

P9-2002-148

Н. Ю. Казаринов, В. Ф. Шевцов

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛОВ
ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ
С БОЛЬШИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ЗАРЯДОМ**

Введение

Программа оптимизации параметров каналов для транспортировки пучков с большим пространственным зарядом является дальнейшим развитием программы расчета динамики заряженных частиц.^{/1/} Эта программа, основанная на методе крупных частиц, в силу того, что для точного расчета собственного поля пучка необходимо большое число моделирующих частиц, требует значительных временных затрат и поэтому может использоваться лишь на конечной стадии расчета каналов транспортировки. В данной работе приводится описание программы, предназначенной для поиска оптимальных параметров каналов транспортировки, основанной на методе моментов функции распределения.^{/2/} Поиск оптимальных параметров каналов строится на основе минимизации функционала, который задает требуемые параметры сильнооточного пучка в какой-либо точке транспортировочной линии. Минимизация производится любым из трех методов: двух градиентных или симплекс-методом.^{/3/}

Проведен расчет транспортировки ионов H^- в канале аксиальной инжекции циклотрона VINCY^{/4/} и ионов H^{1+} в канале аксиальной инжекции циклотрона DC-72^{/5/}. Сравнение двух вариантов расчета, основанных на разработанной программе и на методе крупных частиц, показало хорошее согласие результатов.

Описание программы

1. Постановка задачи

Программа оптимизации параметров каналов транспортировки основана на методе моментов функции распределения. Уравнения, описывающие изменение моментов первого и второго порядка вдоль канала транспортировки приведены в работе^{/2/}. Первые моменты функции распределения описывают координаты и скорости центра масс пучка, вторые моменты определяют его средне-квадратичные размеры. Уравнения для моментов позволяют учесть влияние сил пространственного заряда пучка на динамику заряженных частиц.

Определение оптимальных параметров пучка основано на двух модификациях метода наискорейшего спуска - методах Полака-Рибье и Флетчера-Ривза и симплекс-методе.^{/3/} Программно в процессе итерационной процедуры минимизируется квадратичный функционал, задающий параметры пучка в какой-либо точке канала транспортировки. Например, при расчете динамики ионов H^- в канале аксиальной инжекции циклотрона VINCY функционал имел следующий вид:

$$\Phi(\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y) = W_1((\beta_x / \beta_{x0} - 1)^2 + (\beta_y / \beta_{y0} - 1)^2) + W_2(\alpha_x - \alpha_y)^2,$$

где $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y$ - параметры Твисса заряженного пучка, β_{x0}, β_{y0} - те же параметры, которые необходимо получить на выходе канала, W_1 и W_2 - весовые коэффициенты. Данный функционал задает на выходе канала пучок кругового се-

чения ($\beta_{x0} = \beta_{y0}$) с одинаковыми угловыми расходимостями в поперечном направлении.

Канал представляет собой триплет с четырьмя свободными промежутками. Все расстояния в канале фиксированы, поэтому варьируемыми параметрами являются величины градиентов в триплете, которые рассчитываются автоматически. Выход из программы оптимизации происходит, когда величина функционала становится меньше задаваемой величины. Выходные параметры – величины градиентов в триплете. Проверка корректности полученного решения производится при контрольном расчете с полученными величинами варьируемых параметров с отображением динамики поперечных размеров пучка вдоль канала транспортировки. В специальном окне отображаются выходные значения параметров пучка в задаваемой точке.

2. Интерфейс пользователя

Запуск программы производится из главного меню Visual Basic 5.0 - RUN при выборе пункта START. После старта пользователь получает на экране монитора окно, вид которого показан на рис. 1.

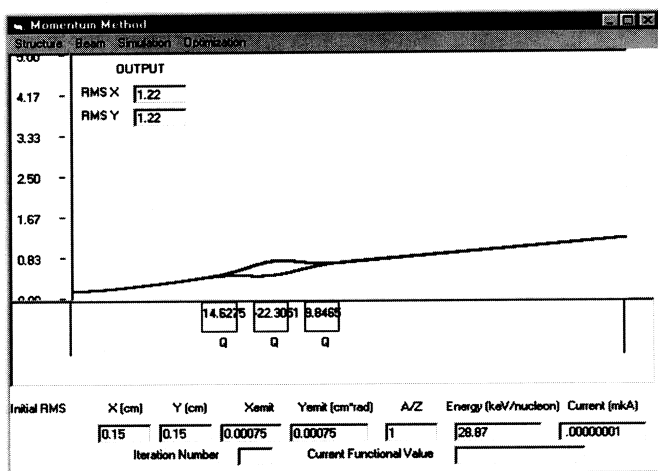


Рис.1. Интерфейсное окно пользователя

Для решения задачи оптимизации параметров канала пользователь должен использовать два пункта главного меню: Simulation и Optimization. В первом пункте меню пользователь последовательно выполняет три команды, пользуясь пунктами подчиненного меню:

1. Read Structure From File,
2. Read Beam From File,
3. All Run (RMS Dimensions).

В результате выполнения первой команды производится считывание структуры канала из файла и отображение его в интерфейсное окно. На рис.1 прямоугольниками показано расположение элементов канала в масштабе. Цифры в прямоугольниках показывают величины полей (или градиентов) на первой итерации процесса оптимизации. Подписи под прямоугольниками означают тип элемента канала (Q обозначает квадруполь, S – соленоид и т.д.). При выполнении второй команды производится считывание начальных параметров пучка (среднеквадратичные размеры, скорости, энергия, ток и т.д.). Третья команда запускает программу расчета динамики средних величин и среднеквадратичных размеров пучка. Результаты расчета отображаются на экране, при этом линии показывают среднеквадратичные размеры пучка в поперечном направлении.

Далее необходимо перейти к пункту главного меню Optimization и выбрать подпункт Make Functional. После его выполнения в окне появляется форма Choose Final Beam Parameters, показанная на рис.2.

RMS Dimension	Value at final point	W_i	S_i	
$\langle x^2 \rangle$	3	1	0	$\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle$
$\langle xv \rangle$	0	0	0	$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle$
$\langle y^2 \rangle$	3	1	1	$\langle xv_x \rangle = \langle yv_y \rangle$
$\langle v_x^2 \rangle$	0	0	0	$\langle v_x v_y \rangle = \langle xv_y \rangle$
$\langle v_x v_y \rangle$	0	0		
$\langle v_y^2 \rangle$	0	0		
$\langle xv_x \rangle$	0	0		
$\langle xv_y \rangle$	0	0		
$\langle yv_x \rangle$	0	0		
$\langle yv_y \rangle$	0	0		

You can create functional consisting of two parts:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N W_i \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_{i0}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^M S_i (\beta_i - \gamma_i)^2$$

where $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ - any RMS dimension, W_i, S_i - the weights for first and second part of functional

Next

Рис.2. Форма для задания функционала

Заполнение формы задания функционала включает в себя три позиции:

- В первый столбец заносятся значения всех среднеквадратичных размеров в заданной (выходной) точке канала транспортировки. Напомним, что параметры Твисса $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y$, поперечные эмиттансы пучка ϵ_x, ϵ_y и среднеквадратичные размеры связаны следующими соотношениями:

$$\overline{x^2} = \epsilon_x \beta_x, \overline{y^2} = \epsilon_y \beta_y, \overline{xv_x} = -\epsilon_x \alpha_x, \overline{yv_y} = -\epsilon_y \alpha_y,$$

- $$\overline{v_x^2} = \frac{\overline{xv_x^2} + \epsilon_x^2}{x^2}, \overline{v_y^2} = \frac{\overline{yv_y^2} + \epsilon_y^2}{y^2}.$$

Например, при оптимизации канала инжекции циклотрона VINCY задавались следующие выходные параметры пучка: $\overline{x^2} = \overline{y^2} = 3$ см, $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = 0,02$, $\epsilon_x = \epsilon_y = 0,00075$ см·рад.

- Во втором столбце определяются величины весовых коэффициентов W_i в функционале $\Phi = \sum_{i=1}^N W_i (x_i / x_{i0} - 1)^2 + \sum_{i=1}^M S_i (y_i - z_i)^2$, где x_i и x_{i0} - значения текущих среднеквадратичных размеров пучка и их целевые значения в задаваемой точке канала, y_i и z_i - среднеквадратичные размеры пучка, значения которых в выходной точке должны быть равны.
- Третий столбец определяет величины весовых коэффициентов S_i в том же самом функционале. По умолчанию все весовые коэффициенты задаются равными нулю.

После окончания ввода в форму “Choose Final Beam Parameters” нужно продолжить формирование функционала, нажав на клавишу “Next”. В результате на экране монитора появляется окно “Variable Parameters”, вид которого представлен на рис. 3.

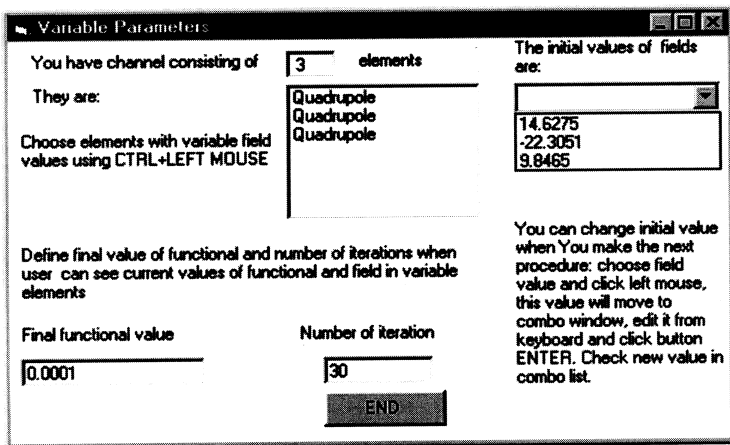


Рис.3. Окно задания параметров оптимизации

Первая группа параметров оптимизации связана со структурой канала, записанной в файл с расширением "*.str". Пользователю напоминает, что канал транспортировки состоит из N элементов, и указывается их тип. В приведенном примере канал состоит из трех квадрупольей, образующих триплет.

При нажатии на стрелку в окне "The initial values of fields are:" открывается Combo Box, в котором показаны величины полей в элементах канала, расположенные в порядке их следования, при этом отображаются значения полей, записанные в структурный файл. Это вторая группа параметров оптимизации. Если необходимо изменить эти значения, то в этом окне выбирается нужный элемент, который корректируется с клавиатуры в верхнем окне Combo Box. Для занесения нового значения в оперативную память необходимо корректировку значения завершить нажатием на клавишу "Enter".

Третья группа задает величину выходного значения функционала (Final Functional Value) и число итераций, после которых пользователь может вмешаться в процесс оптимизации (Number of Iteration).

Ввод параметров оптимизации завершается после нажатия клавиши "End". Окно закрывается, и пользователь попадает в главное окно "Momentum Method", где в пункте меню "Optimization" ему предоставляется на выбор любой из трех вышеперечисленных методов оптимизации. Выбор производится нажатием левой клавиши мыши на какой-либо пункт: "Polak-Rebierre", "Fletcher-Reeves" или "Simplex Method", после чего начинается процесс оптимизации. Однако до его начала пользователь получает возможность проконтролировать задание на оптимизацию с помощью дополнительного окна, в котором отображается содержимое файла задания на оптимизацию (файл по умолчанию имеет имя "exmpl"). Вид этого окна показан на рис. 4.

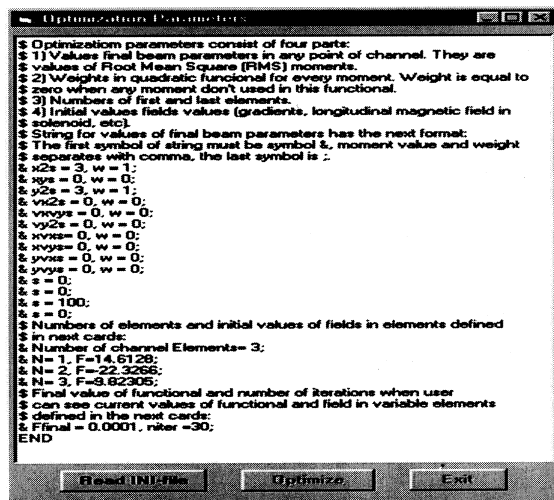


Рис. 4. Вид окна с текстом файла задания на оптимизацию

Текст в окне может быть отредактирован с клавиатуры. Новая редакция будет сохранена в файл с тем же именем, если пользователь закончит свою работу следующим образом:

- выведет курсор мыши в конец последней строки,
- нажмет на клавишу “Enter”.

Для того, чтобы новая редакция была загружена в оперативную память, необходимо нажать клавишу “Read INI-file”. После этого становится доступной клавиша “Optimize”, нажатие которой инициирует начало процесса оптимизации.

Ход итерационного процесса виден в окнах “Iteration Number” и “Current Functional Value”.

После числа итераций, равного Number of Iteration (заданного в окне “Variable Parameters”), пользователь получает сообщение: “Step=N, Functional = eps”, после чего нужно нажать на клавишу “OK”. Далее на вопрос “Do You Want to Continue?” необходимо выбрать один из двух ответов: “Yes” или “No”. В случае выбора положительного ответа программа продолжит расчет со значениями варьируемых параметров, полученными на последней итерации. Если выбран второй ответ, то произойдет автоматическая запись варьируемых параметров в рабочий файл (файл с именем “Example.wrk”), на мониторе появится окно с текстом файла задания на оптимизацию. После нажатия на клавишу “Read INI-File” в окне будут отображены значения варьируемых параметров, полученные на последней итерации, и программа будет ожидать редактирования INI-файла. После окончания редактирования нужно спасти отредактированный файл, используя клавишу “Enter”, вновь нажать клавишу “Read INI-File” и продолжить расчет, нажав на клавишу “Optimize”.

Если пользователь хочет продолжить процесс оптимизации, используя другой метод оптимизации, нужно нажать клавишу “Exit” (см. рис. 4), после чего на экране монитора появится главное окно “Momentum Method”. Пользователь может применить любой из трех методов, выбрав его в меню “Optimization”. При этом необходимо иметь в виду, что для продолжения расчетов с последними значениями варьируемых параметров нужно прочитать файл Example.wrk.

После окончания вычислений, когда величина функционала станет меньше заданной в INI-файле, программа сообщит об окончании и оптимальные величины варьируемых параметров. Чтобы убедиться в правильности расчетов, нужно в форме “Momentum Method” выбрать в главном меню пункт “Simulation”, далее “All Run” и получить картину изменения поперечных размеров вдоль канала транспортировки. В прямоугольнике, показывающие расположение элементов канала, выводятся конечные величины полей или градиентов, а в окне OUTPUT конечные размеры пучка в X- и Y- направлениях. Результаты работы программы представлены на рис. 5.

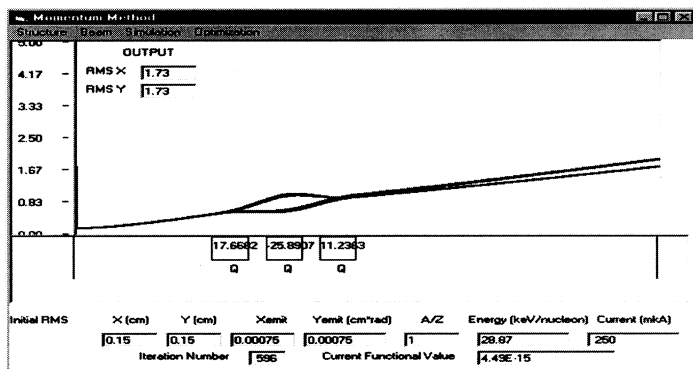


Рис.5. Результаты работы программы

3. Результаты расчетов

Проведена оптимизация градиентов триплета квадрупольных линз в канале аксиальной инжекции циклотрона VINCY ^{14/}. Условия согласования – получить аксиально-симметричный пучок на входе в фокусирующий соленоид, находящийся на расстоянии 330 см от начала канала. Радиус сечения пучка не должен превышать 4 см при максимальном токе пучка, равном 2 мА. Этим условиям соответствуют следующие ограничения на значения параметров Твисса:

$$\beta_x = \beta_y \leq \beta_0, \alpha_x = \alpha_y.$$

При эмиттансе пучка, равном 30 п мкм-мрад, $\beta_0 = 5,333$ м. Для поиска оптимальных значений градиентов линз было взято значение $\beta_0 = 5$ м и использовались строгие равенства:

$$\beta_x = \beta_0, \beta_y = \beta_0, \alpha_x = \alpha_y$$

На рис.4 показано изменение среднеквадратичных размеров (RMSx,y) пучка по тракту канала при максимальном токе пучка (кривые 1).

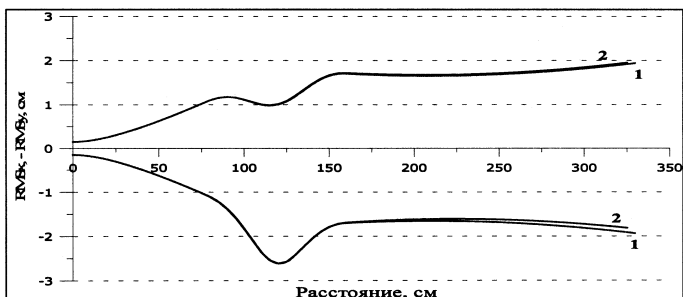


Рис.6. Сравнение результатов расчета двумя методами:

- 1 – результаты расчета с помощью программы оптимизации;
- 2 – результаты моделирования методом крупных частиц

На этом же рисунке для сравнения показаны среднеквадратичные размеры пучка, найденные при моделировании методом крупных частиц (кривые 2). Максимальное отличие результатов расчета двумя методами не превышает 6%. Это связано с небольшим изменением эмиттанса пучка, которое не учитывается в расчете оптимальных градиентов линз (рис.7).

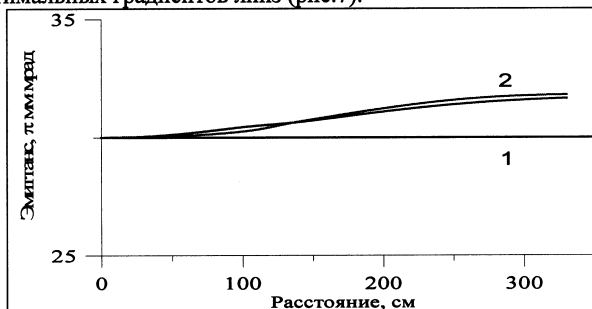


Рис. 7. Изменение эмиттанса: 1 – при оптимизации, 2 – метод крупных частиц

Проведена оптимизация канала аксиальной инъекции циклотрона DC-72^{5/1}. Расчеты проводились для ионов ${}^2\text{H}^{1+}$ с током 750 мкА. Начальная кинетическая энергия равнялась 16,83 кэВ, эмиттанс пучка – 50 п м.м.рад.

Схема канала показана на рис.8.

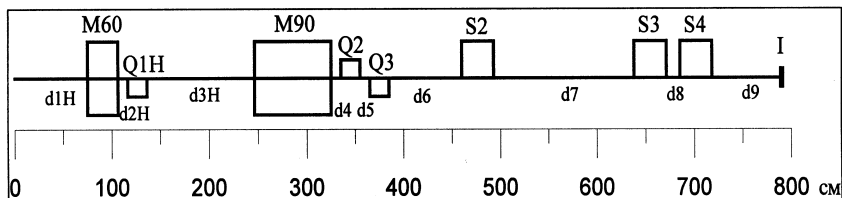


Рис. 8. Структура канала инъекции.

Полная длина канала по траектории пучка 7851 мм. M60 – горизонтальный поворачивающий магнит (угол поворота 60°), M90 – вертикальный поворачивающий магнит (угол поворота 90°), Q1H, Q2 - Q3 – квадрупольные линзы, S2 - S4 – фокусирующие соленоиды, d1H - d3H, d4 - d9 – прямолинейные промежутки, I – инфлатор циклотрона

Градиент квадрупольной линзы Q1H определяется максимально допустимыми поперечными размерами пучка в магните M90.

Оптимизация других параметров элементов канала проводилась в два этапа. Первоначально оптимизировались градиенты квадрупольных линз Q2,3 для обеспечения аксиальной симметрии пучка на конечном участке транспортировки. Условия согласования задавались на входе соленоида S2 в следующем виде:

$$\beta_x = \beta_y, \quad \alpha_x = \alpha_y,$$

где β , α - параметры Твисса.

Зависимости среднеквадратичных размеров пучка от длины по тракту канала, полученные в результате работы программы оптимизации, показаны на рис.9.

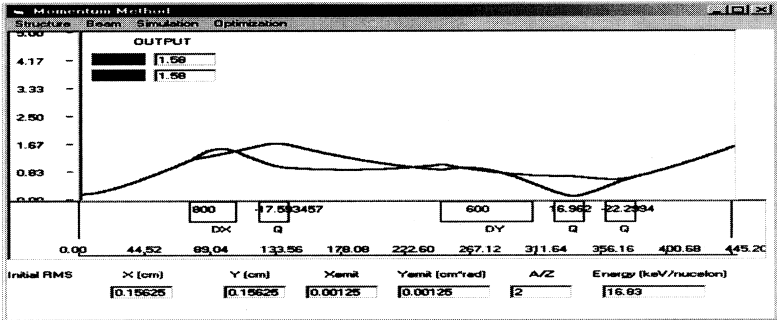


Рис. 9

Далее при фиксированных значениях градиентов квадрупольных линз находились значения индукций магнитных полей соленоидов S2, S4, при которых выполняется условие согласования пучка с магнитным полем на выходе инфлектора:

$$\kappa\beta = Q + (1 + Q^2)^{1/2}, \quad \alpha = 0,$$

где $\kappa = B_0/2B\rho$, $Q = \frac{ZeI}{AMv^3k\varepsilon}$. Здесь B_0 – индукция магнитного поля центральной области циклотрона, v – продольная скорость иона, I – ток пучка, ε – эмиттанс пучка. Поскольку пучок аксиально-симметричный, достаточно выполнить эти условия для одной из поперечных координат. Зависимости среднеквадратичных размеров пучка от длины по тракту канала, полученные в результате работы программы оптимизации, показаны на рис.10.

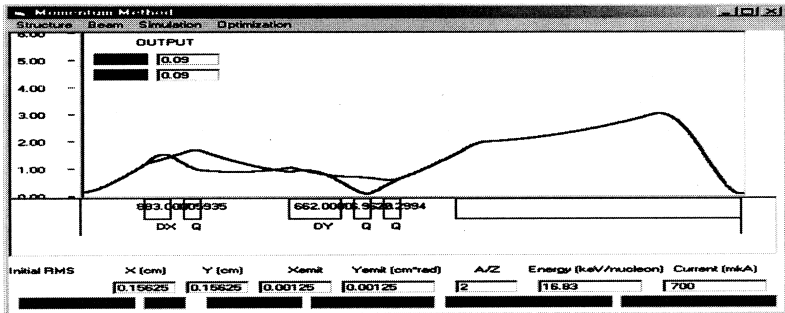


Рис.10

Для оптимизированных значений градиентов квадрупольных линз и индукций магнитного поля соленоидов проведено моделирование транспортировки пучка в канале методом крупных частиц. Результаты моделирования приведены на рис.11.

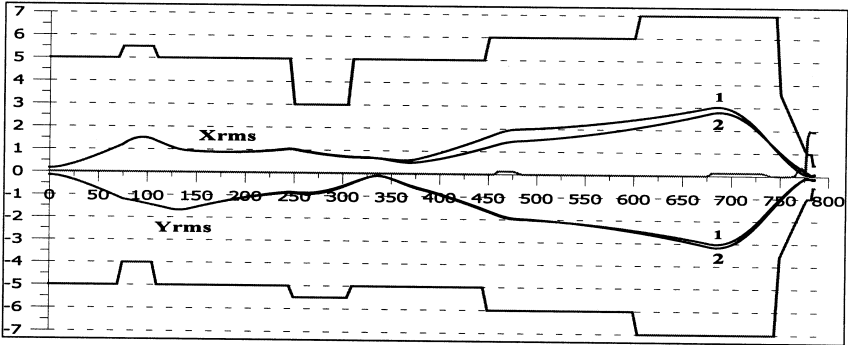


Рис.11. Среднеквадратичные размеры (X_{rms} , Y_{rms}), апертуры, магнитное поле:
 1 – результаты расчета с помощью программы оптимизации;
 2 – результаты моделирования методом крупных частиц

Сравнение результатов моделирования различными методами показывает достаточно хорошее согласие. Тем не менее при моделировании методом крупных частиц аксиальная симметрия пучка после квадрупольных линз восстанавливается не полностью. Максимальное отличие горизонтального и вертикального размеров пучка равно приблизительно 25 %.

Для улучшения аксиальной симметрии пучка в методе крупных частиц необходимо увеличить на 25 % градиент линзы Q3. Результаты моделирования показаны на рис. 12,13.

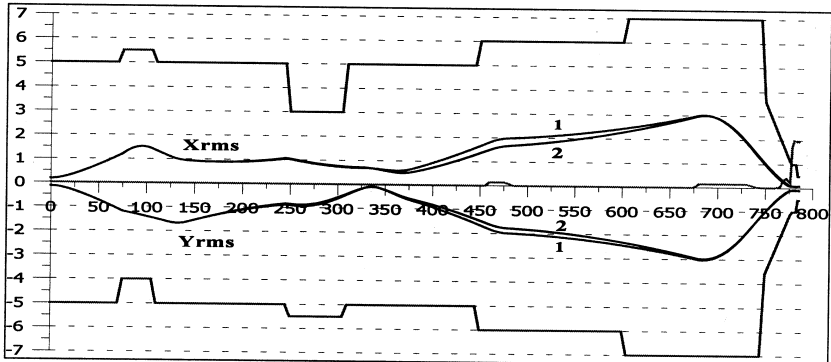


Рис.12. Среднеквадратичные размеры (X_{rms} , Y_{rms}), апертуры, магнитное поле:
 1 – результаты расчета с помощью программы оптимизации;
 2 – результаты моделирования методом крупных частиц

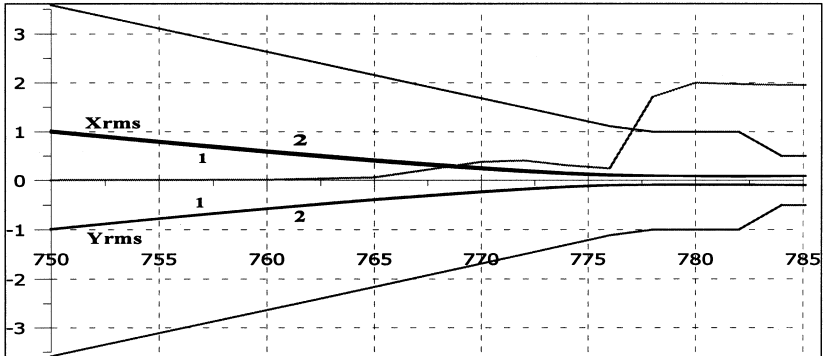


Рис.13. Среднеквадратичные размеры (X_{rms} , Y_{rms}) в пробке и инфлекторе. Обозначения те же, что и на рис.12

Заключение

Разработанная программа оптимизации параметров каналов транспортировки пучков частиц с большим пространственным зарядом позволяет быстро и эффективно находить оптимальные значения величин магнитных полей в каналах при достаточно общих условиях согласования.

Результаты расчетов, проведенных с помощью программы оптимизации, находятся в хорошем соответствии с результатами моделирования методом крупных частиц.

Литература

1. V.S. Alexandrov, Yu.K. Batygin, N.Yu. Kazarinov, V.F. Shevtsov, G.D. Shirkov. Numerical Simulation of Multicomponent Ion Beam from Ion Sources. In: Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Ion Sources ECRIS99, CERN, Geneva, May 1999, p. 27-30.
2. N.Yu. Kazarinov, E.A. Perlstein, V.F. Shevtsov. Moment method in Charged-Particle Beam Dynamics. In: Particle Accelerators, 1980, v.10, No 3/4, p. 181-195.
3. William H. Press, Brain P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling. Numerical Recipes. Cambridge University Press, Cambridge.
4. N.Neskovic et al. In: Proceedings of the 14th International conference on Cyclotrons and their Applications, Capetown, 1995, p.82.
5. О.Н.Борисов и др. Циклотронная лаборатория при словацком метрологическом институте. Сообщение ОИЯИ Р9-97-86, Дубна, 1997.

Получено 26 июня 2002 г.

Казаринов Н. Ю., Шевцов В. Ф.
Оптимизация параметров каналов транспортировки пучков
с большим пространственным зарядом

P9-2002-148

Разработана программа оптимизации параметров каналов транспортировки пучков заряженных частиц с учетом влияния сил пространственного заряда. Программа основана на существующей библиотеке программ расчета динамики пучков заряженных частиц в каналах транспортировки. Оптимизация производится на основе минимизации функционала на выходе канала транспортировки с использованием двух градиентных методов и симплекс-метода. Проведен расчет транспортировки ионов H^- в канале аксиальной инжекции циклотрона VINCY и ионов ${}^2H^{1+}$ в канале аксиальной инжекции циклотрона DC-72. Сравнение двух вариантов расчета, основанных на разработанной программе и на методе крупных частиц, показало хорошее согласие результатов.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц и Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Kazarinov N. Yu., Shevtsov V. F.
Optimization of Transportation Channel Parameters for Beams
with Big Spatial Charge

P9-2002-148

The program for optimization of the transportation channel parameters for beams with big spatial charge is presented. This program is the development of existing program for calculation of charged particles beam dynamics in transportation lines. Optimization is based on minimization of functional at any point of transportation line using two gradient and simplex-method. The numeric simulation of ions H^- transportation in the channel of axial injection of cyclotron VINCY is fulfilled. The comparison of two variants of calculation based on the presented program and particle-in-cell method shows a good agreement one with another.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics and at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *Е. В. Калининкова*
Макет *Е. В. Сабеевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 11.07.2002.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 280 экз. Заказ № 53415.

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