

P9-2008-53

Г. А. Карамышева, О. В. Карамышев, О. Е. Лепкина

РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНАХ
В СИСТЕМЕ МАТЛАБ

Карамышева Г. А., Карамышев О. В., Лепкина О. Е. P9-2008-53
Расчеты динамики пучка в циклотронах в системе MATLAB

В статье показана возможность применения MATLAB для научных расчетов физики ускорителей, в частности для проведения моделирования движения частиц в циклотронах. На примере двух циклотронов показаны результаты расчетов динамики пучка в различных системах ускорителя. Программирование в среде MATLAB открывает широкие возможности создания интегрированной программы, позволяющей проводить весь комплекс необходимых для проектирования циклотронов расчетов динамики заряженных частиц. Существенное увеличение скорости создания программ, а также, что представляется не менее важным, широкие графические возможности MATLAB являются огромным преимуществом для решения многих задач физики пучков заряженных частиц.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Karamysheva G. A., Karamyshev O. V., Lepkina O. E. P9-2008-53
Cyclotron Beam Dynamic Simulations in MATLAB

MATLAB is useful for beam dynamic simulations in cyclotrons. Programming in an easy-to-use environment permits creation of models in a short space of time. Advanced graphical tools of MATLAB give good visualization features to created models. The beam dynamic modeling results with an example of two different cyclotron designs are presented. Programming with MATLAB opens wide possibilities of the development of the complex program, able to perform complete block of calculations required for the design of the accelerators.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

Разработка и проектирование ускорителей заряженных частиц требует проведения большого количества сложных численных расчетов. Для некоторых типов ускорителей, например синхротронов, состоящих из последовательности электромагнитных элементов, существует достаточное количество стандартных программ, позволяющих разработчикам ускорителя проводить весь комплекс необходимых вычислений.

Иначе обстоит дело с циклотронами. При проектировании циклотронов необходимо проводить численные расчеты электромагнитных полей систем ускорителя и далее, используя полученные карты полей, считать динамику движения частиц, учитывая при этом всевозможные эффекты, возникающие из-за действия внешних и внутренних электромагнитных полей. Например, при ускорении H^- -ионов возможно возникновение потерь на диссоциацию (отрыв электрона от иона) в электромагнитном поле, при ускорении тяжелых ионов существенными становятся потери на перезарядку на остаточном газе, а при ускорении пучков большой интенсивности необходимо учитывать силы взаимодействия частиц — эффекты пространственного заряда.

Для проведения подобных расчетов, прежде всего, необходимы подпрограммы численного интегрирования дифференциальных уравнений движения частиц в электромагнитном поле и решения уравнения Пуассона методом конечных элементов и, наконец, программы, позволяющие осуществлять статистический анализ распределения частиц, проводить расчеты частот бетатронных колебаний. Все эти подпрограммы имеются в пакете MATLAB, их использование открывает возможность создания компьютерной модели циклотрона, позволяющей в одной программе производить все необходимые для специалистов расчеты.

В начале коротко опишем циклотроны, на примере которых в статье будут показаны возможности применения подобных программ. Первый ускоритель — это циклотрон ЦИТРЕК [1], предназначенный для облучения полимерных пленок, используемых в производстве разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения, вступивший в строй в Дубне в сентябре 2002 г (см. фото на рис. 1).

Ускоритель ЦИТРЕК представляет собой изохронный циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля (четырёхсекторная структура), аксиальной инжекцией ионов, высокочастотной ускоряющей системой и электростатической системой вывода.



Рис. 1. Общий вид циклотрона ЦИТРЕК

Второй ускоритель — проектируемый в ОИЯИ секторный изохронный циклотрон ЦИ-5 [2] с конечной энергией H^- -ионов, равной 5 МэВ, и средним током пучка 10–30 мА.

В настоящее время авторы создали в SIMULINK MATLAB отдельные программы KRYC [3] и KASCADS [4], позволяющие производить расчет динамики пучка ионов в циклотроне ЦИТРЕК с учетом перезарядки на остаточном газе (KRYC) и динамики пучка в циклотроне CI-5 (KASCADS) с учетом эффектов пространственного заряда. Обе программы интегрируют уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле, записанные в цилиндрической системе координат, используя карты полей, предварительно полученные в трехмерных расчетах. Следует заметить, что для различных задач физики ускорителей необходимо использовать три формы представления уравнений движения: первая форма — система дифференциальных уравнений в декартовой системе координат с переменной интегрирования время t , вторая форма — в цилиндрической системе координат с переменной интегрирования время и третья форма — система дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат с переменной интегрирования азимутальный угол φ . Уравнения движения в декартовой системе координат применяются для расчетов линий транспортировки и моделирования работы элементов линий транспортировки пучка, таких как банчер, сканирующий магнит. Цилиндрическая система координат используется для расчетов движения частиц в самом циклотроне. Для расположения ускоряющих, выводящих и других систем удобно использовать в качестве переменной азимутальный угол, поэтому представление уравнений движения с независимой переменной азимутальный

угол — наиболее распространенное. Однако расчеты взаимодействия частиц требуют их проведения в определенный момент времени, поэтому необходимо использовать уравнения движения с переменной t . Все три системы дифференциальных уравнений оформлены в виде подсистем SIMULINK, что позволяет легко применять их для новых расчетов. 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, широко используя различные распределения, например, наиболее часто применяемые нормальное и равномерное распределения. Отдельными подсистемами оформлены также программы, рассчитывающие потери ионов на перезарядку на остаточном газе, потери, обусловленные диссоциацией H-ионов в электромагнитном поле, программы, рассчитывающие эффекты пространственного заряда по методу прямого кулоновского взаимодействия, а также по методу эквивалентного распределения. И, наконец, имеется блок статистической обработки полученных результатов, осуществляющий расчет эммиттансов пучка, частот бетатронных колебаний.

Первоначально программы создавались с использованием блоков SIMULINK, после успешного завершения отладки и тестирования часть подпрограмм была переведена на язык MATLAB и оформлена в виде функций. Цель модернизации — более компактная запись и увеличение скорости счета. Большинство расчетов динамики циклотронов для достаточно большого числа движущихся в ускорителе частиц (100–1000) занимает минуты, и только учет эффектов пространственного заряда для большого числа частиц (1000–2000) занимает часы, именно эту подпрограмму есть смысл перевести на язык C++ для увеличения скорости счета.

Отдельно хотелось бы сказать о возможности применения FEMLAB. Использование карт полей, полученных в результате ранее произведенных расчетов по каким бы то ни было программам, решающим уравнение Пуассона, всегда сопряжено с рутинной работой вывода и ввода расчетных данных в программы динамики пучка. Получение решения в пакете FEMLAB существенно облегчает данную процедуру, так как результаты расчетов находятся непосредственно в рабочем пространстве MATLAB. Таким образом можно достичь решения задачи прохождения пучка через все системы ускорителя в рамках одной программы, без деления движения пучка на прохождение *a)* в линии инжекции, *б)* в банчере, *в)* в инфлекторе, *г)* в центре, *д)* в зоне ускорения, *е)* через выводные устройства, *ж)* в линии транспортировки, *з)* через сканирующий магнит, и наконец — распределения пучка по облучаемой пленке, как требовалось, например, при расчетах циклотрона ЦИТРЕК. Такой подход позволяет обойтись без передачи параметров пучка от программы к программе и, что не менее важно, увидеть прохождение пучка на протяжении всего цикла ускорения на экране монитора. В настоящее время

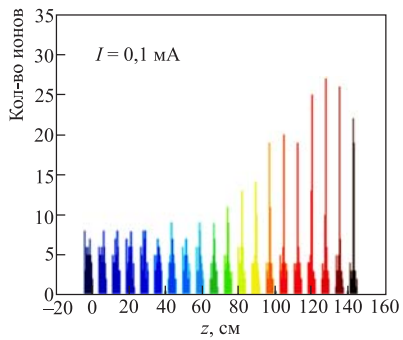


Рис. 2. Результаты банчирования пучка циклотрона ЦИТРЕК

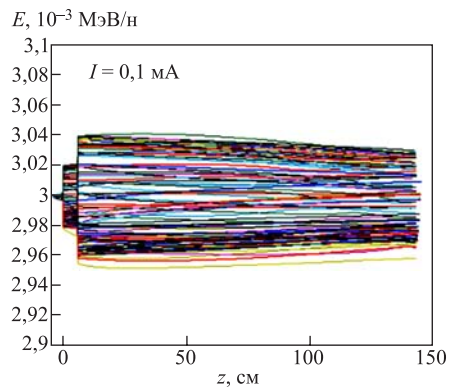


Рис. 3. Зависимость энергии ионов от расстояния от банчера

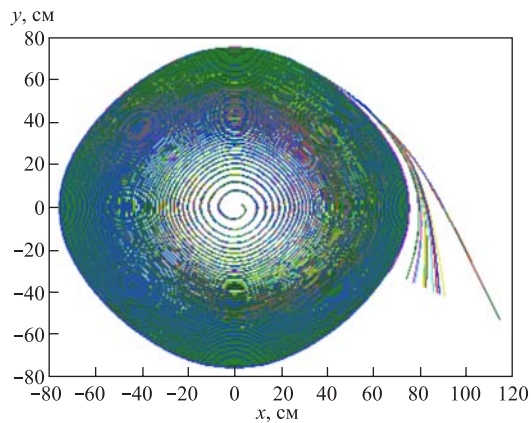


Рис. 4. Траектории пучка в циклотроне ЦИТРЕК

программа KRYC состоит из трех отдельных частей, объединяющих *а)* банчер и инфлектор; *б)* центр, зону ускорения и выводные устройства; *в)* линию транспортировки, сканирующий магнит и облучаемую пленку. Следует отметить, что все программы создавались за весьма ограниченное время небольшим коллективом авторов, хотя предварительно процесс изучения системы MATLAB занимает около года и продолжается всегда в связи с неисчерпаемыми возможностями пакета и его приложений.

Примеры графического представления результатов расчета по вышеописанным программам представлены на рис. 2–7.

На рис. 2 показаны результаты банчирования пучка. Заметим, что распределение поля в банчере можно считать как аналитически, так и численно с использованием FEMLAB. Во время расчетов учитываются эффекты взаимодействия частиц. На рис. 3 показана зависимость энергии пучка от расстояния, видно уменьшение энергетического разброса, обусловленное эффектами пространственного заряда. На рис. 4 показаны траектории пучка в циклотроне ЦИТРЕК, включая выводные устройства. В процессе расчетов динамики пучка по программе KRYC оценивались потери ионов аргона на остаточном газе, полученные значения коэффициента прохождения пучка от давления в камере циклотрона представлены на рис. 5 для трех значений ускоряющего напряжения.

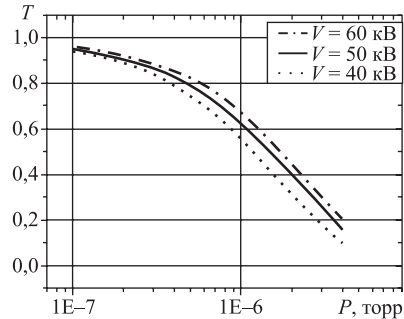


Рис. 5. Зависимость коэффициента прохождения пучка от давления в камере ускорителя ЦИТРЕК для различных ускоряющих напряжений

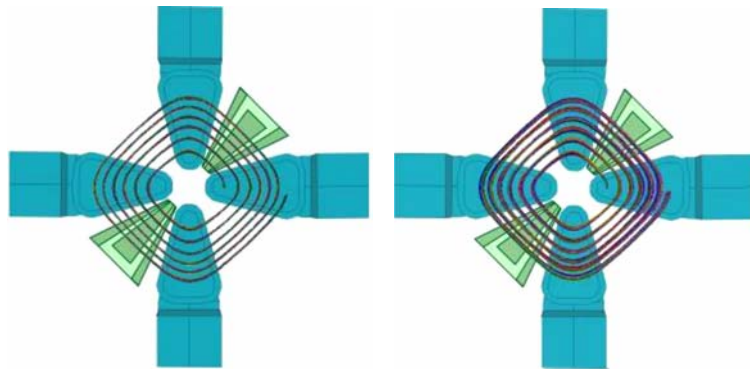


Рис. 6. Траектории пучка H^- -ионов в проектируемом сильноточном циклотроне-инжекторе ЦИ-5: слева — $I = 0$ мА, справа — $I = 30$ мА

На рис. 6 показаны траектории пучка H^- -ионов в проектируемом сильноточном циклотроне-инжекторе ЦИ-5 для двух вариантов — без учета эффектов пространственного заряда и для пучка с интенсивностью 30 мА. Видно существенное уширение пучка, сохраняющее, однако, разделение между орбитами. Аксиальное движение пучка показано на рис. 7 также для двух значений интенсивности пучка.

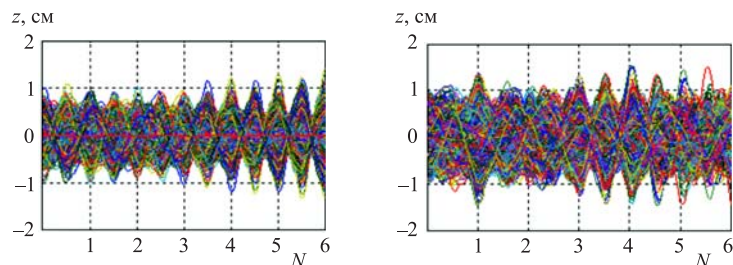


Рис. 7. Аксиальное движение пучка: слева — $I = 0$ мА, справа — $I = 30$ мА

Хотелось бы особо подчеркнуть, что представленные на графиках траектории — это траектории 1000 ускоряемых частиц на протяжении всего цикла ускорения (для циклотрона ЦИТРЕК, например, это 70 оборотов по 720 точек на каждом обороте). Таким образом, MATLAB позволяет легко осуществлять графический вывод любой используемой в расчетах характеристики, не ограничивая пользователя объемом выводимой на экран информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение MATLAB для моделирования динамики пучка в циклотронах открывает широкие возможности создания интегрированной программы, позволяющей проводить весь комплекс необходимых для проектирования циклотронов расчетов движения.

Существенное увеличение скорости создания программ, а также, что представляется не менее важным, широкие графические возможности MATLAB являются огромным преимуществом для специалистов различных областей науки и техники, требующих проведения численных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов Ю. Н. и др. Физический пуск циклотрона ЦИТРЕК // Письма в ЭЧАЯ, 2005, Т. 5, No. [3], с. 34–39.
2. Аленицкий Ю. Г. и др. Сильноточный циклотрон-инжектор в фазотрон ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, No. [3]–2005. С. 24–29.
3. Калиниченко В. В., Карамышева Г. А. Оценка потерь ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-58. Дубна, 2002.
4. Калиниченко В. В., Карамышева Г. А. Моделирование эффектов пространственного заряда в циклотроне-инжекторе в фазотрон ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-57. Дубна, 2002.

Получено 15 апреля 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 28.10.2008.

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

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,80. Тираж 270 экз. Заказ № 56383.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/