

P9-2005-47

М. Лепорис

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА  
ОДНОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ЭЦР-ИСТОЧНИК

Лепорис М.	P9-2005-47
Расчет системы инжекции пучка однозарядных ионов в ЭЦР-источник	
<p>Проект DRIBs, реализуемый в настоящее время в ЛЯР ОИЯИ, посвящен исследованию свойств атомных ядер в реакциях с вторичными радиоактивными ионными пучками. Первая стадия проекта DRIBs предполагает прямое ускорение пучков однозарядных ионов (<math>{}^6\text{He}</math>, <math>{}^8\text{He}</math>, <math>{}^9\text{Li}</math>), получаемых методом ISOL, в циклотроне U-400. Вторая стадия основана на получении тяжелых радиоактивных ядер фотоделением урана. Главная цель этой стадии проекта — получение ускоренного в циклотроне U-400 пучка тяжелых радиоактивных ионов. После ионизации однозарядные ионы инжектируются в ионный источник ЭЦР-типа специальной конструкции (так называемый «charge breeder»), чтобы повысить их заряд до требуемой величины <math>n^+</math>, необходимой для инжекции в циклотрон и ускорения. В работе представлен расчет экспериментальной установки для осуществления ввода вторичных, в том числе и радиоактивных, пучков однозарядных ионов низких энергий (до 25 кэВ).</p>	
Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.	
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005	

Leporis M.	P9-2005-47
Calculation of the Injection System of the Single Charge Ions Beam in ECR Ion Source	
<p>The project DRIBs which is now being realized at the JINR FLNR is dedicated to the research of nuclear reactions with accelerated radioactive ion beams. The first stage of the project DRIBs assumes direct injection and acceleration of light single charged ions (<math>{}^6\text{He}</math>, <math>{}^8\text{He}</math>, <math>{}^9\text{Li}</math>), produced with the use of the ISOL method, at the U400 cyclotron. The second stage aims at the production of heavy radioactive nuclei by uranium target photofission. The main goal of this stage is production of the heavy radioactive elements beam accelerated at the U400 cyclotron. After the ionization, singly charged ions are injected to a special ion source of the ECR type (the so-called charge breeder) to increase their charge states up to the value required for injection into the cyclotron and acceleration. In this paper calculation of experimental installation for realization of injection secondary, including radioactive, singly charged low energy ions beams (up to 25 keV) is presented.</p>	
The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.	
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005	

## 1. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА DRIBs

В соответствии с планом развития ЛЯР ОИЯИ получение и исследование экзотических ядер является одним из главных научных направлений. Проект DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams) предполагает использование ускорителя первичного ионного или электронного пучка для генерации радиоактивных ядер, транспортируемых затем непосредственно в центральную область циклотрона, где происходит их дальнейшее ускорение. Эти функции могут быть выполнены двумя действующими ускорителями типа U-400 и компактным ускорителем электронов (микротрон MT-25). Концептуальная схема проекта показана на рис. 1.

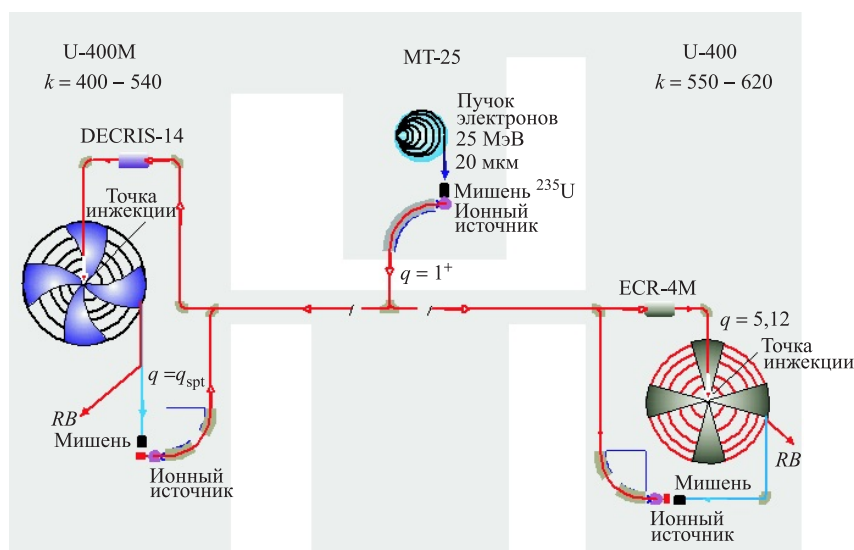


Рис. 1. Концептуальная схема проекта DRIBs

Использование вторичных пучков радиоактивных ядер значительно расширяет возможности исследования свойств атомных ядер и изучения ядерных реакций. Основные области применения вторичных пучков:

- 1) исследование свойств атомных ядер, расположенных вдали от острова стабильности;
- 2) изучение особенностей динамики ядерных реакций для вышеупомянутых ядер;
- 3) синтез и изучение свойств новых элементов и изотопов.

Первая стадия проекта (DRIBs I) предполагает ускорение легких однозарядных радиоактивных ионов в циклотроне U-400. Первичный пучок ионов, ускоренный циклотроном U-400M, образует в мишени легкие вторичные атомы ( ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$  и др.). В качестве ионизатора используется ионный источник ЭЦР-2.45 ГГц [1, 2], который предназначен для получения однозарядных ионов. После ионизации радиоактивных атомов пучок ионов транспортируется в циклотрон U-400 и затем, после ускорения, на экспериментальную установку. Для ускорения более тяжелых вторичных ядер необходимо использование дополнительного ионного источника (так называемого «charge breeder») для трансформации однозарядных ионов в ионы с требуемым для ускорения зарядом.

Вторая стадия проекта DRIBs предполагает получение пучков нейтроноизбыточных изотопов, возникающих в результате деления ядер урана или тория. Отличие этого варианта состоит в использовании компактного электронного ускорителя МТ-25. В данном случае гамма-кванты, образующиеся в результате торможения пучка электронов в мишени, вызывают фотоделение урана (или тория). Из нагретой урановой мишени осколки деления в результате термодиффузии переходят в горячую камеру источника однозарядных ионов. Извлекаемый пучок ионов  $1^+$  после масс-сепарации инжектируется в ионный источник «charge breeder», где пучок однозарядных ионов тормозится в плазменной камере и происходит ионизация из состояния  $1^+$  в ионы с требуемым для ускорения зарядом  $n^+$ . Полученные многозарядные ионы инжектируются в циклотрон U-400 и ускоренный пучок транспортируется на экспериментальную установку.

Реализация проекта DRIBs предполагает модернизацию ионных источников, циклотронов и создание новых каналов для транспортировки пучка. Для ионизации и получения пучков ионов осколков деления газообразных элементов (изотопы Kг и Хе), металлических элементов (изотопы Rb и Cs), а также элементов теллуровой группы необходимо использовать разные типы ионных источников. Например, ионизация газообразных элементов может эффективно осуществляться в ионном источнике ЭЦР-типа со сравнительно низкой микроволновой частотой (2,45 ГГц). Для ионизации щелочных элементов подходит источник с поверхностной ионизацией. Для получения ионов твердых веществ возможно использовать ионный источник дугового типа с нагреваемой камерой [3, 4].

Однако в любом случае при получении тяжелых ионов с относительно большой атомной массой требуется повышение их заряда для ускорения в циклотроне. Основным отличием источника «charge breeder» от традиционных ЭЦР-источников является то, что ввод рабочего вещества в него осуществляется в виде пучка однозарядных ионов, а не в виде нейтральных атомов или молекул. Присутствие достаточно сильных магнитных полей в области инжекции требует создания специальной системы ввода пучка ионов в рабочую

зону источника. Данная система должна обеспечивать эффективный «захват» инжектируемых ионов в область ионизации и максимально эффективное осуществление процесса  $1^+ \rightarrow n^+$ .

## 2. СИСТЕМА ВВОДА ВТОРИЧНЫХ ПУЧКОВ ОДНОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕННУЮ КАМЕРУ ИСТОЧНИКА

В данном разделе представлен расчет экспериментальной установки для осуществления ввода вторичных, в том числе и радиоактивных, пучков однозарядных ионов низких энергий (до 25 кэВ). Из возможных вариантов ввода, которые были обсуждены в работе [5], более подходящим как с точки зрения конструкции (реализации), так и эффективности является ввод со стороны инжекции (так называемый «forward injection») с электростатическим замедлением пучка. Общая блок-схема установки показана на рис. 2. Она состоит

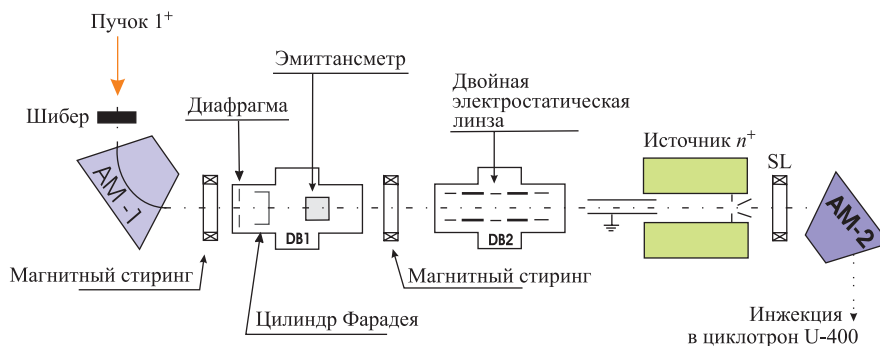


Рис. 2. Блок-схема ввода вторичных пучков однозарядных ионов в плазменную камеру ионного источника DECRIIS-4

из анализирующего магнита, диафрагмы, цилиндра Фарадея, эмиттансметра, магнитного стиринга, двойной электростатической линзы — так называемой «Einzel lens» и трубки, через которую вводится пучок в ионный источник. Некоторые основные элементы трассы будут рассмотрены более подробно.

**Математическое моделирование системы ввода.** Перед началом моделирования необходимо оценить пространство, свободное для размещения, исходя из реальных размеров установки, где планируется использовать систему ввода пучков однозарядных ионов в ионный источник «charge breeder». Общая длина трассы от центра магнита до центра аксиальной инжекции циклотрона У-400 составляет 4469 мм. Вычитая из этой длины так называемые

«заняты размеры», в которые входят фокусное расстояние поворотного магнита АМ-1, длина ионного источника и его расстояние от анализирующего магнита АМ-2, получаем 1449 мм для компоновки элементов трассы.

В точке фокуса поворотного магнита АМ-1, которая является стартовой точкой математического моделирования системы ввода пучка, установлен цилиндр Фарадея для измерения интенсивности ионного пучка. Практически прямо перед цилиндром находится регулируемая в диапазоне от 10 до 45 мм диафрагма, с помощью которой можно изменять размеры пучка, соответственно меняя его эмиттанс. В том же блоке диагностики (ДВ-1) после цилиндра Фарадея предполагается установить эмиттансметр или профилометр для измерения формы и качества пучка.

Перед и после блока диагностики (ДВ-1) находятся магнитные стиринги, с помощью которых можно корректировать возможные отклонения пучка ионов от оси. Каждый стиринг состоит из двух катушек, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, на которые подается постоянный ток. В результате возникает возможность корректировать положение пучка в обоих направлениях (горизонтальном или вертикальном).

Непосредственно перед ионным источником, как показано на рис. 2, располагается второй блок диагностики с установленной внутри электростатической линзой. Данный тип оптического элемента осуществляет фокусировку ионного пучка с помощью электрического поля цилиндрической симметрии. На практике используются два вида таких линз:

- Простая — одиночная линза — образована из трех электродов цилиндрической формы. Центральный электрод находится на высоком потенциале и два крайних на потенциале земли. Данный тип линзы довольно часто применяется для фокусировки пучка, извлекаемого из ионного источника. Типичное напряжение, применяемое на линзе, можно оценить по формуле  $U_{\text{линс}} \approx 2/3U_{\text{beam}}$ . Это значит, что для пучка с энергией 18 кэВ напряжение на линзе составляет обычно около 13 кВ.

- Двойная линза — состоит из пяти электродов: два на высоком потенциале (на рис. 2 показаны жирной линией) и трех заземленных (тонкие линии).

По отношению к одиночной линзе двойная линза позволяет в значительно большей степени менять фокусное расстояние, изменяя напряжения на электродах. Поэтому в данном случае двойная линза является более подходящей для обеспечения более эффективной инжекции пучка через входную трубку в ионный источник «charge breeder» и выбор двойной линзы является оправданным. Для расчетов было предложено несколько конфигураций линз. Их основные параметры представлены в табл. 1, где  $D_1$  — диаметр и  $L_1$  — длина первой высоковольтной пластины;  $D_2$  — диаметр и  $L_2$  — длина второй высоковольтной пластины;  $d$  — диаметр и  $l$  — длина заземленных пластин линзы. Расчетные модели четырех типов линз представлены на рис. 3.

Последним элементом линии ввода является заземленная трубка, входя-

Таблица 1. Основные параметры двойных линз

Конфигурация линз	$D_1$ , мм	$L_1$ , мм	$D_2$ , мм	$L_2$ , мм	$d$ , мм	$l$ , мм
Линза 1	100	60	100	60	70	60
Линза 1-70	100	70	100	70	70	60
Линза 2	80	60	80	60	80	60
Линза 3	70	60	70	60	100	60

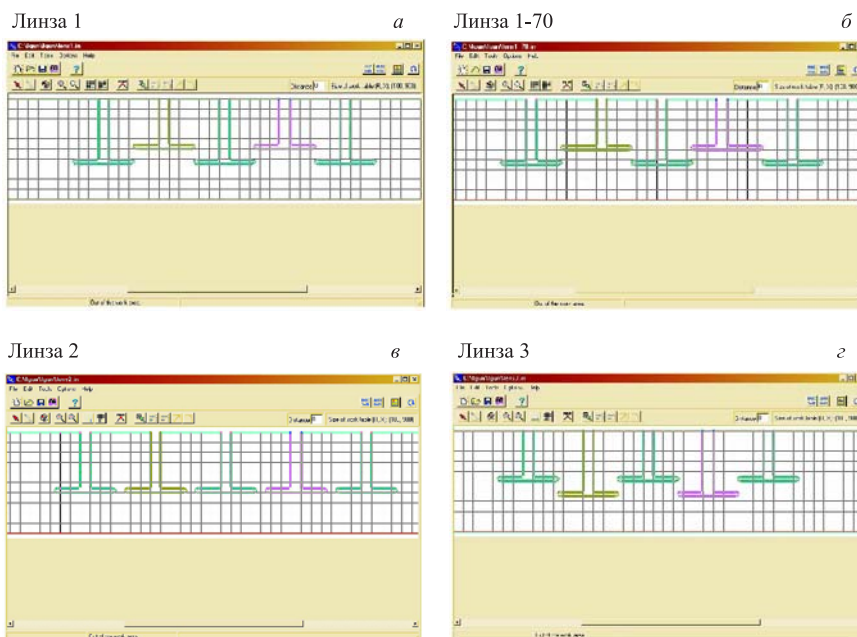


Рис. 3. Различные применяемые в расчете конфигурации электростатических линз

шая непосредственно в камеру ионного источника. Из-за наличия разности потенциалов между плазменной камерой источника и трубкой ионный пучок электростатически тормозится и попадает в плазму, где происходит его дальнейшая ионизация.

Основной задачей расчета было найти оптимальное расположение электростатической линзы так, чтобы обеспечить ввод пучка однозарядных ионов в плазму наиболее эффективно. Как уже упоминалось выше, началом расчета являлась точка фокуса поворотного магнита АМ-1, а конечной точкой — центр плазменной камеры ионного источника. Расчет проводился с использованием программных пакетов TRANSPORT [6] и IGUN [7, 8]. Поскольку вторая фаза проекта DRIBs предполагает использовать дважды магическое

ядро олова, все расчеты были проведены для пучка однозарядных ионов с массой частицы  $A = 132$  и энергией пучка, равной 16 кэВ. На старте использовались пучки с эмиттансом от 10 по 127  $\pi$ -мм-мрад. Параметры этих пучков представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Основные параметры инжектируемых пучков однозарядных ионов, используемых в расчетах**

Пучок	$R_{\max}$ , мм	$\phi_{\max}$ , мрад	Эмиттанс $\varepsilon$ , $\pi$ -мм-мрад	Коэффициенты			Матрица $r_{12} = r_{43}$
				$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	
1	6.13	4.816	10.22	-2.744	3.6786	2.3186	0.93957
2	1.47	21.425	13.12	2.197	0.1665	34.9938	-0.841
3	5.614	43.96	23.1	-10.648	1.3658	83.7452	0.9956
4	7.908	37.152	49.6	-5.832	1.2592	27.804	0.9856
5	4.41	34.09	75.45	1.728	0.2588	15.4021	-0.86551
6	3.284	65.524	89.1	-2.197	0.121	48.1673	0.91
7	9.179	58.613	127.6	-4.096	0.6603	26.9226	0.9715

В первом приближении с помощью программы TRANSPORT были найдены оптимальные положения для всех конфигураций линз как с точки зрения фокусировки пучка, так и конструкции трассы. После этого были рассчитаны и найдены требуемые напряженности электрического поля на электродах линз (конфигурации  $a$ ,  $b$ ,  $v$  и  $z$ ) для всех инжектируемых пучков (1–7). При этом обращалось внимание на то, чтобы обеспечить прохождение 100% пучка. В данной программе трубка была введена как функция FIT и условия расчета заданы так, чтобы габариты пучка были меньше указанной функции. Магнитное поле источника, которое присутствует в области инжекции и также влияет на огибающую пучка, вводилось в виде тонких соленоидов.

Во втором приближении трасса была рассчитана программой IGUN, поскольку она учитывает и пространственный заряд пучка. За основу брались напряженности электрического поля  $E_p$ , кВ/см, которые были найдены с помощью программы TRANSPORT. Поскольку в данной программе задается напряжение на линзе, оно было пересчитано по формуле  $E_p = 2 \cdot (U/a)$ , где  $U$  — напряжение на пластине, кВ, и  $a$  — радиус высоковольтной пластины. Расчет был разделен на две части: для линзы и трубки, причем программа позволяет автоматически загружать результат на выходе первой части как начальные параметры пучка на входе второго файла.

Результаты расчетов собраны в табл. 3, в которой представлены величины напряженности электрического поля и напряжения на пластинах линз. Совпадение расчетов обеих программ достаточно хорошее как с точки зрения требуемого напряжения для фокусировки пучка, так и по огибающей пучка. В качестве примера на рис. 4 показана форма входного пучка, рассчитанная программами TRANSPORT и IGUN, которая, как упоминалось выше, разделена

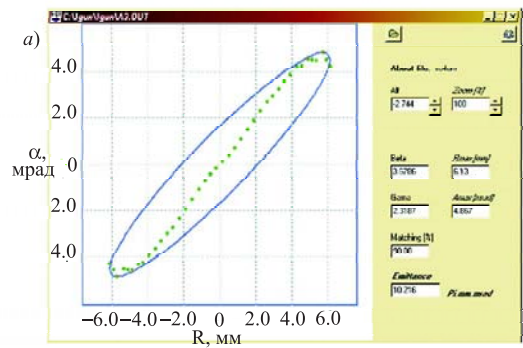


Таблица 3. Таблица полученных в расчетах результатов для отдельных конфигураций линз

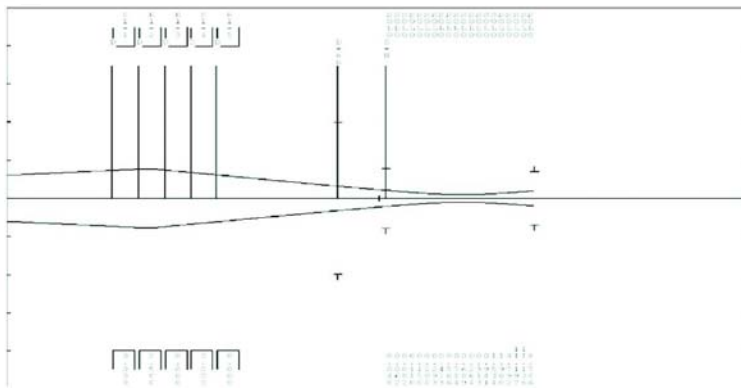
Линза 1							
Пучок	TRANSPORT				IGUN		$\eta$ %
	$E_p$ , кВ/см		$U_T$ , кВ		$U_I$ , кВ		
1	3	0	7,5	0	8,5	0	100
2	5,5	0	13,75	0	14,5	0	100
3	5	0,5	12,5	1,25	13,75	1,4	100
4	5	0	12,5	0	13,5	0	100
5	5	3	12,5	7,5	13,75	8,25	100
6	6,2	0	15,45	0	13	10	90
7	5,4	0	13,5	0	13,5	0	85
Линза 1-70							
Пучок	TRANSPORT				IGUN		$\eta$ %
	$E_p$ , кВ/см		$U_T$ , кВ		$U_I$ , кВ		
1	3	0	7,5	0	8,0	0	100
2	5	0	12,5	0	12	0	100
3	4,8	0	12	0	12	0	100
4	4,5	0	11,5	0	12,6	0	100
5	3	4	7,5	10	8,25	11	100
6	5,1	0,5	12,8	1,5	13	1,5	90
7	4,3	0,5	10,75	1,25	11,8	1,5	85
Линза 2							
Пучок	TRANSPORT				IGUN		$\eta$ %
	$E_p$ , кВ/см		$U_T$ , кВ		$U_I$ , кВ		
1	2,5	0	5,0	0	5,5	0	100
2	5	0	10	0	11	0	100
3	4,5	0	9	0	10	0	100
4	4	0	8	0	9	0	100
5	1,5	4	3	8	3,5	9	100
6	4,6	0,5	9,5	1	10	1	90
7	3,93	0,5	8	1	10	0	85
Линза 3							
Пучок	TRANSPORT				IGUN		$\eta$ %
	$E_p$ , кВ/см		$U_T$ , кВ		$U_I$ , кВ		
1	2	0	3,5	0	3,5	0	100
2	4	0	7	0	7,7	0	100
3	4	0	7	0	10	0	100
4	3,66	0	6,5	0	9	0	100
5	1	4	1,75	7	0	9	100
6	4,33	0	7,6	0	10	0	90
7	3,8	0	6,7	0	10	0	85

на две части — для линзы и трубки. Отличие между программами составляет примерно 10% и это объясняется тем, что программа IGUN учитывает в расчете пространственный заряд.

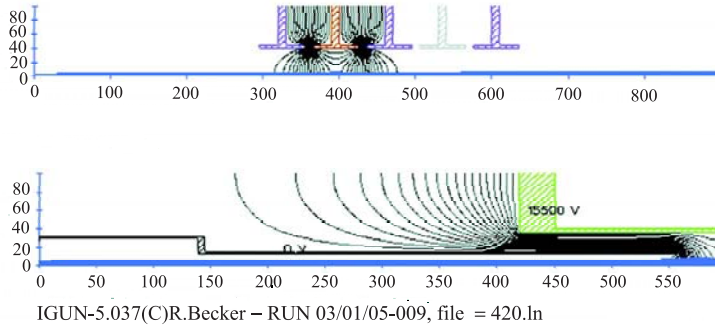
Из предложенных конфигураций электростатических линз, с нашей точки зрения, наиболее подходящими являются вторая или третья конфигурации



б)



в)



IGUN-5.037(C)R.Becker – RUN 03/01/05-009, file = 420.ln

Рис. 4. Пример расчетных результатов: а) форма пучка в стартовой точке, б) TRANSPORT; в) IGUN

(рис.3 б, в). В первом варианте а недостатком является довольно высокое напряжение на пластинах линзы для обеспечения фокусировки пучка. В последнем варианте г напряжения не так велики. Но в данном случае довольно высока напряженность электрического поля между высоковольтной и заземленной пластинами, которая в отдельных случаях достигает величины 30 кВ/см.

Таким образом, можно заключить, что предложенная система оказывается достаточно гибкой и эффективной для ввода пучка однозарядных ионов в плазменную камеру ионного источника «charge breeder». Она обеспечивает ввод в источник без потерь пучка с эмиттансом до  $80 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  и 90%-е прохождение пучка с эмиттансом до  $130 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . При этом аксептанс трубки составляет  $550 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .

## ВЫВОДЫ

После проведенных расчетов и предложений по реализации конструкции ввода можно сделать следующие выводы:

- Результаты расчетов показали принципиальную возможность реализации системы ввода пучка однозарядных ионов, найдено оптимальное расположение элементов трассы для обеспечения ввода с максимальной эффективностью.
- Из предложенных конфигураций двойных электростатических линз более подходящими являются варианты б и в. Для окончательного выбора предлагается провести дополнительную компьютерную симуляцию программой, учитывающей пространственный заряд пучка и с количеством частиц в пучке, близким реальным условиям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Oganessian Yu. Ts.* // Proc of the Int. Conf. «Nuclear shells — 50 years», Dubna, 1999. World Scientific, 2000. P. 61.
2. *Efremov A. et al.* // Cyclotrons and Their Application 2001, Michigan, USA, 2001. P. 268.
3. *Kirchner R.* // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. P. 928.
4. *Kirchner R.* // NIM. 1975. V. 131. P. 371.
5. *Ленорис М. и др.* Основные принципы метода  $1^+ \rightarrow n^+$  (для дальнейшего применения в проекте DRIBs). Препринт ОИЯИ Р9-2003-57. Дубна, 2003.

6. PSI Graphic Transport Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version by K.L. Brown et al. 2001.
7. *Becker R., Herrmannsfeldt W. B.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63 (4). P. 2756.
8. *Becker R.* // EPAC'98 — <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e98/PAPERS/THP44G.PDF>, Stockholm, 1998. P. 1165.

Получено 13 апреля 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 25.04.2005.

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

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,76. Тираж 270 экз. Заказ № 54873.

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

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)