

УДК 621.384.6

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В НАКОПИТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ВЕТАСООЛ**

*И. Н. Мешков, Р. В. Пивин, А. О. Сидорин, А. В. Смирнов, Г. В. Трубников*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Программа ВЕТАСООЛ, разработанная сотрудниками сектора электронного охлаждения, представляет собой набор алгоритмов, основанных на общем формате входных и выходных файлов. Эта программа предназначена для моделирования динамики ионных пучков в накопительных кольцах при наличии эффектов охлаждения и нагрева пучка. Представленная в этой статье версия включает в себя три основных алгоритма: моделирование эволюции во времени среднеквадратичных (RMS) параметров функции распределения частиц, моделирование эволюции функции распределения на основе метода Монте-Карло и алгоритм траекторного анализа, основанный на технике молекулярной динамики. Основными процессами, исследуемыми с помощью программы, являются внутрипучковое рассеяние, электронное охлаждение, взаимодействие с остаточным газом и внутренней мишенью.

ВЕТАСООЛ program developed by JINR electron cooling group is a kit of algorithms based on common format of input and output files. The program is oriented to simulation of the ion beam dynamics in a storage ring in the presence of cooling and heating effects. The version presented in this report includes three basic algorithms: simulation of rms parameters of the ion distribution function evolution in time, simulation of the distribution function evolution using Monte-Carlo method and tracking algorithm based on molecular dynamics technique. General processes to be investigated with the program are intrabeam scattering in the ion beam, electron cooling, interaction with residual gas and internal target.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Электронное охлаждение широко используется для управления параметрами ионных пучков в накопителях. В настоящее время более 20 накопительных колец, оснащенных системами электронного охлаждения, находятся в эксплуатации или в процессе разработки. Программа ВЕТАСООЛ [1, 2], предназначенная для моделирования процесса электронного охлаждения, активно используется в ряде исследовательских центров: FZJ, GSI (Германия), RIKEN, NIRS (Япония), BNL (США), ОИЯИ, ИТЭФ (Россия) [3–7]. Код программы разработан с использованием объектно-ориентированного метода на языке C++. Интерфейсная часть для операционной системы Windows разработана на базе пакета BOLIDE (Builder Object Library & Interface Development Environment) [1], который предназначен для быстрой разработки физических и математических приложений.

Основная цель программы ВЕТАСООЛ — моделирование долговременных процессов (по сравнению с периодом обращения ионов), ведущих к изменению функции распределения ионов в шестимерном фазовом пространстве. Движение ионов в накопителе предполагается устойчивым и рассматривается в линейном приближении.

Структура программы позволяет проводить моделирование изменения функции распределения с использованием нескольких независимых алгоритмов. Каждый алгоритм моделирует динамику ионного пучка с использованием одинаковых входных параметров пучка и накопителя и одинакового набора эффектов, влияющих на функцию распределения пучка.

Эта статья описывает последнюю версию программы ВЕТАСОOL, которая включает в себя три алгоритма для моделирования динамики пучка и имеет следующий набор эффектов: электронное охлаждение, внутривпучковое рассеяние, рассеяние на остаточном газе, внутренняя мишень и др.

## 1. ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ

В текущей версии программы реализованы три алгоритма для моделирования изменения функции распределения ионов:

- моделирование динамики среднеквадратичных (RMS) параметров функции распределения;
- моделирование изменения функции распределения с использованием метода Монте-Карло (алгоритм «модельный пучок»);
- многочастичный траекторный анализ (алгоритм «трекинг») на основе техники молекулярной динамики.

Физическая модель, используемая в алгоритме моделирования RMS-параметров, основана на следующих предположениях:

- 1) ионный пучок имеет гауссовское распределение по всем степеням свободы, и вид распределения не изменяется в процессе эволюции;
- 2) максимум всех функций распределения совпадает с равновесной орбитой.

Изменение параметров ионного пучка в течение его циркуляции в накопителе описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= N \sum_j \frac{1}{\tau_{\text{life},j}}, & \frac{d\varepsilon_v}{dt} &= \varepsilon_v \sum_j \frac{1}{\tau_{v,j}}, \\ \frac{d\varepsilon_h}{dt} &= \varepsilon_h \sum_j \frac{1}{\tau_{h,j}}, & \frac{d\varepsilon_{\text{lon}}}{dt} &= \varepsilon_{\text{lon}} \sum_j \frac{1}{\tau_{\text{lon},j}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N$  — число частиц;  $\varepsilon_h$ ,  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_{\text{lon}}$  — среднеквадратичные значения горизонтального, вертикального и продольного эмиттансов пучка соответственно. Характерные времена являются функциями трех эмиттансов и числа частиц и имеют положительный знак для процессов нагрева и отрицательный — для процессов охлаждения. Отрицательный знак характерного времени жизни означает потерю частиц, положительный знак возможен в случае увеличения числа частиц при инжекции. Индекс  $j$  в (1) соответствует номеру процесса, участвующего в расчете. Структура алгоритма разработана таким образом, что позволяет учитывать влияние любого процесса, который может быть описан в терминах характерных времен нагрева или охлаждения. Численное решение системы (1) выполняется с использованием метода Эйлера с автоматическим изменением шага интегрирования. Результат моделирования представляется в виде зависимостей эмиттансов и числа частиц от времени. Оптическая структура накопителя используется только для

расчета внутрипучкового рассеяния (ВПП). Характерные времена ВПП рассчитываются в соответствии с одной из аналитических моделей с использованием структурных функций накопителя, импортируемых из выходного файла программы MAD [8].

Шаг интегрирования системы (1) по времени определяется характерными временами исследуемых эффектов, и скорость счета может быть высокой. Тем не менее в некоторых случаях эта модель может приводить к значительным погрешностям в основном из-за предположения гауссовской формы функции распределения ионов. Это предположение достаточно реалистично при равновесном состоянии ионного пучка, когда равновесие зависит от множества процессов, имеющих стохастическую природу. Если равновесие не достигается из-за быстрой потери частиц или на начальном этапе охлаждения пучка, то функция распределения может иметь форму, далекую от гауссовской. Похожая ситуация складывается при моделировании экспериментов с внутренней мишенью, размер которой не совпадает с размером ионного пучка. Ионизационные потери энергии в мишени также не могут быть учтены корректно в рамках этой модели.

Исследование динамики ионного пучка для произвольной формы функции распределения выполняется с использованием алгоритма модельного пучка. В этом алгоритме ионный пучок представляется массивом модельных частиц. Процессы охлаждения и нагрева, участвующие в моделировании, ведут к изменению компонентов импульса и числа частиц, которые рассчитываются в соответствии с шагом моделирования по времени. Каждый эффект локализован в некоторой точке накопителя, структурные функции в которой предполагаются известными. Преобразование координат модельных частиц в промежутках между точками локализации эффектов производится путем применения линейных матриц со случайным набегом фазы. Результат моделирования может быть представлен как в виде изменения профиля пучка, так и в виде зависимости эмиттансов и числа частиц от времени. Реальная оптическая структура необходима только для расчета ВПП. Изменение импульса частицы из-за ВПП рассчитывается на основе одной из аналитических моделей, как и в случае использования алгоритма динамики RMS-параметров.

Для моделирования ВПП через кулоновское взаимодействие между ионами используется алгоритм траекторного анализа «трекинг». Одна из целей развития этого алгоритма — моделирование процесса образования кристаллических состояний ионных пучков. В кристаллическом состоянии ионного пучка ВПП не может быть описано в рамках стандартных аналитических моделей, которые основываются на предположении гауссовской формы функции распределения. Повысить скорость расчета ВПП для алгоритма «трекинг» позволяет использование техники молекулярной динамики, предполагающей периодическое распределение ионов в продольном направлении. Соответственно, этот алгоритм может быть использован только для распущенного пучка.

В рамках алгоритма «трекинг» уравнения движения частиц интегрируются для реальной оптической структуры кольца. Структура накопителя импортируется из входного MAD-файла. Каждый эффект охлаждения или нагрева, включенный в расчет (так же, как и ВПП), локализован в некотором оптическом элементе. Расчет изменения координат частиц из-за действия эффектов обеспечивается в результате использования матрицы перехода. Позиция эффекта в кольце описывается в файле, формат которого совпадает с форматом входного файла программы MAD, с использованием специальных меток.

Структура основных объектов программы BETACOOL, в частности модели накопительного кольца и ионного пучка, разработана таким образом, что возможно использование всех трех алгоритмов для одних и тех же входных параметров. Эффекты охлаждения

и нагрева разработаны на базе общих стандартов, и с одинаковыми параметрами они могут быть использованы в каждом из алгоритмов моделирования динамики пучка.

## 2. СТРУКТУРА ЭФФЕКТОВ

В настоящей версии программы моделирование динамики пучка можно проводить при наличии следующих эффектов:

- 1) электронного охлаждения,
- 2) рассеяния на остаточном газе,
- 3) взаимодействия с внутренней мишенью,
- 4) столкновения пучков в коллайдере,
- 5) потерь частиц в секции охлаждения, в точке встреч, из-за акцептанса и др.,
- 6) внутripучкового рассеяния,
- 7) дополнительного внешнего нагрева ионного пучка (например искусственного источника шума).

Алгоритмы для эффектов встреч, стохастического и лазерного охлаждения в настоящий момент находятся в стадии разработки.

Структура эффектов позволяет применять их во всех основных алгоритмах. Для этого каждый эффект может быть использован в программе тремя способами: в виде матрицы перехода; для расчета изменения импульса модельных частиц и для расчета характерных времен изменения среднеквадратичных параметров функции распределения.

Эффект, использующий матрицу перехода, приравнивается к оптическому элементу в кольце, позиция которого определяется во входном файле. Матрица преобразует координаты частиц со входа оптического элемента на его выход и рассчитывает вероятность потери частиц.

На базе матрицы преобразования эффекта разработаны процедуры вычисления изменения импульса частиц и характерных времен. Расчет изменения импульса используется в алгоритме модельного пучка, характерные времена необходимы для моделирования динамики RMS-параметров.

## 3. СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

Программа BETACOOL состоит из двух независимых частей: физического кода, написанного в стандарте языка C++, и интерфейсной части, работающей только под управлением операционной программы Windows. Взаимодействие между двумя частями происходит посредством файлов трех типов: входных, выходных и файлов для управления процессом моделирования. Такая организация позволяет, с одной стороны, использовать BETACOOL на ПК, контролировать процесс моделирования и анализировать результаты во время счета, а с другой стороны, физическая часть кода может быть откомпилирована под UNIX и использована отдельно от интерфейсной части. Все входные и выходные файлы имеют текстовый формат и могут редактироваться без интерфейса.

Интерфейсная часть состоит из выполняемого файла Volide.exe, \*.dfm, файлов, содержащих информацию о внешнем виде BETACOOL, и входных файлов для обработки

результатов моделирования. Интерфейс также поддерживает работу с файловой структурой на жестком диске.

Физическая часть программы состоит из выполняемого файла *Betacool.exe*, откомпилированного для операционных систем Windows или UNIX, и файлов входных параметров. Для расчета ВПР необходимо использовать файл, содержащий параметры структуры накопителя, например MAD-файл. Дополнительные входные файлы используются для ввода значений силы трения при электронном охлаждении, вычисленной с помощью других программ, и для ввода ошибок магнитного поля соленоида в секции охлаждения.

Структура внешнего вида программы BETACOOOL соответствует структуре основных объектов в исходном коде и структуре входного файла.

Работа поддержана грантами РФФИ № 05-02-16320 и INTAS № 03-54-5584.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://lepta.jinr.ru/bolide.htm>
2. *Lavrentev A., Meshkov I.* The computation of electron cooling process in a storage ring. JINR Preprint E9-96-347. Dubna, 1996.
3. *Meshkov I. et al.* Computer simulation of ECOOL and IBS process in ACR and DSR using BETA-COOL program. Preprint RIKEN-AF-AC-21. 2000.
4. *Alekseev N. et al.* Project of TWAC Electron Cooler // *Physica Scripta*. 2003. V. T104. P. 160–163.
5. *Meshkov I. et al.* Electron cooling application for luminosity preservation in an experiment with internal targets at COSY. Institut für Kernphysik, Jül-4031. 2003.
6. *Syresin E. et al.* S-LSR low ion energy mode. Preprint NIRS HIMAC-086. 2004.
7. <http://www.ual.bnl.gov>
8. *Iselin F. C.* The MAD Program. Physical Method Manual. Geneva, 1994.