Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики

РЕФЕРАТИВНЫЙ
ОТДЕЛ 2004
LIBRARY

ITEP-4-04

4 – 04

Воробьёв Игорь Александрович

Компоновка и основные параметры канала согласования пучка между структурами с ПОКФ и суперпериодической (СПКФ) в начальной части ускорительного комплекса ТВН ИТЭФ

Москва 2004

УДК 621.3.038.625 М-16

КОМПОНОВКА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАНАЛА СОГЛАСОВАНИЯ ПУЧКА МЕЖДУ СТРУКТУРАМИ С ПОКФ И СУПЕРПЕРИОДИЧЕСКОЙ (СПКФ) В НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТВН ИТЭФ: Препринт ИТЭФ 04-04

И.А.Воробьёв . М., - 2004 – 37с.

Представлены результаты разработки различных вариантов компоновки согласующего канала между структурами с ПОКФ и суперпериодической (СПКФ) для ускорительного комплекса ТВН ИТЭФ и расчёты динамики пучка в согласующем канале. Расчёты проведены с использованием матричной программы TTRACE-3D и программы численного моделирования динамики пучка методом крупных частиц с учётом кулоновских эффектов. Даётся краткий сопоставительный анализ вариантов. Сформулированы основные требования к рекомендации для разработки элементов согласующего канала.

THE ARRANGEMENTS AND MAIN PATAMETERS OF THE BEAM MATCHING CHANNAL BETWEEN RFQ AND SPA STRUCTURES IN THE INITIAL PART OF ACCELERATOR COMPLEX TWAC ITEP. Preprint ITEP 04-04.

I.A.Vorobyov . M., - 2004 – 37p.

The results of developing of the different variants of the matching channals arrangements between RFQ and superperiodical (SPA) structures for accelerator complex TWAC ITEP and the calculations of beam dynamics in the matching channal are presented. The calculations were carried out with use of matrix program TRACE-3D and program for beam dynamics simulation with taking into account coulomb effects. The brief comparative analysis of the variants is presented. The main requirements and recomendations for developing of the matching channal elements were formulated.

Рис. 35., список лит. 7 наим.

Введение

При стыковке разнородных каналов возникает задача согласования пучка с учётом особенностей динамики частиц в стыкуемых структурах. Для ускорительного комплекса ТВН ИТЭФ в связи с низкой энергией пучка ионов (≈1,6 МэВ/нуклон, зарядовое число 10, массовое число 30) на переходе между структурами с ПОКФ и суперпериодической СПКФ [1] задача согласования усложняется по сравнению с хорошо сформированным протонным пучком при высоких энергиях и требует выбора такой компоновки канала, которая обеспечивает наименьший радиус пучка в согласующем канале при практически достижимых градиентах магнитного поля в квадруполях. Отсутствие кроссовера пучка на входе в СПКФ также усложняет задачу согласования, так как требует обеспечения сходимости пучка под достаточно большими углами и приводит к увеличению апертуры канала. Поэтому при выборе основных параметров канала оценивались максимальная индукция магнитного поля на полюсе, чувствительность канала к отклонениям начальных параметров от номинальных для данного тока, дефокусирующему действию банчера и кулоновским эффектам. На данном этапе разработки задача поиска оптимальной компоновки канала проводилась для преобразования параметров пучка от согласованных выходных условий в ПОКФ до согласованных начальных условий в СПКФ. На выходе ПОКФ при этом полагалось общепринятое окончание канала в момент кроссовера при пересечении серединой сгустка выходного сечения электродов. Задача шестимерного согласования пучка решалась по частям. На первом этапе решалась задача четырёхмерного поперечного

согласования для определения необходимых длин квадруполей при практически достижимых градиентах магнитного поля. На последующих этапах были рассмотрены три варианта структурной схемы согласующего канала, в каждой из которых получено шестимерное согласование по программе TRACE-3D, проведена серия расчётов для определения чувствительности каналов к отклонению параметров от номинальных и проведена проверка полученных результатов методом крупных частиц с применением программы PROTON [2].

Согласованные условия для пучка в ПОКФ и СПКФ и предварительная оценка параметров согласующего канала

Для поиска согласованных начальных условий в связи со спецификой СПКФ (характером ускоряюще-фокусирующих полей и, как следствие, отсутствием кроссовера на входе канала) потребовалось усовершенствовать программу ABC [3]. В программу ABC добавлена возможность поиска периодических решений уравнений для огибающих (функций Флоке канала транспортировки) по произвольным, задаваемым на сетке, распределениям жёсткости и фактора дефокусировки вдоль оси канала. Применены новые алгоритмы и подпрограммы поиска периодических решений, существенно ускоряющие расчёты, особенно при поиске нестандартных согласованных начальных условий. По сравнению с предыдущими версиями, добавлена возможность подбора амплитуды жёсткости фокусировки по заданному характеристическому показателю канала для всех типов каналов, реализованных в программе, в том числе при сеточном способе определения полей.

Распределение заданного исходного градиента поперечной компоненты электрического поля на периоде СПКФ представлено на Рис.1 Период фокусировки равен 45.31 см.

Для определения продольных параметров сгустка проведено численное моделирование динамики пучка по программе PROTON для тока 0 мА. Поперечный нормализованный эмиттанс пучка на входе в ПОКФ принят равным 0,1703 смрад. На выходе ПОКФ получены следующие

параметры: $\Delta p/p_s=\pm 9{,}9\cdot 10^{-3}$; $\Delta\varphi_{ct}=\pm 15{,}9^0$; продольный эмиттанс составляет $2{,}96\cdot 10^{-4}$ кэВ·град.

Коэффициент сжатия сгустка η_φ определён по методике работы [4]:

$$\eta_\varphi = \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\varphi_f},$$

где $\Delta\varphi_i$ – начальная фазовая протяжённость сгустка, $\Delta\varphi_f$ – конечная фазовая протяжённость сгустка. Оптимальная величина коэффициента сжатия определяется соотношением [4]:

$$\eta_\varphi^{opt} = \sqrt{\frac{\Omega_f}{\Omega_i}},$$

где Ω_i - частота продольных колебаний в структуре с ПОКФ, Ω_f - частота продольных колебаний в структуре СПКФ. Частота продольных колебаний Ω определяется соотношением [5]:

$$\Omega = \omega\sqrt{W_\lambda \left|tg\varphi_s\right| / 2\pi\beta\gamma^3}, \qquad (1)$$

где ω - рабочая частота, φ_s – синхронная фаза, β - относительная скорость, γ - Лоренц-фактор частицы. Величина удельного ускорения W_λ в поле стоячих волн определяется соотношением [5]:

$$W_\lambda = \left(eE_0T\lambda / W_0\right)\cos\varphi_s, \qquad (2)$$

где e – заряд частицы, E_0 – среднее поле на оси ускорителя, T – фактор пролётного времени, λ - длина волны ВЧ поля, W_0 – энергия покоя частицы.

Мгновенная величина темпа ускорения определяется соотношением [5]:

$$\omega_0 = dW_s / dz_s = eE_0T\left(\beta\right)\cos\varphi_s,$$

где W_s и z_s – соответственно текущие значения энергии и координаты синхронной частицы, $T(\beta)$. – зависимость фактора пролётного времени от текущего значения относительной скорости синхронной частицы. Для средней величины темпа ускорения $<\omega_0>$ справедливо соотношение:

$$<\omega_0> = \Delta W / \Delta z = e < E_0T\left(\beta\right)\cos\varphi_s >.$$

С учётом этого соотношения и формулы (2) среднее значение удельного ускорения $<W_\lambda>$ можно записать в виде:

$$<W_\lambda> = <\omega_0> \lambda / W_0 .$$

Тогда в соответствии с формулой (1) среднюю частоту колебаний частицы можно записать в виде:

$$<\Omega> = \omega\sqrt{<\omega_0> \lambda \left|tg\varphi_s\right| / 2\pi\beta\gamma^3 W_0} . \qquad (3)$$

С учётом формулы (3) и при прочих равных условиях (β, γ, W_0) для оптимального коэффициента сжатия η_φ можно записать приближённое выражение:

$$\eta_\varphi^{opt} \approx \left(\frac{\omega_f \sqrt{<\omega_0>_f \lambda_f \left|tg\varphi_s\right|_f}}{\omega_i \sqrt{<\omega_0>_i \lambda_i \left|tg\varphi_s\right|_i}} \right)^{1/2} . \qquad (4)$$

Поскольку структуры с ПОКФ и СПКФ работают на одной и той же частоте ВЧ поля $\omega_i = \omega_f$=81,36 МГц, то формула (4) сводится к виду:

$$\eta_\varphi^{opt} \approx \sqrt{\sqrt{\frac{<\omega_0>_f \left|tg\varphi_s\right|_f}{<\omega_0>_i \left|tg\varphi_s\right|_i}}} . \qquad (5)$$

Модуль синхронной фазы φ_s на входе структуры СПКФ равен 30^0, а на выходе ПОКФ составляет 25^0. Средний темп ускорения $<\omega_0>_f$ на единицу заряда частицы в СПКФ равен 2,8 МВ/м [1]. Средний темп ускорения на единицу заряда частицы в конце ПОКФ составляет по данным таблицы параметров ПОКФ $<\omega_0>_f$=(46,7572-45,0933)МэВ/(10*e*(106,13+105,18)мм)= 1,6639МэВ/(10е211,31мм)=1,6639МВ/2113,1мм=1,6639МВ/2,1131м= 0,78742 МВ/м≈0,787 МВ/м.

Из этих данных следует, что сепаратриса на входе в СПКФ превышает по размерам сепаратрису на выходе ПОКФ. Оптимальный коэффициент сжатия в соответствии с формулой (5) при этих условиях составляет

$$\eta_\varphi^{opt} = \sqrt{\sqrt{\frac{2,8 \cdot tg30^0}{0,787 \cdot tg25^0}}} \approx \sqrt{\sqrt{4,405}} \approx \sqrt{2,1} \approx 1,45$$

Коэффициент сжатия длины сгустка в продольном фазовом пространстве η_φ на данном этапе расчётов принят равным 1,45. В структурной схеме 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя дополнительно проведена оптимизация для η_φ=2,0.

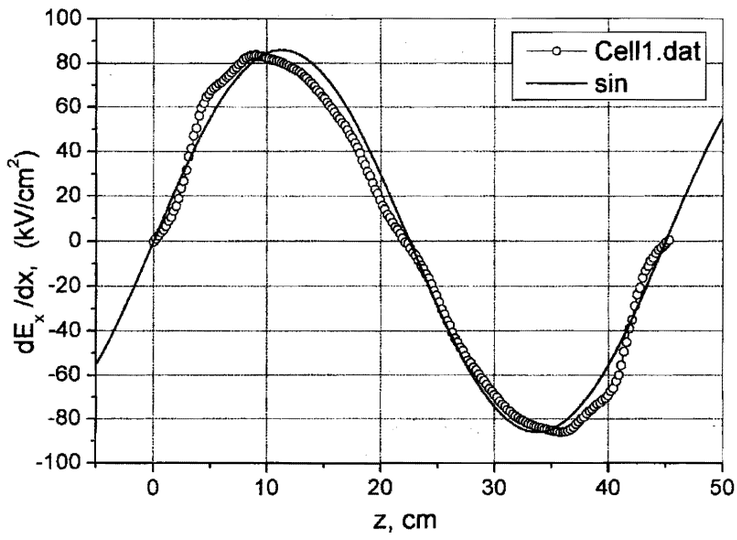

Рис.1. *Зависимости градиента напряжённости электрического поля на периоде СПКФ.*

Для показанных на Рис.1 данных и тока пучка 0 мА в таблице 1 представлены полученные с применением усовершенствованной программы АВС согласованные значения нормированной огибающей ρ и её производной dρ/dτ для каждой из поперечных плоскостей на выходе ПОКФ и входе СПКФ, Данные в таблице 1 приведены для СПКФ при значении начальной фазы ВЧ поля 0^0. Зависимости нормированных огибающих и их производных в СПКФ для трёх значений фаз ВЧ поля – 30^0, 0^0 и 30^0 показаны на Рис.2 и Рис.3.

Таблица 1. Согласованные параметры пучка на выходе ПОКФ и входе СПКФ.

	Нормированные огибающие				Параметры Твисса			
	Плоскость X		Плоскость Y		Плоскость X		Плоскость Y	
	ρ	dρ/dτ	ρ	dρ/dτ	β,m/rad	α	β,m/rad	α
ПОКФ	0.7620	0	1.2872	0	0.1238	0	0.3532	0
СПКФ	0,9776	1,1563	0,9837	-1,172	0.4330	-1.130	0.4385	1.1525

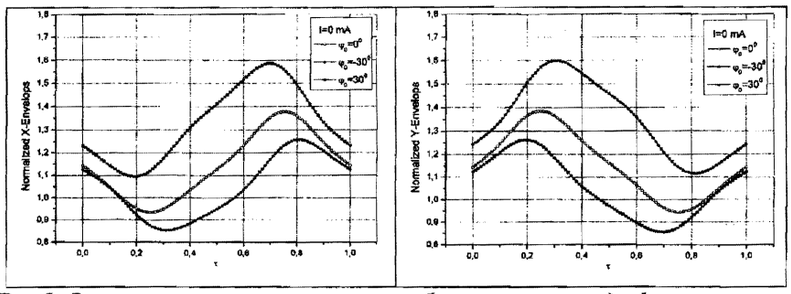

Рис.2. *Зависимости нормированных огибающих на периоде фокусировки в СПКФ.*

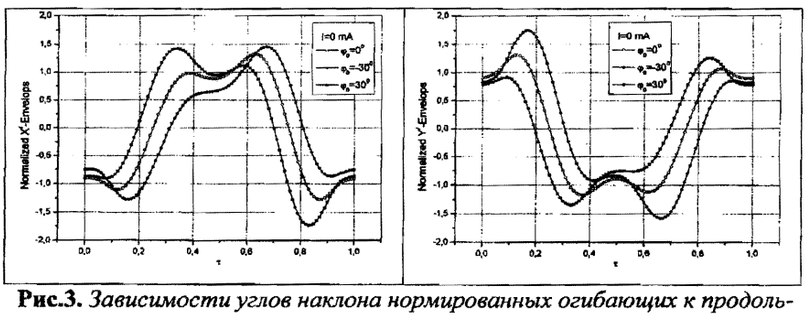

Рис.3. *Зависимости углов наклона нормированных огибающих к продольной оси канала на периоде фокусировки в СПКФ.*

Как видно из Рис.2 и Рис.3, имеет место динамическая зависимость параметров пучка от фазы ВЧ поля. Характеристический показатель канала в данных расчётах изменяется от 0,898 до 1,310 рад ($51{,}5^0 \div 75{,}1^0$). Для

анализа влияния нелинейных эффектов на динамику пучка в ускорителе ТВН могут быть применены методы семиинвариантов и группового анализа динамики пучка [7], требующие проведения дополнительных исследований и затрат счётного времени.

Как известно [5], в общем случае для четырёхмерного согласования необходимо, как минимум, четыре квадруполя. Для предварительных расчётов была усовершенствована и адаптирована на PC программа PREINJ, обладающая наилучшими из доступных возможностями оптимизации [6]. Ускорение времени оптимизации обеспечивается разработанным функционалом оптимизации, применением и проведённой адаптацией оптимизирующей программы MINUIT из библиотеки CERN (D506).

С помощью программы PREINJ получены параметры для четырёх квадруполей с промежутком дрейфа посередине, представленные в таблице 2. Каждый из квадруполей окружён технологическими дрейфовыми промежутками по 20 мм. Конструктивная длина банчера принята равной 100 мм. Как поперечное, так и продольное согласования осуществлялись к началу СПКФ.

Таблица 2. Предварительные параметры квадруполей.

Квадруполь	1	2	3	4
Длина, (см)	10	10	10	10
Градиент, (Тл/м)	-20.01	46.42	-39.38	17.36

Полученные значения обеспечивают величину коэффициента согласования k, равную 1,003 по обеим плоскостям. Коэффициент согласования k вычислялся по методике Капчинского [5]

$$k = 1 + \sqrt{c^2 - 4},$$

где

$$c=\frac{\rho_0^2}{\sigma_0^2}+\frac{\sigma_0^2}{\rho_0^2}+\left(\rho_0\frac{d\sigma_0}{d\tau}-\sigma_0\frac{d\rho_0}{d\tau}\right)^2\Big|_{\tau=0}.$$

Здесь ρ_0 и σ_0 - значения согласованных огибающих для двух каналов в месте стыковки, нормированные на одинаковую длину периода фокусировки. Уравнения для нормированных огибающих ρ_x и ρ_y имеют вид [5]

$$\frac{d^2\rho_x}{d\tau^2}+Q_x(\tau)\cdot\rho_x-\frac{1}{\rho_x^3}-\frac{a}{\rho_x+\rho_y}=0$$

$$\frac{d^2\rho_y}{d\tau^2}+Q_y(\tau)\cdot\rho_y-\frac{1}{\rho_y^3}-\frac{a}{\rho_x+\rho_y}=0.$$

Здесь $Q(\tau)$ – функция, определяемая фокусирующими и дефокусирующими полями в плоскостях x и y соответственно; a - параметр, определяемый кулоновским полем пучка с микроканоническим распределением. В данном обозначении параметр a имеет вид

$$a=\frac{4S}{(\beta_0\gamma_0)^2}\cdot\frac{I_{peak}}{I_0},$$

где S – период фокусировки, β_0 - относительная скорость синхронной частицы, γ_0 - Лоренц-фактор, I_0 – характеристический ток пучка (I_0 = $3{,}13\cdot10^7$m/z A, где m – массовое число, z – зарядовое число), I_{peak} – пиковый ток пучка, $\tau=l/S$ (l – продольная координата в реальном масштабе). Если известно периодическое решение $\varphi(\tau)$ уравнений для огибающих, то характеристический показатель канала (набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки) μ вычисляется по формуле [5]

$$\mu=\int_0^1\frac{d\tau}{|\varphi(\tau)|^2}.$$

Нормированные огибающие ρ_x и ρ_y связаны с реальными огибающими $R_{x,y}$ и углами наклона огибающих $R'_{x,y}$ соотношениями

$$\rho_{x,y} = \frac{R_{x,y}}{\sqrt{F_0}}$$

$$\frac{d\rho_{x,y}}{d\tau} = R'_{x,y} \frac{S}{\sqrt{F_{0_{x,y}}}},$$

$$F_{0_{x,y}} = \frac{SV_{x,y}}{\beta_0 \gamma_0},$$

где $V_{x,y}$ – нормализованные эмиттансы пучка.

Полезно отметить взаимосвязь параметров ρ и $d\rho/d\tau$ с общепринятыми параметрами в форме Твисса. Часто используемые уравнения эллипсов пучка на фазовых плоскостях XX' и YY' имеют вид [6]

$$\gamma_x X^2 + 2\alpha_x XX' + \beta_x \left(X'\right)^2 = \varepsilon_x$$

$$\gamma_y Y^2 + 2\alpha_y YY' + \beta_y \left(Y'\right)^2 = \varepsilon_y,$$

где $\varepsilon_{x,y}$ – площади эллипсов, делённые на π. По условию нормировки

$$\beta_{x,y}\gamma_{x,y} - \alpha_{x,y}^2 = 1.$$

Максимальный угловой полуразмах пучка – X'_m, Y'_m и пространственная координата наиболее удалённой точки пучка – X_m, Y_m связаны с параметрами эллипса соотношениями

$$X_m = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x}, \qquad Y_m = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y}$$

$$X'_m = \sqrt{\varepsilon_x \gamma_x}, \qquad Y'_m = \sqrt{\varepsilon_y \gamma_y}.$$

Площадь эллипса $\varepsilon_{x,y}$ связана с величиной нормализованного эмиттанса $V_{x,y}$ соотношением

$$V_{x,y} = \beta_0 \gamma_0 \varepsilon_{x,y}$$

Соответственно величины огибающих пучка связаны с параметрами Твисса следующими соотношениями:

$$\alpha_{x,y} = -\rho_{x,y}\frac{d\rho_{x,y}}{d\tau} = -\frac{R_{x,y}R'_{x,y}}{\varepsilon_{x,y}},$$

$$\beta_{x,y} = S\rho^2_{x,y} = \frac{R^2_{x,y}}{\varepsilon_{x,y}},$$

$$R_{x,y} = \sqrt{\beta_{x,y}\varepsilon_{x,y}},$$

$$R'_{x,y} = -\alpha_{x,y}\frac{\sqrt{\varepsilon_{x,y}}}{\sqrt{\beta_{x,y}}}$$

Как показали предварительные расчёты по программе PREINJ, дрейфовый промежуток между двумя парами квадруполей способствует снижению градиента во втором, наиболее критичном, квадруполе до практически достижимой величины. Однако, полученные значения градиентов около 40-46 Т/м оказались несколько больше желаемых по техническим и эксплуатационным условиям. При радиусе апертуры 2,0 см градиент магнитного поля 50 Т/м (0,5 Т/см) приводит к величине индукции магнитного поля на полюсе 1,0 Т. Величина индукции насыщения для доступных материалов не превышает 1,2-1,6 Т. С учётом полученных результатов в параметры квадруполей внесены коррективы в сторону увеличения длины. Это также улучшает продольное распределение градиента поля в квадруполях.

В дальнейшем шестимерное согласование с учётом дефокусирующего действия банчера проводилось по программе TRACE-3D. Как показали расчёты, коэффициент сжатия фазовой длины сгустка 1,45 достигается на расстоянии ≈520 мм при эффективном напряжении на банчере ≈470 кВ. В соответствии с этим и ранее полученными предварительными расчётами по программе PREINJ были рассмотрены следующие варианты компоновки.

Структурная схема с 4 квадруполями и банчером

Схема 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя

В данном варианте (2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя) с применением программы TRACE-3D было получено надлежащее согласование пучка. Результаты показаны на Рис.4 для тока пучка 0 мА и на Рис.5 для тока пучка 40 мА при одних и тех же параметрах Твисса на входе и выходе канала.

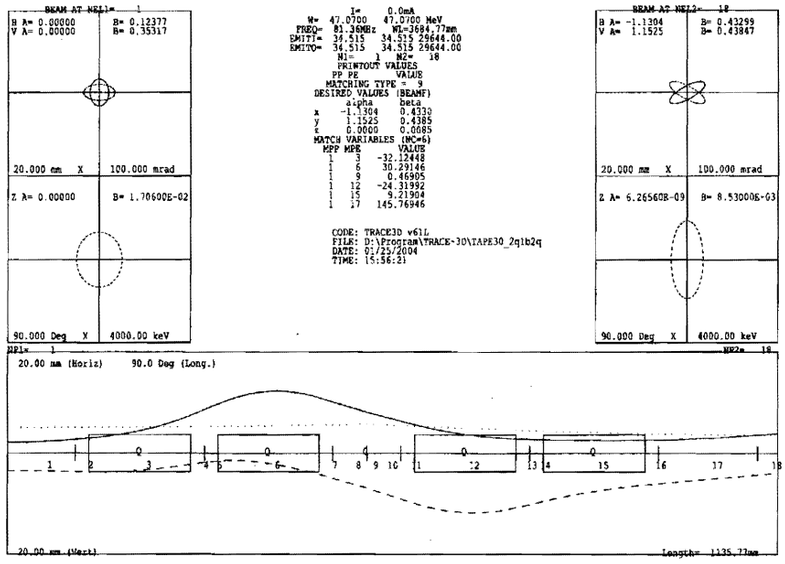

Рис.4. *Результаты оптимизации согласующего канала для тока пучка 0 мА.*

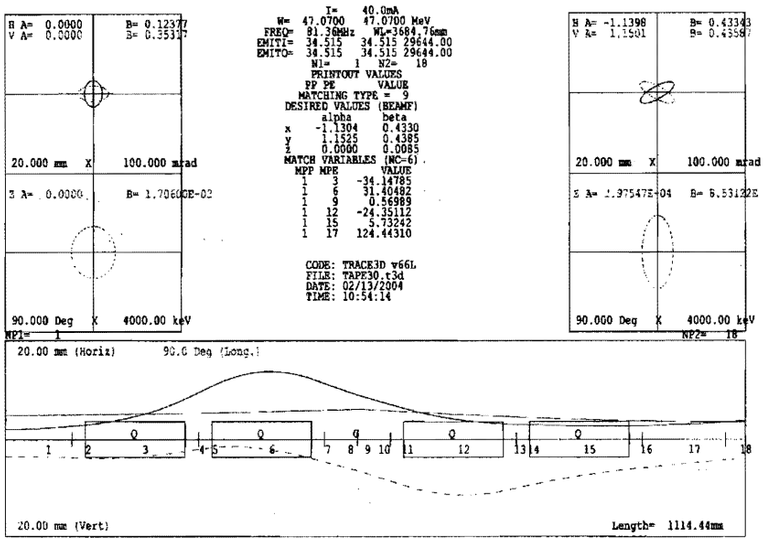

Рис.5. *Результаты оптимизации согласующего канала для тока пучка 40 мА.*

Необходимые для согласования параметры квадруполей и значения эффективного напряжения в бенчере представлены в таблице 3 для токов пучка 0 и 40 мА. Каждый квадруполь окружён с двух сторон технологическими промежутками длиной по 20 мм без дополнительных дрейфовых промежутков между ними. Расстояние от конца электродов с ПОКФ в месте кроссовера пучка до первого квадруполя 100 мм. Коэффициент сжатия 1,45 достигается при эффективном напряжении на банчере 469 кВ длиной 100 мм на расстоянии 196 мм от последнего квадруполя без учёта краевого технологического промежутка. Частота ВЧ поля в банчере принята равной частоте ВЧ поля в ПОКФ (81.36 МГц). Общая длина канала ≈1140 мм. Радиус апертуры канала равен 20 мм.

Другие варианты расположения банчера и длин квадруполей

Ниже на Рис.6 - Рис.7 показаны результаты расчётов для других возможных вариантов размещения квадруполей и банчера в канале с минимально необходимым числом квадруполей (4 штуки), а на Рис.8 - Рис.9

представлены результаты оптимизации в схеме 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя с длинами квадруполей 25 и 30 см.

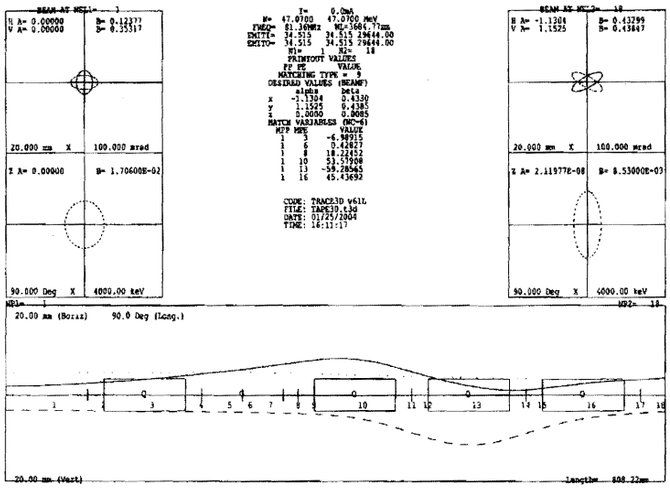

Рис.6. *Результаты расчётов согласующего канала для схемы 1 квадруполь + банчер + 3 квадруполя.*

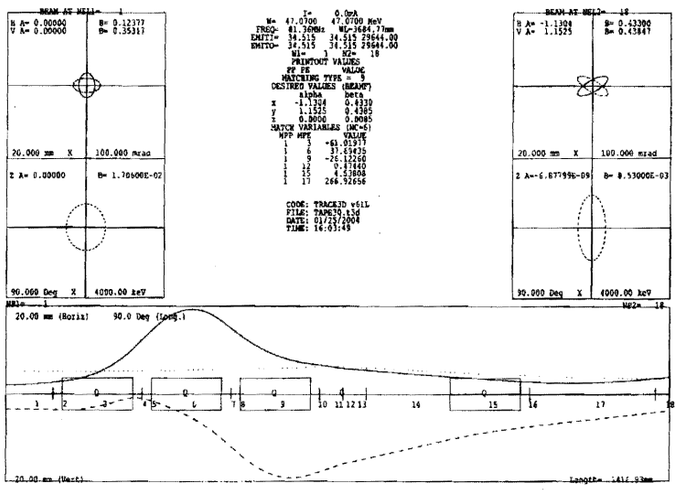

Рис.7. *Результаты расчётов согласующего канала для схемы 3 квадруполя + банчер + 1 квадруполь.*

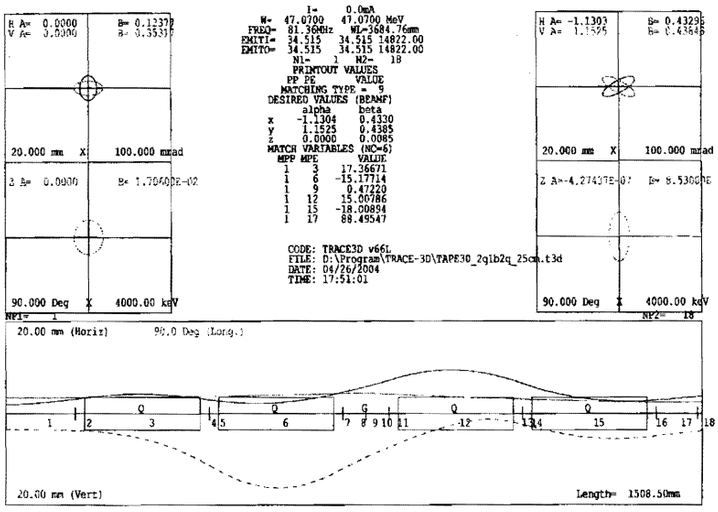

Рис.8. *Результаты расчётов согласующего канала для схемы 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя для длин квадруполей 25 см.*

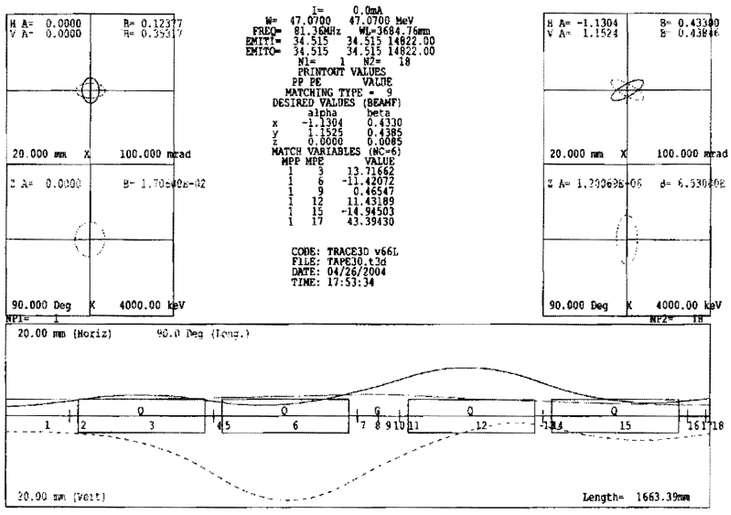

Рис.9. *Результаты расчётов согласующего канала для схемы 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя для длин квадруполей 30 см.*

Схемы каналов 1 квадруполь + банчер + 3 квадруполя (Рис.6) и 3 квадруполя + банчер + 1 квадруполь (Рис.7) требуют увеличения градиентов до ≈60 Т/м. Как видно из Рис.4 - Рис.9, схема канала 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя (Рис.4) обеспечивает наименьший радиус пучка при наименьших градиентах магнитного поля в квадруполях. Увеличение длин квадруполей (Рис.8 - Рис.9) приводит к нежелательному увеличению максимального размера пучка в согласующем канале.

Исследование влияния дефокусировки банчера и кулоновских эффектов в схеме 2 квадруполя + банчер +-2 квадруполя по прошрамме TRACE-3D

В этой схеме для оценки влияния дефокусировки в банчере и кулоновских эффектов на конечные параметры пучка проведёны расчёты по программе TRACE-3D с выключенным ВЧ напряжением в зазоре при токе пучка 0 мА и со штатным напряжением на банчере при токе 40 мА. Расчёты проведены для согласованных при токе 0 мА параметрах квадруполей и банчера. Полученные данные показаны на Рис. 10 - Рис. 12 и в таблице 3. Результаты оптимизации для коэффициента сжатия η_φ=2,0 показаны на Рис.13 - Рис.14. Радиус апертуры канала R_a в этих вариантах равен 4,0 см. Величина индукции магнитного поля при этом достигает ≈1,0 Т. В варианте на Рис.14 технологические промежутки увеличены до 5,0 см по обеим сторонам квадруполей.

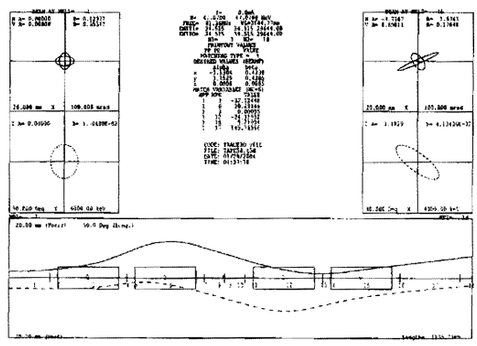

Рис.10. *Результаты расчётов динамики пучка с выключенным напряжением в банчере при токе пучка 0 мА*

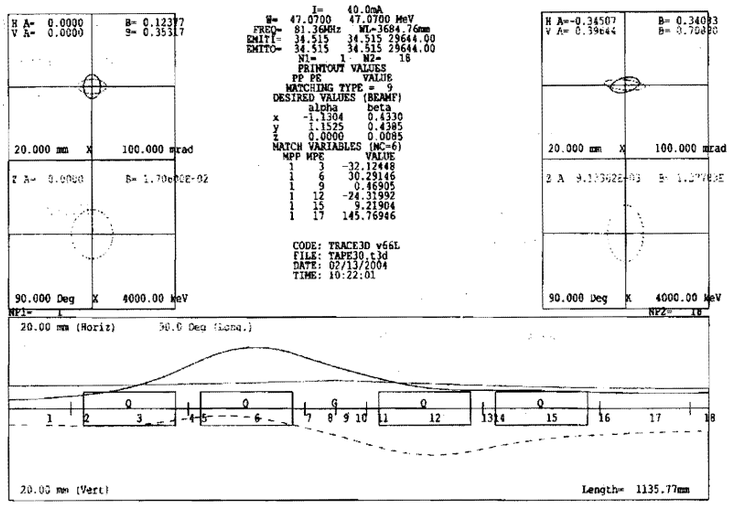

Рис.11. *Результаты расчётов динамики пучка со штатным напряжением в банчере при токе пучка 40 мА.*

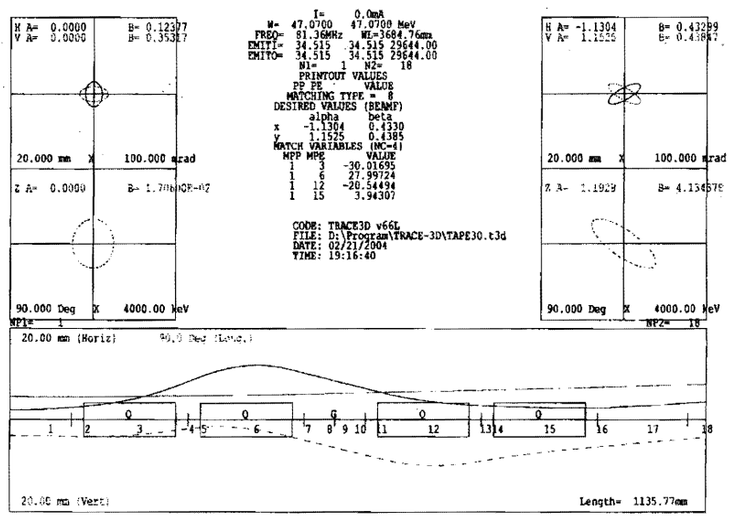

Рис.12. *Результаты оптимизации согласующего канала с выключенным напряжением в банчере при токе пучка 0 мА*

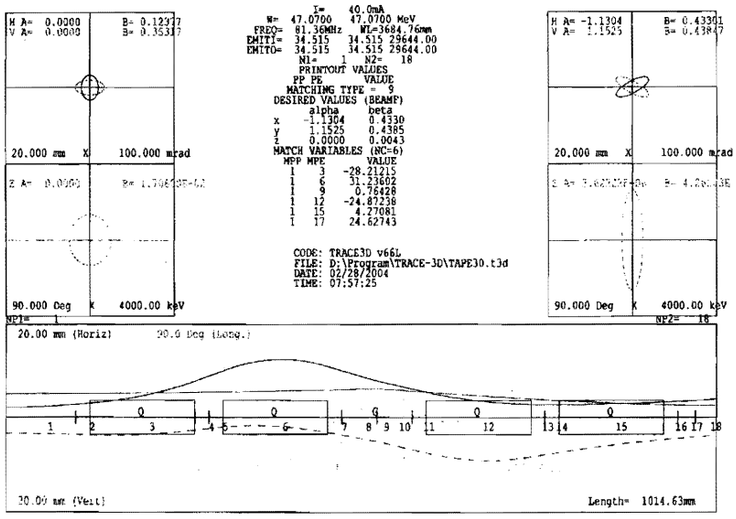

Рис.13. *Результаты оптимизации для схемы 2 квадруполя + банчер + 2 квадруполя при токе пучка 40 мА и коэффициенте сжатия η_φ=2,0.*

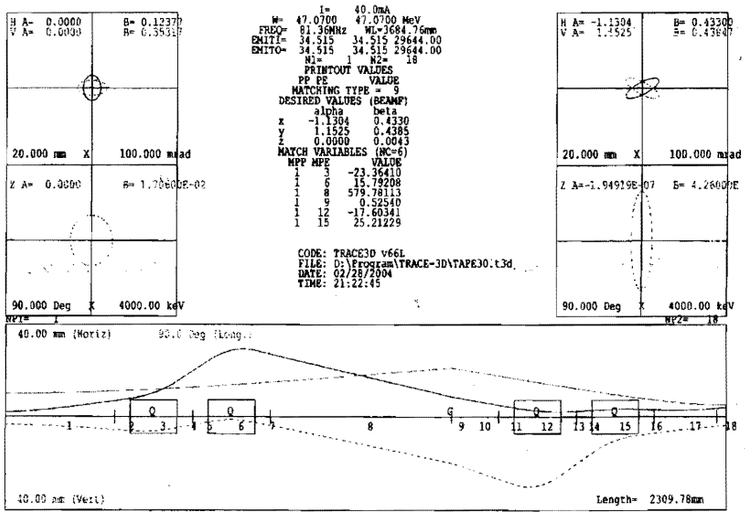

Рис.14. *Результаты оптимизации для схемы 2 квадруполя + дрейф + банчер + 2 квадруполя при токе пучка 40 мА и коэффициенте сжатия η_φ=2,0.*

Таблица 3. Параметры квадруполей и эффективное напряжение в банчере (E_0TL, МВ) по результатам оптимизации для схемы канала 2 квадруполя + банчер + .2 квадруполя.

Квадруполь	1	2	3	4	Банчер	η_φ	R_a, см
Длина, (см)	15	15	15	15	10		
Градиент, (Тл/м) для тока 0 мА	-32.12	30.29	-24.32	9.22	0.469	1.45	2.0
	-30.02	28.00	-20.54	3.94	0.0	-	2.0
Градиент, (Тл/м) для тока 40 мА	-34.15	31.40	-24.35	5.73	0.570	1.45	2.0
	-18.21	31.23	-24.87	4.27	0.764	2.0	4.0
	-23.36	15.79	-17.60	25.21	0.525	2.0	4.0

Как видно из данных таблицы 3, ток пучка 40 мА и отсутствие напряжения в банчере мало влияют на значения градиентов магнитного поля в квадруполях, но для продольного согласования при токе 40 мА требуется некоторое заметное увеличение напряжения в банчере. Как видно из Рис.4 и Рис.10 - Рис.11, при качественном соответствии ориентации эллипсов пучка на поперечных плоскостях имеет место заметное количественное различие в параметрах, обусловленных учётом дефокусирующего действия банчера впрограмме TRACE-3D. Соответствующие данные для параметров пучка представлены в таблице 4.

Численное моделирование динамики пучка по программе PROTON

Для проверки полученных по программе TRACE-3D результатов проведено численное моделирование динамики пучка по программе PROTON с использованием метода крупных частиц. Полученные результаты при эффективном напряжении в банчере 469 кэВ. показаны на Рис.19 - Рис.21 для тока пучка 0 мА, на Рис.22 – Рис.24 для тока пучка 40 мА и в таблице 5. В численном моделировании для тока пучка 0 мА использовано 1000 крупных частиц в сгустке, для тока 40 мА – 5000. Длина зазора банчера - 2,0 см. Результаты расчётов при эффективном напряжении на банчере

570 кВ и параметрах квадруполей, согласованных по программе TRACE-3D для тока пучка 40 мА показаны на Рис.25 - Рис.27 и в таблице 6. Результаты расчётов по программе PROTON получены в режиме соответствия программе TRACE-3D.

Под режимом соответствия в программе PROTON понимается такое соотношение между амплитудами радиальной дефокусирующей (E_r) и продольной ускоряющей (E_z) компонентами электрического поля в зазоре банчера, которое воспроизводит разницу в результатах, полученных в программе TRACE-3D. Как показал опытный подбор, воспроизводимость полученных по программе TRACE-3D результатов обеспечивается в программе PROTON при 4÷6-кратном увеличении отношения E_r/E_z по сравнению со значением для типичного ВЧ зазора в структуре с трубками дрейфа (Рис.15). Требуемый коэффициент сжатия сгустка 1,45 и кроссовер на продольной фазовой плоскости также воспроизводятся с хорошей практической точностью для тока 0 мА (η_φ=1,40).

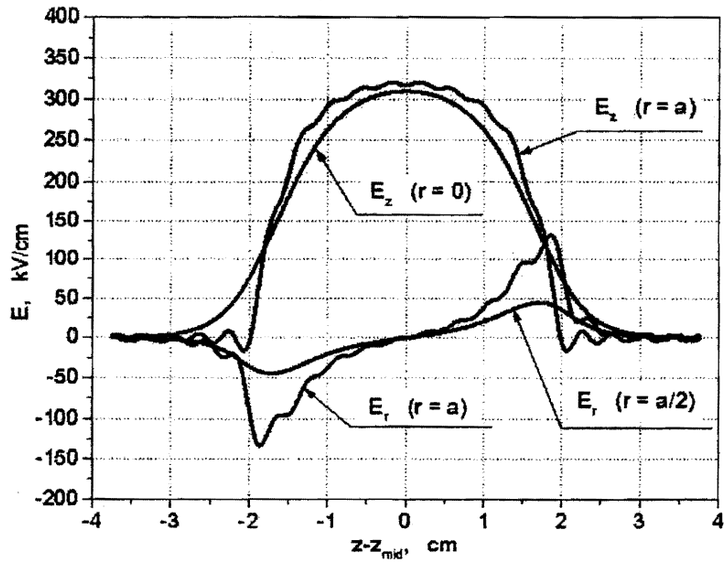

Рис.15. *Типичное распределение продольной E_z и радиальной E_r компонент поля в резонаторе с трубками дрейфа.*

В данных расчётах применены распределение поля типа меандра для продольной компоненты E_z и следующая аналитическая аппроксимация для радиальной компоненты электрического поля E_r:

$$E_r(z,r) = E_r^0 \frac{z}{l} \cdot I_1\left(\frac{r}{r_0}\right) / I_1(1),$$

где E_r^0 – максимальное значение радиальной компоненты на радиусе апертуры r_0, l – половина длины резонатора, координата z отсчитывается от середины зазора. Данная аппроксимация удобна тем, что позволяет подбирать необходимое соотношение между радиальной и продольной амплитудами поля, не рассчитывая поля в конкретном резонаторе.

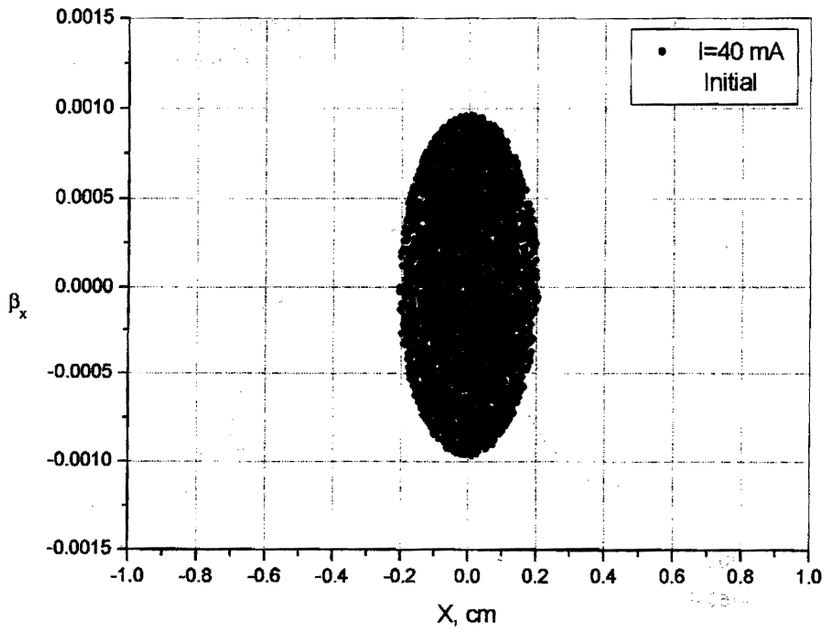

Рис.16. *Поперечный фазовый портрет пучка на входе согласующего канала.*

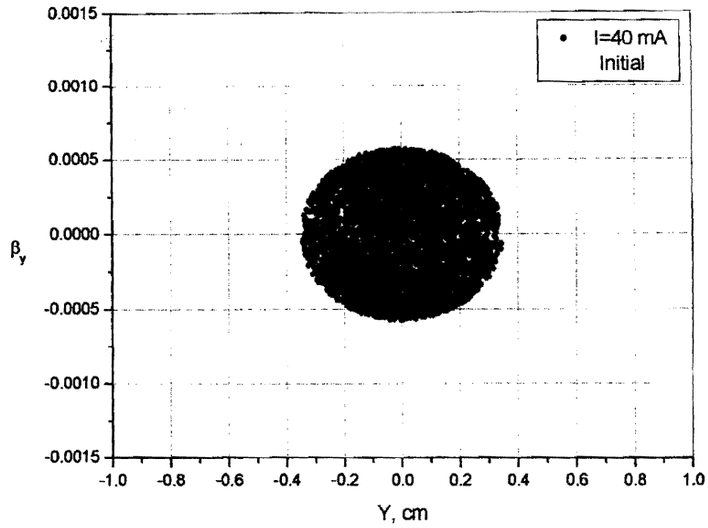

Рис.17. *Поперечный фазовый портрет пучка на входе согласующего канала.*

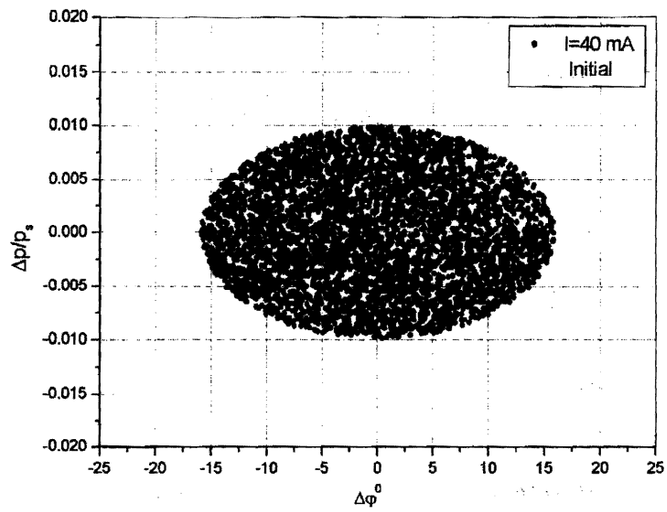

Рис.18. *Продольный фазовый портрет пучка на входе согласующего канала.*

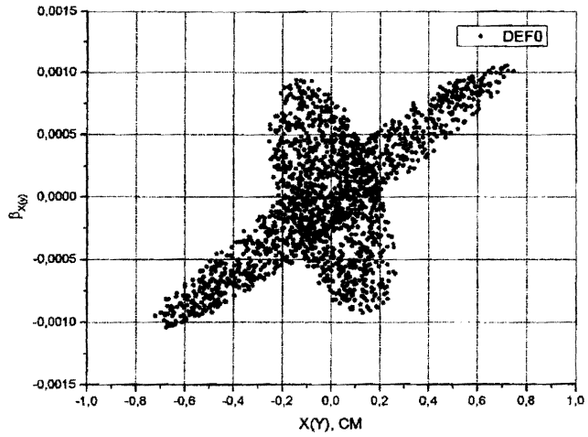

Рис.19. *Поперечные фазовые портреты пучка на выходе согласующего канала при отсутствии дефокусировки в банчере, полученные в режиме соответствия программе TRACE-3D для тока пучка 0 мА.*

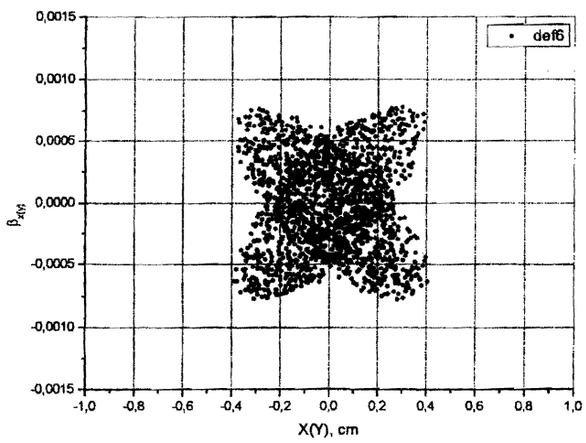

Рис.20. *Поперечные фазовые портреты пучка на выходе согласующего канала, полученные в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 469 кВ и тока пучка 0 мА.*

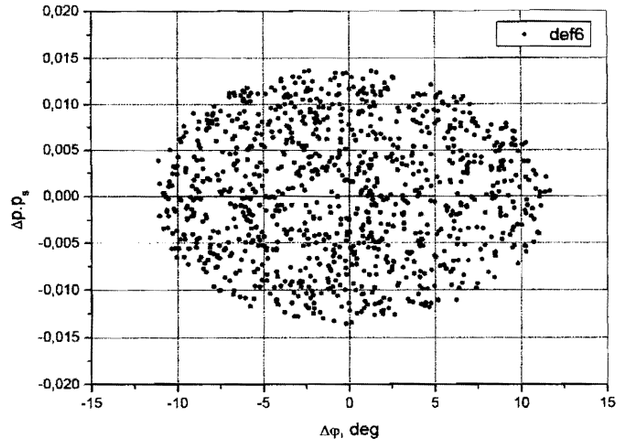

Рис.21. *Продольный фазовый портрет пучка на выходе согласующего канала, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 469 кВ и тока пучка 0 мА.*

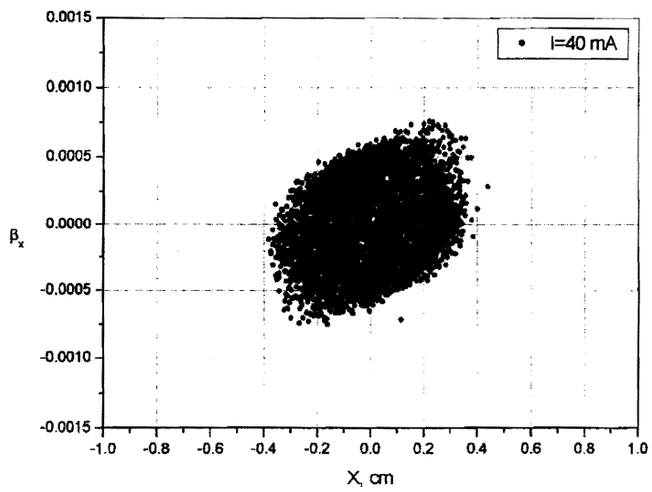

Рис.22. *Поперечный фазовый портрет пучка на выходе согласующего, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 469 кВ и тока пучка. 40 мА*

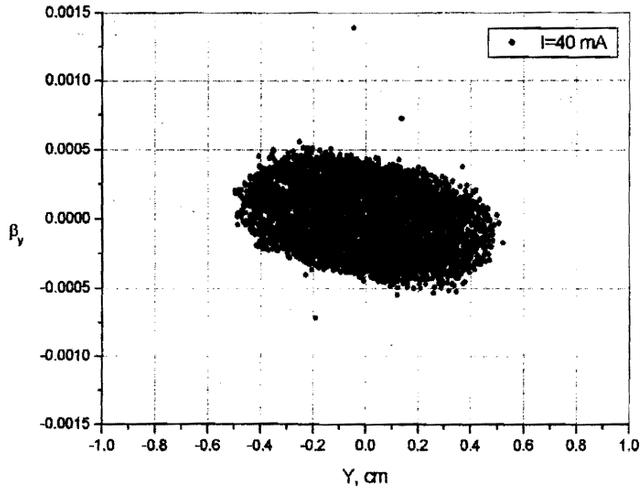

Рис.23. *Поперечный фазовый портрет пучка на выходе согласующего, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 469 кВ и тока пучка. 40 мА*

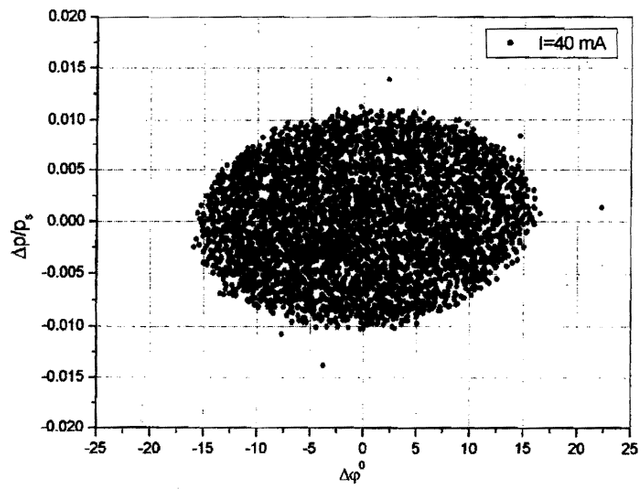

Рис.24. *Продольный фазовый портрет пучка на выходе согласующего канала, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 469 кВ для тока пучка. 40 мА*

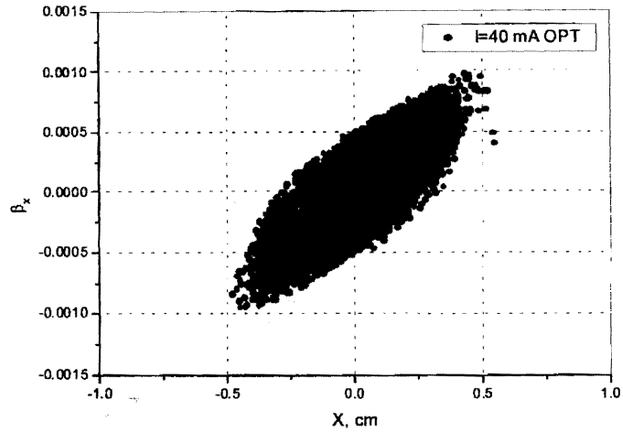

Рис.25. *Поперечный фазовый портрет пучка на выходе согласующего канала, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 570 кВ и тока пучка. 40 мА*

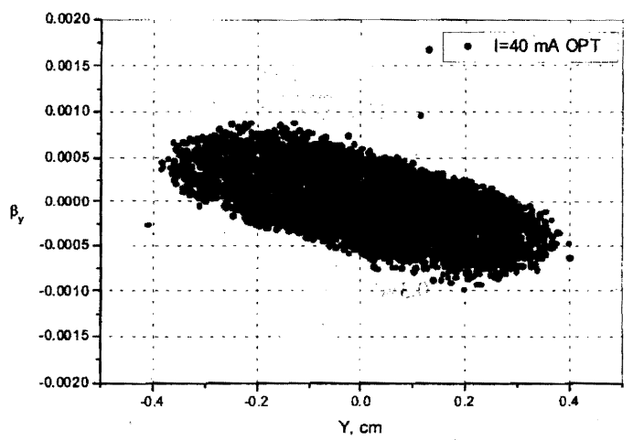

Рис.26. *Поперечный фазовый портрет пучка на выходе согласующего канала, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 570 кВ и тока пучка. 40 мА*

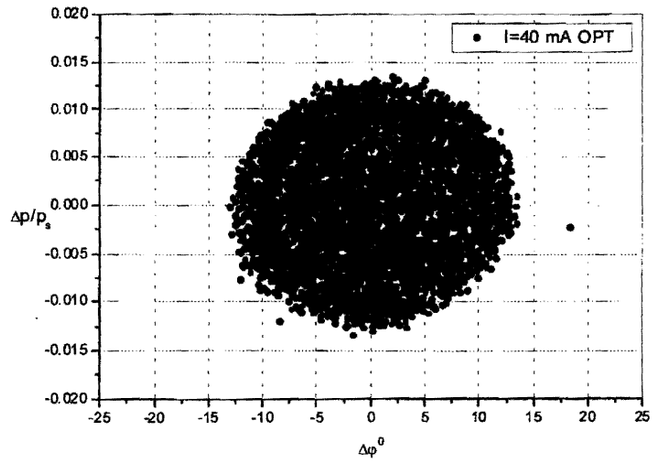

Рис.27. *Продольный фазовый портрет пучка на выходе согласующего канала, полученный в режиме соответствия программе TRACE-3D для эффективного напряжения на банчере 570 кВ и тока пучка. 40 мА*

Таблица 4. Параметры пучка на выходе согласующего канала, полученные по программе TRACE-3D..

	Плоскость X		Плоскость Y	
	β, m/rad	α	β, m/rad	α
Согласованные	0.43299	-1.1304	0.43847	1.1525
С выключенным банчером	1.5763	-3.7780	0.17848	0.65011
С банчером при токе 40 мА	0.34083	-0.34507	0.70890	0.39644

Таблица 5. Параметры пучка на выходе согласующего канала, полученные по программе PROTON при напряжении на банчере 0,469 МВ.

	Плоскость X		Плоскость Y	
	β, m/rad	α	β, m/rad	α
С выключенным банчером	1.4781	-3.7341	0.16998	0.51267

В номинальном режиме	0.35915	-0.96077	0.39376	0.97890
С банчером при токе 40 мА	0.40682	-0.25294	0.59054	0.28601

Таблица 6. Параметры пучка в поперечных плоскостях на входе и выходе согласующего канала при напряжении на банчере 0,570 МВ и согласовании для тока пучка 40 мА.

	Плоскость X			Плоскость Y		
	ε, cmmrad	β, m/rad	α	ε, cmmrad	β, m/rad	α
На входе канала	0.19653	0.10628	$2.36\cdot10^{-3}$	0.19687	0.31447	$-5.25\cdot10^{-3}$
На выходе канала	0.20454	0.44732	-1.1403	0.20384	0.33138	0.74051

Как показывают полученные результаты, рост эмиттанса в согласующем канале незначителен (≈10%), при радиусе апериуры 20 мм потеряна 1 крупная частица из 5000 при напряжении на банчере 469 кВ и 3 из 5000 – при 570 кВ.. Коэффициент сжатия η_φ=1,25 при напряжении на банчере 570 кВ. Качественно и количественно полученные на выходе параметры пучка с хорошей практической точностью воспроизводят результаты программы TRACE-3D в режиме соответствия дефокусировки в банчере и свидетельствуют о незначительном влиянии кулоновских эффектов на поперечное движение частиц и заметном влиянии на продольное движение.

Структурная схема 4 квадруполя + банчер + 3 квадруполя

Отсутствие кроссовера пучка в банчере в рассмотренной схеме может осложнить конструкцию банчера в части увеличения апертуры. В связи с этим А.А.Коломийцем предложена структурная схема 4 квадруполя + банчер + 3 квадруполя, в которой первые 4 квадруполя обеспечивают кроссовер в банчере и, в совокупности с последующими 3 квадруполями, - надлежащее согласование пучка. Наличие кроссовера в банчере также позволяет применить удвоение рабочей частоты. Результаты аналогичных расчётов для этой схемы при той же частоте ВЧ поля в банчере представ-

лены на Рис.28 – Рис.31 и в таблицах 7 - 8. Общая длина канала составляет ≈1720 мм.

Таблица 7. Параметры пучка на выходе согласующего канала..

	Плоскость X		Плоскость Y	
	β, m/rad	α	β, m/rad	α
Согласованные	0.43299	-1.1304	0.43847	1.1525
С выключенным банчером	0.45702	-1.0897	0.38141	0.59287
С банчером при токе 40 мА	0.66626	-2.1540	1.4677	2.7698

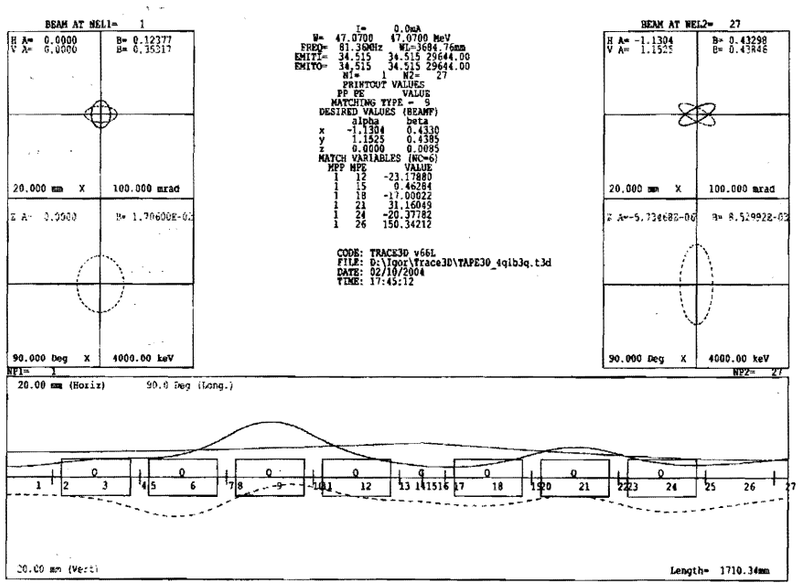

Рис.28. *Результаты оптимизации канала для схемы 4 квадруполя + банчер + 3 квадруполя со штатным напряжением в банчере при токе пучка 0 мА.*

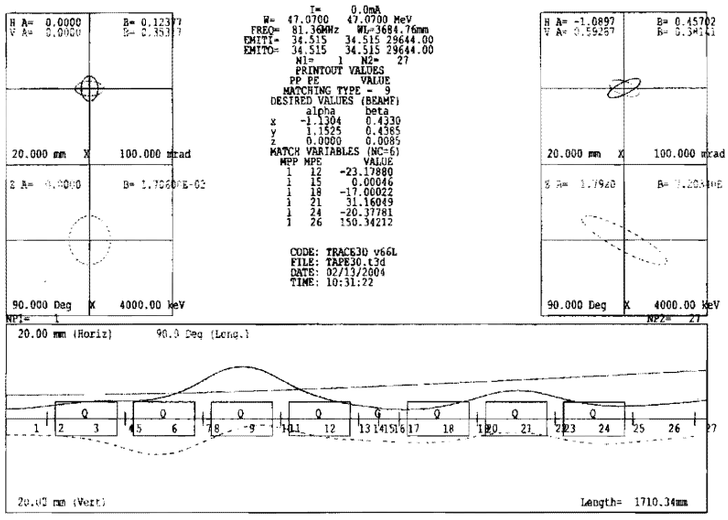

Рис.29. *Результаты расчётов динамики пучка в схеме 4 квадруполя + банчер + 3 квадруполя с выключенным банчером при токе пучка 0 мА.*

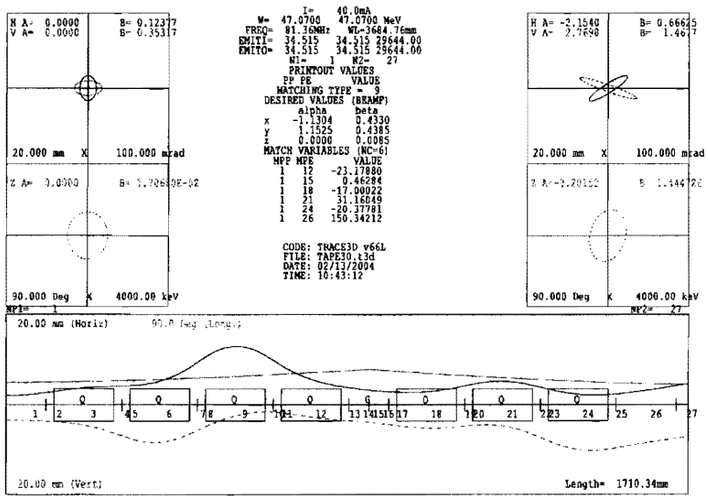

Рис.30. *Результаты расчётов динамики пучка в схеме 4 квадруполя + банчер + 3 квадруполя со штатным напряжением в банчере при токе пучка 40 мА.*

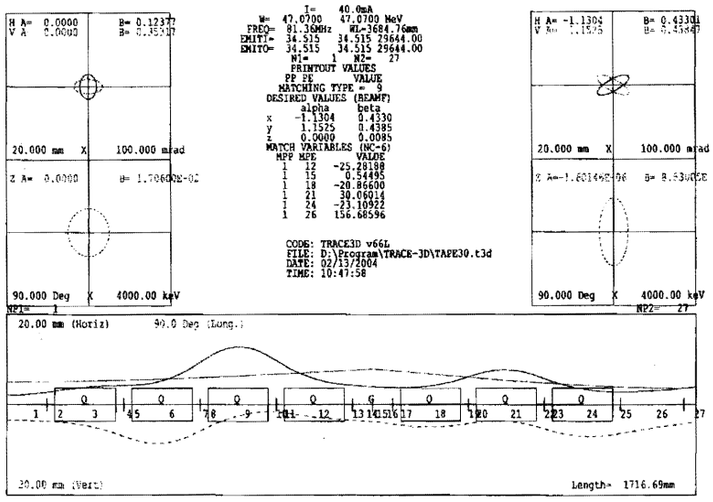

Рис.31. *Результаты оптимизации согласующего канала в схеме 4 квадруполя + банчер + 3 квадруполя при токе пучка 40 мА.*

Таблица 8. Параметры квадруполей и эффективное напряжение в банчере (E_0TL, МВ) по результатам оптимизации для схемы канала 4 квадруполя + банчер + .3 квадруполя.

Квадруполь	1	2	3	4	5	6	7	Банчер
Длина, (см)	15	15	15	15	15	15	15	10
Градиент, (Тл/м) для тока 0 мА	16.61	-33.61	33.19	-23.18	-17.00	31.16	-20.38	0.457
Градиент, (Тл/м) для тока 40 мА	16.61	-33.61	33.19	-25.28	-20.87	30.06	-23.11	0.545

Структурная схема 3 квадруполя + банчер + 3 квадруполя

Результаты расчётов для схемы 3 квадруполя + банчер + 3 квадруполя при той же частоте ВЧ поля в банчере представлены на Рис.32 – Рис.35 и в таблицах 9 - 10. Общая длина канала составляет ≈1810 мм. Меньшее число квадруполей по сравнению с предыдущей схемой несколько облегчает настройку согласующего канала. Перед банчером предусмотрен дрейфовый промежуток для размещения устройств метрики пучка.

Таблица 9. Параметры пучка на выходе согласующего канала.

	Плоскость X		Плоскость Y	
	β, m/rad	α	β, m/rad	α
Согласованные	0.43299	-1.1304	0.43847	1.1525
С выключенным банчером	0.49016	-1.1954	0.42481	0.71274
С банчером при токе 40 мА	0.41601	-1.1022	0.89774	3.1798

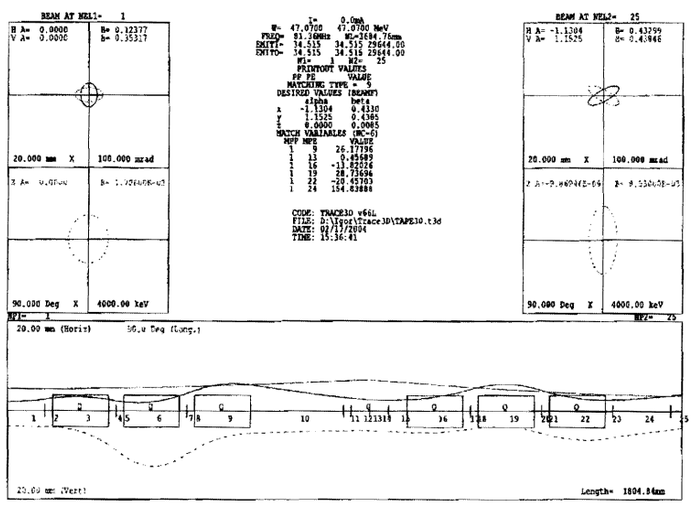

Рис.32. *Результаты оптимизации канала для схемы 3 квадруполя + банчер + 3 квадруполя со штатным напряжением в банчере при токе пучка 0 мА.*

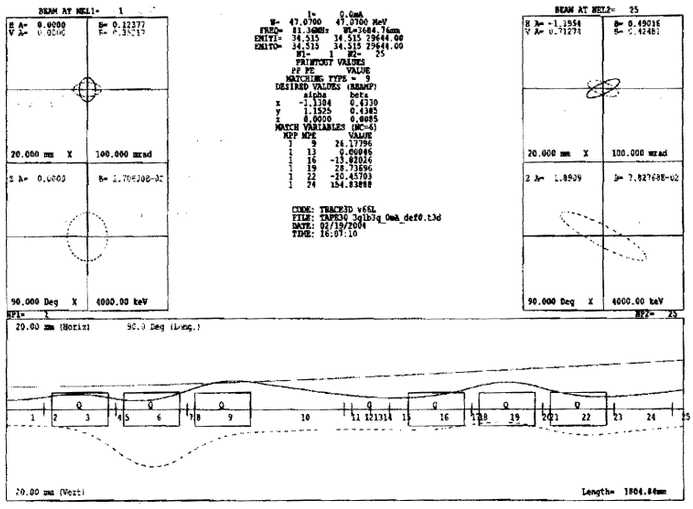

Рис.33. Результаты расчётов динамики пучка в схеме 3 квадруполя + банчер + 3 квадруполя с выключенным банчером при токе пучка 0 мА.

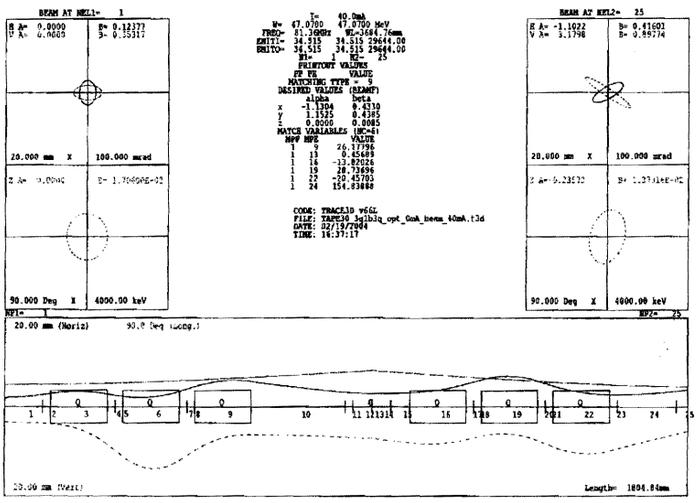

Рис.34. *Результаты расчётов динамики пучка в схеме 3 квадруполя + банчер + 3 квадруполя со штатным напряжением в банчере при токе пучка 40 мА.*

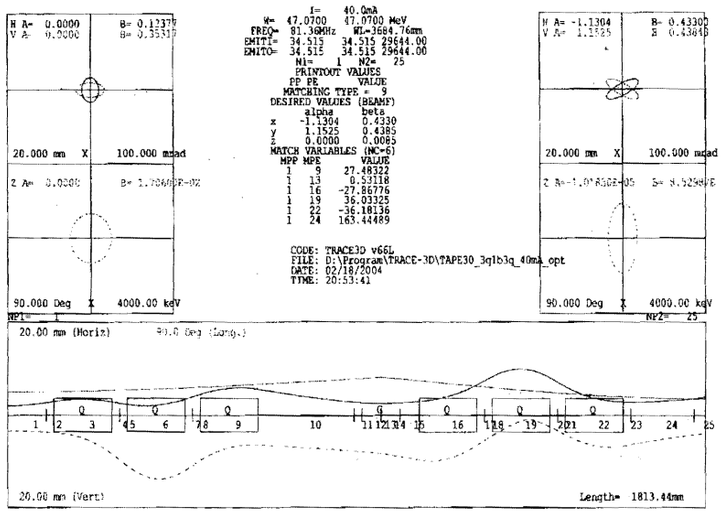

Рис.35. *Результаты оптимизации согласующего канала в схеме 3 квадруполя + банчер + 3 квадруполя при токе пучка 40 мА.*

Таблица 10. Параметры квадруполей и эффективное напряжение в банчере (E_0TL, МВ) по результатам оптимизации для схемы канала 3 квадруполя + банчер + .3 квадруполя.

Квадруполь	1	2	3	4	5	6	Банчер
Длина, (см)	15	15	15	15	15	15	10
Градиент, (Тл/м) для тока 0 мА	38.01	-33.22	26.18	-13.82	28.74	-20.46	0.457
Градиент, (Тл/м) для тока 40 мА	38.01	-33.22	27.48	-27.87	36.03	-36.18	0.531

Заключение

Как следует из полученных результатов, рассмотренные варианты компоновки согласующего канала при радиусе апертуры 2,0 см обеспечи-

вают прохождение пучка в пределах 2/3 апертуры, что не превышает 1,4 см. Это достигается очень близким расположением элементов на короткой длине канала и требует повышенного внимания к конструированию квадруполей и банчера. При этих условиях в различных вариантах рассмотренных структурных схем длина согласующего канала находится в диапазоне от ≈1,2 до ≈2,4 м. При установке в канале устройств метрики пучка, длину согласующего канала требуется увеличить (до ≈3 м). В связи с короткой длиной сгустка на выходе ПОКФ рекомендуется применение банчера на удвоенной частоте ВЧ поля.. По данным программы TRACE-3D схема 2 квадруполя+1 банчер +2 квадруполя обладает несколько большей чувствительностью к дефокусирующему действию банчера и меньшей к кулоновским эффектам по сравнению с двумя другими. Влияние кулоновских эффектов в этой сжеме по данным численного моделирования методом крупных частиц по программе PROTON на поперечную динамику также невелико (рост среднеквадратического нормализованного эмиттанса в пределах 10%). Схема 4 квадруполя+1 банчер +3 квадруполя обеспечивает наименьший радиус пучка в канале, обладает меньшей чувствительностью к дефокусирующему лействию банчера и наибольшей по отношению к кулоновским эффектам по данным программы TRACE-3D. Структурная схема 4 квадруполя+1 банчер +3 квадруполя обладаетт наиболее сбалансированной чувствительностью к дефокусирующему действию банчера и влиянию кулоновских эффектов, но требует несколько больших градиентов магнитного поля в квадруполях. Коэффициент сжатия сгустков по фазам, определённый по программе PROTON, хорошо воспроизводит данные оптимизации по программе TRACE-3D без учёта кулоновских эффектов. В связи с особенностями учёта дефокусирующего действия банчера в программе TRACE-3D сделанные выводы являются предварительными, а полученные результаты требуют некоторой коррекции с учётом реальных распределений полей в элементах канала. В связи с этим становится актуальной разработка оптимизирующей программы для расчёта согласующих каналов с учётом реальных распределений ускоряюще-фокусирующих полей. Проведённая модернизация программы ABC и успешное включение в эту программу оптимизирующей математической программы MINUIT де-

лают возможным развитие АВС для оптимизации каналов с заданием реальных распределения полей и учётом кулоновского поля пучка. В заключение выражаю благодарности А.А.Коломийцу и С.А.Высоцкому за полезные обсуждения и предложения по улучшению структурной схемы согласующего канала, В.И.Першину за содействие в работе.

Литература

[1] S.Minaev, D.Kashinskiy, V.Pershing, B.Sharkov, T.Tretiakova, R.Vengrov, S.Yaramishev. A Spartially Periodic RFQ Accelerating Structure Based on E_{010} Mode Cavity. Proc. of LINAC200 Conf.

[2] И.А.Воробьёв, Е.С.Гальперн, А.А.Коломиец, В.Н.Ляховицкий, О.С.Сергеева. Численное моделирование динамики пучка в ускорителе ИТЭФ с пространственно однородной квадруполной фокусировкой. М., Препринт ИТЭФ, 1986, №52.

[3] И.А.Воробьёв. Программа АВС для поиска функций Флоке канала. Программы расчёта и моделирования для ускорительной техники (Сборник аннотаций). М., Научный совет АН и Минатома Российской федерации по комплексной проблеме "перспективные ускорительные комплексы и новые методы ускорения заряженных частиц" 1992.

[4] Линейные ускорители ионов. Т.1. Проблемы и теория. Б.П.Мурин, Б.И.Бондарев, В.В.Кушин, А.П.Федотов; Под ред. Б.П.Мурина. М., Атомиздат, 1978.

[5] И.М.Капчинский. Теория линейных резонансных ускорителей. М., Энергоиздат, 1982.

[6] И.А.Воробьёв, С.А.Высоцкий. Оптимизация согласующего канала ускорителя "Истра-36'. Программы расчёта. Препринт ИТЭФ №2, М., 1998.

[7] И.А.Воробьёв. Автореферат диссертации "Эволюция фазового объёма и согласование пучка в линейном ускорителе высокой мощности" на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. М., 2002.