

## КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОЕКТА NICA-MPD

*В.С. Александров, В.А. Михайлов, В.А. Мончинский, В.Ф. Шевцов*

*ОИЯИ, Дубна, Россия*

*E-mail: alexs@jinr.ru*

В рамках проекта NICA-MPD, разрабатываемого в ОИЯИ, проведены расчеты двух вариантов канала перевода пучка ионов золота от источника ESIS в начальную часть линейного ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). Приведены характеристики варианта канала, выбранного для проекта NICA, и результаты численного моделирования динамики пучка.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проекта NICA-MPD [1] является проведение в ближайшие 5-7 лет экспериментов по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной кварк-глюонной материи и поиск возможного образования так называемой «смешанной фазы» такой материи: смеси кварк-глюонной («кварк-глюонная плазма») и адронной (частицы адронной материи) фазовых состояний [2]. Далее планируется осуществление столкновений встречных пучков легких ионов и пучков поляризованных протонов и дейтронов.

Инжектор ускорительного комплекса NICA включает в себя:

- источник электронно-струнного типа (ESIS), который производит ионы  $Au^{32+}$  с интенсивностью на уровне  $2 \cdot 10^9$  частиц за импульс длительностью 6...8 мкс и частотой повторения до 50 Гц;

- линейный ускоритель с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (RFQ), предназначенный для ускорения ионов с отношением массы к заряду  $A/q \leq 8$  до энергии 6.2 МэВ/ нукл. и эффективностью не менее 80%.

Канал транспортировки ионов низкой энергии (Low Energy Beam Transfer, LEBT) переводит пучок из источника ESIS, расположенного на платформе под потенциалом 200 кВ, в начальную часть линейного ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). Источник заканчивается системой предварительного ускорения.

Рассматривались 2 варианта канала:

- вариант 1 с сепарацией компонент пучка, т.е. с выделением одной зарядности;
- вариант 2 без сепарации, т.е. переводом в RFQ всех зарядностей пучка.

Вариант 1 состоит из поворотного магнитоспектрометра и фокусирующей системы, включающей в себя две соленоидальные магнитные линзы, 4-5 квадрупольных линз.

В варианте 2 отсутствуют квадрупольные линзы и спектрометр, вместо которого устанавливается анализирующий магнит.

Для проекта NICA предполагается использовать вариант LEBT без разделения компонент пучка.

Расчет канала транспортировки проведен с помощью оригинального программного кода MSIB04 [3], который был использован для расчета и оптимизации

каналов транспортировки ЛЯР (ОИЯИ) [4], RIKEN (Япония) [5], CERN [6]. Первоначальный выбор структуры и параметров элементов канала осуществлялся с помощью программы MAD [7] в приближении «нулевого» тока пучка. При расчетах электро- и магнитостатических полей использовался POISSON-код [8].

### 2. СИСТЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ

Ускоряющий зазор (AG), схематично показанный на Рис.1, обеспечивает увеличение энергии ионов до 200...225 кэВ/ч. Электрическое поле в зазоре рассчитано с помощью программы POISSON. Распределения потенциала и компонент электрического поля показаны на Рис.2-4.

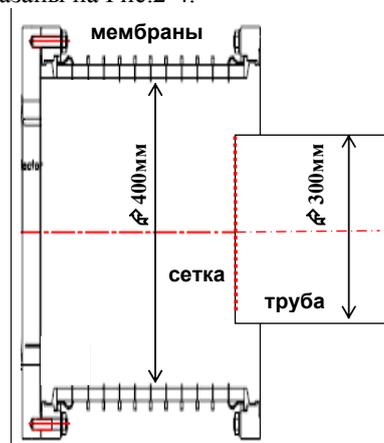


Рис.1. Система предварительного ускорения

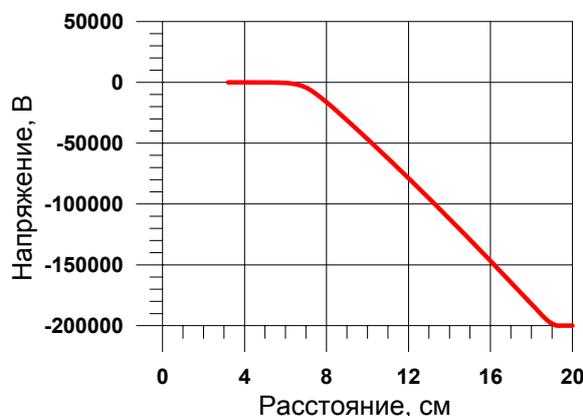


Рис.2. Распределение потенциала на оси

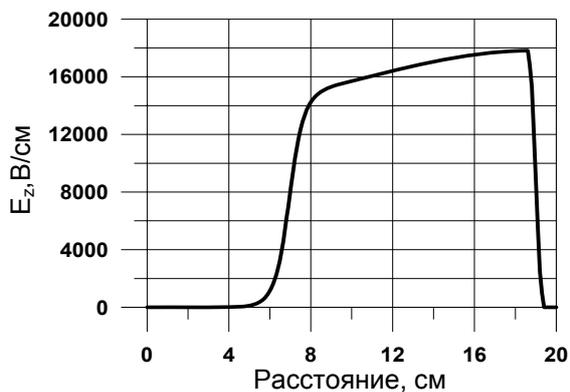


Рис.3. Распределение продольной компоненты  $E_z$  на оси

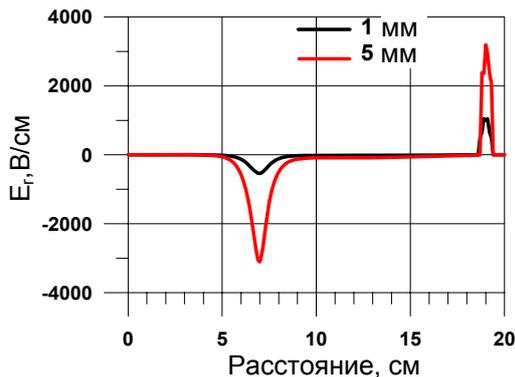


Рис.4. Распределение радиальной компоненты  $E_r$  для двух радиусов

### 3. НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ

Ускорение пучков в поле зазора моделировалось с помощью программы MCIB04, учитывающей эффекты собственного поля пучка ионов и его зарядовый спектр.

Параметры компоненты  $Au^{+32}$  пучка золота на выходе AG, использованные при расчете LEBT, приведены в Табл.1.

Таблица 1

Ток пучка, мА	0	1.2
$4 \text{ rms } \epsilon_{un}, \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	48	
$R_{beam}, \text{мм}$	2.2	3.4
$\beta, \text{мм/мрад (м/рад)}$	0.094	0.245
$\alpha$	0.12	0.41

### 4. ТРЕБОВАНИЯ К ПУЧКУ В КОНЦЕ КАНАЛА

Требуемые параметры пучка в конце канала определяются оптимальной ориентацией фазового эллипса на входе в RFQ. Основные параметры, характеризующие акцептанс RFQ согласно методике работы [9], приведены в Табл. 2.

Таблица 2

$6 \text{ rms } \epsilon_{un}, \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	$\leq 88$
$R_{beam}, \text{мм}$	2.8
$\beta, \text{мм/мрад (м/рад)}$	0.089
$\alpha$	0.61

### 5. СОСТАВ КАНАЛА

Фокусирующая система канала (Рис.5) из двух соленоидальных магнитных линз (S1, S2) служит для согласования эмиттанса пучка с акцептансом

RFQ. Предусматривается место для установки  $45^\circ$ -прямого анализирующего магнита AM, имеющего углы между полюсом и радиусом по  $11.5^\circ$ . Измерительный бокс DB1 расположен между S1 и анализирующим магнитом AM. Он включает в себя горизонтальную и вертикальную щели, цилиндр Фарадея и измеритель профиля пучка, что позволяет проводить измерения эмиттанса пучка. Измерительный бокс DB2 расположен после анализирующего магнита AM, и включает в себя измеритель профиля пучка, горизонтальную щель и цилиндр Фарадея, и предназначен для анализа компонент. Между магнитом AM и соленоидом S2 расположены 2 пары корректирующих магнитов (HV) (горизонтальные и вертикальный в каждой паре) для корректировки положения и угла пучка на входе в RFQ.

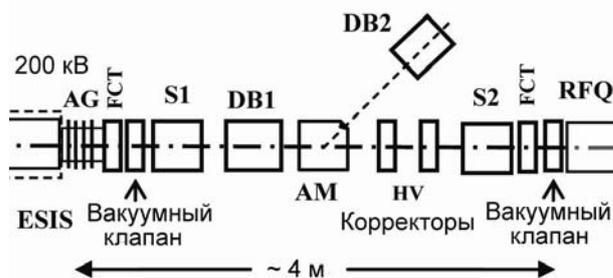


Рис.5. Схема LEBT

Величина тока на входе и выходе канала контролируется двумя трансформаторами тока FCT.

Рассмотрены 2 типа соленоидов: длиной обмотки 28 и 5 см (далее в тексте «соленоид» и «катушка»). Длины промежутков между элементами канала приведены в Табл.3. Параметры элементов указаны в разделе 7. Структурная функция для варианта с соленоидами (обратная задача) приведена на Рис.6. Результаты моделирования прямой задачи с ускорением в AG и транспортировкой до входа в RFQ (весь канал) с помощью MCIB04-кода для пучков с током 3 мА показаны на Рис.7-8.

Таблица 3

Длины промежутков

промежуток	с соленоидами	с катушками
	длина, м	длина, м
AG – S1	0.60	0.91
S1 – DB1	0.46	0.46
DB1 – HV	0.70	0.70
HV – HV	0.50	0.50
HV – S2	0.20	0.20
S2 – RFQ	0.40	0.62
Полная длина канала	4.26	4.56

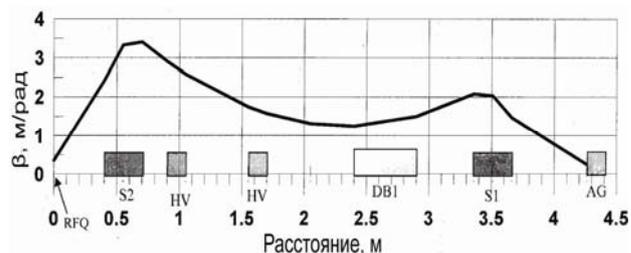


Рис.6. Канал и структурная функция для варианта с соленоидами (обратная задача)

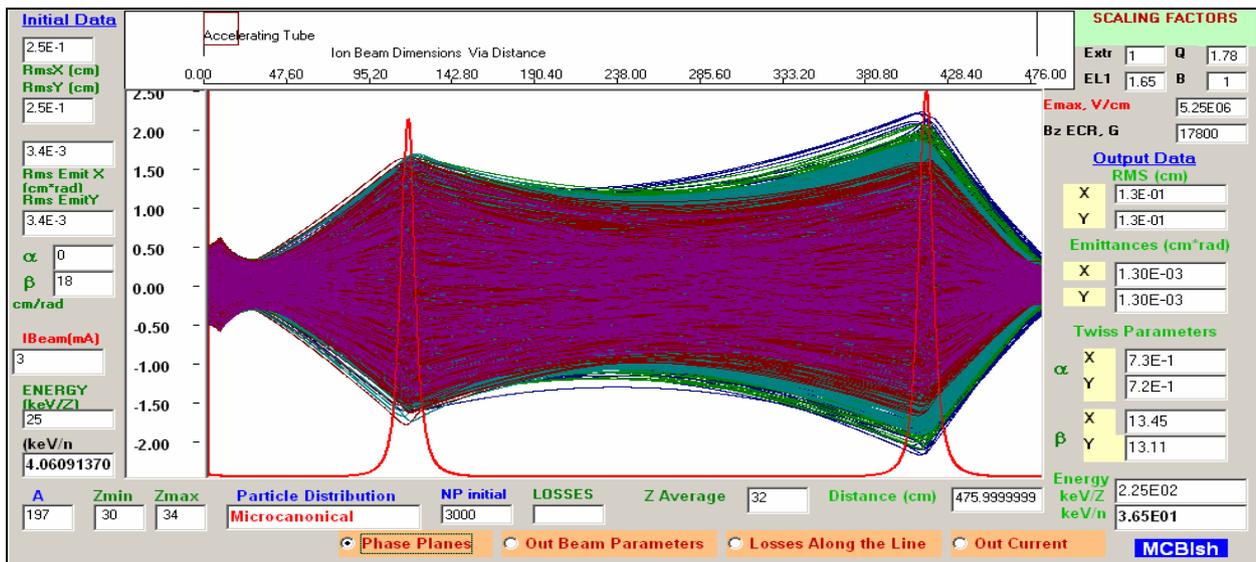


Рис.7. Траектории ионов «пучка  $Au^{+32}$ » при полном токе пучка 3 мА (вариант с катушками)

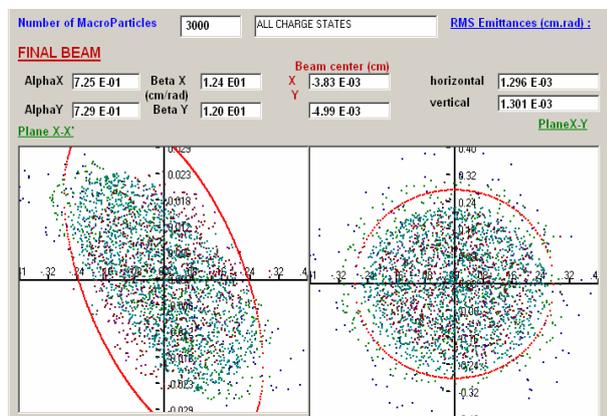


Рис.8. Фазовый эллипс и сечение пучка на входе в RFQ

В акцептансе RFQ – 99.9% ионов основной зарядности с эмиттансом  $4\text{rms } \epsilon_{un} = 48 \pi\text{-мм}\cdot\text{мрад}$ . Эмиттанс всего пучка  $4\text{rms } \epsilon_{un} = 52 \pi\text{-мм}\cdot\text{мрад}$ .

## 6. АНАЛИЗИРУЮЩИЙ МАГНИТ

Тестирование анализирующего магнита показало, что он способен разводить зарядности на  $\sim 15$  мм (Рис.9) на расстоянии 80 см, где обеспечивается фокусировка в обеих плоскостях. Горизонтальный полуразмер пучка (с учетом вклада от дисперсии) не превышает 5 мм.

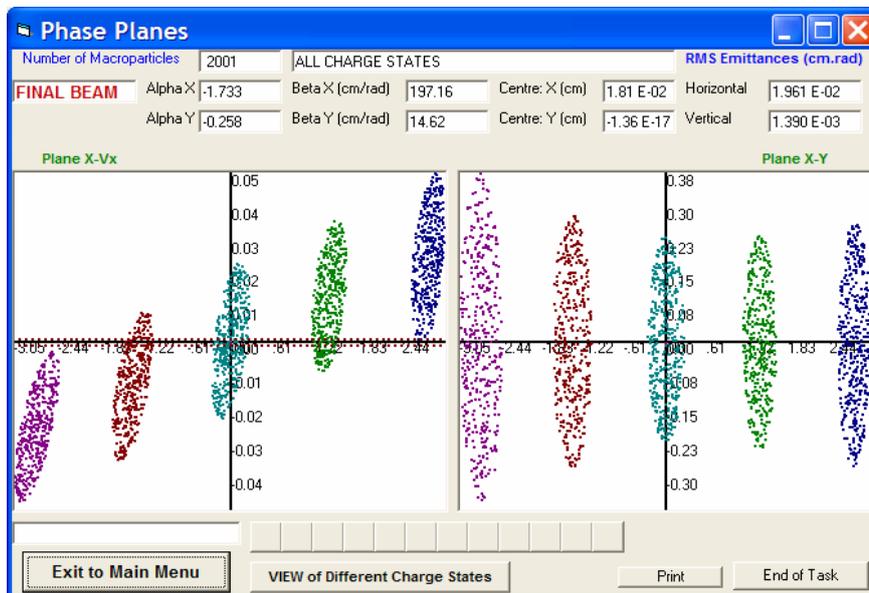


Рис.9. Компоненты пучка на фазовой (слева) и координатной плоскостях

## 7. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕВТ

### 7.1. АНАЛИЗИРУЮЩИЙ МАГНИТ АМ

Тип: прямоугольный, со скошенными по  $11.5^\circ$  полюсами;  
 Угол поворота, град ... .. 45  
 Радиус поворота, мм ... .. 400

Фокусирующий угол на входе и выходе, град ... 11.5  
 Зазор, мм ... .. 90  
 Ширина полюса по средней линии, мм ... .. 300  
 Радиальная однородность в области  $\pm 100\text{мм}$  ...  $2 \cdot 10^{-4}$   
 $B_{\text{max}}$ , Тл ... .. 0.425  
 Ампер-витки ... ..  $2 \times 15000$

## 7.2. СОЛЕНОИДЫ S1, S2

	Соленоид	Катушка
Тип	бронированный	
Полная длина, мм	300	76
Апертура, мм	110	
Макс. диаметр, мм	200	206
Сечение обмотки, мм×мм	35×280	35×50
Толщина экрана, мм	10	11
Макс. продольное поле, Тл	1.1	2.2
Ампер-витки, А-в	250000	238000
Макс.интеграл, [Jb <sup>2</sup> dz], Тл <sup>2</sup> м	0.27	0.38

## 7.3. КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МАГНИТЫ HV

Длина, мм	150
Апертура, мм	100
Макс. отклонение, мрад	3
Макс. смещение, мм	2
Макс. поле, Гаусс	350

## 7.4. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ БОКСЫ DB1 И DB2

	DB1	DB2
Длина, мм	500	300

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Концептуальный проект ускорительного комплекса Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA): P9-2008-153.* Дубна: ОИЯИ, 2008, с.51.
2. A.N. Sissakian, A.S. Sorin, and V.D. Toneev. QCD Matter: a search for mixed quark-hadron phase //

*Proc. of the 33rd International High Energy Physics conference (ICHEP'06), Moscow, Russia.* 2006, v.1, p.421, nuclth/0608032.

3. V. Aleksandrov, N. Kazarinov, V. Shevtsov. Multi-Component Ion Beam code - MCIB04 // *Proc. XIX Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2004), Dubna, Russia.* 2004, p.201.
4. V.S. Aleksandrov, G.G. Gulbekian, N.Yu. Kazarinov, V.F. Shevtsov, A.V. Tikhomirov. Numerical simulation of the <sup>48</sup>Ca<sup>5+</sup> ions transport along the U-400 cyclotron's injection line // *Proc. of the 16<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications.* East Lansing, Michigan, USA. 2001.
5. V. Alexandrov, N. Kazarinov, V. Mironov, V. Shevtsov, G. Shirkov, Y. Yano, and T. Nakagawa. *Optimization of Ion Beam Line from ECRIS to RFQ at RIKEN:* Preprint RIKEN-AF-AC-27, 2001.
6. V. Aleksandrov, Yu. Batygin, N. Mironova, V. Mironov, V. Shevtsov, G. Shirkov. Simulation of the Charge-State Mixed Ion Beam Transportation through the Low Energy Ion Beam Transport Line (LEBT, CERN) // *Proc. of the 4<sup>th</sup> Intern. Workshop "Beam Dynamics & Optimization"*. Dubna, 1997.
7. F.C. Iselin and J. Niederer. *The MAD Program:* Preprint CERN/LEP-TH/88-38, Geneva, Switzerland, 1988.
8. *POISSON Program:* Preprint LA-UR-87-115, Los Alamos Acc. Group, 1987.
9. А.П. Мальцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. *Расчётные параметры начальной части ускорителя с ВЧ-квадрупольной фокусировкой:* Препринт ИФВЭ 71-116, Серпухов, 1972.

*Статья поступила в редакцию 06.09.2009 г.*

## LOW ENERGY BEAM TRANSPORTATION LINE FOR NICA-MPD PROJECT

*V.S. Alexandrov, V.A. Mikhailov, V.A. Monchinsky, V.F. Shevtsov*

Within the frames of NICA-MPD project developed at JINR, calculations of two variants of the channel of transfer of a gold ion beam from ESIS source to an RFQ type initial part of the linear accelerator are carried out. Characteristics of a variant of the channel chosen for project NICA, and results of numerical simulation of beam dynamics are given.

## КАНАЛ ТРАНСПОРТУВАННЯ ІОНІВ НИЗЬКОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПРОЕКТА NICA-MPD

*В.С. Александров, В.А. Михайлов, В.А. Мончинський, В.Ф. Шевцов*

У рамках проекту NICA-MPD, розроблювального в ОІЯД, проведені розрахунки двох варіантів каналу переводу пучка іонів золота від джерела ESIS у початкову частину лінійного прискорювача із просторово-однорідним квадрупольним фокусуванням (RFQ). Наведено характеристики варіанта каналу, обраного для проекту NICA, і результати чисельного моделювання динаміки пучка.