

# BEAMDYN — программа для расчетов динамики пучка в жесткофокусирующем ускорителе ИФВЭ

А.А. Асеев, М.Ю. Горин

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## Введение

При моделировании динамики заряженных частиц при их взаимодействии с внутренними мишенями ускорителя, устройствами, осуществляющими формирование эмиттанта или вывод части пучка, приходится контролировать параметры циркулирующего пучка на протяжении многих оборотов, что требует значительного времени счета. Использувавшиеся ранее программы (см., например, [1]) не позволяли обеспечить разумного соотношения числа контролируемых параметров при заданном времени счета, что определялось возможностями компьютерной техники.

Программа BEAMDYN, написанная на языке Турбо С и приспособленная для IBM PC 486DX2, позволяет обеспечить, например, расчеты динамики пучка при его взаимодействии с внутренними мишенями (при моделировании вывода вторичных частиц) со скоростью на 2 порядка выше, чем это было возможно ранее. С помощью BEAMDYN возможно решение следующих задач: а) построение фазовых эллипсов невозмущенного пучка на любых азимутах ускорителя; б) расчеты траекторий центра тяжести циркулирующего и/или выводимого пучков и локальных искажений орбиты; в) расчеты динамики пучка при взаимодействии с внутренними мишенями; г) расчеты распределений частиц, заброшенных в апертуру первого дефлектора системы медленного вывода при нерезонансном медленном выводе [2]; д) моделирование вывода пучка из ускорителя с помощью изогнутых монокристаллов.

В процессе счета осуществляется контроль потерь частиц на стенках вакуумной камеры, на границах апертур септум-магнитов и других “узких” местах периметра ускорителя.

## 1. Описание программы

Для моделирования движения частиц в ускорителе используются матрицы  $3 \times 3$  для горизонтального движения и матрицы  $2 \times 2$  для вертикального движения. В программе описывается структура ускорителя аналогично [3], но используются пять точек на блоке и одна точка в середине прямолинейного промежутка.

При вычислении траектории центра тяжести пучка пробная частица с некоторыми координатами  $r, r', z, z', \Delta p/p_0$  из выбранной точки азимута ускорителя совершает  $N$  оборотов (не менее 10). Координаты частицы на каждом обороте позволяют получить фазовые эллипсы в любой из выбранных точек азимута ускорителя. Центры полученных фазовых эллипсов являются координатами траектории центра тяжести пучка. Изменения траекторий центра тяжести пучка при создании локального искажения орбиты (бампа) моделируются путем изменения угла частицы на участке возмущения на величину, пропорциональную силе тока в дополнительных обмотках магнитных блоков, формирующих искажение поля на орбите ускорителя.

Исходные параметры пучка обычно задаются в середине первого прямолинейного промежутка на выбранном отрезке ускорителя. В горизонтальной плоскости частицы распределяются по семи фазовым эллипсам с шагом амплитуд 1 мм, таким образом, максимальная амплитуда бетатронных колебаний берется 7 мм, что соответствует эмиттансу  $2\pi$  мм·мрад. При таком описании пучка проще исследовать процессы, зависящие от интенсивности пучка и от амплитуд бетатронных колебаний частиц. Плотность распределения частиц по амплитудам берется в соответствии с релейским законом распределения [4]. В вертикальной плоскости координаты частиц задаются с помощью генератора случайных чисел, а распределение частиц в пучке подчиняется гауссовому закону. Такой способ задания исходного пучка позволяет существенно упростить моделирование наведения пучка на внутренние мишени и процесса раскачки частиц с разными амплитудами бетатронных колебаний.

Одним из режимов работы программы является расчет и построение фазовых эллипсов циркулирующего пучка в заданных точках ускорителя. Для этого каждая частица совершает заданное число оборотов с фиксацией ее координат на каждом обороте. Этот режим используется при выборе координат внутренних мишеней, оптимизации сил бампов при подведении пучка к токовым перегородкам септум-магнитов в процессе нерезонансного медленного вывода [2].

При взаимодействии с внутренними мишенями в программе учитываются следующие процессы: многократное кулоновское и упругое ядерное рассеяние, ядерное поглощение и ионизационные потери энергии [5-6].

В качестве мишени может быть использован изогнутый монокристалл (см., например, [7]). В этом случае решается уравнение движения протона в поле плоскостного канала [8].

Увеличение амплитуд бетатронных колебаний при взаимодействии с внутренними мишенями используется для заброса частиц за токовую перегородку септум-магнита при нерезонансном медленном выводе [2]. После каждого оборота частицы на азимуте первого септум-магнита системы медленного вывода осуществляется проверка условия попадания частицы в апертуру магнита. В случае “чистого” попадания в апертуру дефлектора частица считается выведенной, и ее параметры заносятся в память для дальнейшей обработки и определения эффективности. После завершения расчетов для заданного распределения частиц строятся зависимости, характеризующие распределения частиц в апертурах септум-магнитов, время жизни частиц в ускорителе и т.п.

Так как трасса выводимого пучка проходит на больших расстояниях от центра камеры, где проявляются нелинейности магнитного поля ускорителя, расчеты движения этих частиц матричным методом будут неточными. Поэтому расчет дальнейшего движения выводимых частиц ведется с помощью программы ТРАЕК [9], которая позволяет интегрировать уравнения движения частиц в реальном поле ускорителя, полученном по данным магнитных измерений. В качестве начального используется распределение заброшенных частиц в апертуре первого дефлектора.

## 2. Пример работы программы

Для иллюстрации работы программы возьмем режим нерезонансного медленного вывода при раскачке пучка двумя мишенями, расположенными в 24- и 27-м магнит-

ных блоках ускорителя, когда первым элементом системы вывода является септум-магнит 18-го прямолинейного промежутка (ПП-18).

Для наведения пучка на мишени используются локальные искажения замкнутой орбиты, формируемые соответственно токами в дополнительных обмотках блоков 20; 26 и 24; 30. Мишени 24-го блока имеют, как правило, положительные, а мишени 27-го — отрицательные рабочие координаты. Для подвода пучка к токовым перегородкам септум-магнитов, установленным в ПП-18, 20 У-70, используются бампы 15–21 и 16–22 (см., например, [2]). Исходный пучок задается описанным выше способом в середине 12-го прямолинейного промежутка. Для набора статистики взята 1000 частиц с возможностью для каждой частицы совершить 500 оборотов.

На рис. 1 показаны фазовые портреты на плоскости  $r, r'$  невозмущенного (а) и раскачанного на мишенях (б) пучка в 18-м прямолинейном промежутке.

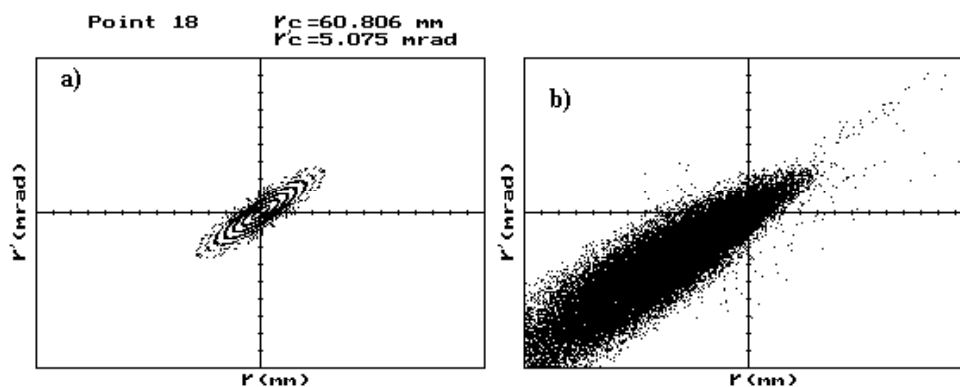


Рис. 1: Пример раскачки пучка внутренними мишенями. а) — невозмущенный пучок; б) — распределение частиц при взаимодействии с внутренними мишенями.

На рис. 2а и б изображены соответственно фазовые картинки для частиц, заброшенных в апертуру септум-магнита ПП-18 в плоскостях  $r, r'$  и  $z, z'$ , а также зависимости доли заброшенных частиц от числа оборотов в ускорителе (рис. 2в) и от числа пересечений мишеней (рис. 2г). Внизу приведены данные по потерям частиц за границами апертуры магнита и на стенках вакуумной камеры, а также среднее число пересечений мишеней каждой частицей.

## Заключение

Позволяя моделировать динамику пучка протонов в жесткофокусирующем ускорителе ИФВЭ при их взаимодействии с внутренними мишенями, программа BEAMDYN является удобным инструментом для оптимизации существующих и разработки новых режимов вывода пучка с использованием аморфных внутренних мишеней, изогнутых монокристаллов и любых других устройств, способных выступать в качестве мишеней. Структура программы позволяет легко вводить любые элементы ускорителя, необходимые для обеспечения вывода частиц (бамп-магниты, кикер- и септум-магниты), в том числе с нелинейными полями. Программа может быть легко приспособлена для расчета аналогичных задач вывода частиц из других ускорителей на более высокие энергии.

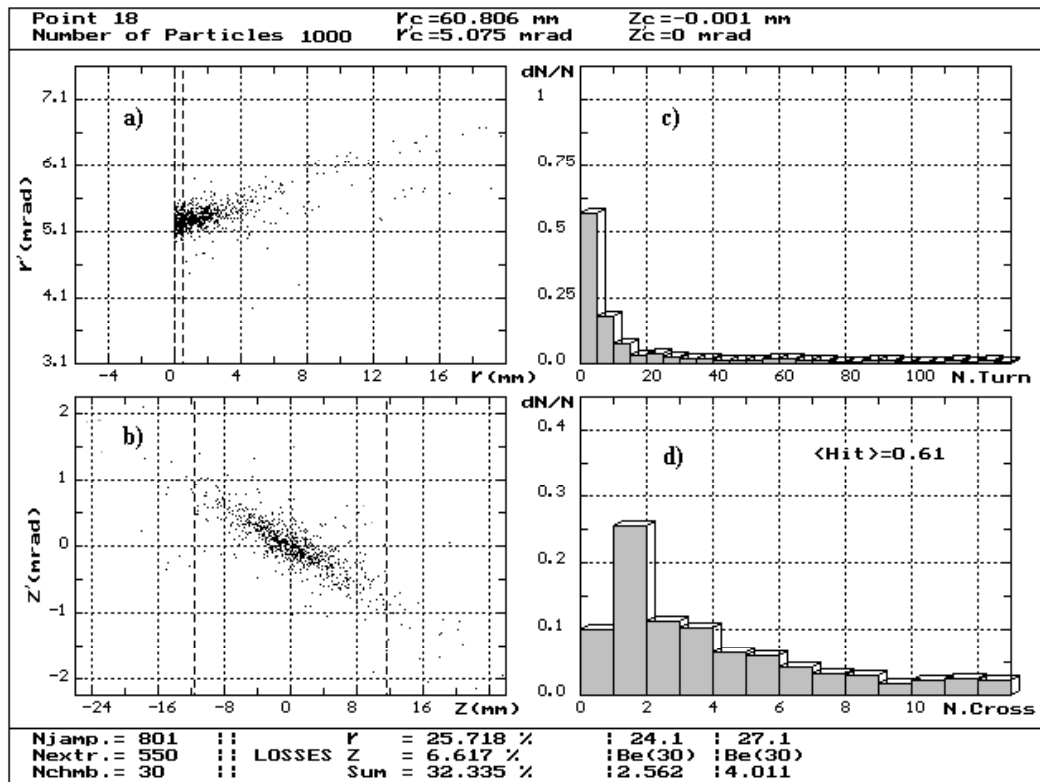


Рис. 2: Один из случаев распределения частиц при нерезонансном медленном выводе: а) и б) — фазовые портреты пучка в плоскостях  $r, r'$  и  $z, z'$ ; в) и г) — зависимости доли заброшенных частиц от их времени жизни в ускорителе.

### Список литературы

- [1] Мызников К.П. и др. — Препринт ИФВЭ 70-51, Серпухов, 1970.
- [2] Асеев А.А. и др. // ЖТФ, 1990, т.60, №9, с.70.
- [3] Тарасов Е.К. и др. — Препринт ИТЭФ 1232, Москва, 1964.
- [4] Гридасов В.И. и др. — Препринт ИФВЭ 73-78, Серпухов, 1973.
- [5] Belletini H.G., Cocconi G., Diddens A. et al. // Nucl.Phys. 1996, v. 79, p. 609.
- [6] Herevard H.G., Ranft J., Richter W. CERN 65-1, Geneva, 1965.
- [7] Asseev A.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A330 (1993) 39.
- [8] Kudo H. // Nucl. Instr. and Meth. 189 (1981) 609.
- [9] Fedotov Yu., Frounteau J., Keyser R. CERN-DD/CO/67/5, Geneva, 1967.