

P9-2011-21

О. В. Карамышев

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ПУЧКА  
ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ЦИКЛИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ

Карамышев О. В.

P9-2011-21

Программа для расчета динамики пучка  
при инжекции в циклические ускорители

Разработка и проектирование линий инжекции в циклические ускорители требуют проведения большого количества численных расчетов. Необходимо проводить расчеты электромагнитных полей элементов системы инжекции и далее, используя полученные карты полей, считать динамику движения частиц. В работе описана программа DYN, созданная в Matlab, использующая результаты расчетов электромагнитного поля в Comsol, CST Studio или ANSYS. Программа интегрирует уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле. Возможности программы показаны на примере расчета спирального электростатического инфлектора, используемого при аксиальной инжекции пучка в центр циклотрона, а также линии инжекции пучка антипротонов в электростатическое кольцо AD-REC.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2011

Karamyshev O. V.

P9-2011-21

A Code for Simulation of Beam Dynamics  
at Injection into Circular Accelerators

It is important to perform a great number of numeric simulations for designing injection systems of circular accelerators. Initially, we calculate electromagnetic fields of the elements of injection lines and then simulate beam dynamics in these fields. This paper presents the DYN code, created in Matlab, which can use results from electromagnetic field simulations performed by Comsol, CST Studio or ANSYS. The code integrates differential equations of motion of the charged particles in the electromagnetic field. Simulations of the spiral electrostatic inflector, dedicated for axial injection of the beam into the cyclotron center, and the beam line for antiproton injection into the AD-REC electrostatic ring are presented as examples.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2011

Программа расчета движения частиц DYN была написана в 2003 г. и с тех пор широко использовалась в расчетах динамики пучка, например в компактном циклотроне, предназначенном для обнаружения взрывчатых веществ [1], в системе вывода пучка из электростатического кольца USR [2], в центре сверхпроводящего циклотрона С400 [3] и в системе инжекции в электростатическое кольцо антипротонов AD-REC [4]. Уравнения движения в декартовой системе координат необходимо использовать для расчетов линий транспортировки и моделирования работы элементов линий транспортировки пучка, таких как квадруполь, соленоиды, банчер, сканирующий

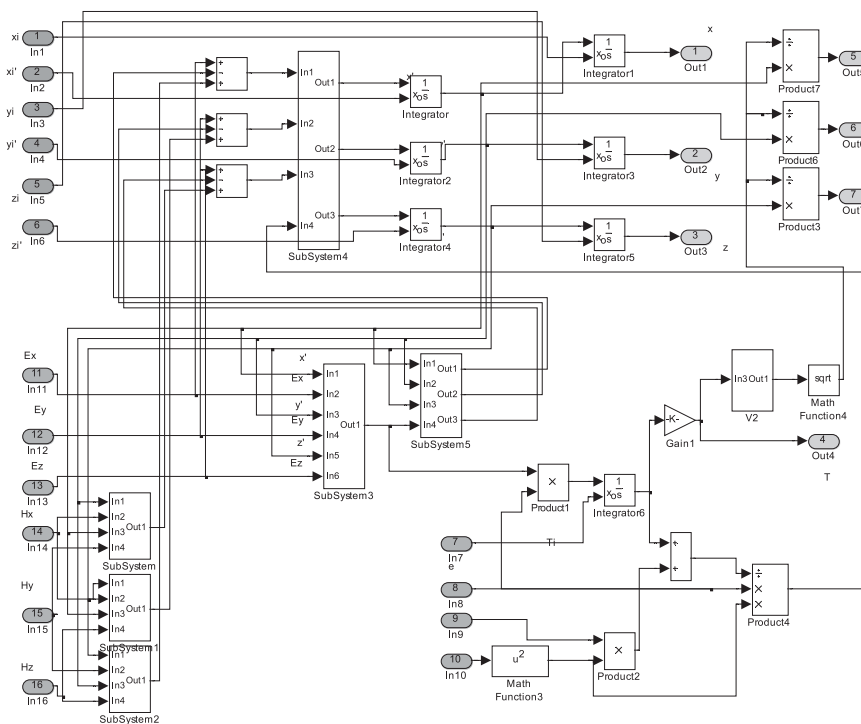


Рис. 1. Вид блока дифференциальных уравнений движения

магнит. Декартова система координат должна быть заложена также в программе расчетов инфлектора и центра циклотрона. При расчетах динамики низкоэнергетического пучка очень важно использовать результаты численных расчетов электромагнитных полей, так как эффекты краевых полей вносят существенный вклад в движение заряженных частиц. Программа DYN написана в пакете Matlab и состоит из ряда блоков (подпрограмм), предназначенных для решения различных задач проектирования систем ускорителя. Вид блока дифференциальных уравнений движения представлен на рис. 1. В виде подсистем оформлены блоки задания начальных параметров, таких как координаты и скорости частиц, их энергия, фаза. Следует заметить, что Matlab предоставляет возможность легко менять начальное распределение частиц с помощью различных распределений, например наиболее часто применяются нормальное и равномерное распределение. Отдельными подсистемами оформлены также программы, рассчитывающие потери ионов на перезарядку на остаточном газе, имеется блок статистической обработки полученных результатов, осуществляющий расчет эмиттансов пучка, частот бетатронных колебаний.

## **СПИРАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ИНФЛЕКТОР ДЛЯ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА В ЦЕНТР ЦИКЛОТРОНА**

Расчеты центра циклотрона особенно важны при разработке ускорителя с внешней инжекцией пучка. Основу подобных расчетов составляет моделирование инфлектора и геометрии центральной области, включающей геометрию носиков дуантов, корпуса инфлектора и диафрагм фазовой селекции.

В течение последних пяти лет в рамках сотрудничества ИВА–ОИЯИ группой сотрудников ОИЯИ был разработан проект компактного сверхпроводящего изохронного циклотрона С400 [3] для адронной терапии, который будет установлен в медицинском центре в Канне (Франция). С помощью этого ускорителя предполагается получать пучки  $^{12}\text{C}^{6+}$  и  $^4\text{He}^{2+}$  с энергией 400 МэВ/нуклон, а также протоны с энергией 260 МэВ.

Пучок вводится в циклотрон аксиально по линии инжекции. Расчеты показали, что при инжекции в С400 (среднее магнитное поле в центре 2,45 Тл) можно использовать спиральный инфлектор [5], у которого зазор между электродами горизонтален на вертикальном сечении (без дополнительного поворота, см. рис. 2). Такой инфлектор относительно прост в изготовлении, так как ширина зазора между электродами инфлектора везде одинакова.

Максимальная величина напряженности электрического поля между пластинами инфлектора составляет  $E_0 \sim 24$  кВ/см (ограничена напряженностью пробоя). Высота инфлектора, как правило, ограничена зазором в центре ускорителя, но в нашем случае большое магнитное поле в центре задает радиус первого оборота около 2 см, таким образом, ограничивая размеры,

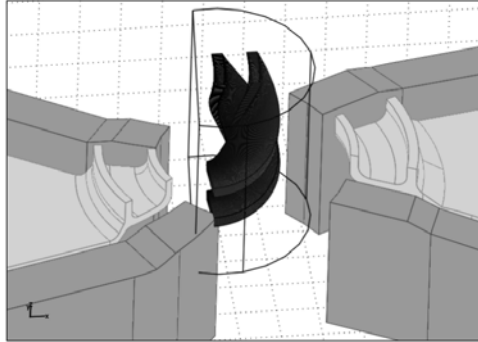


Рис. 2. Модель центра циклотрона С400 с инфлектором в заземленном корпусе

следовательно, и высоту инфлектора. Зазор между потенциальными пластинами равен 6 мм, для обеспечения прохождения пучка с эмиттансом около  $50 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . Ширина электродов выбирается равной двум зазорам между потенциальными пластинами (для уменьшения эффектов краевых полей).

Процесс создания компьютерной модели инфлектора начинается с аналитического расчета траектории центральной частицы для заданных величин электрического и магнитного полей. Следующий этап моделирования инфлектора — расчет поверхности электродов вокруг аналитической траектории центральной частицы и трехмерный расчет поля инфлектора. После расчета электрического поля полученного инфлектора, вновь, теперь уже численно, интегрированием уравнений движения рассчитывается траектория центральной частицы. Краевые поля на входе и выходе из инфлектора существенно изменяют траекторию иона. Далее производится еще одна итерация расчета поверхностей электродов уже вокруг новой траектории центральной частицы.

На рис. 2 показана используемая в расчетах модель центра циклотрона, на рис. 3 — рассчитанные в модели траектории ионов углерода с энергией 30 кэВ начиная от входа в корпус инфлектора и далее по центру циклотрона. Соответствующая энергия ионов представлена на рис. 4.

В настоящее время в мире наблюдается растущий интерес к созданию сверхпроводящих синхроциклотронов с высоким средним полем. Например, разрабатывается проект ускорителя со средним полем 4,5 Тл для лечения онкологических заболеваний ионами углерода [6]. Вопрос инжекции в центр такого ускорителя остается открытым. Авторами [6] предлагается использовать для инжекции спиральный инфлектор с большим параметром  $\text{tilt} = 3-5$ , однако конкретных расчетов, доказывающих реалистичность подобного инфлектора, не приводится.

Мы провели расчеты подобного инфлектора. На рис. 5 показана компьютерная модель инфлектора, способного инжектировать пучок в синхроцикло-

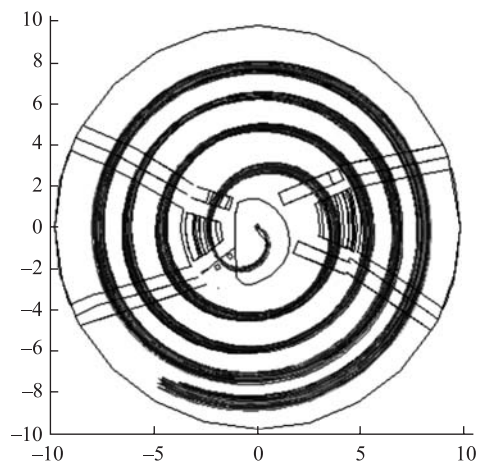


Рис. 3. Траектории пучка в центре

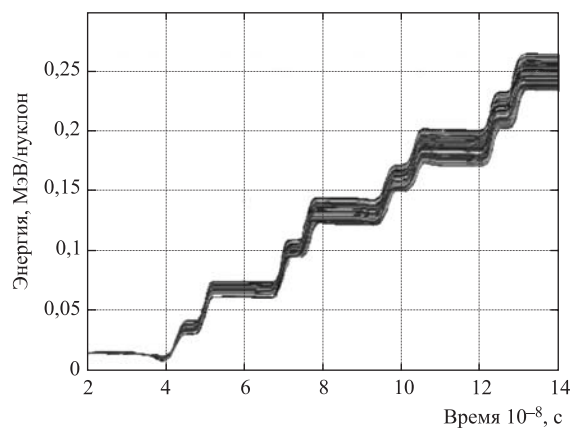


Рис. 4. Энергия частиц в течение первых двух оборотов

трон с величиной среднего поля в центре 4,5 Тл. Параметры инфлектора: напряженность поля 12 кВ, высота, или электрический радиус, 41,6 мм, tilt-параметр 3, расстояние между электродами 6 мм. Энергия инжектируемого пучка ионов углерода с  $A/Z = 2$  равна 25 кэВ/Z.

Необходимость столь сложной конструкции инфлектора (рис. 5) связана с очень маленьким радиусом ( $< 8$  мм), на который нужно инжектировать пучок. Расчет траекторий пучка в таком инфлекторе показал, что аксиальная

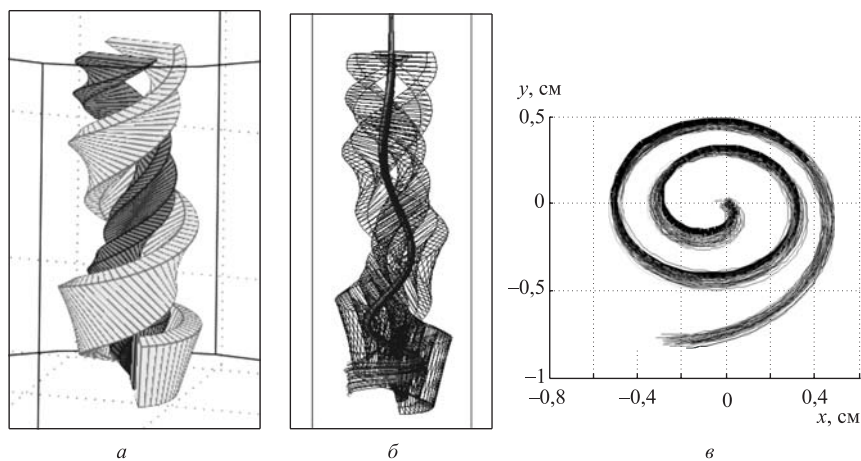


Рис. 5. Компьютерная модель инфлятора в заземленном корпусе (а); траектории пучка в инфляторе (б); траектории пучка в инфляторе (вид сверху) (в)

инжекция в синхроциклотрон с магнитным полем 4,5 Тл реальна, однако, учитывая маленькие размеры центра, его конструкция также будет непростой задачей.

### ЛИНИЯ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ КОЛЬЦО AD-REC

Программа DYN использовалась при расчете линии инжекции низкоэнергетических антипротонов в электростатическое кольцо AD-REC.

Создание в ЦЕРН кольца, замедляющего антипротоны AD (Antiproton Decelerator) [7], открыло широкие возможности для изучения свойств как самих антипротонов, так и их взаимодействия с веществом и антивеществом при низких энергиях. Накопительное кольцо AD-REC (RECYCLER), которое будет установлено на линии ловушки антипротонов MRT MUSASHI [8] в CERN-AD, позволит перейти к изучению антипротонов при ультранизких энергиях.

Накопительное кольцо AD-REC предназначено для проведения экспериментов с антипротонами, имеющими энергию от 3 до 30 кэВ. Кольцо будет состоять из электростатических элементов, для измерений сечений взаимодействия антипротонов с газовыми мишенями в нем будет установлен так называемый микроскоп реакций RM (Reaction Microscope). Необходимость применения исключительно электростатических элементов связана прежде

всего с отсутствием в них остаточного намагничивания, в отличие от магнитных элементов.

В линии инжекции также будут полностью отсутствовать магнитные элементы. Основные требования к линии инжекции:

1) провести пучок антипротонов от MRT MUSASHI к кольцу AD-REC с минимально возможными потерями, так как количество антипротонов, выводимое из ловушки, составляет всего  $5 \cdot 10^5$ ;

2) начальная энергия пучка должна быть в диапазоне 150–500 эВ;

3) энергия инжекции в кольцо AD-REC должна быть варьирема от 3 до 30 кэВ;

4) необходимо инжектировать пучок согласованно со структурой кольца, причем пучок должен быть сфокусирован на мишени с минимально возможным размером, т. е. эмиттанс инжектируемого пучка должен быть не более  $15\text{--}30 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , а разброс по энергии 1–3 % для диапазона энергий инжекции 3–30 кэВ соответственно.

Для сохранения качества пучка из ловушки MUSASHI при транспортировке к кольцу AD-REC необходимо прежде всего ускорить пучок до планируемой в кольце энергии, далее сформировать пучок так, чтобы можно было инжектировать его согласованно со структурой кольца. Поэтому нашу линию можно условно разделить на две секции — ускоряющую и согласующую.

Так как количество антипротонов из ловушки MUSASHI очень ограничено, наладку кольца AD-REC необходимо будет осуществлять на пучке  $\text{H}^-$ -ионов, поэтому мы предусмотрели возможность установки в линии инжекции секции ионного источника. Секция источника будет включать в себя дуоплазмотрон (источник  $\text{H}$ -ионов), линзу Энзеля, два стирера, цилиндр Фарадея и систему откачки.

**Ускоряющая секция.** Схематически ускоряющая секция показана на рис. 6. После выхода из ловушки MUSASHI антипротоны проходят через

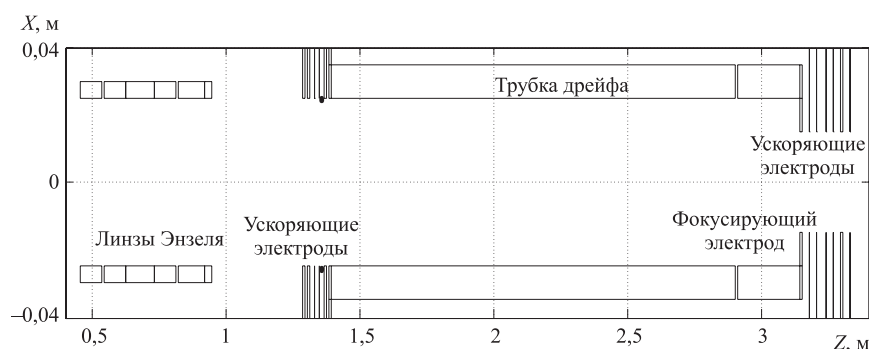


Рис. 6. Модель ускоряющей секции



линзы Энзеля вытягивающего электрода, находящиеся в зоне спада магнитного поля сверхпроводящего соленоида. Электростатическое кольцо будет работать с пучком антипротонов, полученным из MUSASHI посредством быстрого вывода. До настоящего времени быстрый вывод осуществляли при энергии 150 эВ. Однако ускоряющая секция должна обеспечивать возможность ускорения пучка с начальной энергией в диапазоне 150–500 эВ, так как в целях улучшения качества пучка возможны изменения условий проведения быстрого вывода. Конечная энергия должна быть варьируема в диапазоне от 3 до 30 кэВ.

Ускоряющая секция заменит работающую в настоящее время линию KEN [9], так как обеспечит лучшее качество пучка на входе в AD-REC. Ускоряющая секция будет состоять из двух частей, разделенных трубкой дрейфа.

Первая часть, состоящая из 5 электродов, будет ускорять пучок антипротонов от энергии 150–500 эВ до 400–1300 эВ, обеспечивая при этом фокусировку, которая позволит пучку дрейфовать внутри трубки. Когда пучок будет находиться внутри трубки дрейфа, напряжение на ней переключится на отрицательное, таким образом, при вылете из нее пучок продолжит ускорение до проектных 3–30 кэВ. 6 электродов во второй части ускоряющей секции выполняют также две функции: ускорят и сфокусируют пучок.

Банч длительностью 2 мкс при энергии 400 эВ пролетит трубу длиной 1,5 м за 5 мкс, т. е. для этой энергии длина трубки избыточна; мы спроектировали трубку такой длины, так как длительность пучка в настоящее время не определена жестко и будет зависеть от условий эксплуатации ловушки MUSASHI. Возможно, специалистам MUSASHI удастся снизить энергетический разброс пучка ценой увеличения длительности импульса; в таком случае то, что линия инъекции может работать с пучком длительностью до 5 мкс, окажется полезным.

При необходимости изменить начальную энергию пучка нужно будет менять напряжение на ускоряющих электродах как первой, так и второй части ускоряющей секции. Если нужно поменять только конечное значение энергии пучка, достаточно изменить напряжение на электродах второй части ускоряющей секции.

**Согласующая секция.** Согласующая секция будет состоять из четырех электростатических квадруполей. В компьютерной модели секции эквипотенциальные поверхности электродов имеют гиперболическую форму. Вид модели представлен на рис. 7, распределение электрического потенциала — на рис. 8.

**Расчеты динамики пучка.** Расчеты движения пучка по линии инъекции начинали из ловушки MUSASHI, там, где магнитное поле сверхпроводящего соленоида имеет максимальное значение — 2,5 Тл ( $z = 0,4$  м), т. е. до начала

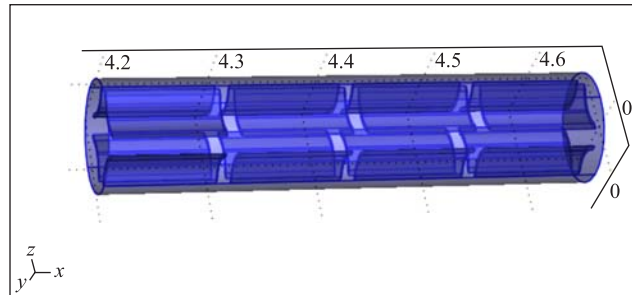


Рис. 7. Компьютерная модель согласующей секции

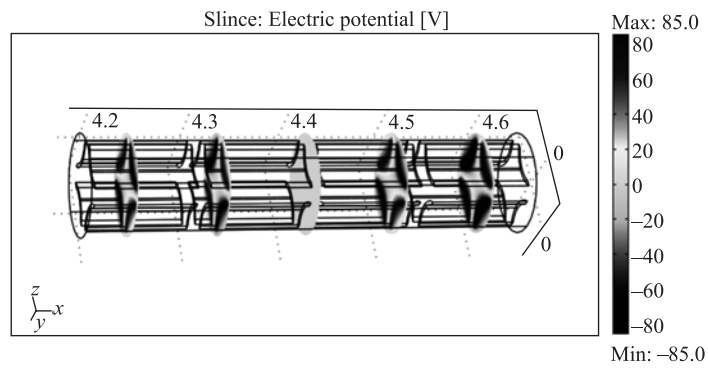


Рис. 8. Распределение электрического потенциала квадрупольного квадруплета

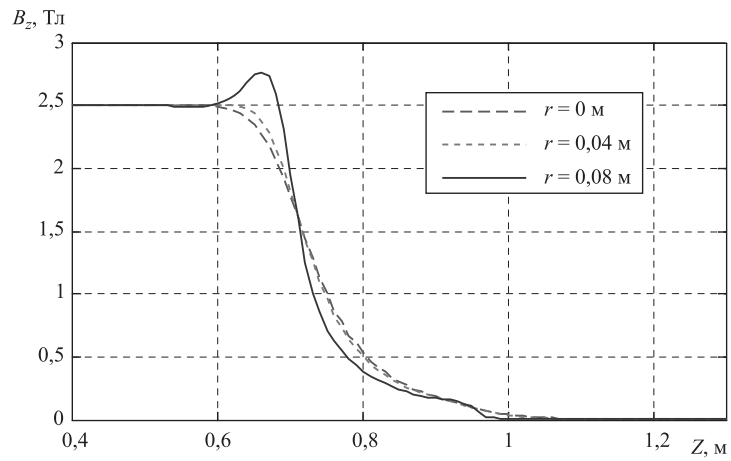


Рис. 9. Продольная компонента магнитного поля соленоида ловушки MUSASHI

спада поля. Далее пучок проходил область спада магнитного поля (см. рис. 9) и только после этого попадал в зону действия ускоряющей секции линии транспортировки.

Так как движение частиц происходит в области действия магнитного поля ловушки MUSASHI, необходимо осуществлять трехмерные расчеты динамики пучка. В то же время осевая симметрия ускоряющей секции позволяет использовать результаты 2D-моделирования электростатического поля. Таким образом, с целью экономии компьютерного времени и для увеличения точности расчета мы решали трехмерные уравнения движения, при этом использовали результаты двумерного моделирования ускоряющей секции и трехмерного моделирования согласующей секции.

Начальные параметры пучка выбирали, исходя из информации работы [10]. Авторы [10], основываясь на экспериментальных данных, пришли к выводу, что сжатый пучок внутри ловушки точнее всего описывается двумя распределениями Гаусса. Радиусы пучка 45 % антипротонов распределены по Гауссу с  $\sigma = 0,25$  мм, остальные 55 % антипротонов распределены с  $\sigma = 4,0$  мм (см. рис. 10).

Для наших расчетов мы задали начальное распределение пучка аналогичным образом, при этом использовали только ядро пучка, ограниченное окружностью радиусом  $R = 0,25$  мм (см. рис. 11), так как частицы, составляющие гало пучка (исходя из опыта авторов [10]), все равно будут потеряны.

Результаты моделирования динамики пучка в процессе движения по линии инжекции представлены на рис. 12. Энергия пучка в первой части уско-

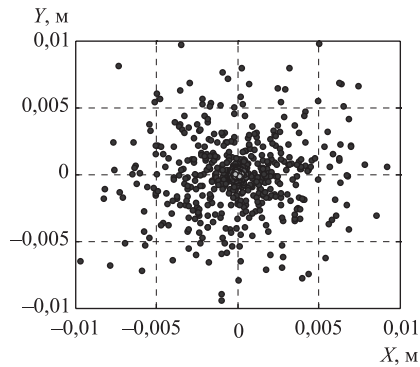


Рис. 10. Распределение пучка в ловушке

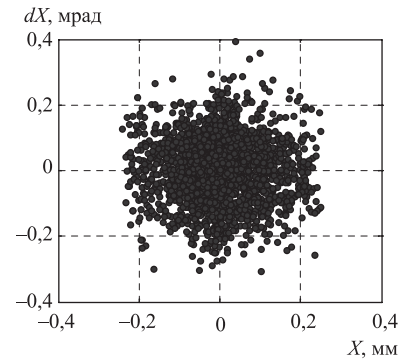


Рис. 11. Начальное распределение пучка на фазовой плоскости (частицы внутри окружности радиусом 0,25 мм)

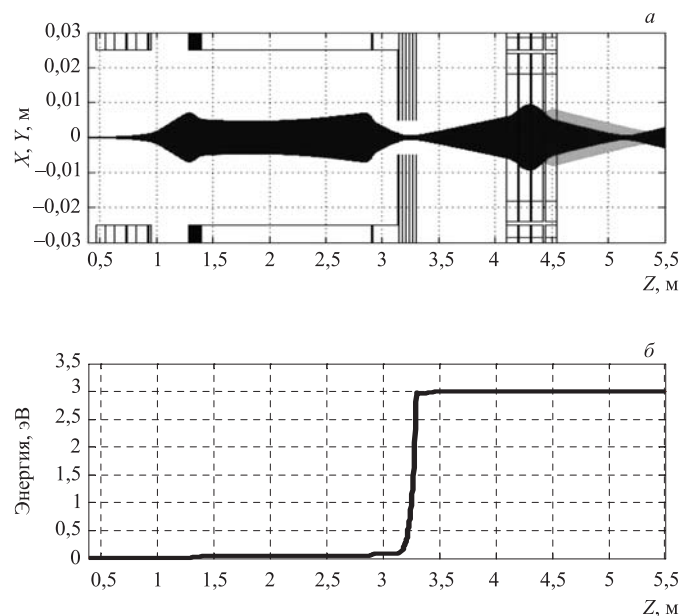


Рис. 12. Результаты моделирования динамики пучка: *а)* траектории частиц от выхода из ловушки до инъекции в кольцо (темным и светлым показаны проекции на взаимно перпендикулярные оси); *б)* энергия частиц в процессе движения по линии инъекции

ряющей секции была увеличена до 400 эВ, во второй части — до 30 кэВ. Квадруполь позволяют инжектировать пучок согласованно со структурой кольца AD-REC, которое будет работать в различных режимах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа DYN позволяет моделировать динамику пучка при проектировании центра циклотрона и линии инъекции. В рамках международного сотрудничества с MPI (Гейдельберг, Германия) по результатам расчетов динамики пучка антипротонов из MUSASHI осуществлен концептуальный проект линии инъекции пучка антипротонов с начальной энергией 150–500 эВ, ускоряющей пучок до 3–30 кэВ и проводящей пучок низкой интенсивности в кольцо AD-REC.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Onischenko L. M. et al.* Development of the Compact Cyclotron for Explosives Detection // Proc. of RUPAC, 2004. P. 138–140.
2. *Karamysheva G. A. et al.* Study of Slow and Fast Extraction for the Ultralow Energy Storage Ring USR // Part. Nucl., Lett. 2010. V. 8, No. 1(164). P. 85–99.
3. *Jongen Y. et al.* Compact Superconducting Cyclotron C400 for Hadron Therapy // NIM A. 2010. V. 624, Iss. 1. P. 47–53.
4. *Siggel-King M. R. F. et al.* Electrostatic Low-Energy Antiproton Recycling Ring // TCP2010 Conf. Proc., 2010.
5. *Jongen Y., Abs M., Kleeven W., Zarembo S., Karamysheva G., Karamyshev O., Morozov N., Samsonov E.* Central Region Design of the Cyclotron C400 for Hadron Therapy // RUPAC, 2010.
6. *Garonna A.* Synchrocyclotron Preliminary Design for a Dual Hadron Therapy Center // Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010. P. 552–554.
7. *Baird S. et al.* The Antiproton Decelerator: AD // Proc. Part. Conf., 1997.
8. *Kuroda N. et al.* Development of MUSASHI, a Mono-Energetic Ultra-Slow Antiproton Beam Source // Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010. P. 4188–4190.
9. *Franzen Y. K. et al.* Transport Beam Line for Ultraslow Monoenergetic Antiprotons // Review of Scientific Instruments. 2003. V. 74, No. 7.
10. *Kuroda N. et al.* Radial Compression of an Antiproton Cloud for Production of Intense Antiproton Beams. 2008. PRL 100, 203402. P. 203402-1–203402-4.

Получено 1 марта 2011 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 01.06.2011.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 230 экз. Заказ № 57339.

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

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

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