

# Линейный ускоритель – инжектор источника СИ СКИФ

А.Е.Левичев,

[A.E.Levichev@inp.nsk.su](mailto:A.E.Levichev@inp.nsk.su)

31.01.2020

# Основные параметры инжектора источника синхротронного излучения

## Основные параметры инжектора

Энергия инжекции в основное кольцо	3 ГэВ
Максимальная энергия инжекции	3,15 ГэВ
Частота инжекции в накопитель	1 Гц
Время между сгустками	5,6 нсек
Количество сгустков электронов в поезде	до 55
Заряд в одном сгустке	до 0,27 нКл
Максимальный заряд в поезде	13 нКл
Время заполнения накопителя электронов от 0 до 400 мА	Не более 1 минуты
Эффективность транспорта заряда от пушки до накопителя	Не менее 90%
Горизонтальный эмиттанс при 3ГэВ	< 40 нм*рад
Разброс по энергии	< 0,1%
Время незапланированных остановок в год	Не более 0,5%

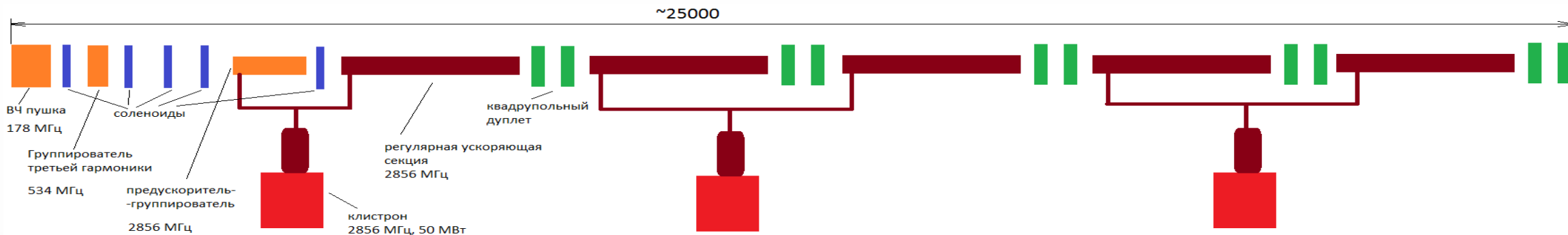
## Основные параметры линака

Энергия электронов	200 МэВ
Максимальная энергия	210 МэВ
Частота выстрелов	1 Гц
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ	150 нм*рад
Разброс по энергии на 200 МэВ	Не более 1% (rms)
Время незапланированных остановок в год	Не более 0,5%

## Пользовательские режимы

Режим	Ток, мА	Время между сгустками, нс
Режим 1 - общий	400	5.6
Режим 2 - односгустковый	5	
Режим 3	5	22.409 (5.6x4)
Режим 4	5	100.84 (5.6x18)
Режим 5	5	134.454 (5.6x24)
Режим 6	5	201.681 (5.6x36)

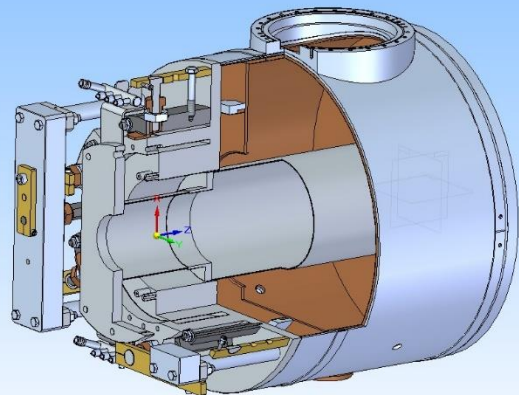
# Общая схема ускорителя с энергией 200 МэВ



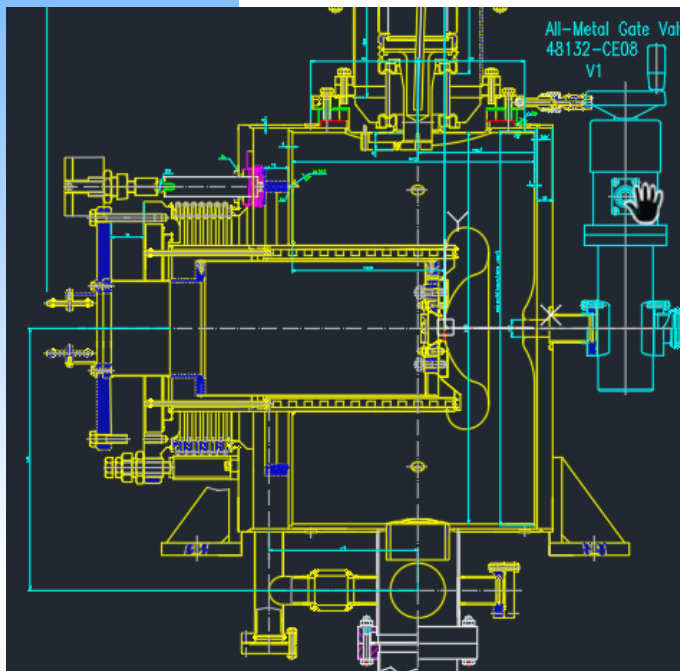
Название	Описание	Кол-во
Источник электронов	СВЧ пушка на основе триодной лампы, частота 178 МГц	1
Группирующий резонатор 1	Резонатор третьей гармоники с частотой 534 МГц	1
Группирователь-предускоритель	Структура на бегущей волне с частотой 2856 МГц с видом колебания $2\pi/3$ , мощность 10 МВт	1
Ускоряющая структура	Частота 2856 МГц, длина 3 м, структура на бегущей волне с видом колебания $2\pi/3$	5
Источник мощности резонатора СВЧ пушки	Частота 178 МГц, мощность около 1 МВт	1
Модулятор источника электронов	Частота до 0-178 МГц, длительность 2 нс, амплитуда до -150 В	1
Источник СВЧ мощности резонатора группирователя	Частота 534 МГц, мощность 10 кВт	1
Клистрон	Частота 2856 МГц, мощность 50 МВт	3+1
Предусилитель мощности для клистрона	Частота 2856, мощность 500 Вт	3
Модулятор клистрона	350 кВ высокое напряжение, 120 МВт импульсная мощность	3
Термостабилизация	100 kW	1
Соленоидальные фокусирующие элементы	соленоид с максимальным полем $\sim 1000$ Гс	5+2
Квадрупольные линзы	Линзы регулярных ускоряющих структур	10

# СВЧ пушка с частотой 178 МГц

Н. Васильева, В. Волков



Катодный узел на базе лампы ГС-34



Резонансная частота, МГц	178
Максимальное поле на оси, МВ/м	13
Коэффициент перенапряженности	1.8
Добротность	10300
Импульсная мощность, кВт	500



Parameter	Min	Max
Мощность, рассеиваемая сеткой, Вт		3
Напряжение накала, В	12	13.2
Напряжение смещения, В	-150	0
Максимальный импульсный ток катода, А		11
Импульсный ток сетки, А		4
Длительность импульса, мс		10
Прозрачность сетки		75%
Коэффициент проникновения поля за сетку		25.8%

Режим	Заряд в одном сгустке, нКл	Время между сгустками, нс
Режим 1 - общий	0.27	5.6
Режим 2 - односгустковый	1	
Режим 3	1	22.409 (5.6x4)
Режим 4	1	100.84 (5.6x18)
Режим 5	1	134.454 (5.6x24)
Режим 6	1	201.681 (5.6x36)

# СВЧ пушка с частотой 178 МГц

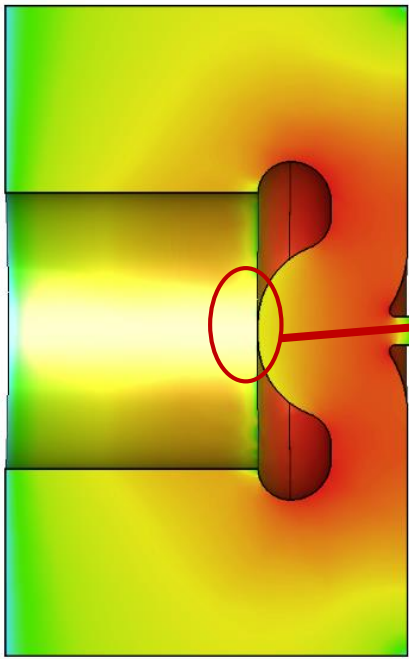
## Задачи:

1. Получение заряда с учетом реальной паркетной сетки катода.

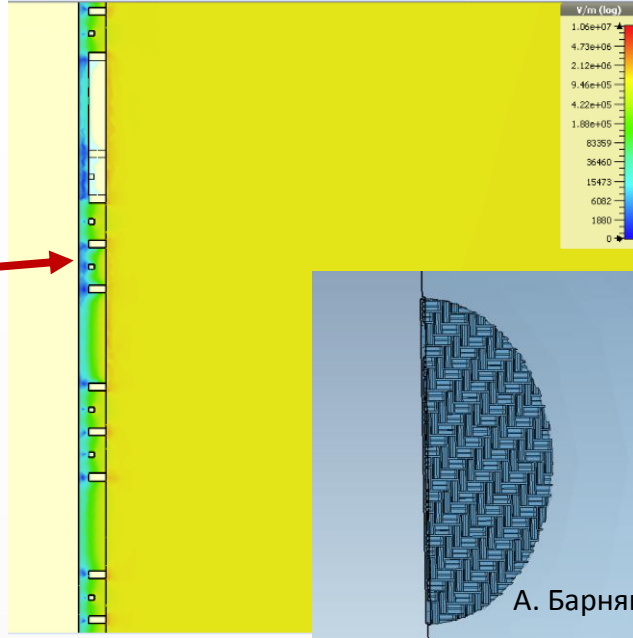
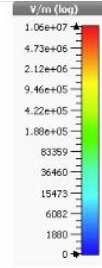
Данную задачу можно выполнить только в CST-studio, но расчет динамики всего линака невозможен.

2. Расчет динамики.

Возможен в ASTRA, но невозможно смоделировать паркетную сетку

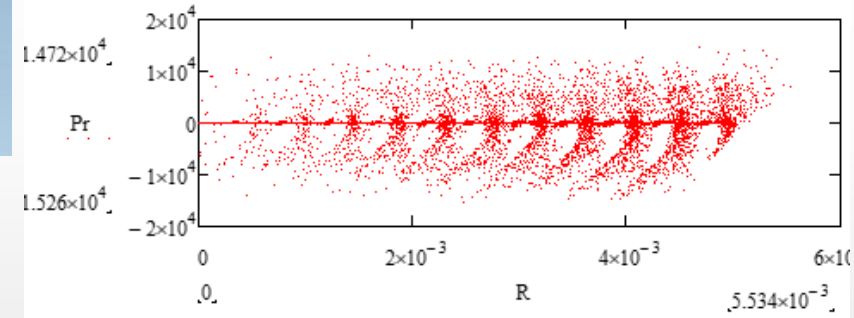


А. Барняков, В. Волков

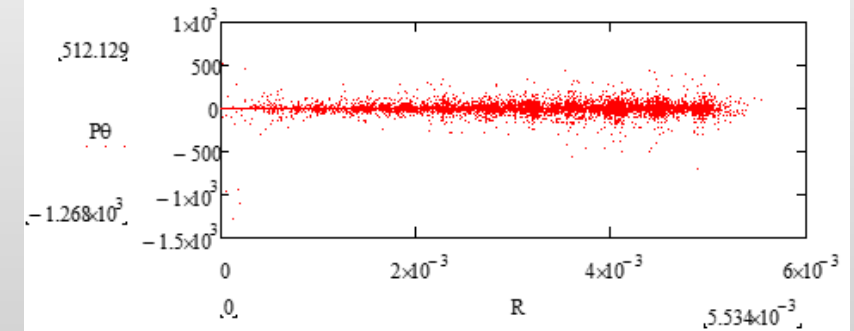


А. Барняков

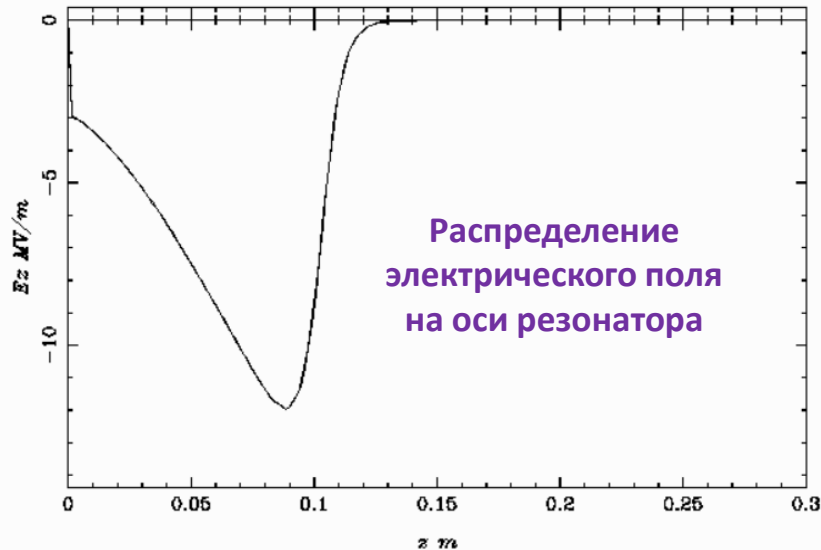
Сетка катода в коде ASTRA



Азимутальный импульс частиц

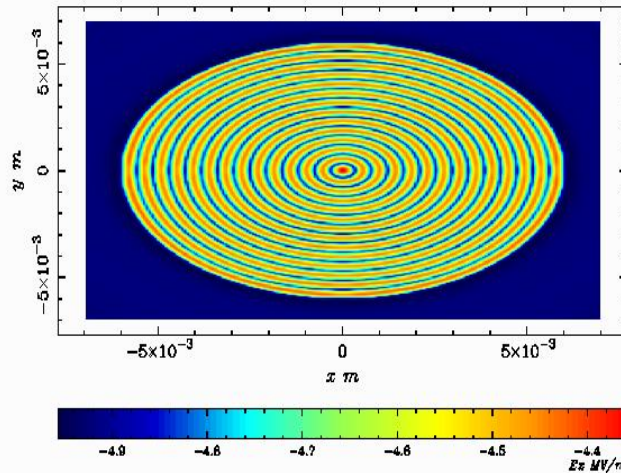


longitudinal electric field



Распределение электрического поля на оси резонатора

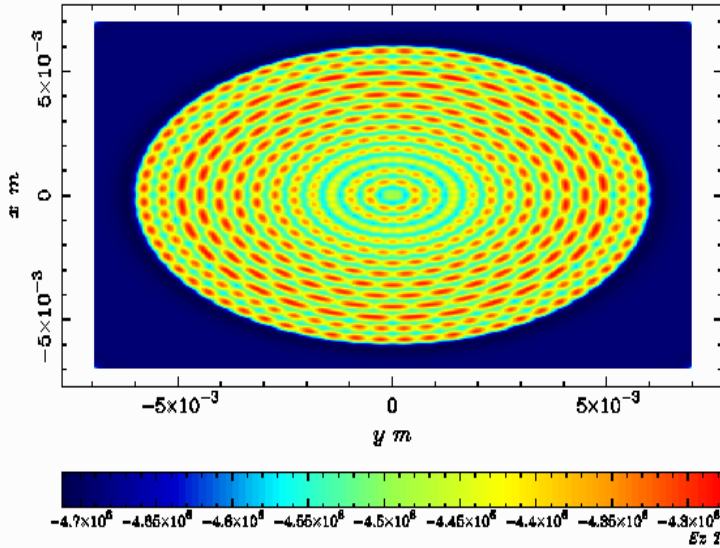
Cavity Field Map x-y



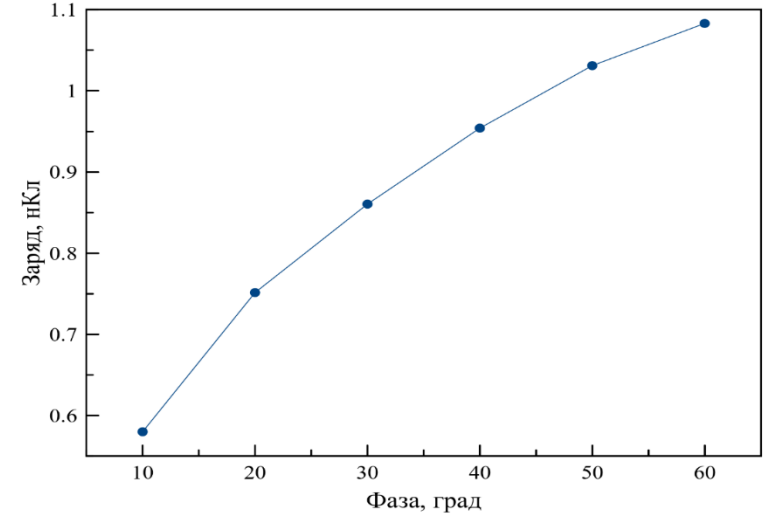
Д. Никифоров

# СВЧ пушка с частотой 178 МГц

Cavity Field Map x-y

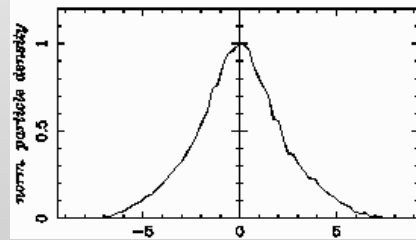
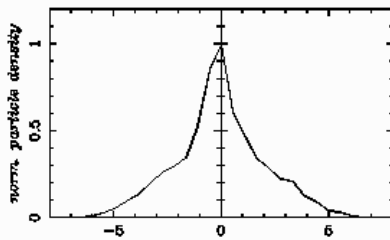
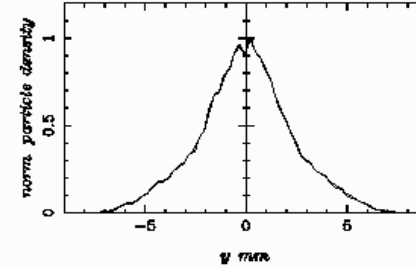
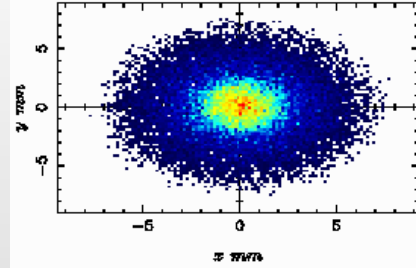
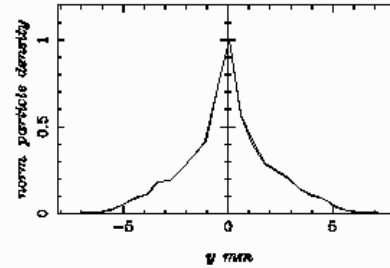
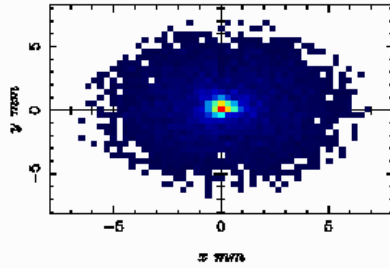
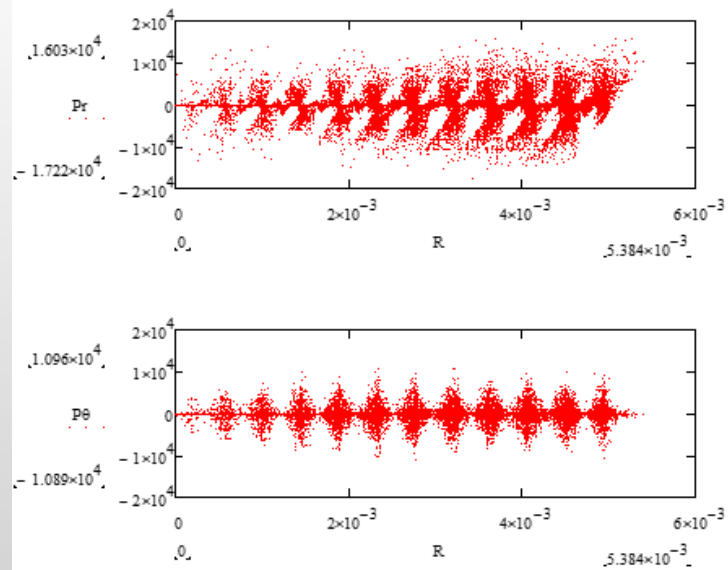


Чтобы усовершенствовать поля катодно-сеточного узла, надо в него добавить азимутальные компоненты электрического поля. Для этого между кольцами можно вставить тоненькие проволочки, которые практически не задерживают частицы, но должны сильно исказить азимутальные поля.



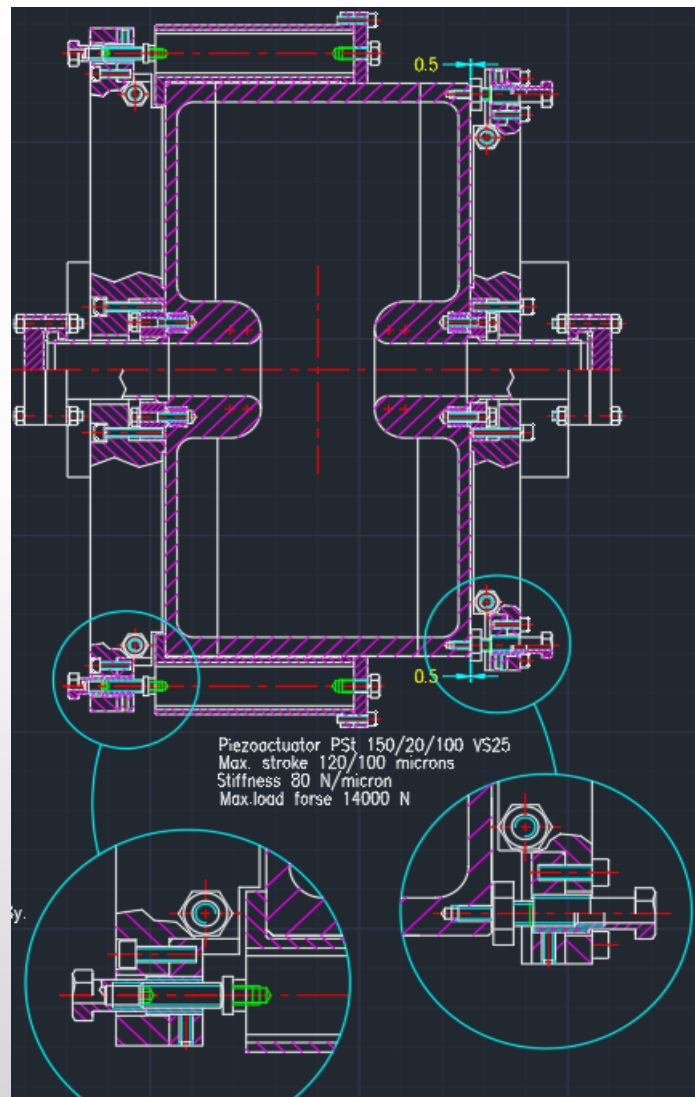
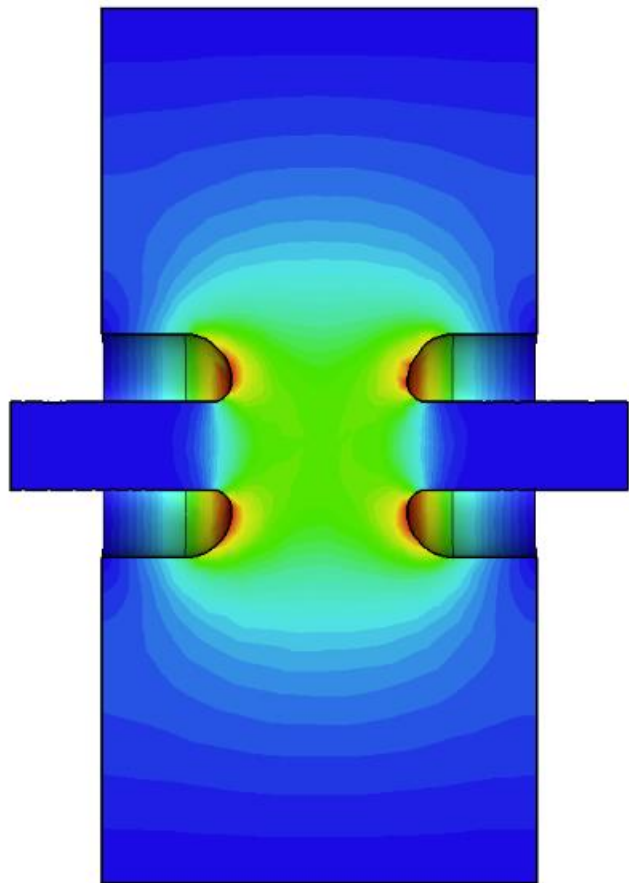
Распределение после пушки без радиальных проволочек

Распределение после пушки с радиальными проволочками



# Группирователь третьей гармоники (534 МГц)

В. Волков, А. Барняков

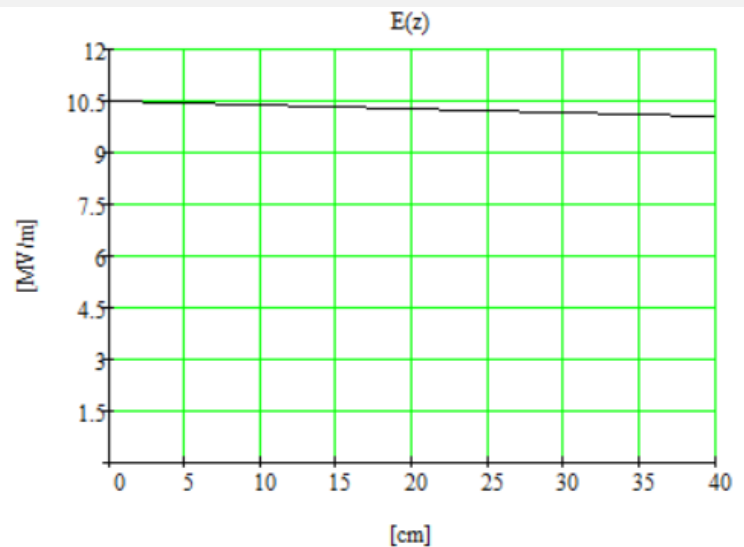
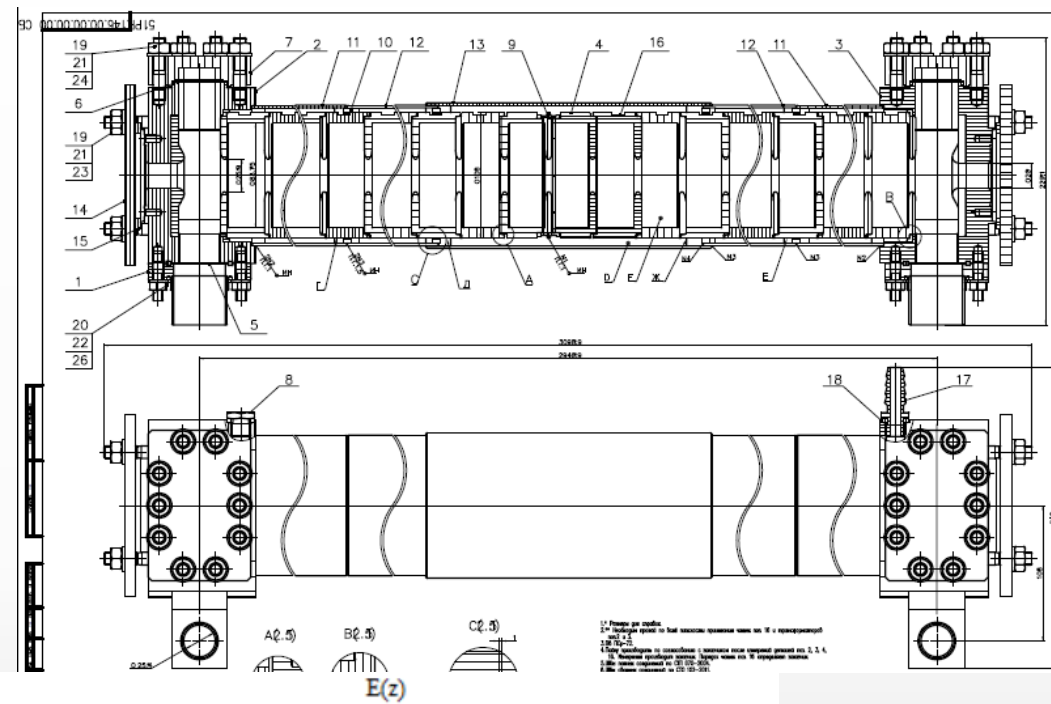
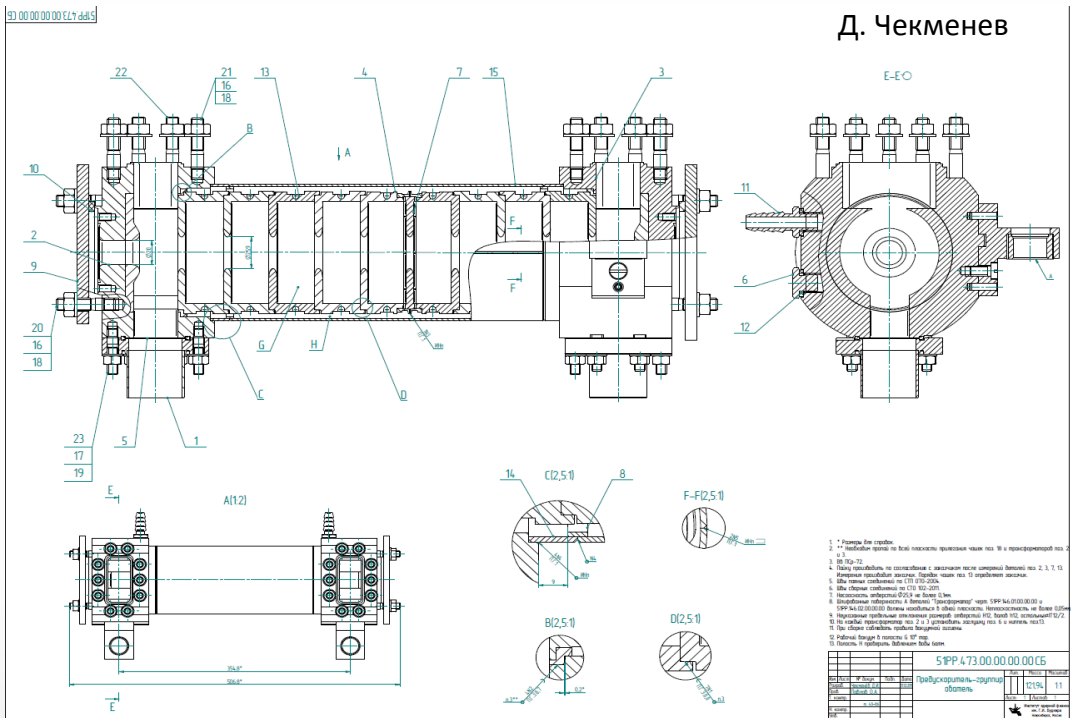


В. Ческидов

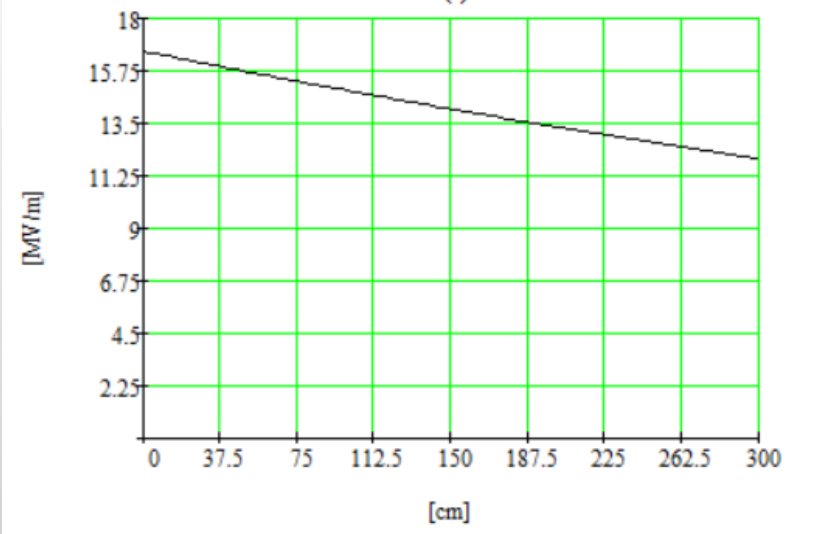
Характеристика	Обозначение	Значение
Резонансная частота	$f_3$ , MHz	535.3-535.5
Добротность (80% от расчета SLANS)	$Q_3$	20210
Эффективн. Характеристич. импеданс	$\rho_3$ , Ом	148.2
Коэффициент пролета	$T$	0.9614564
Накопленная ВЧ энергия	$U_3$ , Дж	0.036267
Эффективное напряжение ( $\rho \cdot Q$ )	$V_3$ , MV	0.19
Мощность имп., рассеив-ая в стенках	$P_3$ , кВт	6.02
Средняя мощность, рассеив. в стенках	$Вт$	<1.5
Энергия пучка на выходе резонатора	$E_3$ , MeV	0.5112
Энергия пучка на входе резонатора	$MeV$	0.684
Фаза пролета относит. фазы ВЧ	$\Phi_3$ , град	-188.01
Подсадка напряжения рез-ра пучком	$\Delta V_3/V_3$ , %	0.237948
Стабильность амплитуды ВЧ	%	<4.7
Стабильность фазы ВЧ	град	<3.0
г.т.с. поперечный размер пучка	мм	2.7
Чувствительность к прогибу стенки	МГц/мм	1.73
Чувствительность к измен. длины рез.	МГц/мм	0.95
Ход пьезокерамическ. Тюнера 40 мм	мкм	38
Ход Тюнера под нагрузкой 65 кN/mm	мкм	23

В. Волков

# Группирователь-предускоритель и регулярная ускоряющая структура



Мощность 10 МВт,  
максимальная  
энергия пучка 4  
МэВ



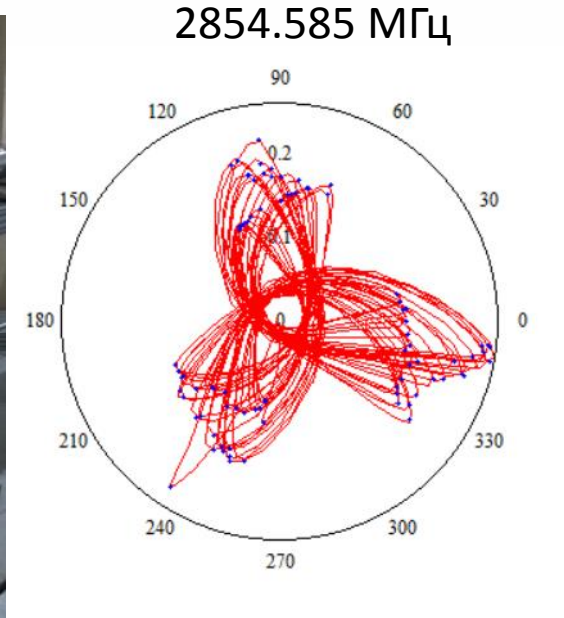
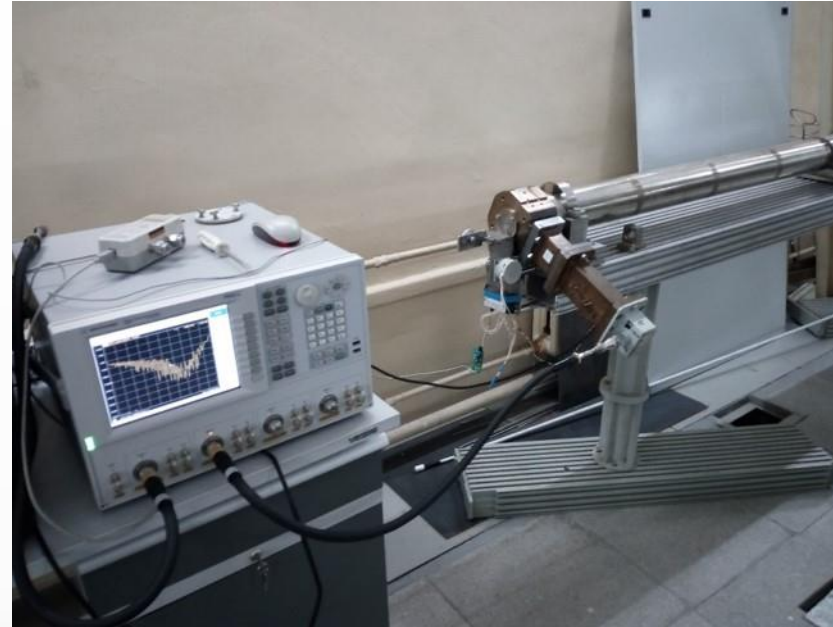
Мощность 25 МВт,  
максимальная  
энергия 42 МэВ



# Регулярная ускоряющая структура

Table1. Parameters of the accelerating section.

Operational frequency	2855.5 MHz
Internal cell diameter $2b$	83.75 mm
Iris diameter $2a$	25.9 mm
Iris thickness $t$	6 mm
Period $D$	34.99 mm
Operational mode of oscillation $\theta$	$2\pi/3$
Relative phase velocity $\beta_p$	1
Relative group velocity $\beta_g$	0.021
Section length $L$	2.93 m
Total number of cells (incl. 2 WTT)	85
Unloaded quality factor $Q_0$	13200
Shunt impedance $R_{sh}$	51 MOhm/m
Time constant $\tau_{kl}=2Q_0/\omega_0$	1.471 $\mu$ s
Attenuation (by field) $\alpha=1/(\tau_{0a}v_{gr})$	0.108 m <sup>-1</sup>
Filling time $T_f=L/v_{gr}$	0.465 $\mu$ s



## Test of accelerating Section for VEPP-5 Pre-injector

M.S. Avilov, V.E. Akimov, A.V. Aleksandrov, A.V. Antoshin,  
 P.A. Bak, O.Yu. Bazhenov, Yu.M. Boimelshtein, D.Yu. Bolkhovityanov,  
 R.Kh. Galimov, R.G. Gromov, K.V. Gubin, S.M. Gurov, Ye.A. Gusev,  
 N.S. Dikansky, N.I. Zmevich, I.V. Kazarevov, N.A. Kiseleva,  
 V.I. Kokoulin, V.I. Kopylov, S.N. Klyushev, M.B. Korabelnikov,  
 A.A. Korepanov, A.N. Kosarev, N.Kh. Kot, N.N. Lebedev, P.V. Logatchev,  
 A.N. Lukin, P.V. Martyshekin, L.A. Mironenko, A.A. Nikiforov,  
 A.V. Novokhatski, V.M. Pavlov, I.L. Pivovarov, O.V. Pirogov,  
 V.V. Podlevskikh, S.L. Samoilo, B.A. Skarbo, B.M. Smirnov,  
 A.N. Skrinisky, A.N. Sudarkin, D.P. Sukhanov, A.R. Frolov,  
 A.S. Tsyganov, A.G. Chupryra, V.D. Khabibov, V.D. Shemelin,  
 S.V. Shiyankov, Yu.V. Yudin.

Budker INP,  
 630090 Novosibirsk, Russian federation

## Abstract

Basic results of VEPP-5 pre-injector accelerating section tests are presented in this paper. Single 3 m long accelerating section was powered by 240 MW RF of 5045 klystron with pulse compression system.

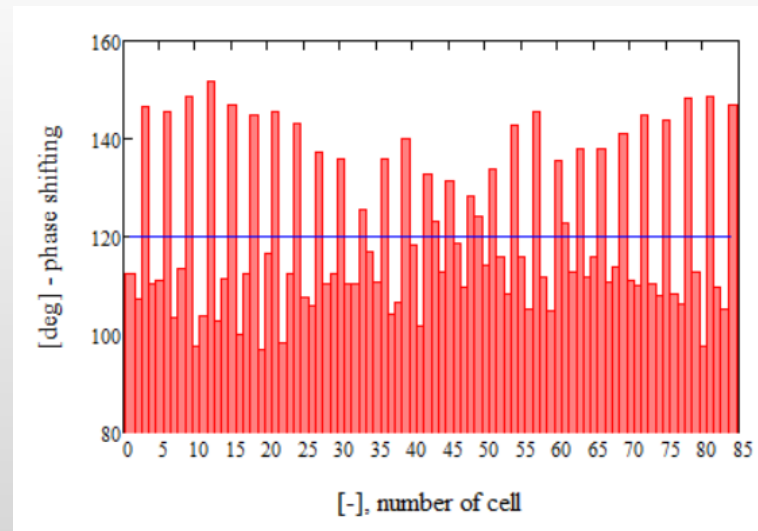
The maximum beam energy of 105 MeV was detected at U-turn magnetic spectrometer. The beam energy per pulse 26 J was reached at the energy of 92 MeV for the 310 ns beam current.

## Отклонение энергии

$$\delta W = \frac{\Delta W}{W} = -\Delta\theta \left( \frac{1}{2tg\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} - \frac{1}{\theta_0} \right) = 0.189\Delta\theta$$

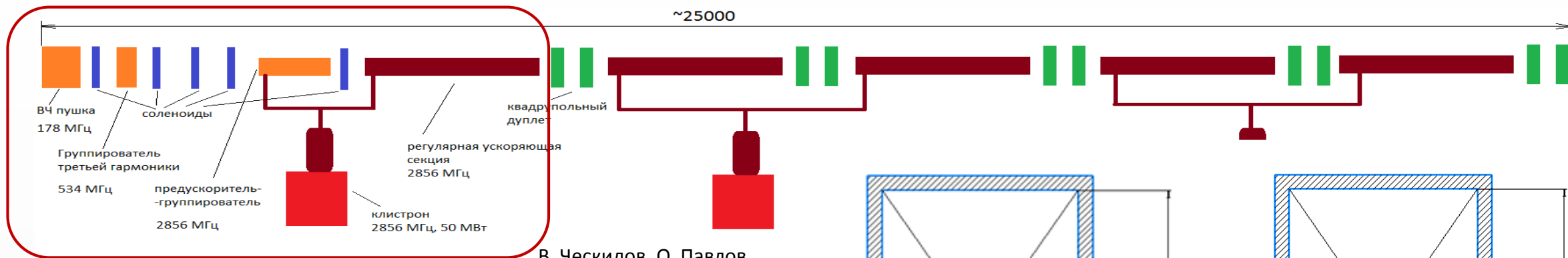
При  $\Delta\theta = 30$  град уход по энергии 10%

С учетом измерений для инжектора СКИФ энергия должна составить 198 МэВ!

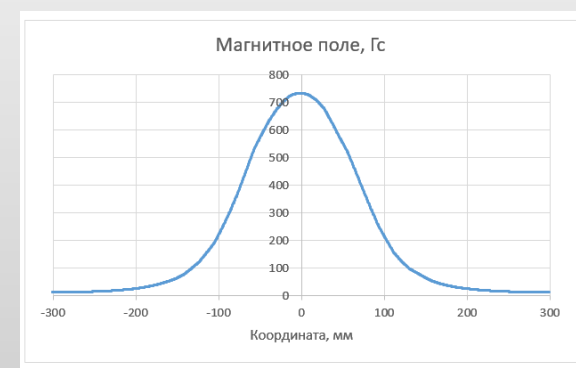
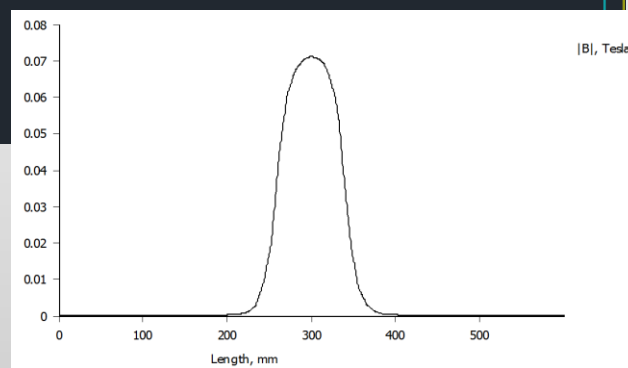
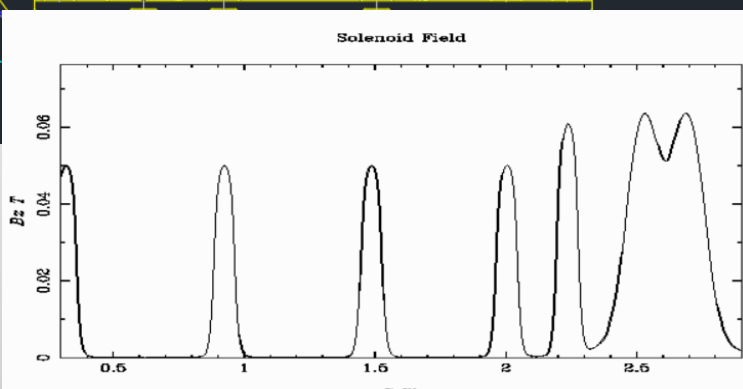
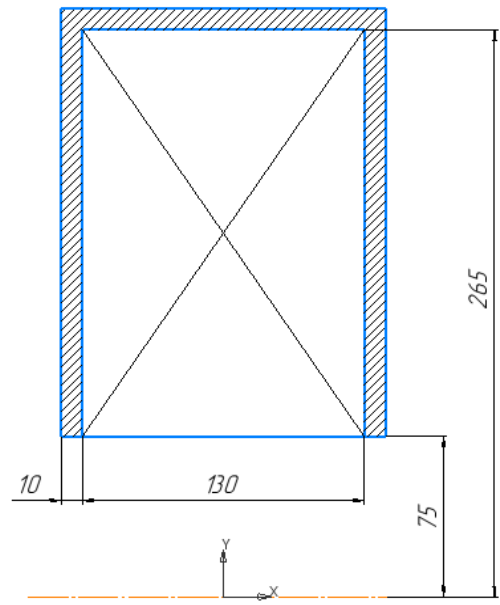
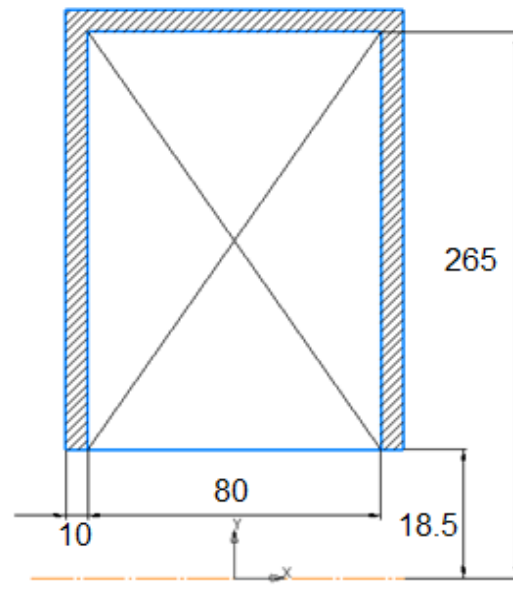
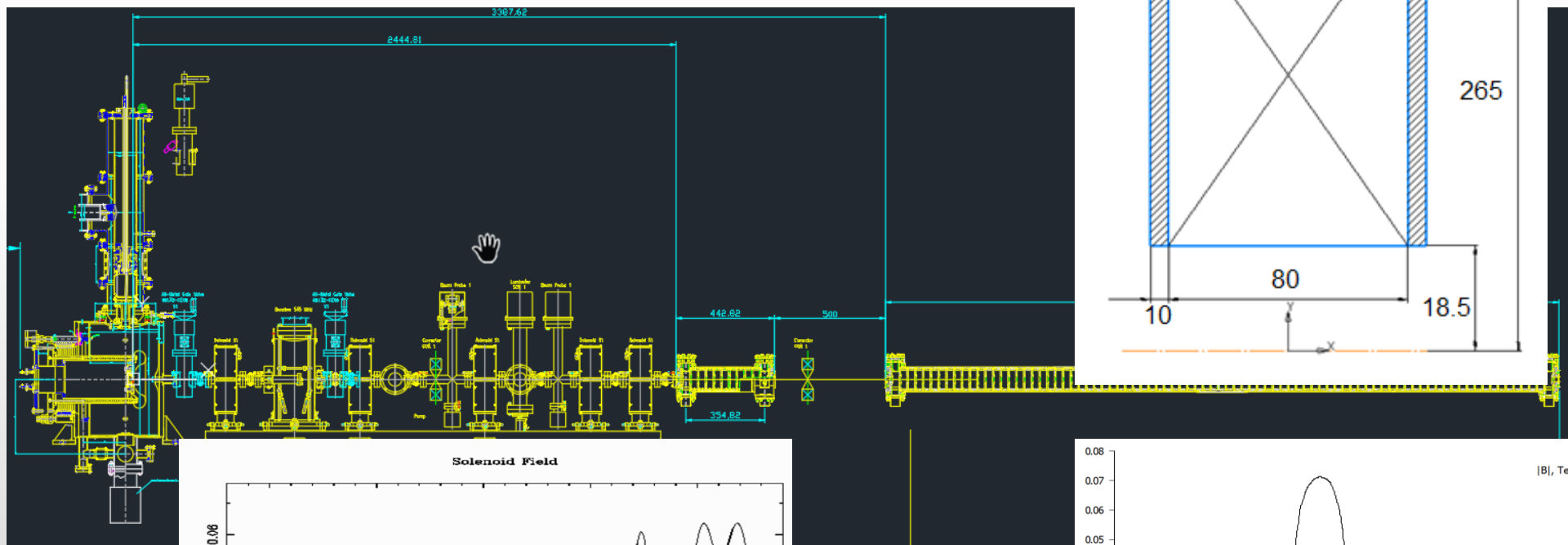


Суммарная ошибка 24 град.

# Система группировки и предускорения (стенд ИЯФ)

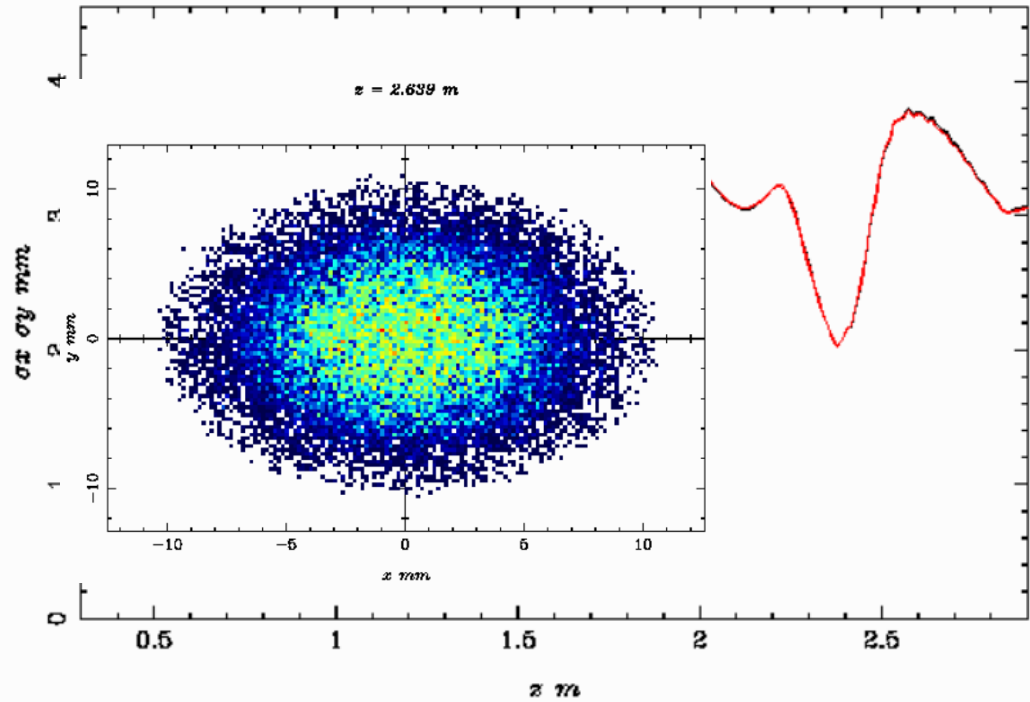


В. Ческидов, О. Павлов

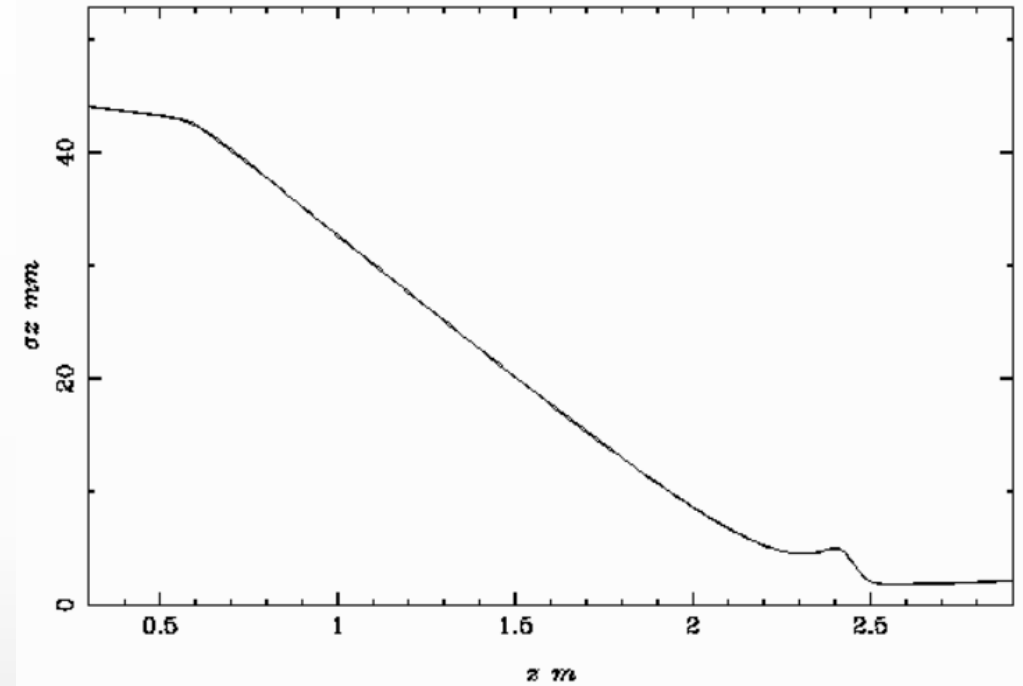


# Система группировки и предускорения, заряд 1 нКл

Beam Size

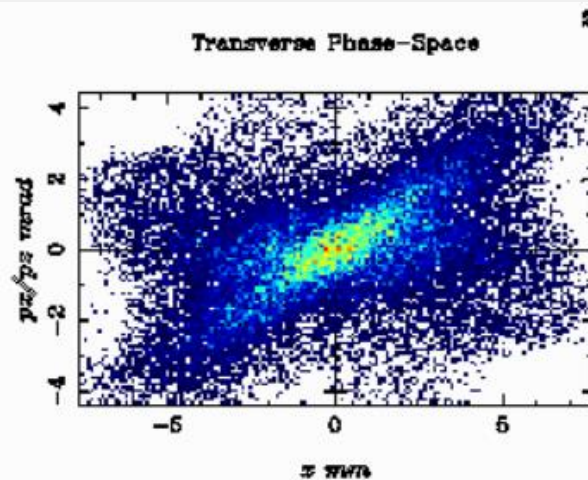


Bunch Length

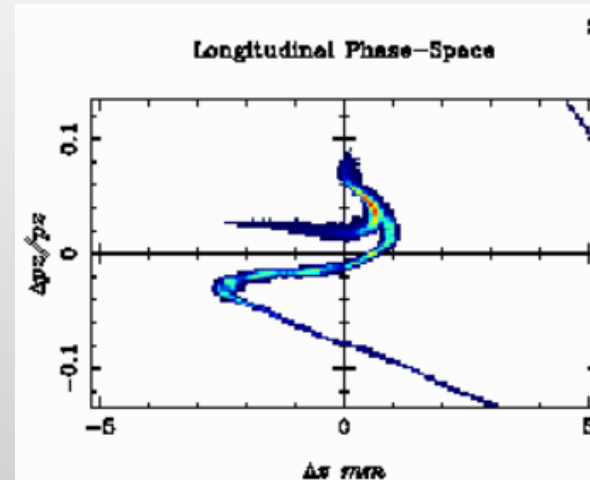


Particles taken into account	N =	32752
total charge	Q =	-0.9825 nC
horizontal beam position	x =	8.3475E-03 mm
vertical beam position	y =	7.2224E-04 mm
longitudinal beam position	z =	2.900 m
horizontal beam size	sig x =	3.065 mm
vertical beam size	sig y =	3.055 mm
longitudinal beam size	sig z =	2.076 mm
average kinetic energy	E =	4.222 MeV
energy spread	dE =	250.9 keV
transverse beam emittance	eps x =	46.12 pi mrad mm
correlated divergence	cor x =	0.6741 mrad
transverse beam emittance	eps y =	45.47 pi mrad mm
correlated divergence	cor y =	0.6821 mrad
longitudinal beam emittance	eps z =	520.6 pi keV mm
correlated energy spread	cor z =	-3.993 keV
emittance ratio eps y/eps x	=	1.014

Transverse Phase-Space

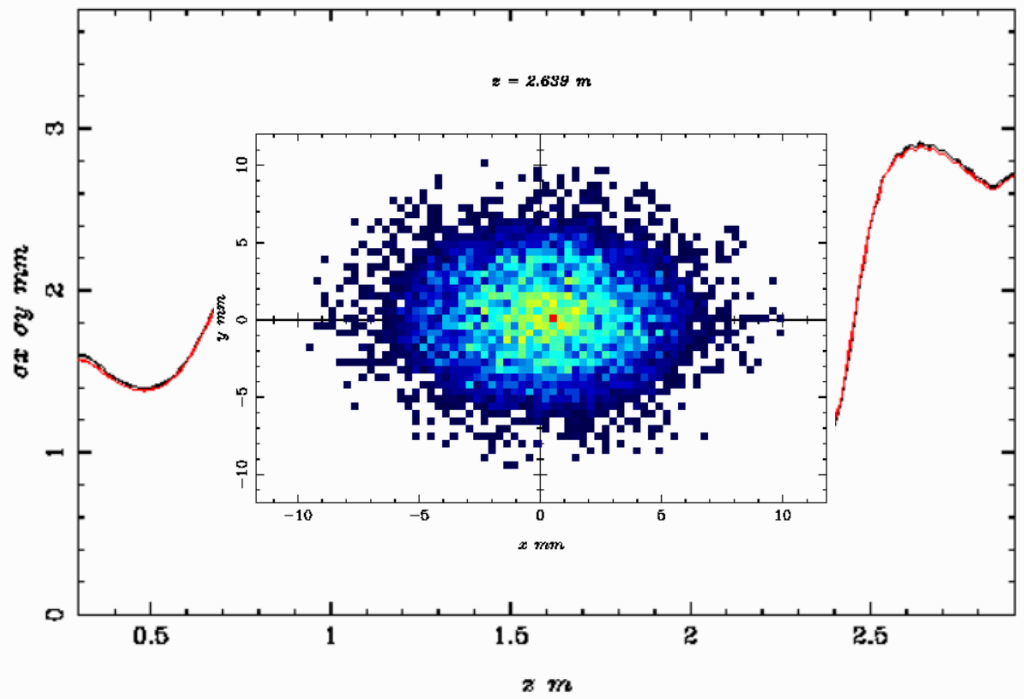


Longitudinal Phase-Space

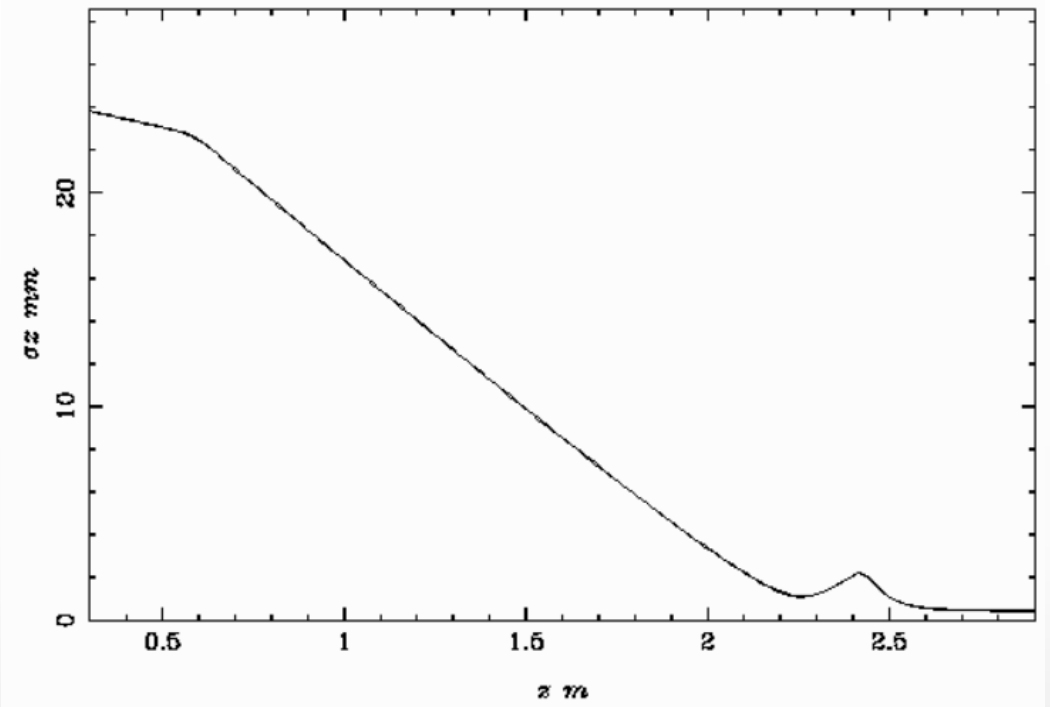


# Система группировки и предускорения, заряд 0.3 нКл

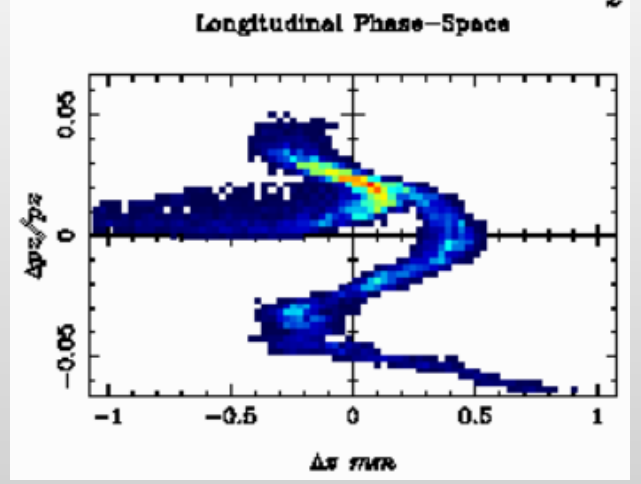
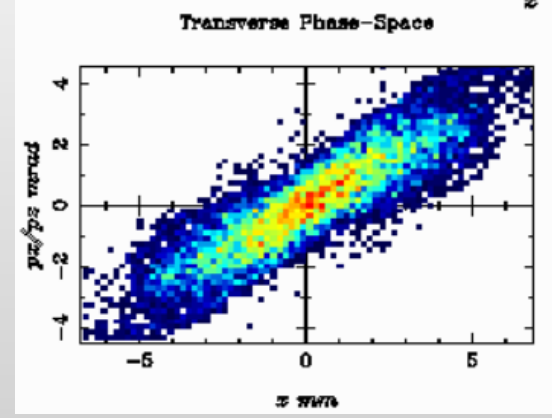
Beam Size



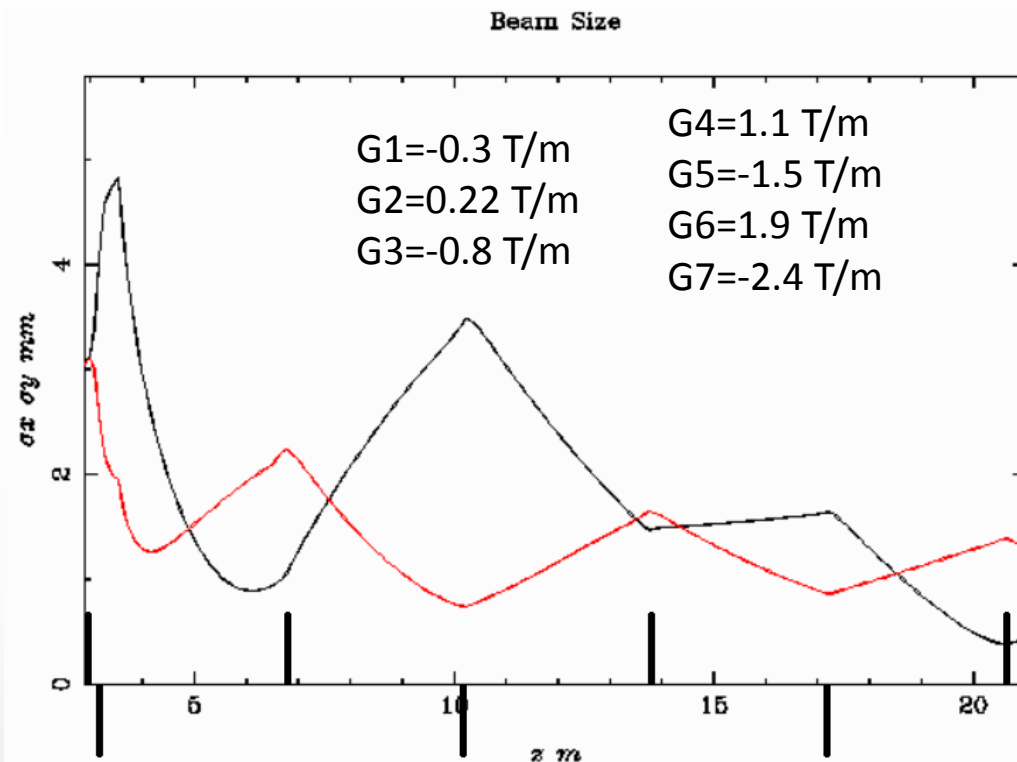
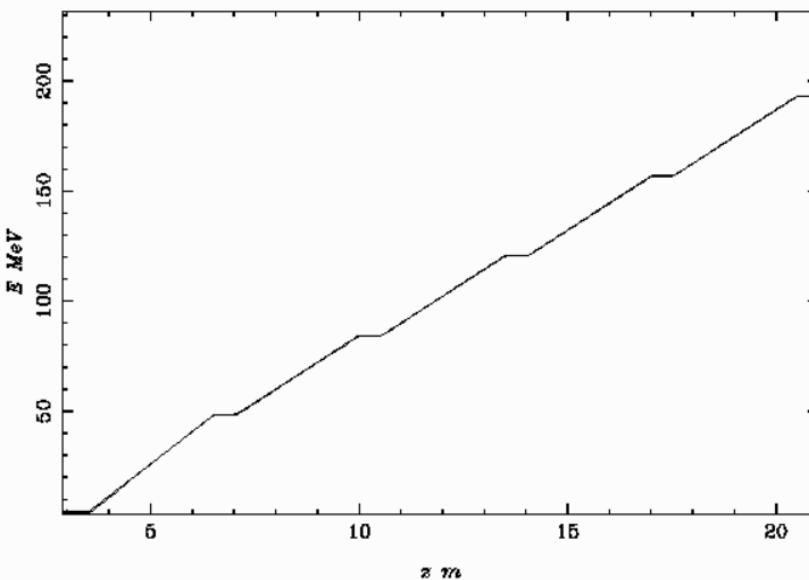
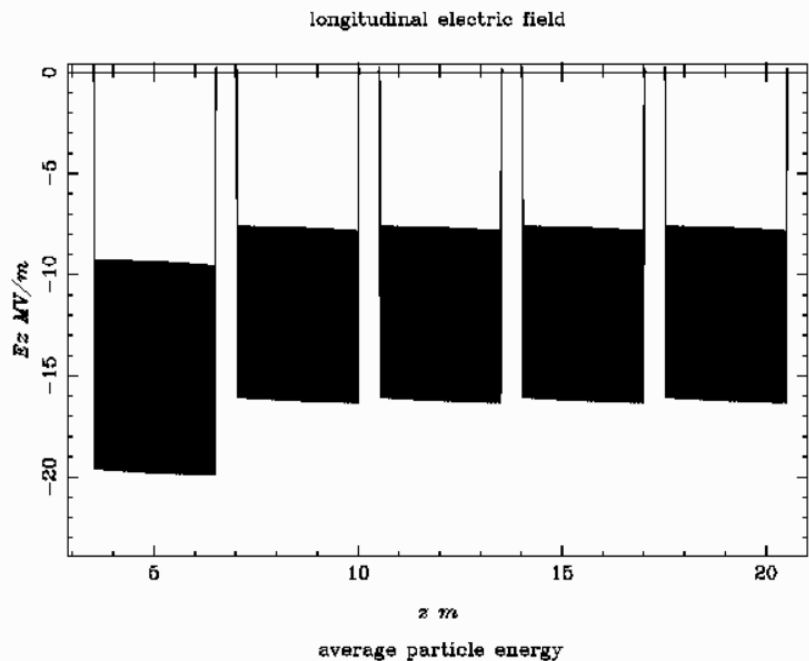
Bunch Length



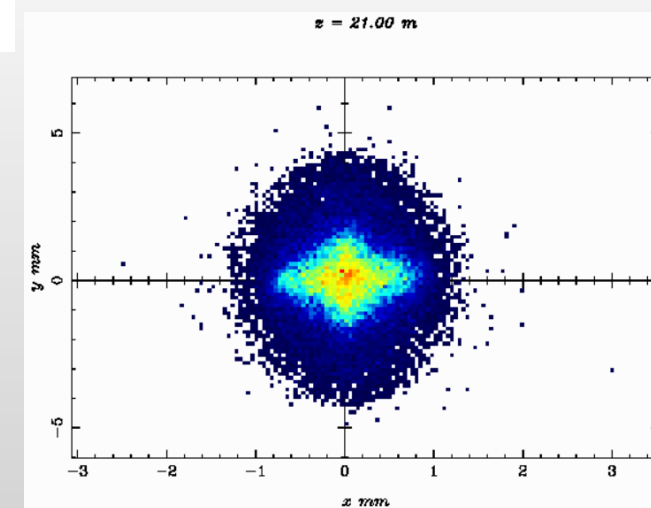
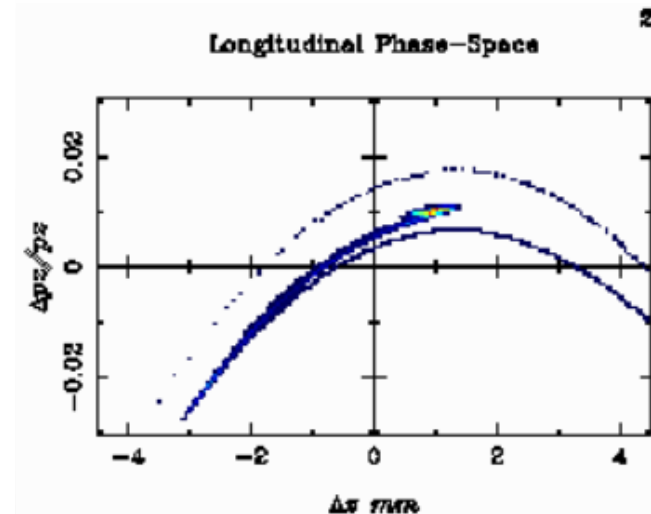
Particles taken into account	N =	10221	
<u>total charge</u>	Q =	-0.3066	nC
horizontal beam position	x =	2.8415E-02	mm
vertical beam position	y =	4.1434E-03	mm
longitudinal beam position	z =	2.900	m
horizontal beam size	sig x =	2.728	mm
vertical beam size	sig y =	2.712	mm
longitudinal beam size	sig z =	0.4318	mm
<u>average kinetic energy</u>	E =	4.254	MeV
<u>energy spread</u>	dE =	125.2	keV
transverse beam emittance	eps x =	19.91	pi mrad mm
correlated divergence	cor x =	1.617	mrad
transverse beam emittance	eps y =	19.93	pi mrad mm
correlated divergence	cor y =	1.629	mrad
longitudinal beam emittance	eps z =	50.48	pi keV mm
correlated energy spread	cor z =	-44.85	keV
emittance ratio eps y/eps x	=	0.9991	



# Регулярная часть линака, заряд 1 нКл

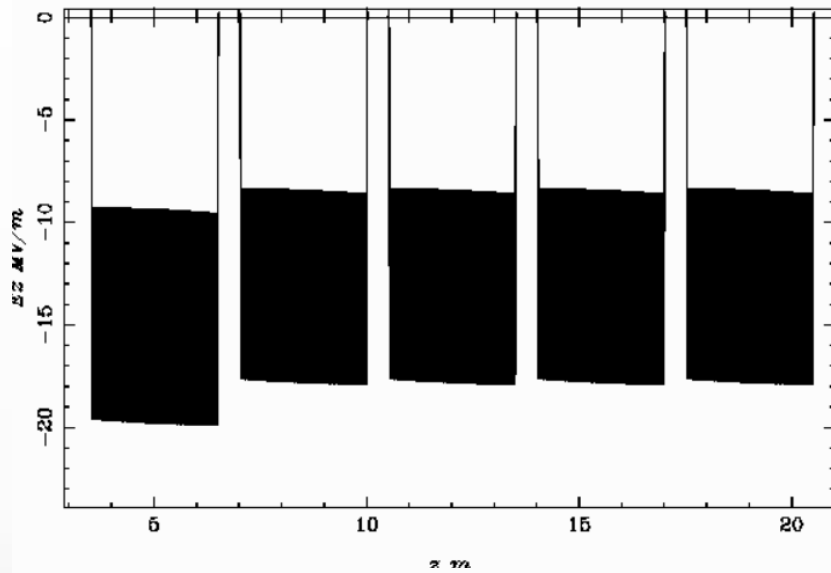


total charge	Q =	-0.9770	nC
horizontal beam position	x =	-4.2050E-04	mm
vertical beam position	y =	1.0070E-03	mm
longitudinal beam position	z =	21.00	m
horizontal beam size	sig x =	0.4409	mm
vertical beam size	sig y =	1.297	mm
longitudinal beam size	sig z =	1.803	mm
average kinetic energy	E =	193.1	MeV
energy spread	dE =	2369.	keV
transverse beam emittance	eps x =	59.36	pi mrad mm
correlated divergence	cor x =	0.2322	mrad
transverse beam emittance	eps y =	48.66	pi mrad mm
correlated divergence	cor y =	-0.2705	mrad
longitudinal beam emittance	eps z =	3754.	pi keV mm
correlated energy spread	cor z =	1131.	keV
emittance ratio eps y/eps x	=	1.220	

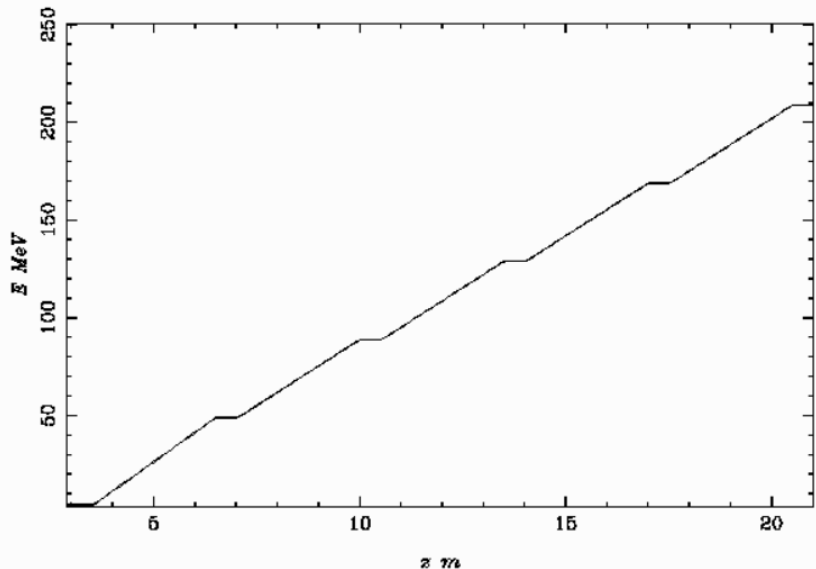


# Регулярная часть линака, заряд 0.3 нКл

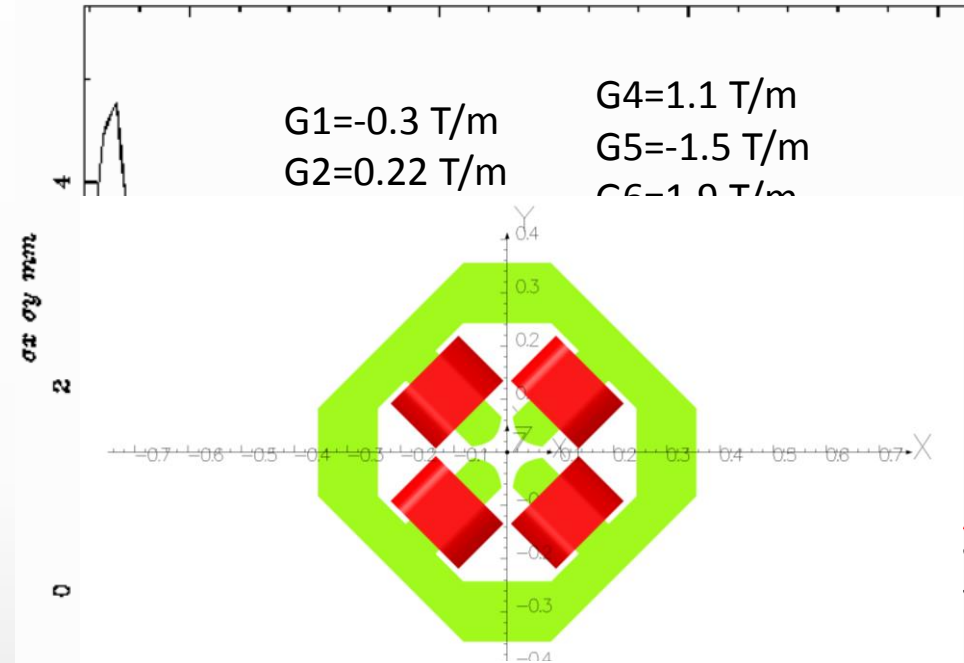
longitudinal electric field



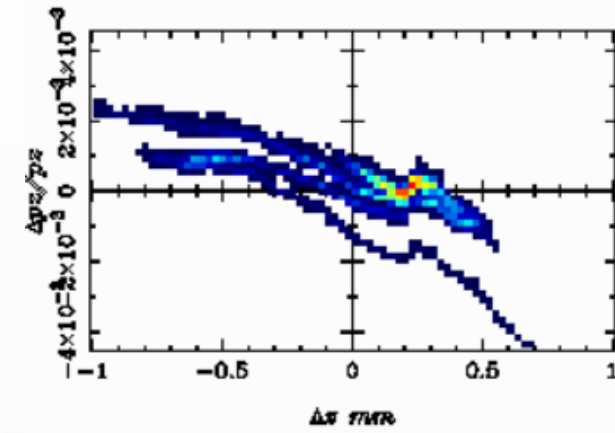
average particle energy



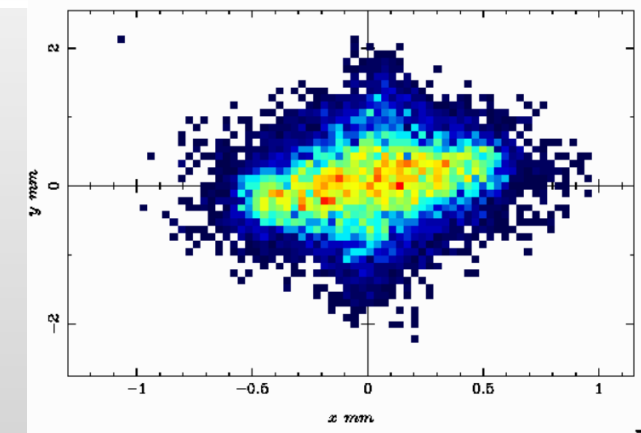
Beam Size



Longitudinal Phase-Space



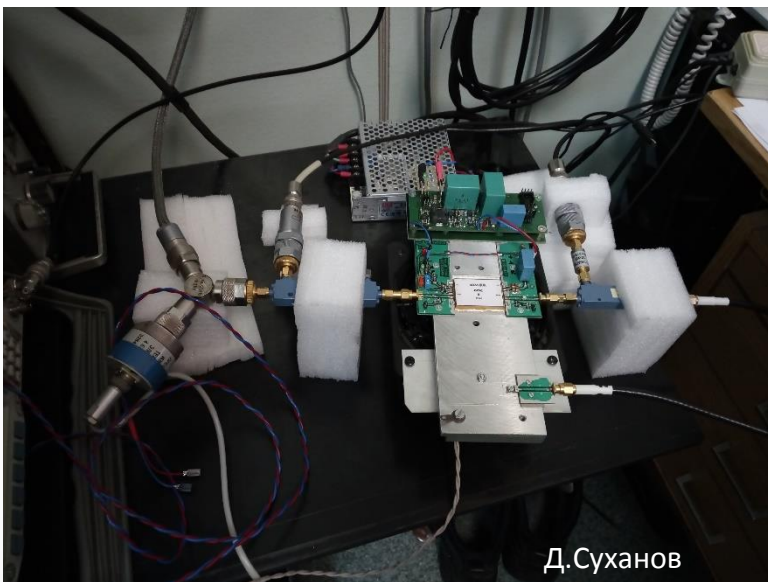
z = 21.00 m



- Апертура 37 мм.
  - Полный ток в катушке 6000 А, плотность тока 1 А/мм<sup>2</sup>. Сечение катушек в расчётах 50x120 мм.
  - Площадь для размещения катушек примерно 15000 мм<sup>2</sup>. Если всю площадь заполнить катушками и взять для оценок мощности половину площади получится примерно 35 W на катушку.
  - Градиент в центре 10.26 T/m
  - Интеграл градиента 1.44678 T
- |                             |         |         |           |
|-----------------------------|---------|---------|-----------|
| total beam emittance        | eps x = | 110.0   | ps mm     |
| correlated divergence       | cor y = | -0.1226 | mrاد      |
| longitudinal beam emittance | eps z = | 108.5   | pi keV mm |
| correlated energy spread    | cor z = | -268.9  | keV       |
| emittance ratio eps y/eps x | =       | 1.081   |           |

# Другие элементы

Предусилитель клистрона



Д. Суханов

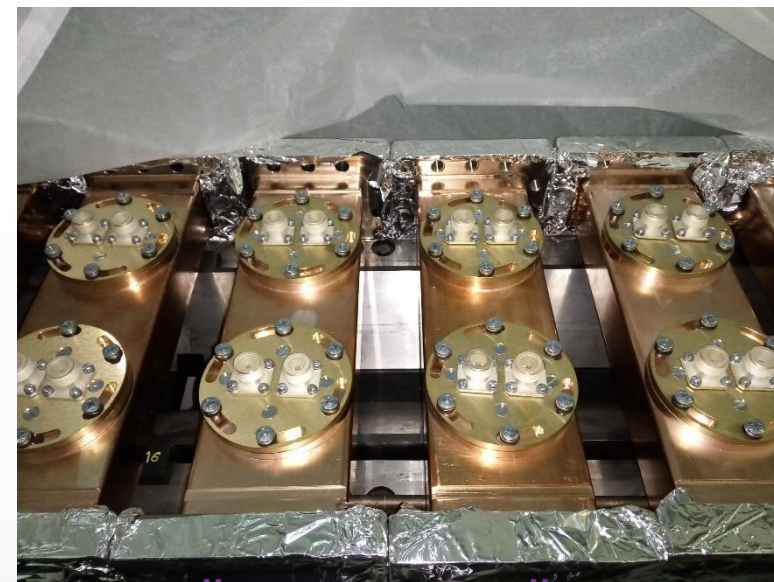
Мост 3 дБ



Элементы фазовращателя



Измерительные ответвители



Ячейки ускоряющей секции



СВЧ нагрузки



# Заключение

1. Проработана принципиальная схема линейного ускорителя
2. Рассчитана динамика, определены основные параметры магнитных элементов, получены основные параметры в СВЧ пушке и на выходе линака
3. Разработан стенд для измерения ускоряющих структур
4. Готовится помещение для настройки ускоряющих структур в ЭП-1
5. Определен список лабораторного оборудования для настройки и измерения ускоряющих структур

## **В стадии конструкторской проработки :**

- СВЧ пушка
- группирователь третьей гармоники

## **В стадии изготовления:**

- предускоритель,
- регулярные ускоряющие структуры,
- СВЧ нагрузки,
- волноводные фазовращатели,
- волноводные делители 3 дБ,
- предусилитель мощности клистрона

## **В стадии разработки:**

- модулятор катода,
- система управления и синхронизации
- система измерения и диагностики
- система термостабилизации,
- ответвитель на 7 дБ
- фазовращатель-аттенюатор для ответвителя на 7 дБ
- магнитные элементы ускорителя

## **Кроме этого:**

идет активное взаимодействие с инженерными службами института по формированию требований к помещениям линейного ускорителя источника синхротронного излучения СКИФ



**Спасибо за внимание**