,124 МГц). Увеличение частоты группирователя снижает его размеры, но увеличивает энергетический разброс, вносимый им в сгустки пучка, что ведет к увеличению фазовых размеров сгустков после прохождения дрейфового промежутка. Расчеты показали, что наиболее оптимальной частотой группирователя для требуемого фазового расстояния между центрами

крайних сгустков 100° является частота 36,248 МГц. На рис.2 приведены зависимости расстояния по фазе между центрами крайних сгустков (1 и 3) от амплитуды напряжения на группирователе после их дрейфа на расстоянии 8 м (начальная энергия сгустков 5 МэВ) и – отклонение средней энергии 1-го и 3-го сгустков от энергии 2-го сгустка. Уменьшение фазового расстояния между центрами сгустков до величины менее чем 100° . требует увеличения амплитуды ускоряющего напряжения на зазоре группирователя, увеличивает энергетический разброс между сгустками и в каждом сгустке, что увеличивает фазовый размер сгустков в точке инжекции пучка в фазотрон и что, в свою очередь, компенсирует эффект увеличения эффективности захвата из-за уменьшения фазового расстояния между центрами сгустков.

В качестве начального фазового эмиттанта был использован расчетный эмиттанс из циклотрона ЦИ-5 при учете тока пучка. Расчет фазового движения сгустков в линии инжекции проводился при помощи программы TRACE 3-D [5] для тока пучка 30 мА. В этой программе ведется расчет динамики пучка в 6-мерном фазовом пространстве матричным методом. При учете влияния заряда сгустка пучка на продольное и поперечное его движение он рассматривается как равномерно заряженный эллипсоид. Электрическое поле внутри такого сгустка рассчитывается по формулам Лапостоля, оно линейно растет от 0 до максимального значения на границе сгустка для каждого из трех координатных направлений. На рис.3 показан начальный фазовый эмиттанс, использованный в расчетах динамики линии инжекции в фазотрон. Размер эмиттанта по фазе $\pm 6^\circ$ для частоты захвата фазотрона. На рис.3 также приведены эмиттансы для первого, второго и третьего сгустков после прохождения всей линии инжекции в фазотрон. Видно, что при фазовой группировке между центрами сгустков до 100° , общий фазовый размер набора из трех сгустков находится в пределах 185° . С учетом требуемого фазового размера пучка на захвате в фазотрон, равного 180° , эффективность группирователя близка к 100%. Разброс по энергии растет до величины $\pm 0,24$ МэВ. Благоприятным обстоятельством является то, что на границах фазового диапозона находится малая часть инжектируемого пучка. Характеристики пучка по фазовому движению и параметры группирователя приведены в табл.2.

Таблица 1. Исходные данные для выбора параметров линии инжекции

Энергия пучка	5 МэВ
Относительный разброс по энергии	$\pm 3,5 \cdot 10^{-3}$
Ток пучка (макс.)	30 мА
Частота циклотрона	54,6 МГц
Частота фазотрона (на захвате)	18,2 МГц
Фазовый размер пучка из циклотрона (для частоты 54,6 МГц)	36°
Максимальный фазовый размер сепаратрисы фазотрона на захвате	180°
Поперечный нормализованный эмиттанс пучка из циклотрона	2 п.мм•мрад

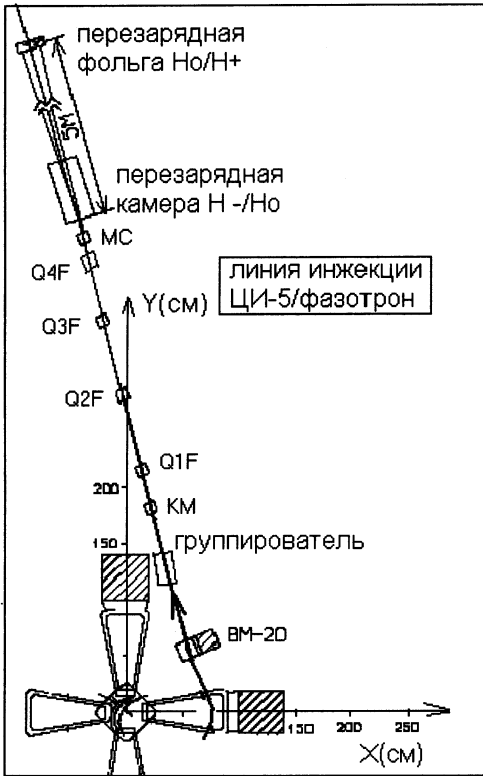


Рис.1. Схема тракта инжекции пучка из ЦИ-5 в фазотрон

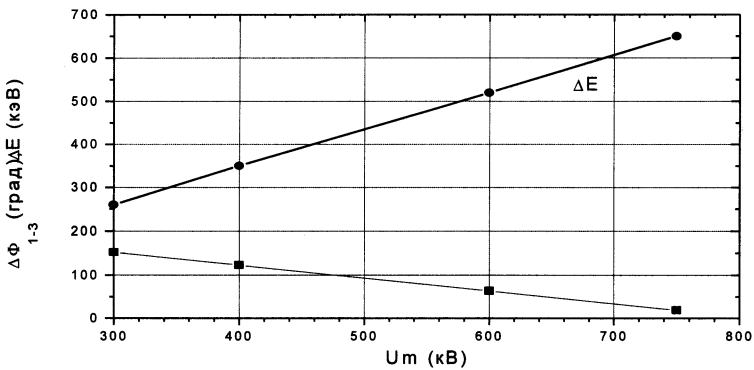


Рис.2. Фазовое расстояние между центрами 1-го и 3-го сгустков и отклонение средней энергии 1-го и 3-го сгустков от энергии центрального сгустка

Таблица 2. Характеристики пучка и параметры группирователя

Энергия пучка (МэВ)	5
Длина дрейфового промежутка (м)	8
Начальный продольный эмиттанс пучка (для частоты 18,124 МГц) (π град•МэВ)	1,05
Расстояние по фазе между центрами крайних сгустков на захвате в фазотрон (град.)	100
Полный фазовый размер трех сгустков на захвате в фазотрон (град.)	185
Частота ВЧ-напряжения группирователя (МГц)	36,248
Амплитуда ВЧ-напряжения (кВ)	475
Эффективность группирователя (%)	100
$\beta\lambda$ (м) ($\beta=v/c$, λ - длина волны ВЧ-напряжения)	0,844

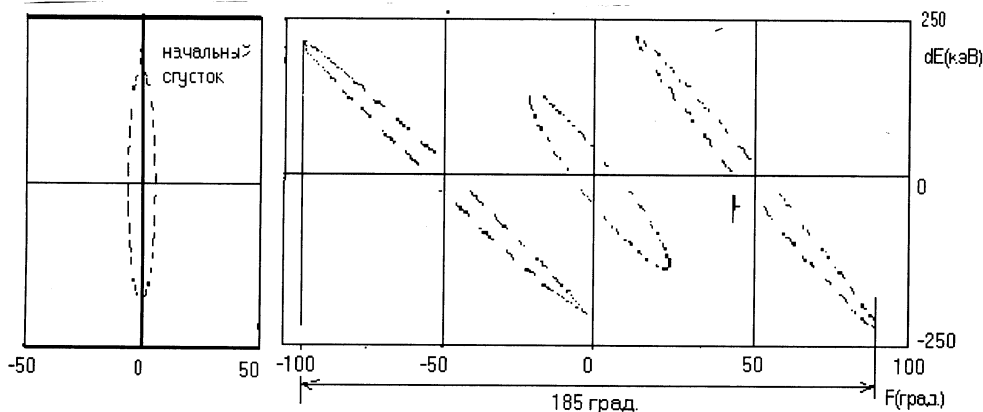


Рис.3. Фазовый эмиттанс для начального сгустка, положение трех сгруппированных сгустков на фазовой плоскости в момент захвата в фазотрон

4. Магнит-селектор

Магнит-селектор (МС) служит для разделения инжектируемых сгустков по их энергии с целью инжекции в фазотрон на равновесную орбиту, соответствующую средней энергии каждого сгустка. Параметры равновесных орбит в фазотроне для трех сгустков инжектируемого пучка приведены в табл.3. Направление инжекции пучка в фазотрон выбирается таким образом, чтобы сгустки с энергией 5 МэВ инжектировались на радиус $R=27,14$ см и имели направление $\alpha=45,3$ мрад. Магнит-селектор в этом случае должен для сгустков с энергиями 4,59 и 5,41 МэВ обеспечить разность углов поворота относительно центрального сгустка $\Delta\alpha = \pm 1,8$ мрад при расстоянии от магнита до точки

инъекции в фазотрон, равном 6 м. Для нерелятивистских протонов разность углов поворота в магните для частиц различных энергий определяется формулой

$$\Delta\alpha(\text{мрад})=1000 \text{ В (Тл)} L_{\text{mag}} (\text{м}) [(48/E_0 (\text{МэВ}))^{1/2}-(48/(E_0+\Delta E))^{1/2}].$$

Подстановка $E_0=5 \text{ МэВ}$, $\Delta E=0,41 \text{ МэВ}$ дает выражение

$$\text{В } L_{\text{mag}} = 0,0149 (\text{Тл}\cdot\text{м}).$$

Эта зависимость графически изображена на рис.4.

Таблица 3. Положение равновесных орбит в фазотроне на азимуте 170°

W (МэВ)	4,59	5	5,41
R (см)	26,05	27,14	28,21
R_r (см)	1,15	1,23	1,31
α_r (мрад)	43,5	45,3	47,1
φ (град)	170	170	170

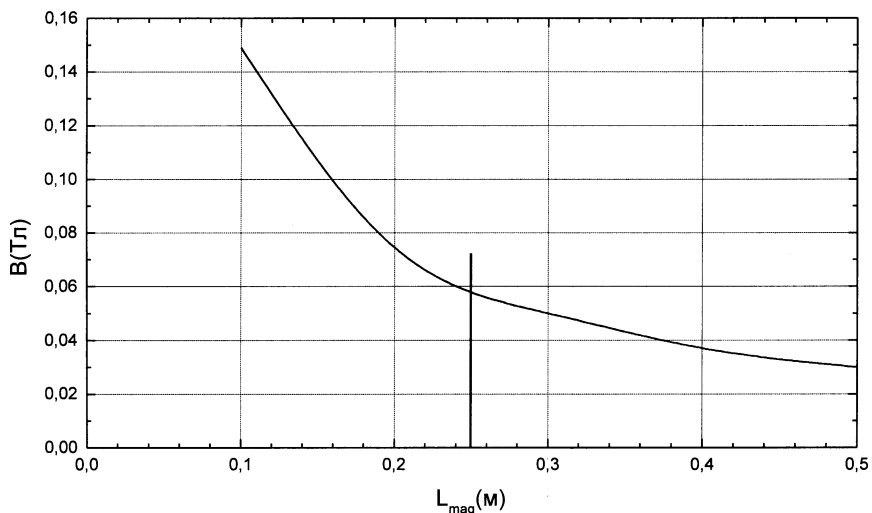


Рис.4. Требуемое магнитное поле МС в зависимости от его длины

Расчет динамики пучка в тракте инъекции показал необходимость обеспечения в точке установки МС горизонтальной и вертикальной рабочей апертуры соответственно $\Delta X=\pm 50 \text{ мм}$, $\Delta Y=\pm 10 \text{ мм}$. Длина магнита была выбрана равной 25 см, при этом в его зазоре требуется уровень магнитного поля 0,055 Тл.

Расчет магнитного поля МС проводился по программе SUPERFISH [6]. Поперечное сечение выбранной конфигурации Н-образного магнита-селектора показано на рис.6. Для получения относительной однородности магнитного

поля в требуемой горизонтальной рабочей апертуре на уровне 10^{-3} на полюсах магнита предусмотрены шиммы размером $15 \times 0,9$ мм.

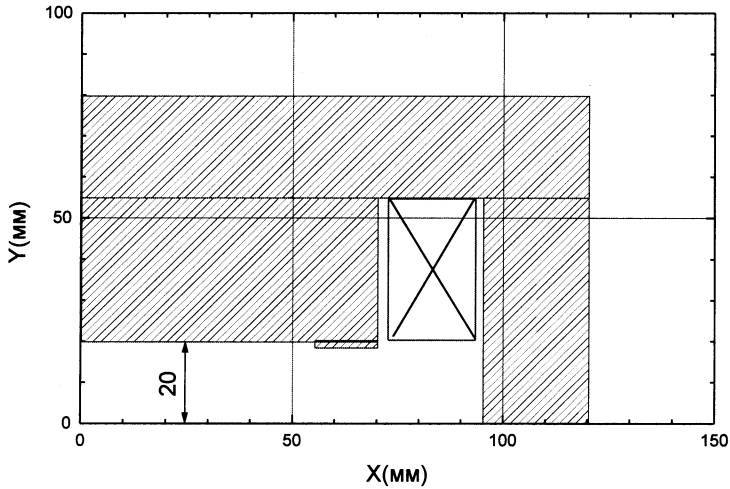


Рис.5. Поперечное сечение магнита-селектора

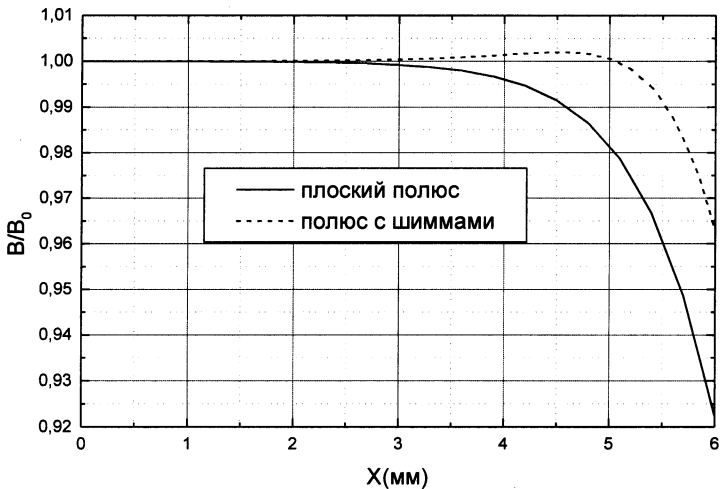


Рис.6. Относительное распределение магнитного поля в зазоре МС

Каждая обмотка магнита состоит из 15 витков (3 витка \times 5 слоев), намотанных медным проводником $\varnothing 6 \times 1$ мм, охлаждение водяное. Изоляция проводника -

стеклолента, пропитанная эпоксидной смолой. Толщина изоляции - 0,3 мм на сторону, дополнительная корпусная изоляция - 0,5 мм. Номинальный ток в проводнике - 60 А. Основные параметры магнита приведены в табл.4.

Таблица 4. Параметры МС

Тип магнита	Н-образный
Материал ярма	Ст-10 - Ст-15
Зазор между полюсами (мм)	40
Длина магнита (по железу) (мм)	250
Рабочая апертура (горизонт./вертикальн.) (мм)	100/20
Тип проводника для обмотки	Си, Ø6*1 мм
Число витков на полюс	15
Ток в обмотке (номин.) (А)	60
Плотность тока в проводнике (номин.)(А/мм ²)	4,8
Напряжение на обмотке (номин.)(В)	2,1
Мощность в обмотке (номин.) (кВт)	0,13

Относительное расчетное распределение магнитного поля в зазоре магнита без и с шиммирующими выступами показано на рис.6.

5. Динамика пучка в тракте инжекции

Расчеты поперечной динамики пучка в тракте инжекции проводились также при помощи программы TRACE-3D с учетом заряда пучка (ток пучка 30 мА). Результаты расчета поперечных огибающих пучка для тракта приведены на рис.7, его основные характеристики и параметры элементов приведены в табл.5.

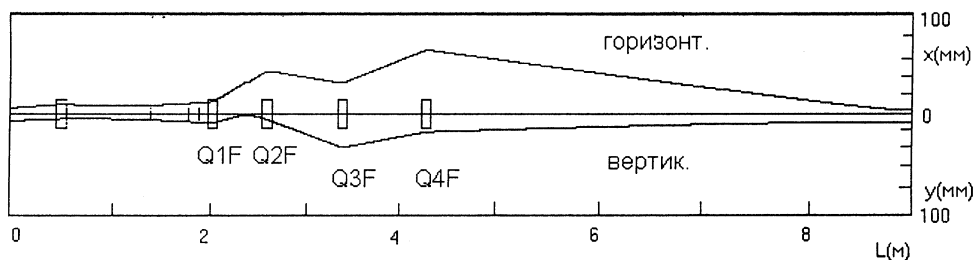


Рис.7. Поперечные огибающие пучка для тракта инжекции пучка из ЦИ-5 в фазотрон

Таблица 5. Характеристики и параметры тракта инжекции

Начальный горизонтальный эмиттанс пучка (π мм•мрад)	20
Начальный вертикальный эмиттанс пучка (π мм•мрад)	20
Конечный горизонтальный эмиттанс пучка (π мм•мрад)	30
Конечный вертикальный эмиттанс пучка (π мм•мрад)	30
Интеграл градиента магнитного поля для квадруполя Q1F (Тл)	1,2
Диаметр рабочей апертуры (мм)	30
Интеграл градиента магнитного поля для квадруполя Q2F (Тл)	0,55
Диаметр рабочей апертуры (мм)	80
Интеграл градиента магнитного поля для квадруполя Q3F (Тл)	0,52
Диаметр рабочей апертуры (мм)	80
Интеграл градиента магнитного поля для квадруполя Q4F (Тл)	0,25
Диаметр рабочей апертуры (мм)	120

6. Оценка увеличения эмиттансов пучка в тракте инжекции

При расчете динамики сильноточного пучка при помощи программы TRACE-3D сгустки пучка рассматривались как равномерно заряженные эллипсоиды. Электрическое поле внутри такого сгустка линейно в каждом направлении. Эмиттансы пучка постоянны, так как только нелинейные эффекты, возникающие при неоднородном распределении заряда пучка в сгустке, приводят к их изменению. Многочисленные аналитические и численные варианты моделирования поведения сильноточных пучков, реализованные за последние 10 – 20 лет прежде всего в теории линейных ускорителей, показали, что неоднородные распределения частиц в сгустках пучка имеют большую энергию электростатического поля, чем эквивалентные сгустки с такими же размерами, таким же током, но с однородным распределением заряда. Так как неоднородное распределение частиц в сгустке имеет тенденцию перехода к однородному распределению (к минимуму потенциальной энергии), дополнительная энергия сгустка переходит в кинетическую энергию частиц пучка, что вызывает рост эмиттансов. В работе [7] приведены в общем виде дифференциальные уравнения изменения эмиттансов пучка. В предположении, что дополнительная энергия сгустка пучка выделяется равномерно по всем трем координатам, для оценки изменения эмиттанса (ϵ_x) пучка в каждом направлении (x) может быть использовано аналитическое выражение:

$$\frac{\Delta \varepsilon_x}{\varepsilon_x} = \left[\frac{32 x_{rms}^2}{3 \varepsilon_x^2 m \gamma^3 \beta^2 c^2 N} \Delta(W_{un} - W_u) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где

x_{rms} – среднеквадратичный размер сгустка,

N - число частиц в сгустке,

W_u – энергия электрического поля сгустка при однородном распределении заряда в нем,

W_{un} – энергия электрического поля сгустка при неоднородном распределении заряда в нем.

Для расчета энергии электрического поля сгустка пучка были использованы аналитические формулы, приведенные в работе [8] для сгустка пучка, имеющего цилиндрическую форму и при учете наличия стенок вакуумной камеры. При расчетах энергии неоднородного распределения заряда в сгустке были использованы выражения для гауссовского распределения заряда в поперечном направлении и параболического - в продольном. Так как пучок на первом участке тракта инжекции (до квадрупольных магнитов) имеет минимальные размеры и максимальную плотность заряда в сгустке, увеличение эмиттанса будет реализовываться на этом участке, в расчетах использовались средние размеры сгустка на этом участке. Расчеты были проведены для двух типов сгустков, имеющих различную среднюю длину (соответственно 70 и 110 мм). Результаты расчетов для тока пучка 30 мА (заряд в сгустке $5,4 \cdot 10^{-10}$ Кл) приведены в табл.6. Из расчетов следует ожидать роста эмиттансов пучка в пределах 30 – 50%.

Таблица 6. Энергия сгустков и рост эмиттансов пучка

	Сгусток (L=70 мм)	Сгусток (L=110 мм)
Энергия электрического поля сгустка при однородном распределении заряда (Дж 10^{-7})	0,423	0,313
Энергия электрического поля сгустка при неоднородном распределении заряда (Дж 10^{-7})	0,865	0,642
Разность энергий (Дж 10^{-7})	0,442	0,329
Коэффициент увеличения эмиттансов пучка	1,52	1,31

7. Выводы

- Проведен выбор параметров для элементов линии инжекции пучка в фазотрон ОИЯИ из сильноточного циклотрона ЦИ-5.
- Группирователь пучка осуществляет уменьшение фазового расстояния между центрами сгустков с 240 до 100°.
- Магнит-селектор осуществляет разделение сгустков по средней энергии и позволяет их инжекцию в фазотрон на оптимальный радиус равновесной орбиты пучка.

- Магнитные квадрупольные линзы линии инжекции обеспечивают фокусировку в линии и инжекцию нейтрального пучка с требуемым эмиттансом на перезарядной фольге в фазотроне.
- Проведены расчеты по аналитическим формулам, показывающие возможное полуторакратное увеличение начальных эмиттансов пучка. Для более точного расчета изменения эмиттансов сильноточного пучка предполагается провести компьютерное моделирование его динамики в тракте инжекции по программам численного интегрирования уравнений движения заряженных частиц с учетом их собственных полей.

Литература

- 1) Онищенко Л.М. - ОИЯИ, 9-95-24, Дубна, 1995.
- 2) Савченко О.В. - ОИЯИ, Б1-9-90-72, Дубна, 1990.
- 3) Борисов О.Н., Онищенко Л.М. - ОИЯИ, Р9-97-282, Дубна, 1997.
- 4) Onischenko L., Borisov O. - External Injection into the JINR Phasotron – Computer Simulation. Proc. of the EPAC-2000, p.569.
- 5) Crandal K., Rusthoi D. – TRACE 3-D Documentation. Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-97-886, 1997.
- 6) Billen I.H., Young L.M. - POISSON SUPERFISH Documentation. LA-UR-96-1834, Los Alamos, 1996.
- 7) Hofmann I., Struckmeier J. - Generalized three-dimensional equations for the emittance and field energy of high-current beams in periodic focussing structures. Part. Acc. 21, 69, 1987.
- 8) Chen Y., Huang Zh. - Nonlinear space charge effects and emittance growth in linac. Proc. of PAC-95, 1995, p.753-757.

Получено 24 января 2003 г.

Морозов Н. А., Онищенко Л. М.

P9-2003-14

Выбор параметров линии инжекции пучка из циклотрона ЦИ-5
в фазотрон ОИЯИ

С целью существенного повышения качества проводимых на фазотроне (ЛЯП ОИЯИ) физических исследований в лаборатории разрабатывается предложение по повышению на порядок величины выведенного тока пучка протонов путем использования внешней инжекции и последовательной двухступенчатой перезарядки пучка H^- -ионов сначала в H^0 , а затем в H^+ . В качестве инжектора H^- -ионов рассматривается сильноточный циклотрон на энергию 5 МэВ с интенсивностью выведенного пучка 10–30 мА.

Работа посвящена разработке, расчетам и выбору параметров тракта пучка, транспортирующего пучок H^- -ионов от выхода канала вывода циклотрона-инжектора до перезарядной фольги (H^0/H^+), установленной в центре фазотрона. Проведен выбор элементов тракта, среди которых группирователь пучка, магнит-селектор и фокусирующие квадрупольные магниты. Осуществлен расчет динамики сильноточного пучка в тракте при равномерном распределении заряда в сгустке. Проведена аналитическая оценка возможного роста эмиттанса пучка, проходящего тракт при неравномерном распределении плотности заряда.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Morozov N. A., Onischenko L. M.

P9-2003-14

Choice of Parameters for the Injection Line from the Cyclotron CI-5
into the JINR Phasotron

With the purpose of essential improvement of the quality of physics researches carried out at the JINR Phasotron at the Laboratory of Nuclear Problems, a proposal on the order of value increase of the extracted protons beam current is developed by use of the external injection and two-step H^- -ions charge converting: at the first step — into H^0 and then into H^+ . As an H^- -ions injector a high-current cyclotron with an energy of 5 MeV and an intensity of the extracted beam of 10–30 mA is examined.

The work is devoted to the development, calculations and choice of parameters of the beam line, transporting H^- -ions from the cyclotron extraction channel exit up to the charge-exchange foil (H^0/H^+), placed in the centre of the Phasotron. The choice of the parameters of transport line elements, including a beam buncher, a magnet-selector and focusing quadrupoles magnets, is made. Calculation of dynamics for the high-current beam in the line is carried out at uniform distribution of the charge in the bunch. An analytical estimation of the possible beam emittance growth is carried out at the beam line passage at non-uniform distribution of the bunch charge density.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 26.02.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 270 экз. Заказ № 53788.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/