18

Институт теоретической и
экспериментальной физики

FERMILAB
MAR 22 1999
LIBRARY

39-98

ITEP-39-98

Высоцкий С.А., Коломиец А.А., Ярамышев С.Г.

Расчёт поворотного ионопровода ускорителя "Истра-36".

Fermilab Library
0 1160 0068576 2

Москва 1998

УДК 539.I М-I6

РАСЧЕТ ПОВОРОТНОГО ИОНОПРОВОДА УСКОРИТЕЛЯ "ИСТРА-36": Препринт ИТЭФ 39-98/

С.А.Высоцкий,А.А.Коломиец,С.Г.Ярамышев - М., I998 - I6с.

Приведён последовательный расчёт физических параметров поворотного канала, позволяющего транспортировать пучок ускоренных протонов с одного этажа здания на другой. Достигнуто снижение роста эмиттанса пучка в канале в результате совершенствования оптической схемы канала и развития методики расчёта.

Visotskiy S.A., Kolomiets A.A., Yaramishev S.G. The calculation of the turn canal of the accelerator Istra-36.

It have been brought sequential calculation physical parameter of the turning canal, allowing transfer beam of accelerated protons from one floor to another of the house. It have been overreached decline of growth of the emittance of the beam in the canal as a result of the elaboration of the optical schema of the canal and development of the method of the calculation.

Рис. - I2, список лит. - 9 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, I998

В ИТЭФ ведутся работы по созданию нейтронного генератора [1]. В качествера драйвера предполагается использовать существующий линейный ускоритель протонов "Истра-36" [2,3]. Схема ускорителя приведена на рис.1. Пучок с энергией 36 МэВ предполагается направлять на бериллиевую мишень, расположенную в центре субкритической реакторной сборки. Предусматривается возможность вывода пучка с энергией 36, 10 и 3 МэВ для наработки радионуклидов, производства эмиттеров, для томографии, проведения элементного активационного анализа, экспериментального облучения материалов и изделий.

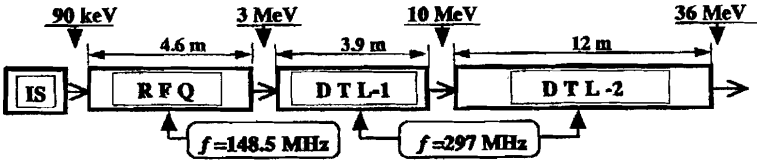

Рис. 1. Схема ускорителя "Истра-36" (IS - источник протонов, RFQ - ускорительная секция с ПОКФ, DTL-1 и DTL-2- ускорительные секции с пролётными трубками Альвареца, f - частота ВЧ колебаний).

В проекте нейтронного генератора предусматривается перемещение ускорителя в здание реактора. Размеры помещения не позволяют установить ускоритель на одном этаже, поэтому предложена схема (рис.2) размещения узлов ускорителя на двух этажах корпуса. На первом этаже предполагается установить источник ионов, ускорительные секции с ПОКФ и Альвареца (DTL-1). На втором этаже будет установлена укорительная секция DTL-2. Для транспортировки ускоренных частиц между секциями DTL-1 и DTL-2 требуется создание канала, обеспечивающего поворот пучка в вертикальной плоскости на 180^0. Возможность перевода пучка с этажа на этаж без существенных потерь частиц и значительного ухудшения фазовых характеристик пучка является основным условием осуществимости проекта в целом.

Задачей данной работы было: исследовать возможность создания поворотного канала с требуемыми транспортными характеристиками, разработать конструкцию канала.

В исходной схеме построения ЛУ предусматривалось, что резонатор DTL-2 следует за DTL-1 с минимально возможным по технологическим соображениям зазором. Это означает, что переход пучка из одного резонатора в другой происходит без использования какого-либо согласующего канала и без существенного изменения параметров пучка ввиду малости участка дрейфа между резонаторами. Поэтому на начальном этапе проектирования канала была поставлена задача разработки конструкции канала, позволяющего переводить параметры пучка на выходе DTL-1 в самих себя на входе DTL-2, то-есть матрица перехода канала должна равняться 1.

Из теории известно, что оптические системы с зеркально

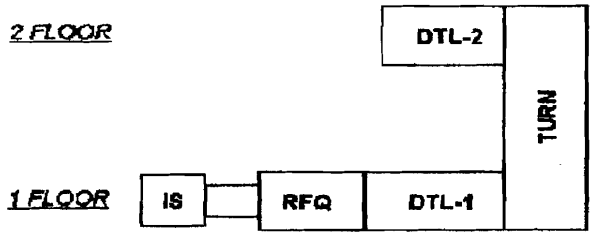

Рис. 2. Схема размещения ускорителя "Истра-36" в здании реактора (1 FLOOR и 2 FLOOR - первый и второй этажи корпуса, TURN - канал транспортировки пучка).

симметричным расположением оптических элементов позволяют получить требуемые транспортные характеристики [4]. Расчёты, выполненные с использованием оптимизирующей программы MIRKO, дали возможность определить состав используемых оптических элементов и их положение в канале. На рис. 3 показана конструкция поворотного канала, в табл. 1 приведены его важнейшие физические параметры.

Канал поворота пучка состоит из четырех дублетов квадрупольных линз q1q2, q3q4, q5q6, q7q8 и поворотных магнитов b1, b2 со скосами e1-e4. В геометрическом центре канала расположен банчер с двумя ускоряющими промежутками g1,g2. Дублеты квадрупольных линз q1q2 и q3q4 формируют пучок в плоскости симметрии канала, проходящей через центр дрейфового промежутка d7. Симметрия канала предполагает наличие кроссовера в этой точке. Дублеты квадрупольных линз q5q6 и q7q8 позволяют сфокусировать пучок на выходе из канала. Магниты b1, b2 обеспечивают поворот пучка на 180^0. Банчер служит для согласования продольных фазовых характеристик пучка на входе и выходе канала.

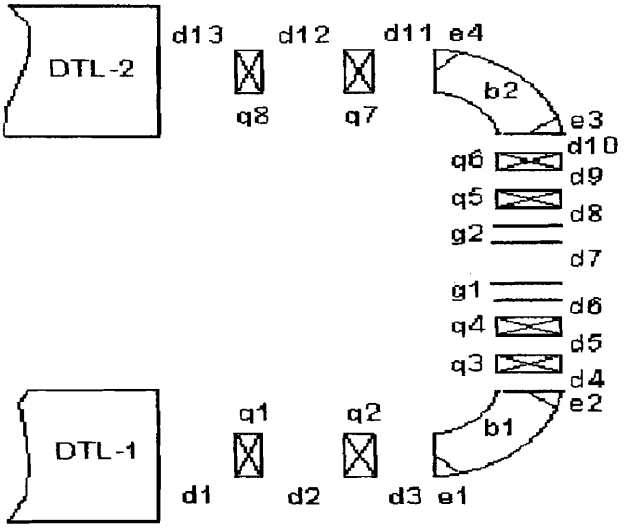

Рис 3. Схема поворотного канала.

Таблица 1. Параметры повортного канала

№ элем.	Обозначение элемента	Наименование элемента	Параметры	Апертура (мм)
1,29	d1	Дрейфовый промежуток	L*=600	
2,4,10,12,18 20,26, 28	q1- q8	Квадрупольная линза	L*=200	70
3,27	d2,d12	Дрейфовый промежуток	L*=150	
5,25	d3,d11	Дрейфовый промежуток	L*=650	
6,22	e1,e3	Вход в магнит	Скос полюса 30^0	56x150
7,23	b1,b2	Поворотный магнит	Угол поворота - 90^0, Радиус поворота -500мм	56x150
8,24	e2,e4	Выход из магнита	Скос полюса - 30^0	56x150
9,21	d4,d10	Дрейфовый промежуток	L*=400	
11,19	d5,d9	Дрейфовый промежуток	L*=250	
13,17	d6,d8	Дрейфовый промежуток	L*=226.5	
14,16	g1,g2	Ускоряющий зазор	L*=38,5	50
15.	d7	Дрейфовый промежуток	L*=147	

* - длина элемента по ходу пучка (мм)

Для расчёта градиентов магнитных полей в квадрупольных линзах и напряжённости электрического поля в зазорах банчера нам были доступны оптимизирующие программы TRANSPORT, GIOSP, TRACE 3-D, PREINJ [5]. В результате сопоставления функциональных возможностей этих программ для расчётов была выбрана программа TRACE 3-D [6]. Эта программа с 1973 года после серии редакций превратилась в хорошо отлаженную и проверенную в ряде разработок интерактивную программу, позволяющую в рамках принятых приближений моделировать трёхмерные пучки с учётом пространственного заряда.

На рис. 4 показаны огибающие пучка в трёх плоскостях (x,y,z), полученные для тока пучка 0.0 и 100.0 мА. В расчётах с нулевым током использованы параметры согласованного пучка [7] на выходе секции DTL-1 предоставленные А.И. Балабиным (табл. 2). В расчётах, выполненных для пучка с током 100 мА, поперечный эмиттанс $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ увеличен на 25%.

Необходимо отметить, что программа Trace 3-D позволяет проводить

Таблица 2. Параметры пучка на выходе резонатора DTL-1.

Энергия пучка	W (МэВ)	10.27
Параметры эллипса, представляющего эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости	ε_x (мм мрад)	13.63
	α_x	0.00
	β_x (метр/рад),	0.2900
Параметры эллипса, представляющего эмиттанс пучка в вертикальной плоскости	ε_y (мм мрад)	13.63
	α_y	0.00
	β_y (метр/рад)	0.6340
Параметры эллипса, представляющего эмиттанс пучка в продольной плоскости	ε_φ (град кэВ)	3317.00
	α_φ	0.00
	β_φ (град/кэВ)	0.0272

вычисления только с магнитами, поворачивающими пучок в горизонтальной плоскости, поэтому весь канал повёрнут на 90^0, соответственно изменены знаки поля в квадрупольных линзах.. Во избежание ошибок в дальнейшем, условлено, что во всём ускорителе пучок имеет наибольшие значения параметра β в плоскости поворота.

Программа Trace 3-D позволяет одновременно оптимизировать шесть независимых параметров. В нашем случае требовалось рассчитать градиенты магнитного поля в восьми линзах и напряжённости электрического поля в двух зазорах банчера - всего 10 параметров. Поэтому, для того чтобы согласовать количество оптимизируемых параметров с возможностями программы, расчёт был выполнен в два этапа. На первом этапе были определены градиенты поля в квадрупольных линзах q1- q4, позволяющие

получить кроссовер пучка в центре банчера. На втором этапе, путём оптимизации градиентов магнитного поля в линзах q5 - q8 и напряженности электрического поля в зазорах банчера g1, g2 достигалось согласование параметров поперечного и продольного движения пучка на выходе поворотного канала с начальными данными (табл. 3).

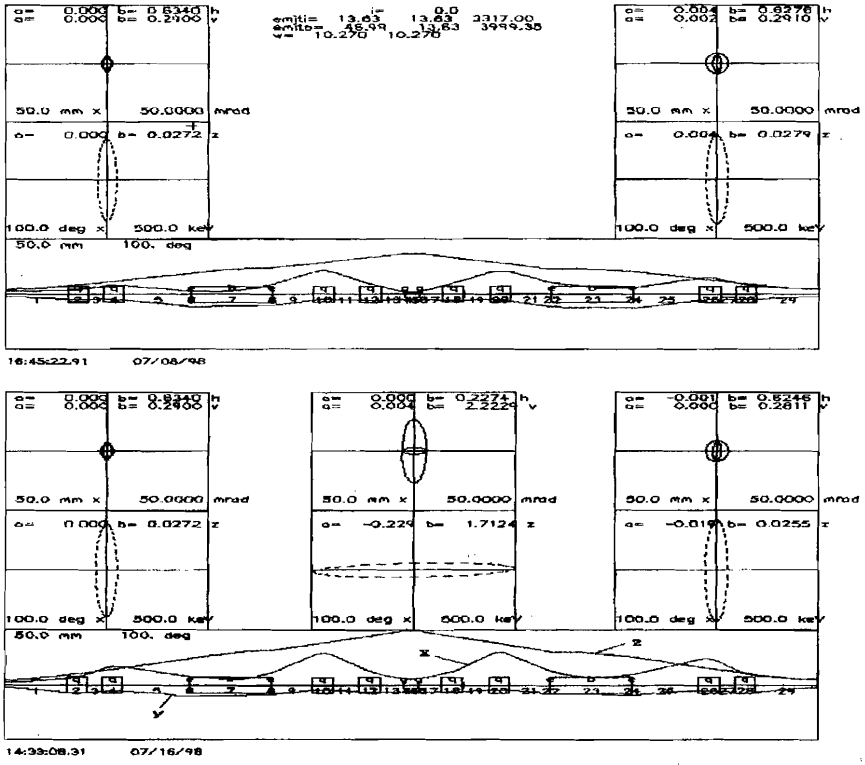

Рис 4. Огибающие пучка и представляющие эллипсы на входе и выходе канала (изображены слева и справа рисунка), полученные для нулевого тока (сверху) и 100 мА (внизу). I - ток пучка, W-энергия синхронной частицы, emiti и emito - эмиттанс пучка на входе и выходе из канала, α и β - параметры эллипсов, x,y,z - оси координат.

Анализ полученных результатов показывает, что для пучка с нулевым током и равным 100 мА наблюдается рост эмиттанса в плоскости поворота (xx`) в ~ 3.5 раз, при сохранении постоянной величины эмиттанса во второй поперечной плоскости (yy`). Коэффициенты эллипсов на входе и выходе из канала близки по величине, однако полного совпадения достигнуть не удалось.

Таблица 3. Рассчитаные поля.

Ток пучка	0.0 мА		100.0 мА	
Фокусирующий элемент	Напряжение (МВ)	Градиент поля (Т/м)	Напряжение (МВ)	Градиент поля (Т/м)
q1		-4.5126314		-6.7334264
q2		5.8851523		6.4127723
q3		6.4937255		6.7063828
q4		-1.7802272		-2.8577149
q5		-1.0560626		-2.5870565
q6		5.7758818		6.3054298
q7		5.5522132		6.4616264
q8		-3.8104806		-6.5112402
g1	0.28031863		0.29070324	
g2	0.28031863		0.29070324	

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что предложенная конструкция канала даёт возможность в принципе решить задачу транспортировки пучка между секциями ускорителя. В то же время требуются дополнительные усилия по совершенствованию конструкции поворотного канала с целью снижения роста эмиттанса, повышения точности согласования задаваемых фазовых характеристик пучка. и полученных в результате оптимизации параметров оптических элементов канала. Требуют уточнения данные о фазовых характеристиках пучка на выходе секции DTL-1 и согласованных условиях на входе DTL-2.

Моделирование движения пучка в ускорителе от источника ионов до выхода резонатора DTL-1 с помощью программы DINAMION [8] позволило получить уточнённые данные о фазовых характеристиках пучка на выходе секции DTL-1, которые приведены в табл. 4. Использованы обозначения: part ,per - число частиц и проценты от полного числа частиц; e_{tot}, e_{rms} - эмиттанс пучка; x_{bar}, y_{bar} - координаты центра пучка; alpha, beta - коэффициенты фазовых эллипсов. На рис. 5 показаны фазовые эллипсы, полученные для 95 процентов частиц пучка.

С целью уточнения согласованных условий для пучка на входе ускоряющей секции DTL-2 было проведено сопоставление результатов расчётов, выполненых с помощью программы TRACE 3-D и созданной в ИТЭФ АБС. Разработана методика коррекции данных с помощью программы DYNAMION. К печати готовится препринт, содержащий описание выполненных исследований. В табл. 5 приводятся полученные с учётом роста эмиттанса в канале поворота фазовые характеристики согласованного пучка для секции DTL-2.

Уточнённые данные о фазовых характеристиках пучка на выходе ускоряющей секции DTL-1 и согласованных условиях на входе секции DTL-2 были использованы для оптимизаци конструкции поворотного канала. В

Таблица 4. Фазовые характеристики пучка на выходе DTL-1.

X - dX/dZ plane; cm . mrad

per	part	e_{tot}	e_{rms} un	e_{rms} norm	x_{bar}	y_{bar}	alpha	beta
100	413	0.123E+02	0.781E+00	0.114E+00	-0.953E-02	0.247E+00	-0.233E+00	0.262E-01
95	392	0.487E+01	0.626E+00	0.917E-01	-0.874E-04	0.342E+00	-0.293E+00	0.222E-01
90	371	0.399E+01	0.541E+00	0.793E-01	0.278E-02	0.366E+00	-0.203E+00	0.204E-01
85	351	0.286E+01	0.473E+00	0.693E-01	0.446E-02	0.364E+00	-0.118E+00	0.192E-01
80	330	0.242E+01	0.421E+00	0.617E-01	0.475E-02	0.344E+00	-0.181E+00	0.181E-01
75	309	0.205E+01	0.374E+00	0.548E-01	0.259E-02	0.257E+00	-0.221E+00	0.169E-01
70	289	0.169E+01	0.333E+00	0.489E-01	0.197E-02	0.165E+00	-0.192E+00	0.167E-01
65	268	0.144E+01	0.299E+00	0.438E-01	0.277E-02	0.122E+00	-0.237E+00	0.168E-01
60	247	0.134E+01	0.264E+00	0.387E-01	0.996E-03	-0.273E-01	-0.921E-01	0.156E-01
55	227	0.116E+01	0.233E+00	0.341E-01	-0.182E-02	-0.283E-01	-0.386E-01	0.160E-01
50	206	0.993E+00	0.201E+00	0.295E-01	0.209E-04	0.269E-01	0.434E-02	0.150E-01

Y - dY/dZ plane; cm . mrad

per	part	e_{tot}	e_{rms} un	e_{rms} norm	x_{bar}	y_{bar}	alpha	beta
100	413	0.110E+02	0.716E+00	0.105E+00	0.446E-02	0.987E-01	-0.131E+01	0.475E-01
95	392	0.487E+01	0.584E+00	0.856E-01	0.124E-01	0.409E+00	-0.105E+01	0.402E-01
90	371	0.356E+01	0.505E+00	0.739E-01	0.535E-02	0.126E+00	-0.908E+00	0.390E-01
85	351	0.272E+01	0.446E+00	0.654E-01	0.531E-02	0.130E+00	-0.889E+00	0.389E-01
80	330	0.239E+01	0.394E+00	0.577E-01	0.189E-02	-0.626E-01	-0.861E+00	0.412E-01
75	309	0.202E+01	0.347E+00	0.508E-01	0.183E-02	0.289E-01	-0.878E+00	0.434E-01
70	289	0.167E+01	0.308E+00	0.451E-01	0.911E-03	0.756E-01	-0.881E+00	0.453E-01
65	268	0.151E+01	0.269E+00	0.394E-01	0.452E-02	0.269E-01	-0.857E+00	0.487E-01
60	247	0.125E+01	0.235E+00	0.344E-01	0.361E-02	0.129E-01	-0.830E+00	0.484E-01
55	227	0.104E+01	0.204E+00	0.298E-01	-0.459E-02	-0.563E-01	-0.786E+00	0.455E-01
50	206	0.916E+00	0.174E+00	0.254E-01	-0.407E-02	0.387E-02	-0.922E+00	0.546E-01

Z - dZ/dZ plane; cm . mrad

per	part	e_{tot}	e_{rms} un	e_{rms} norm	x_{bar}	y_{bar}	alpha	beta
100	413	0.773E+02	0.195E+01	0.286E+00	0.166E-01	-0.232E+01	0.947E+00	0.109E+00
95	392	0.112E+02	0.146E+01	0.214E+00	0.252E-01	-0.239E+01	0.123E+01	0.114E+00
90	371	0.910E+01	0.128E+01	0.187E+00	0.133E-01	-0.219E+01	0.139E+01	0.119E+00
85	351	0.771E+01	0.115E+01	0.168E+00	0.571E-02	-0.201E+01	0.151E+01	0.122E+00
80	330	0.665E+01	0.105E+01	0.154E+00	0.330E-02	-0.180E+01	0.164E+01	0.130E+00
75	309	0.566E+01	0.942E+00	0.138E+00	-0.134E-01	-0.151E+01	0.179E+01	0.137E+00
70	289	0.489E+01	0.864E+00	0.127E+00	-0.110E-01	-0.146E+01	0.185E+01	0.144E+00
65	268	0.423E+01	0.805E+00	0.118E+00	-0.878E-02	-0.133E+01	0.194E+01	0.147E+00
60	247	0.386E+01	0.743E+00	0.109E+00	-0.101E-01	-0.116E+01	0.204E+01	0.149E+00
55	227	0.356E+01	0.675E+00	0.988E-01	-0.924E-02	-0.107E+01	0.228E+01	0.158E+00
50	206	0.304E+01	0.595E+00	0.872E-01	0.926E-03	-0.117E+01	0.230E+01	0.158E+00

этих расчётах для повышения точности согласования полученных с помощью программы TRACE 3-D фазовых характеристик пучка и начальных данных изменена методика расчёта: после определения полей в оптических элементах в первой и второй половине канала по схеме, аналогичной применённой ранее, в режиме оптимизации параметров поперечного движения пучка расчитаны градиенты полей в линзах q3 - q8. При этом ценой некоторого смещения положения кроссовера из центра банчера и потери симметрии огибающей пучка на входе и выходе из банчера, достигнуто совпадение полученных в

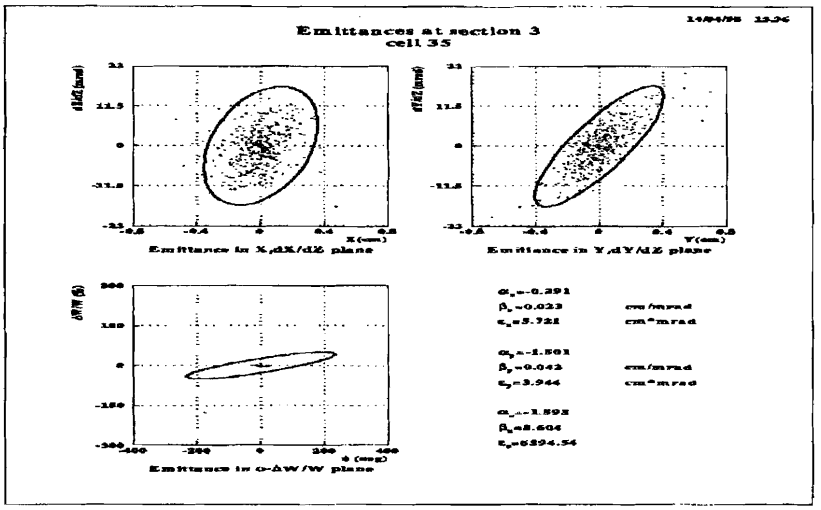

Рис 5. Фазовые характеристики пучка на входе поворотного канала, полученные с помощью программы DYNAMION.

Таблица 5. Фазовые характеристики согласованного пучка.

Параметры эллипса, представляющего эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости	ε_x (мм мрад)	102.43
	α_x	0.00
	β_x (метр/рад),	0.561
Параметры эллипса, представляющего эмиттанс пучка в вертикальной плоскости	ε_y (мм мрад)	48.7
	α_y	0.00
	β_y (метр/рад)	0.235
Параметры эллипса, представляющего эмиттанс пучка в продольной плоскости	ε_φ (град кэВ)	3190.53
	α_φ	0.00
	β_φ (град/кэВ)	0.0698

результате расчёта фазовых характеристик пучка на выходе поворотного канала и согласованных условий DTL-2. Полученные огибающие пучка и представляющие элипсы приведены на рис. 6. Соответствующие градиенты магнитного поля и напряжённости электрического поля представлены в табл. 6. Рост эмиттанса в плоскости поворота снизился до ~ 2.3 раз.

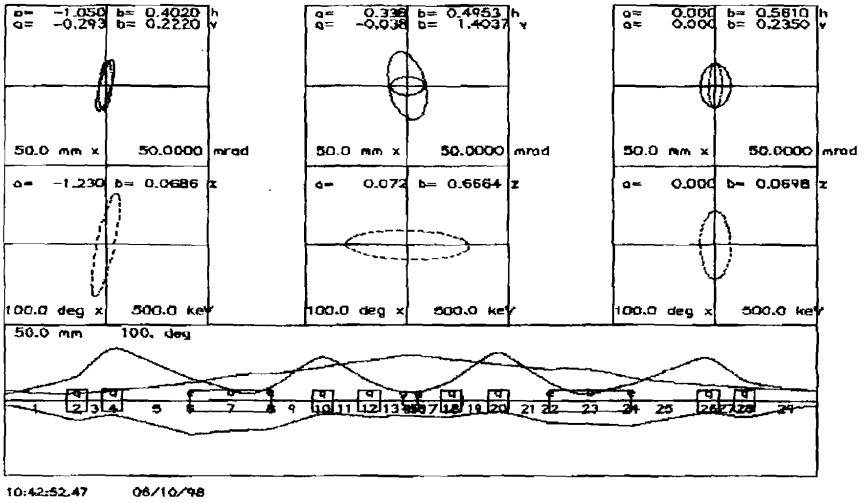

Рис 6. Огибающие пучка и представляющие эллипсы на входе, выходе канала и центре банчера, полученные для скорректированных параметров пучка.

Таблица 6. Рассчитанные поля.

Ток пучка	100.0 мА	
Фокусирующий элемент	Напряжение (МВ)	Градиент поля (Т/м)
q1		-5.564209
q2		6.1633083
q3		6.9886215
q4		-2.2088541
q5		-2.8189075
q6		6.7677475
q7		6.4565632
q8		-6.3454763
g1	0.28383566	
g2	0.28383566	

Исследование динамики движения пучка от источника ионов до выхода из ускоряющей секции DTL-2 с помощью программы DYNAMION показало (рис. 7,8), что при прохождении пучка через поворотный канал потери частиц отсутствуют. Около 10% частиц теряется из-за обрезания пучка на входе в резонатор DTL-2, так как размеры пучка в плоскости поворота превосходят апертуру резонатора.

Размеры пучка зависят от величины его эмиттанса [9]

$$X = \sqrt{\beta_x \varepsilon} \qquad (1)$$

Величина эмиттанса на выходе поворотного канала определяется его величиной на входе в поворотный канал и ростом эмиттанса при прохождении пучка через поворотный канал. Величина эмиттанса пучка на входе в

поворотный канал определяется конструкцией уже существующего ускорителя и поэтому не может быть изменена. Рост эмиттанса в поворотном канале может быть снижен целенаправленным изменением конструкции канала.

В программе TRACE 3-D не предусмотрена возможность задания эмиттанса или прямого управления в процессе вычислений за его изменением. Предпринятые попытки расчётов с заданием численных значений элементов субматрицы σ_{xx} (2) [4] матрицы перехода σ не дали желанного результата

$$\sigma_{xx} = \begin{vmatrix} \beta_x \varepsilon_x & -\alpha_x \varepsilon_x \\ -\alpha_x \varepsilon_x & \gamma_x \varepsilon_x \end{vmatrix} . \qquad (2)$$

В процессе оптимизации были получены комбинации больших значений эмиттанса ε_x и малых величин параметра β_x.

Исследование динамики движения частиц в поворотных магнитах показали, что минимальный рост эмиттанса в плоскости поворота может быть достигнут при локализации кроссовера в этой плоскости в центре магнита, при

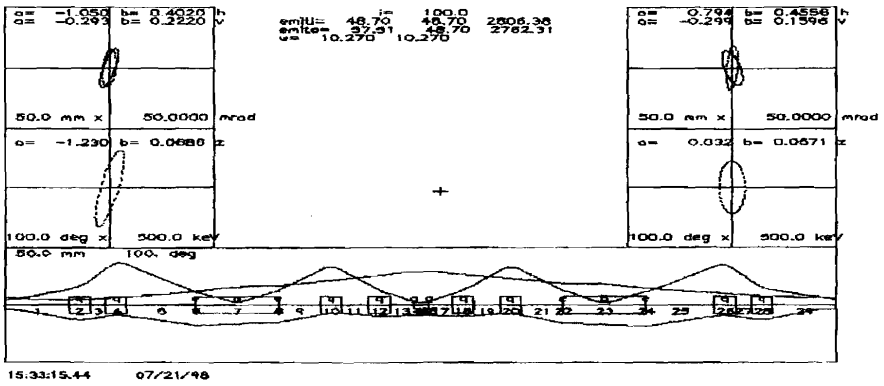

Рис 7. Огибающие пучка и представляющие эллипсы на входе, выходе канала и центре банчера, полученные для пучка, имеющего кроссовер в центре поворотного магнита для плоскости поворота.

достаточно малом размере пучка в кроссовере. С целью обеспечения требуемой фокусировки пучка выполнен с помощью программы TRACE 3-D расчёт параметров оптических элементов поворотного канала. Подбором градиентов полей в дублете квадрупольных линз q1, q2 достигалось

размещение кроссовера, для плоскости поворота, в центре поворотного магнита b1; далее были рассчитаны поля в дублете линз q3,q4, при которых положение кроссовера для обоих компонент поперечного движения совпадает с центром банчера. Оптимизация градиентов полей в линзах q5,q6 позволила разместить кроссовер пучка для плоскости поворота в центре поворотного магнита b2, подбором градиентов полей в линзах q7, q8 и напряжённостей полей в зазорах банчера g1, g2 достигалось соответствие фазовых характеристик на выходе поворотного канала согласованным условиям на входе резонатора DTL-2. На рис. 7 показаны огибающие пучка и представляющие эллипсы, полученные с помощью программы TRACE 3-D. Анализ полученных результатов показывает, что в данном случае рост эмиттанса в плоскости поворота составляет около 20 %, однако с помощью двух квадрупольных линз, расположенных за последним поворотным магнитом, не удаётся получить требуемых параметров поперечного движения пучка на выходе поворотного канала.

Необходимы дополнительные фокусирующие элементы для согласования фазовых характеристик пучка на выходе поворотного канала с согласованными условиями в ускоряющей секцией DTL-2.

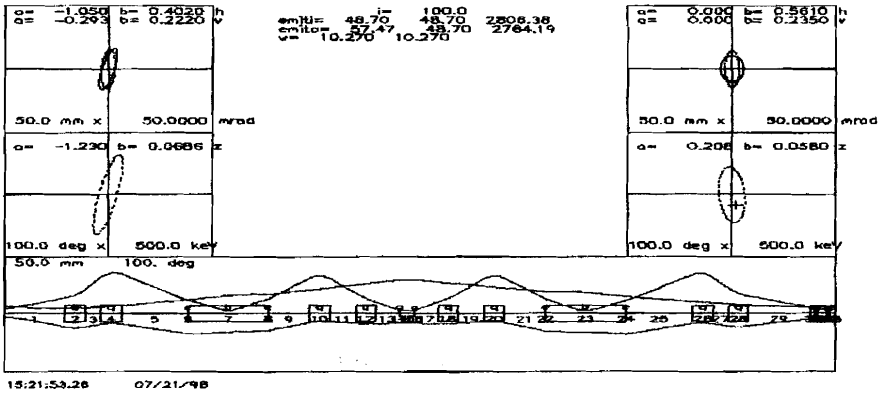

Рис 8. Огибающие пучка и представляющие эллипсы, полученные для поворотного канала, дополненного квадрупольными линзами первого периода фокусировки резонатора DTL -2.

Был рассмотрен вариант использования квадрупольных линз первого периода фокусировки резонатора DTL-2. Полученные в этом случае огибающие пучка и представляющие эллипсы представлены на рис. 8. Более подробно участок поворотного канала с включённым в него периодом фокусировки секции DTL-2 (справа) показан на рис. 9. Удалось получить фазовые характеристики пучка , совпадающие с согласованными условиями в DTL-2, но при этом размеры пучка на входе в секцию DTL-2 превосходят

пучковую апертуру резонатора, что делает рассмотренный вариант конструкции поворотного канала мало перспективным для использования.

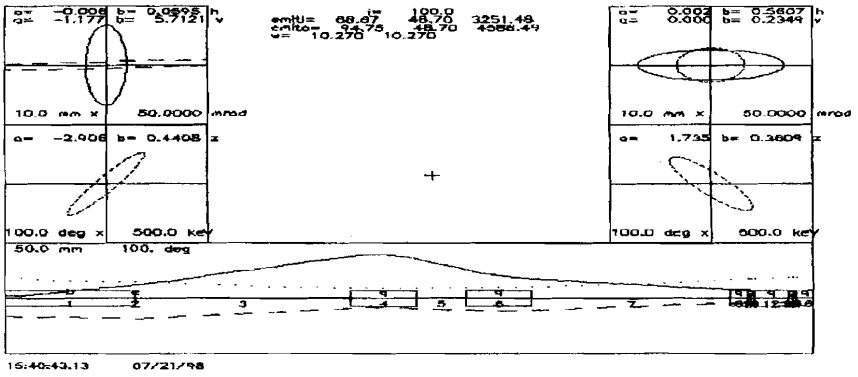

Рис 9. Огибающие пучка и представляющие эллипсы, полученные для участка поворотного канала.

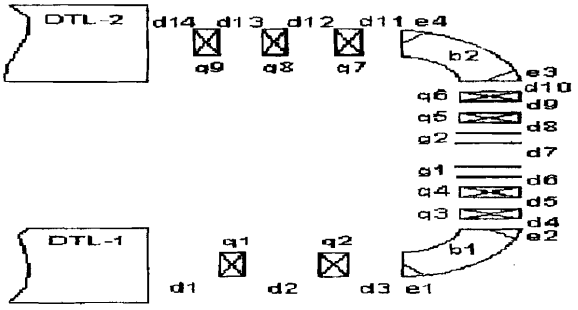

Рис 10. Схема поворотного канала.

Исследована возможность фокусировки пучка на выходе поворотного канала оптической системой из трёх квадрупольных линз (q7,q8,q9 на рис.10), разделённых дрейфовыми промежутками d11-d14. На рис. 11 изображены огибающие пучка и представляющие эллипсы полученные с помощью программы TRACE 3-D для рассматриваемого варианта конструкции канала. На рис. 12 приведён выходной файл, содержащий результаты вычислений. Жирно выделены градиенты магнитного поля в линзах и размеры дрейфовых промежутков между ними.

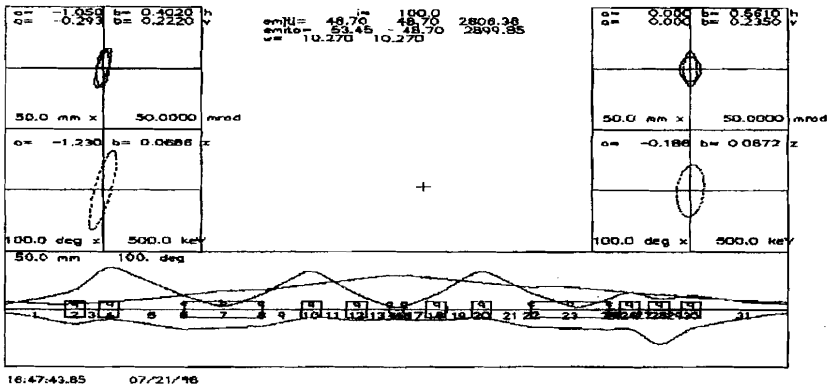

Рис 11. Огибающие пучка и представляющие эллипсы, полученные для поворотного канала с тремя квадрупольными линзами на выходе из канала

Анализ полученных результатов показывает, что рост эмиттанса в плоскости поворота пучка на выходе поворотного канала составляет ~ 10% для тока 100 мА. Фазовые характеристики пучка на входе в ускоряющую секцию DTL-2 соответствуют согласованным условиям для пучка на этом участке ускорителя.

Таким образом, в результате совершенствования оптической схемы канала и развития методики расчёта удалось снизить рост эмиттанса пучка в канале с 300% до 10%; разработана конструкция поворотного канала, позволяющего выполнять задачу по транспортировке пучка ускоренных частиц с этажа на этаж здания между секциями ускорителя. Полученные результаты позволяют говорить о возможности практической реализации предложенного проекта создания нейтронного генератора ИТЭФ.

Параметры элементов поворотного канала могут быть в дальнейшем уточнены на разных этапах практической реализации проекта с появлением экспериментальных результатов.

В заключение в табл.7 приводится список основных этапов расчёта поворотного канала.

Авторы считают своми приятным долгом выразить благодарность А.Ф. Клыкову за техническую помощь в проведении данной работы.

```
&data
 er=   938.230, q= 1., w=    10.270, xi=   100.000,
 emiti(1)=     48.70,     48.70,   2806.38,
 beami(1)= -1.05,  0.402,  -0.293,   0.222,  -1.23,   0.06860,
 freq=   150.000, pqext=  2.50, ichrom= 0,
 xm= 50.00, xpm=  50.0000, ym=  50.0, dpm= 100.0, dwm=  500.0,
dpp= 100.0,
 n1=   1, n2=  31, smax=  10.0, pqsmax=   2.0, xc=  0.00,
 nel1=   1, nel2=  31,
 beamf(1)= 0.0, 0.561,  0.0,  0.235,  -0.18600,    0.06730,
 mt=  8,mp=0,   0 , 1,  26 , 1,  28 , 1,  30 , 0,   0 , 0,   0 ,
 mvc=0,  0,0 , 0,  0,0 , 0,  0,0 , 0,  0,0 , 0,  0,0 , 0,  0,0 ,
 nt(   1)=  1, a(1,   1)= 600.00000    ,
 nt(   2)=  3, a(1,   2)= -6.2730618, 200.0 ,0.0, 0.0, 0.0 ,
 nt(   3)=  1, a(1,   3)= 150.00000 ,
 nt(   4)=  3, a(1,   4)= 6.7141778 , 200.0, 0.0, 0.0, 0.0 ,
 nt(   5)=  1, a(1,   5)= 650.0 ,
 nt(   6)=  9, a(1,   6)= 30.0 , 500.0, 50.0,  0.0 ,0.0 ,
 nt(   7)=  8, a(1,   7)= 90.0 , 500.0, 0.0    ,
 nt(   8)=  9, a(1,   8)= 30.0 , 500.0, 50.0,  0.0 ,0.0 ,
 nt(   9)=  1, a(1,   9)= 400.0 ,
 nt(  10)=  3, a(1,  10)= 6.7535132 , 200.0, 0.0, 0.0 ,0.0 ,
 nt(  11)=  1, a(1,  11)= 250.0 ,
 nt(  12)=  3, a(1,  12)=-2.7379725 , 200.0, 0.0, 0.0 ,0.0 ,
 nt(  13)=  1, a(1,  13)= 226.5,
 nt(  14)= 10, a(1,  14)=0.30257145 ,-90.0, 0.0, 0.0 ,0.0 ,
 nt(  15)=  1, a(1,  15)= 147.0 ,
 nt(  16)= 10, a(1,  16)=0.30257145 ,-90.0, 0.0, 0.0 ,0.0 ,
 nt(  17)=  1, a(1,  17)= 226.5 ,
 nt(  18)=  3, a(1,  18)= -2.6827162, 200.0, 0.0, 0.0,0.0,
 nt(  19)=  1, a(1,  19)= 250.0 ,
 nt(  20)=  3, a(1,  20)= 6.5504490 , 200.0, 0.0, 0.0,0.0 ,
 nt(  21)=  1, a(1,  21)= 400.0,
 nt(  22)=  9, a(1,  22)= 30.0 , 500.0, 50.0,  0.0 ,0.0,
 nt(  23)=  8, a(1,  23)= 90.0, 500.0, 0.0 ,
 nt(  24)=  9, a(1,  24)= 30.0 , 500.0, 50.0,  0.0 ,0.0 ,
 nt(  25)=  1, a(1,  25)= 100.0,
 nt(  26)=  3, a(1,  26)= 9.8506443 , 200.0, 0., 0.0, 0.00000000 ,
 nt(  27)=  1, a(1,  27)= 100.0 ,
 nt(  28)=  3, a(1,  28)=-8.9874140 , 200.0, 0.0, 0.0, 0.0 ,
 nt(  29)=  1, a(1,  29)= 120.0 ,
 nt(  30)=  3, a(1,  30)= 4.6751567 , 200.0, 0.0,0.0, 0.00000000,
 nt(  31)=  1, a(1,  31)= 880.0 ,
 &end
```

Рис 12. Экранная копия выходного файла программы TRACE 3-D.

Таблица 7. Этапы расчёта поворотного канала.

No	Выполненные исследования	Программа
1.	Определён первоначальный состав оптических элементов канала.	MIRKO
2.	В результате сопоставления функциональных возможностей программ TRANSPORT, GIOSP, TRACE 3-D, PREINJ для расчётов выбрана программа TRACE 3-D.	
3.	Для тока 0 и 100 мА рассчитаны градиенты магнитного поля в квадрупольных линзах и напряженности электрического поля в зазорах банчера поворотного канала. Для тока 0 мА начальные данные на входе и входе канала - согласованные условия в DTL-1. Для тока 100 мА поперечный эмиттанс увеличен на 25%.	TRACE 3-D
4.	Получены уточнённые данные о фазовых характеристиках пучка на входе поворотного канала	DINAMION
5.	Разработана методика определения согласованных условий на выходе поворотного канала.	TRACE 3-D, АБС, DINAMION
6.	Рассчитаны для тока 100 мА градиенты магнитного поля в квадрупольных линзах и напряженности электрического поля в зазорах банчера поворотного канала с уточнёнными данными о фазовых характеристиках пучка на входе и выходе канала.	TRACE 3-D
7.	Выполнен расчёт параметров оптических элементов канала путём задания численных значений элементов матрицы перехода σ.	TRACE 3-D
8.	Расчёт поворотного канала пучка, имеющего кроссоверы в центре поворотных магнитов.	TRACE 3-D
9.	Исследована возможность использования первого периода фокусировки резонатора DTL-2 для формирования пучка.	TRACE 3-D
10.	Разработана конструкция поворотного канала с тремя квадрупольными линзами на выходе, обеспечивающая требуемые условия транспортировки пучка.	TRACE 3-D

Список литературы

1. Chuvilo I.V., Katz M.M., Kozodaev A.M., Kolomiets A.A., Lazarev N.V., Plotnikov V.K., Shimchuk G.G., Shvedov O.V. Proton 36 MeV, 0.5 mA linac Istra-36 as a driver of multipurpose irradiation test facility. 8th European

Particle Conference - EPAC96. 10-14 June 1996, Barcelona, Spain, v.3, p.2674-2676.

2. Балабин А.И., Капчинский И.М., Козодаев А.М., Коломиец А.А., Липкин И.М., Угаров С.Б. Основные физические параметры протонного линейного ускорителя "Истра-56" (Часть-1). М., Препринт ИТЭФ, 1989, № 157.
3. Венгров Р.М., Воробьёв И.А., Капчинский И.М, Козодаев А.М., Коломиец А.А., Ярамышев С.Г. Линейный протонный ускоритель с ПОКФ на энергию 3 МэВ. Препринт ИТЭФ, 1993, № 34.
4. Котов В.И., Миллер В.В. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. М., Атомиздат, 1969.
5. Воробьёв И.А., Высоцкий С.А. Оптимизация согласующего канала ускорителя "Истра-36". Программы расчёта.. М., Препринт ИТЭФ, 1998, № 2.
6. Crandall K.R. Trace 3-D Documentation, Los Alamos National Lab., LA-UR-90-4146.
7. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М., Атомиздат, 1966.
8. Kolomiets A.A., Vorobyov I.A., Yaramishev S.G. DYNAMION - the New Code for Beam Dynamics Simulations in High Current Ion Linac. 6th European Particle Conference (EPAC98), Proc. p. 1201-1203, 22-26 June 1998, Stockholm.
9. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. М., Энергоиздат, 1982.

Подписано к печати 04.II.98 Формат 60x90 I/I6
Усл.-печ.л.I,0. Уч.-изд.л.0,7. Тираж I0I экз. Заказ 39.
Индекс 3649

Отпечатано в ИТЭФ, II7259, Москва, Б.Черемушкинская, 25