

С 345е 2

В-991

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



25/11-78

5652/2-78

P9 - 11672

Г.Н.Вялов, Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн,
В.Д.Рукавишников, В.Ф.Шевцов, Б.Г.Шинов

РАСЧЕТ КАНАЛА ИНЖЕКЦИИ

СИЛЬНОТОЧНОГО ПУЧКА

ДЛЯ МЕЗОННОЙ ФАБРИКИ ИЯИ АН СССР

1978

Р9 - 11672

Г.Н.Вялов, Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн,
В.Д.Рукавишников, В.Ф.Шевцов, Б.Г.Щинов

РАСЧЕТ КАНАЛА ИНЖЕКЦИИ
СИЛЬНОТОЧНОГО ПУЧКА
ДЛЯ МЕЗОННОЙ ФАБРИКИ ИЯИ АН СССР

Вялов Г.Н. и др.

P9 - 11672

Расчет канала инжекции сильноточного пучка для мезонной фабрики ИЯИ АН СССР

Рассчитан участок канала инжекции сильноточного пучка от инжектора до банчера для мезонной фабрики ИЯИ АН СССР.

В работе динамика пучка прослеживается с помощью метода моментов с эффективной линеаризацией сил пространственного заряда. Такой подход дает большой выигрыш в затратах времени на ЭВМ. Проведена оптимизация параметров канала в режиме диалога "человек-машина" и оптимизация с помощью программы FUMILI. Эффекты, обусловленные нелинейностью пространственного заряда, рассматриваются для выбранного варианта в модели укрупненных частиц. Среднеквадратичные отклонения пучка, полученные методом моментов и методом укрупненных частиц, совпадают с точностью не хуже 30%.

Выбранные параметры элементов канала обеспечивают проводку пучков с различными распределениями без потерь.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Vyalov G.N. et al.

P9 - 11672

Computation of the Injection Channel of High Current Beam for the Meson Mill of INR of the USSR Academy of Sciences

The injection channel region of high current beam from injector up to buncher for meson mill of the Institute for Nuclear Research of the USSR Academy of Sciences has been computed.

The beam dynamics is being considered by momentum procedure as well as by effective linearizing of spatial charge forces. The channel dimension optimization under the routine of dialogue "Man-Machine" and optimization by FUMILI program has been held. The effects stipulated by spatial charge non-linearity are looked upon to selected variant in the super-macro particle model.

The chosen dimensions of the channel elements provide the beam transport with different distributions without losses.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

Задача о проведении сильноточного пучка заряженных частиц неоднократно решалась в связи с созданием сильноточных ускорителей^{/1-4/}. Основная особенность задачи связана с большим влиянием пространственного заряда пучка, который существенно проявляется при малых энергиях частиц. Влияние пространственного заряда сводится, прежде всего, к сильной поперечной дефокусировке, а также к нелинейным эффектам, приводящим к изменению эмиттанса пучка^{/4/}.

В расчетах систем транспортировки пучка с учетом пространственного заряда используются различные подходы: метод укрупненных частиц^{/1,3,5/}, численное решение уравнений Власова^{/6/} и т.д. Эти методы требуют значительных затрат времени на ЭВМ и поэтому малоприменимы для оптимизации параметров канала транспортировки.

Методы расчета, основанные на уравнениях Владимирского-Капчинского для огибающей пучка, не позволяют учитывать вращение сечения пучка и неприменимы для расчетов участков с продольным магнитным полем.

В данной работе динамика пучка прослеживается с помощью метода моментов с эффективной линеаризацией сил пространственного заряда^{/7-11/}. Такой подход дает большой выигрыш в затратах времени на ЭВМ. Поэтому становится возможным оптимизировать канал транспортировки в режиме диалога "человек-машина" и использовать известные программы для выбора оптимального варианта канала.

Эффекты, обусловленные нелинейностью пространственного заряда, рассматривались для выбранного варианта канала в модели укрупненных частиц. Расчеты выполнялись для участка канала транспортировки пучка от инжектора до банчера мезонной фабрики ИЯИ АН СССР/12/.

1. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ПУЧКА

В основу расчета положены полученные в работах^{/9-10/} уравнения, позволяющие в практически безмодельном подходе рассматривать изменение во времени среднеквадратичных размеров пучков заряженных частиц в линейных внешних электромагнитных полях:

$$\frac{dM_{xx}}{dz} = M_{xv} + M_{xv}^*$$

$$\frac{dM_{vv}}{dz} = b M_{xv} + M_{xv}^* b^* + a M_{vv} + M_{vv} a^* \quad /1/$$

$$\frac{dM_{xv}}{dz} = M_{vv} + M_{xx} b^* + M_{xv} a^*$$

где $z = v_z t$, $v_z = \beta c$ - продольная координата и скорость пучка соответственно, c - скорость света. Матрицы $a, b, M_{xx}, M_{xv}, M_{vv}$ - квадратные матрицы второго порядка, знак * означает транспонирование матрицы. Элементы матрицы M_{xx} являются средними квадратами размеров пучка:

$$M_{xx}^{i,j} = \overline{x_i x_j} = \frac{1}{N} \int f x_i x_j d\vec{x} d\vec{v}, \quad i, j = 1, 2 \quad /2/$$

Здесь f - функция распределения частиц в пучке, N - линейная плотность, интегрирование проводится по всей области фазового пространства, занятого частицами.

Элементы матриц M_{xv} и M_{vv} определяются следующими соотношениями:

$$M_{xv}^{i,j} = \overline{x_i v_j}, \quad i, j = 1, 2, \quad /3/$$

$$M_{vv}^{i,j} = \overline{v_i v_j}, \quad i, j = 1, 2,$$

где x_i, v_i - поперечные координаты и скорости частиц. Элементы матриц a и b связаны с силой Лоренца внешнего (ext) и собственного (s) электромагнитных полей:

$$b = b^s + b^{ext} \quad /4/$$

$$a = a^{ext} \quad /5/$$

При этом в /5/ не учитывается собственное магнитное поле, связанное с поперечным движением частиц в пучке. Для пучков с плотностью заряда, имеющей эллиптические линии постоянного уровня, матрица b^s собственного электромагнитного поля пучка определяется следующим образом^{/11/}:

$$b^s = \frac{\nu}{\beta^2 \gamma^3} \frac{M_{xx}^{-1/2}}{\text{Sp} M_{xx}^{1/2}}, \quad /6/$$

где $\nu = N r_0$ - параметр Будкера, $r_0 = e^2/mc^2$, e, m - заряд и масса частицы соответственно, $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$ - релятивистский фактор продольного движения. Матрица $M_{xx}^{1/2}$ определена так, что $M_{xx}^{1/2} M_{xx}^{1/2} = M_{xx}$,

$$M_{xx}^{1/2} M_{xx}^{-1/2} = I, \quad I - \text{единичная матрица.}$$

Элементы матрицы a^{ext} и b^{ext} определяются внешними электромагнитными полями:

1/ фокусирующий соленоид

$$b^{ext} = \frac{e}{mc^2 \beta \gamma} \frac{\partial B_z(z)}{\partial z} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad /7a/$$

$$a^{ext} = \frac{e}{mc^2 \beta \gamma} B_z(z) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix},$$

$B_z(z)$ - индукция магнитного поля соленоида;

2/ квадрупольная линза

$$b^{ext} = \frac{e}{mc^2\beta\gamma} G(z) \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad a^{ext} = 0, \quad /76/$$

$G(z)$ - градиент магнитного поля линзы;

3/ поворотный магнит /поворот в плоскости xz /

$$b^{ext} = -\left(\frac{e}{mc^2\beta\gamma} B_y\right)^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad a^{ext} = 0, \quad /78/$$

B_y - амплитуда индукции магнитного поля.

Уравнения /1/ вместе с формулами /6/, /7/ и начальными условиями для моментов второго порядка позволяют определить среднеквадратичные характеристики пучка в любой точке канала транспортировки.

Уравнения /1/ могут быть аналитически проинтегрированы лишь в некоторых частных случаях^{/9/}. Здесь эта система численно решалась на ЭВМ с использованием схемы Рунге-Кутты^{/13/} четвертого порядка. Программа позволяет рассчитывать каналы с произвольным числом элементов, рассмотренных выше. Внешние магнитные поля могут быть заданы как аналитически, так и в виде таблиц. В последнем случае для вычисления требуемых производных функций используется квадратичная интерполяция. Точность вычислений контролируется по известному интегралу системы уравнений /1/, представляющему собой определитель матрицы моментов:

$$\text{Det} = | M_{xx} | | M_{vv} - M_{xv} M_{xx}^{-1} M_{xv}^* | \quad /8/$$

Для выбора оптимальных параметров канала использовались два режима работы программы.

Первый режим - режим диалога с ЭВМ, в котором на экран терминала типа ТЕКТРОНИХ выводились графики зависимости среднеквадратичных размеров пучка от продольной координаты z . В этом режиме предусмот-

рена возможность изменения параметров любого из элементов канала с последующей выдачей на экран нового варианта расчета среднеквадратичных размеров пучка. Использование этого режима позволяет оперативно получить первое приближение для дальнейшего поиска оптимальных параметров канала транспортировки.

Во втором режиме производится поиск оптимальных характеристик каналов с помощью программы минимизации функционала - FUMILI^{/14/}. В качестве начальных используются значения параметров, выбранные в режиме диалога. Этот режим работы позволяет находить параметры фокусирующих элементов, обеспечивающих заданные характеристики пучка на выходе из канала.

2. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ДЛЯ МЕЗОННОЙ ФАБРИКИ ИЯИ АН СССР

Рассмотренным выше методом рассчитывался участок канала транспортировки протонного пучка от инжектора до банчера мезонной фабрики ИЯИ АН СССР. Структура этого участка, предложенная в НИИЭФА^{/15/}, имеет вид, показанный на рис. 1. Система согласования пучка на входе или выходе поворотного магнита, предназначенная для восстановления кругового сечения пучка, - квадрупольный дублет - приведена в работе^{/17/}. Геометрическое расположение элементов канала задано, апертура составляет 6 см.

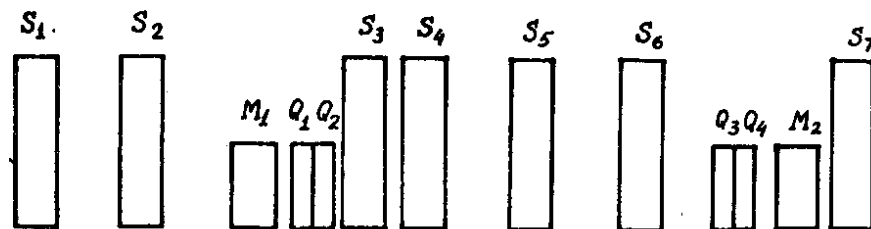


Рис.1. Схема участка канала. $S_1 - S_7$ - фокусирующие соленоиды, M_1, M_2 - поворотные магниты, $Q_1 - Q_4$ - квадрупольные линзы.

В расчете приняты следующие параметры пучка протонов: ток - 150 мА, энергия инъекции - 750 кэВ, радиус пучка на входе в канал - ~ 1 см.

Определялись параметры элементов канала /индукция магнитного поля в фокусирующих соленоидах, значения градиентов магнитных полей квадруполь/, обеспечивающие заданную конфигурацию пучка. Распределение поля вдоль оси z предполагалось одинаковым для всех соленоидов. Величины полей в поворотных магнитах, определяемые радиусом кривизны траектории пучка, составляли $B_y = 2500$ Э. Таким образом, определялись одиннадцать параметров канала.

В режиме диалога были выбраны величины параметров первых девяти элементов канала. При этом мы стремились получить вдоль тракта пучок с как можно меньшими изменениями относительных поперечных размеров, поскольку, согласно работе /6/, нежелательное расширение фазового объема, вызываемое нелинейными кулоновскими полями, особенно существенно в местах перетяжек пучка.

Размеры пучка на выходе из канала особенно чувствительны к изменению величин градиентов магнитных полей Q_3 и Q_4 в последнем квадрупольном дублете. Выбор величин этих градиентов был произведен с помощью программы минимизации функционала, который выбирался в следующем виде:

$$\Phi = \left(\frac{\overline{x_1^2 - x_2^2}}{(\Delta x)^2} \right)^2 + \left(\frac{\overline{v_1^2 - v_2^2}}{(\Delta v)^2} \right)^2, \quad /9/$$

где $\sqrt{\overline{x_i^2}}$, $\sqrt{\overline{v_i^2}}$, $i=1,2$ - среднеквадратичные поперечные размеры и скорости пучка соответственно,

$$(\Delta x)^2 = (\overline{x_1^2})_D - (\overline{x_2^2})_D \quad \text{и} \quad (\Delta v)^2 = (\overline{v_1^2})_D - (\overline{v_2^2})_D,$$

символ "D" обозначает среднеквадратичные величины на выходе из канала, рассчитанные в режиме диалога. Минимум этого функционала определяет на выходе из канала круговой пучок с равными поперечными среднеквадратичными скоростями. Зависимость среднеквадратичных размеров пучка от продоль-

ной координаты показана на рисунках 2,3. Заметим, что $\sqrt{\overline{x^2}} = 0,5a$, где a - радиус пучка с постоянной по сечению плотностью заряда. Величины оптимизированных параметров канала приведены в таблице.

Таблица

Элемент канала	Варьируемый параметр	Оптимальная величина
S ₁	B _z (Э)	5500
S ₂	B _z (Э)	7200
M ₁	B _y (Э)	2500
Q ₁	G (Э/см)	-350
Q ₂	G (Э/см)	280
S ₃	B _z (Э)	5250
S ₄	B _z (Э)	6300
S ₅	B _z (Э)	6800
S ₆	B _z (Э)	5900
Q ₃	G (Э/см)	-7,82
Q ₄	G (Э/см)	-145,15
M ₂	B _y (Э)	2500
S ₇	B _z (Э)	5500

Время расчета участка канала длиной 8,65 м при шаге интегрирования системы уравнений /1/ $\Delta z = 0,04$ см составляет 2 мин на ЭВМ CDC-6500. Поиск минимума функционала /9/ при двух варьируемых параметрах осуществлялся за время ~ 10 мин.

Область применения системы уравнений /1/ ограничена линейными внешними и собственными электромаг-

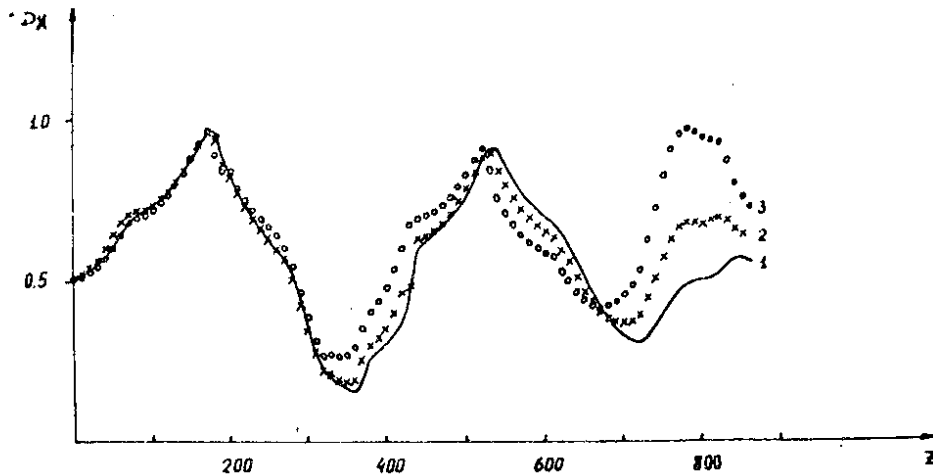


Рис.2. Зависимость среднеквадратичного размера D_x пучка от продольной координаты z . Кривая 1 - результат расчета методом моментов, кривые 2 и 3 - результаты расчета методом укрупненных частиц для пучков с микроканоническим и гауссовым распределениями соответственно.

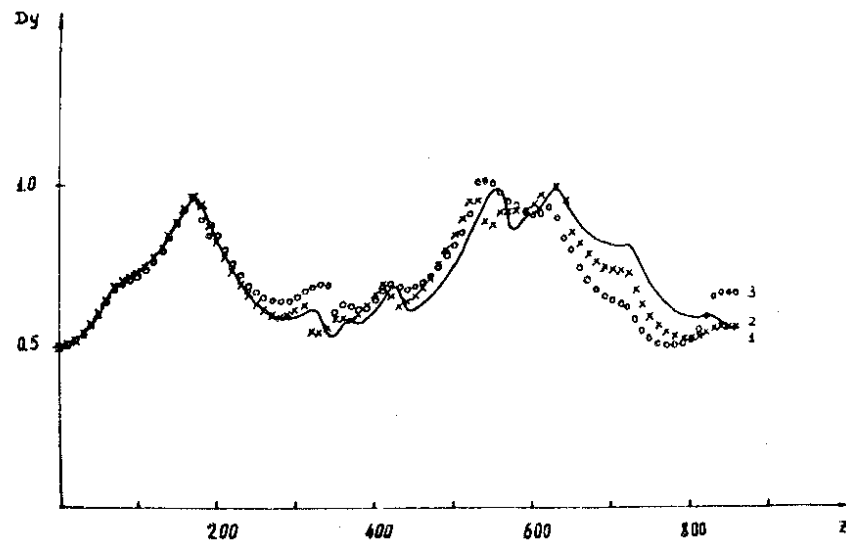


Рис.3. Зависимость среднеквадратичного размера D_y пучка от продольной координаты z . Обозначения те же, что и на рис. 1.

нитными полями, поэтому эффекты, обусловленные нелинейностью собственных полей пучка, исследовались методом укрупненных частиц.

3. РАСЧЕТ КАНАЛА В МОДЕЛИ УКРУПНЕННЫХ ЧАСТИЦ

В принятой нами модели в качестве укрупненных частиц выбирались бесконечные вдоль оси z равномерно заряженные цилиндры кругового сечения. Подобная модель использовалась ранее в работах /5,16/. Начальные условия для укрупненных частиц задавались таким образом, чтобы система невзаимодействующих частиц была близка к стационарной, соответствующей а/ микроканоническому и б/ гауссову распределению в четырехмерном фазовом пространстве.

В случае "а" численное значение радиуса a_0 укрупненной частицы, введенного для устранения нефизической расходимости силы взаимодействия при сближении частиц, и количество n укрупненных частиц подбирались таким образом, чтобы при равномерной расстановке частиц по сечению пучка обеспечить линейный закон нарастания напряженности поля по радиусу. Выбранные для расчета параметры $a_0/a = 0,1$ и $n=132$ дают точность вычисления электрического поля цилиндра не хуже $10^{a_0/16}$.

Согласование начальных условий для системы уравнений /1/ с начальными условиями для частиц достигалось вычислением по данной совокупности частиц моментов второго порядка по формулам типа:

$$\overline{a\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \beta_i, \quad /10/$$

где a и β - любая поперечная координата или скорость частицы.

Сравнение результатов расчетов среднеквадратичных размеров пучка при отсутствии кулоновского взаимодействия между частицами, полученных методом укрупненных частиц и методом моментов, показала их совпадение с относительной погрешностью $\sim 10^{-3}$.

Методом укрупненных частиц было исследовано влияние пространственного заряда на среднеквадратичные размеры пучка, транспортируемого в канале с выбранными параметрами. Графики зависимости размеров от продольной координаты z для случаев "а" микроканонического и "б" гауссова распределения частиц в фазовом пространстве приведены на рисунках 2,3. В этих расчетах начальные значения моментов второго порядка примерно совпадали со значениями моментов для уравнений /1/. Различие в выходных характеристиках пучка, полученных двумя разными методами, обусловлено следующими причинами. В случае "а" это различие связано с малым числом укрупненных частиц, что искажает линейный характер собственных полей пучка. В случае "б" собственные поля пучка нелинейны в силу распределения /2/.

Программа позволяет симметризовать пучок на выходе квадрупольного дублета после первого поворотного магнита. Однако это не представляет большого интереса, поскольку из-за нелинейности кулоновских сил симметризация по огибающим не обеспечивает симметризации распределения плотности заряда. Поэтому такая симметризация в среднем проводилась только на выходе второго поворотного магнита, что облегчало выбор начальных условий на входе в банчер.

Контроль точности расчетов производился по интегралу энергии. Относительная погрешность в вычислении этого инварианта не превышала 1%. Характерное время просчета данного участка канала методом укрупненных частиц при шаге интегрирования $\Delta z = 1$ см составляло 1 час 25 минут на ЭВМ БЭСМ-6.

Результаты расчетов с распределениями, дающими различные начальные пространственные дисперсии / $\sigma_2 = 0,57$ см и $\sigma_1 = 0,42$ см /, приведены на рисунках 4,5.

Поведение среднеквадратичных огибающих пучка, полученных методом моментов и методом укрупненных частиц, совпадает /см. рис. 2, 3/, количественное отличие среднеквадратичных размеров не превышает 30%. Выбранные параметры элементов канала обеспечивают проводку пучков с изученными распределениями частиц

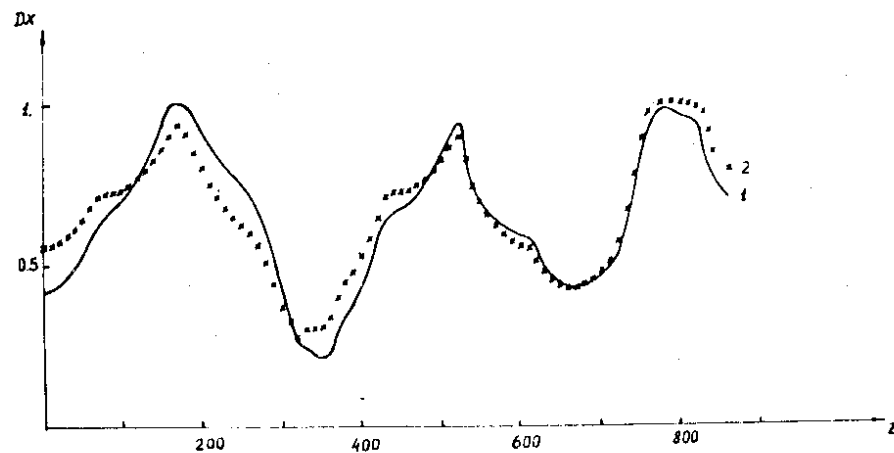


Рис.4. Зависимость среднеквадратичного размера D_x пучков с гауссовым распределением частиц в фазовом пространстве от продольной координаты z . Кривая 1 - начальная пространственная дисперсия $\sigma_1 = 0,42$ см, 2 - $\sigma_2 = 0,57$ см.

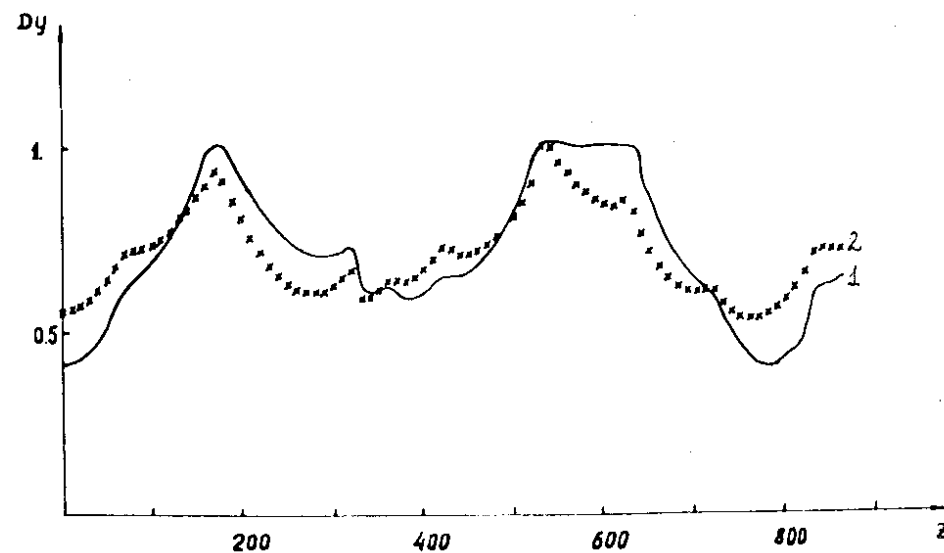


Рис.5. Зависимость среднеквадратичного размера D_y пучков с гауссовым распределением частиц в фазовом пространстве от продольной координаты z . Кривая 1 - начальная пространственная дисперсия $\sigma_1 = 0,42$ см, 2 - $\sigma_2 = 0,57$ см.

в фазовом пространстве без потерь. Изменение выходных параметров пучка в каждом конкретном случае достигается вариацией градиентов магнитного поля последнего квадрупольного и индукции поля в последнем соленоиде /рис. 6/.

В данной работе остались неучтенными следующие эффекты:

1/ немонахроматичность пучка и ее влияние на выбор параметров канала, дающих минимальное искажение фазового портрета,

2/ нелинейности фокусирующих полей и краевые эффекты.

Эти эффекты, на наш взгляд, следует рассматривать на последней стадии расчета канала совместно с учетом работы банчера.

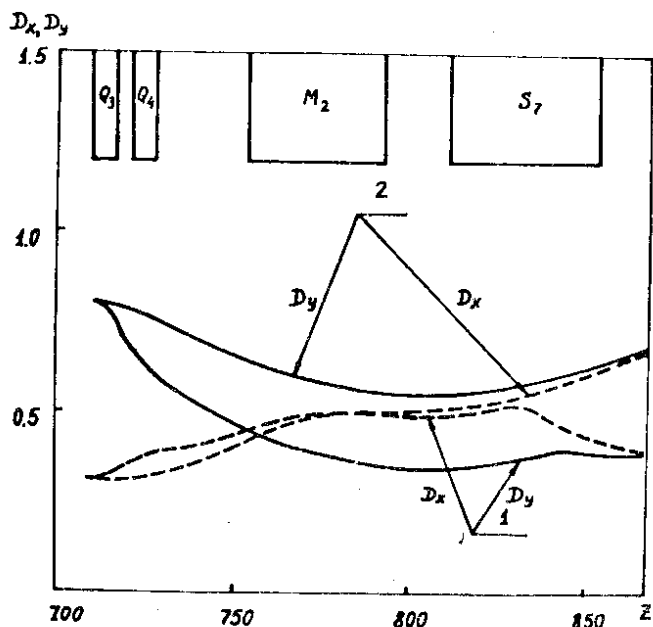


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичных размеров D_x, D_y пучка от продольной координаты z при различных значениях параметров последнего квадрупольного дублета и последнего соленоида;
кривые 2 - $G_3 = -82,19$ Э/см, $G_4 = -72,27$ Э/см, $B_z = 5500$ Э.
кривые 1 - $G_3 = -400$ Э/см, $G_4 = 276,7$ Э/см, $B_z = 7957$ Э.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chasman R. Proc. of the 1968 Proton Linear Accelerators Conference, I, BNL 50120 (C-54), p.372.
2. Taylor C.S., Davies A.J., P. Tanguy P. Proc. of the 1966 Linear Accelerator Conf., Los Alamos, p.48.
3. Martini M., Prome M. В сб.: Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Ереван, 1969, т.1. Изд-во АН АССР, Ереван, 1970, с.223.
4. Капчинский И.М. В сб.: Труды четвертого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 1974, т. 1, "Наука", М., 1975, с. 114.
5. Термен Е.Л., и др. Препринт ИТЭФ-91, М., 1973.
6. Kuznetsov V.S. e.a. Proc. of the 8th Int. Conf. on High Energy Accelerator, CERN, 1971, p.384.
7. Lapostolle P.M. Proc. of Particle Accelerator Conf. Chicago, IEEE Trans., 1971, NS-18, 3, p.1101.
8. Sacherer R. Proc. of Particle Accelerator Conf. Chicago, IEEE Trans., 1971, NS-18, 3, p.1105.
9. Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А., Шевцов В.Ф. ОИЯИ, Р9-10985, Дубна, 1977.
10. Дымников А.Д., Перельштейн Э.А. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 148(3), p.567; ОИЯИ, Р9-1020, Дубна, 1977. ОИЯИ, Р9-10620, Дубна, 1977.
11. Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, Р9-11337, Дубна, 1978.
12. Мурин Б.П. В сб.: Труды четвертого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 1974, т. 1, "Наука", М., с. 123.
13. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа, ФМ, М., 1963.
14. Силин И.Н. ОИЯИ, 11-3362, Дубна, 1967.
15. Авраменко М.И. и др. В сб.: Труды третьего всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972, т. 1, "Наука", М., с. 261.
16. Перельштейн Э.А., Шевцов В.Ф., Щинов Б.Г. ОИЯИ, Р9-10060, Дубна, 1976.
17. Кузнецов В.С., Трубников Г.И. Препринт НИИЭФА, к-0361, Ленинград, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1978 года.