



# Накопитель источника СИ СКИФ

Г.Н.Баранов  
ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН

НКС ЦКП СКИФ, ИЯФ, 21-22 марта 2019 г.

# Авторы доклада

Г.Баранов  
А.Богомяков  
П.Воблый  
Е.Гусев  
А.Журавлев  
К.Золотарев  
К.Карюкина  
А.Краснов  
Е.Левичев  
И.Окунев  
С.Синяткин  
А.Трибендис



**СИБИРСКИЙ**



**КОЛЬЦЕВОЙ**



**ИСТОЧНИК**

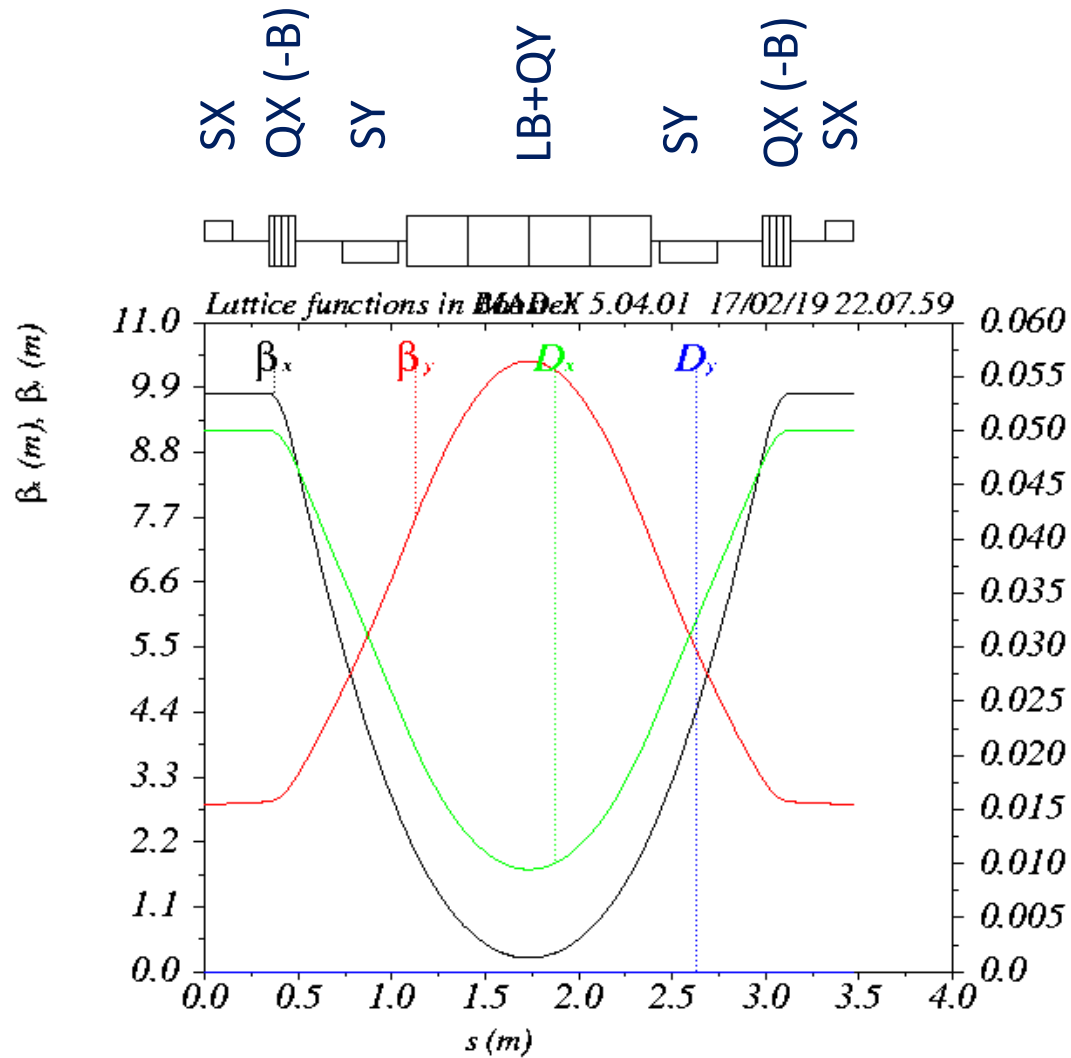


**ФОТОНОВ**

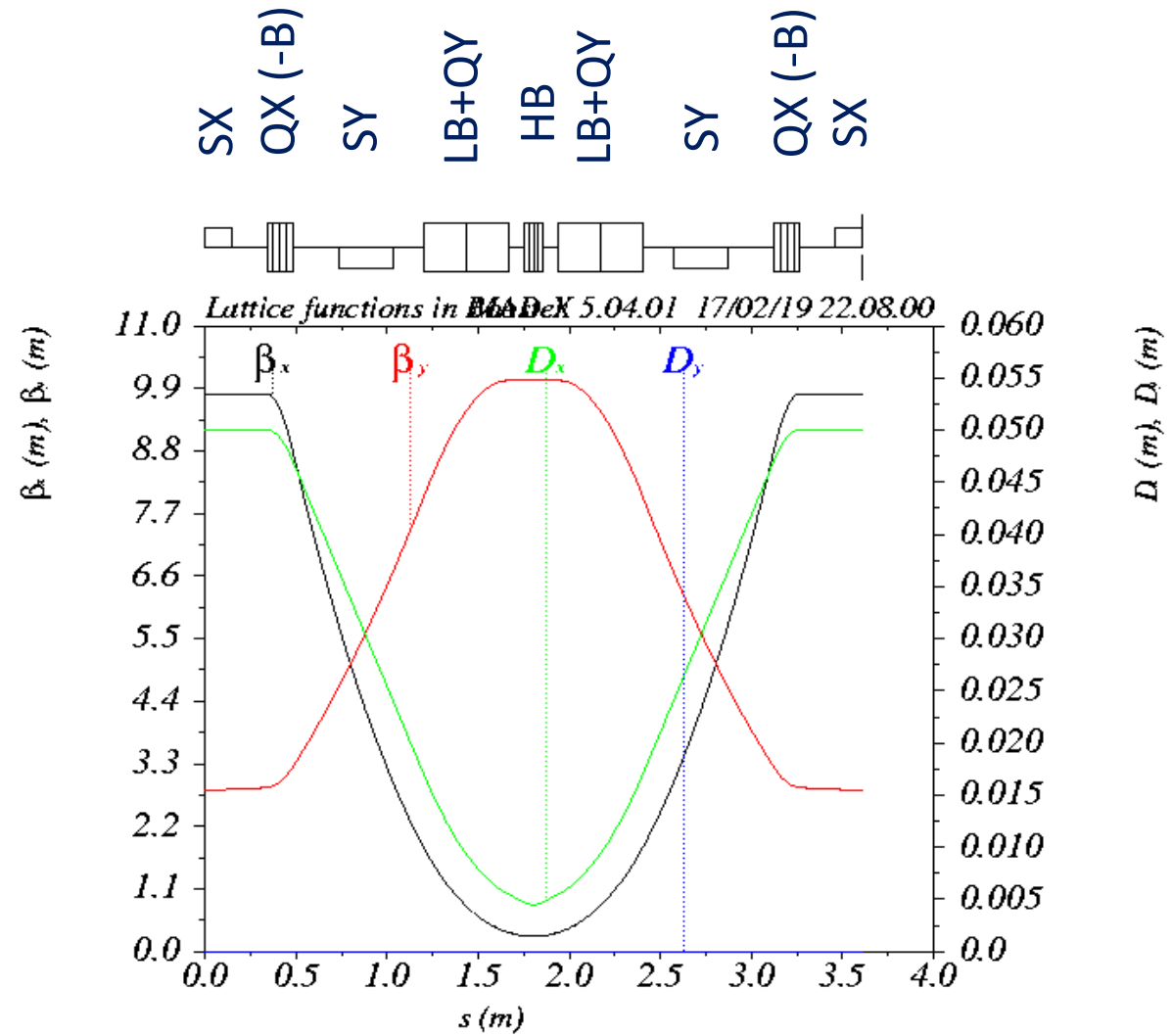
# Техническое задание

- Энергия 3 ГэВ
- Периметр  $\leq 500$  м
- Горизонтальный эмиттанс  $\leq 100$  пм (нулевой ток и связь)
- Достаточное число каналов вывода СИ из
  - Прямолинейных промежутков (СП вигглеры и ондуляторы)
  - Магнитов в большом поле (жесткий рентген)
  - Магнитов с малым полем (мягкий рентген и ультрафиолет)
- Простота и дешевизна конструкции (магнитных элементов). Магниты C-образные, чтобы не замораживаться с выводом СИ
- Инжекция на энергии эксперимента из синхротрона-бустера а la «бустер NSLS II»
- Поперечная апертура, достаточная для простой, надежной инъекции в горизонтальной плоскости
- Продольная апертура, достаточная для обеспечения «тушековского» времени жизни в условиях сильного внутрисгусткового рассеяния
- Гибкость оптики. Возможность компенсации влияния сильнополевых вигглеров для купирования возможного ухудшения характеристик источника

# Базовая ячейка магнитной структуры (FODO/TME)



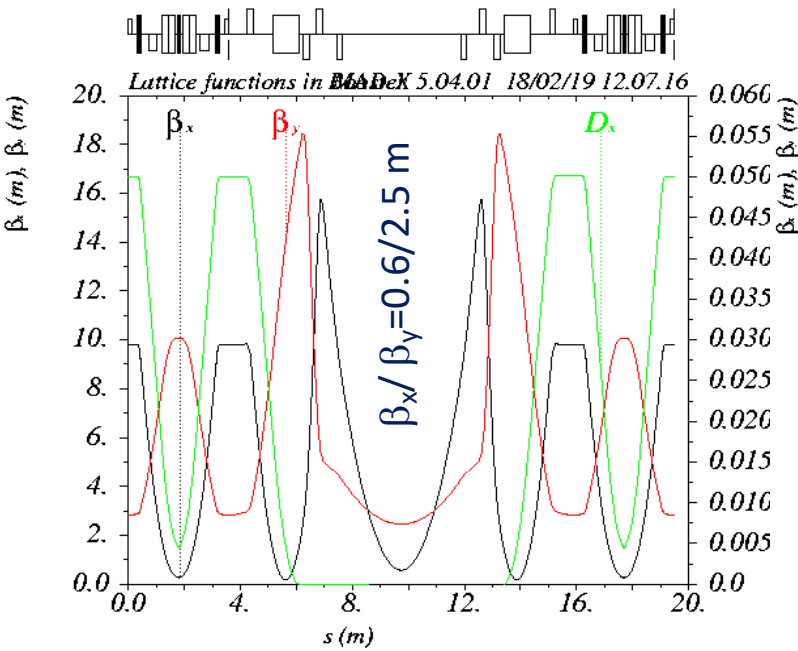
Магнит со слабым полем (мягкий рентген)



Магнит сильным полем (жесткий рентген)

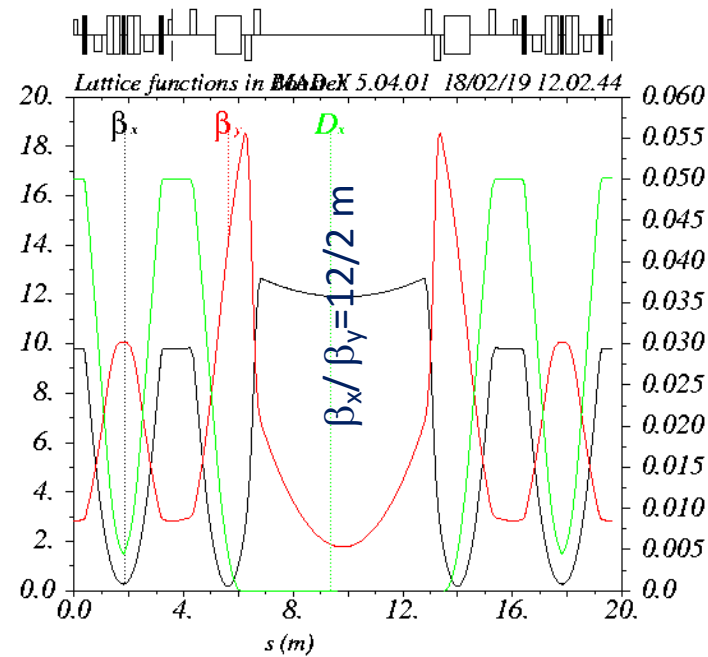
# Промежутки и параметры

4.24 m



«Триплетная» секция для  
сильнополевых вигглеров

6 m



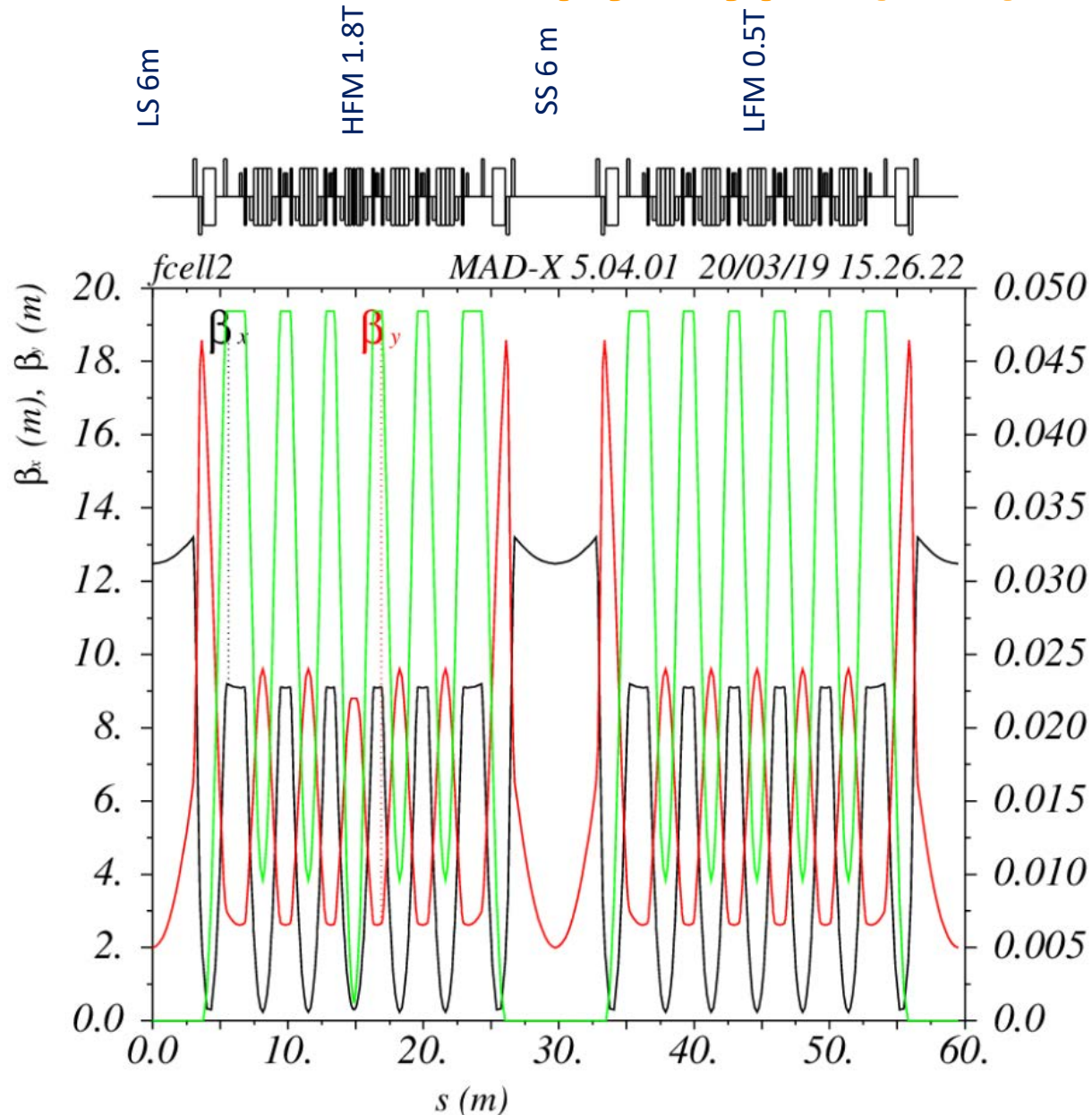
«Дублетная» секция для  
слабополевых вигглеров,  
ондуляторов, инжекции и  
ускоряющих резонаторов

Промежутки взаимозаменяемы путем постановки (вкл/выкл) одной (третьей) квадрупольной линзы.

## SKIF main parameters

Beam energy	3 GeV
Circumference	476.14 m
Revolution period	1.59 $\mu$ s
Symmetry	16(8)
Horizontal emittance	90 pm (zero current)
Momentum compaction	$1.24 \times 10^{-4}$
Energy loss/turn	419 keV
Tune (x/y)	53.781/16.825
Chromaticity (x/y)	-147/-62
Partitions (x/s)	1.94/1.06
Damping times (x/s)	11.7/21.5 ms
Energy spread	$8.6 \times 10^{-4}$
RF freq/harm number	357/567
RF voltage	742 kV
RF acceptance	2.5%
Synchrotron tune	$1.51 \times 10^{-3}$
Bunch length	5.5 mm
Straight sections	8×6 m 8×4.24 m 2 for RF and injection 14 for IDs

# Магнитная структура (DD)



7B Achromat

16SS (8LS+8SS)

1SS Main RF

1SS Injection+3hRF

14SS for IDs

Линак 2856 МГц/8 = 357 МГц

Синхротрон 158.4 м → 158.71 м (189 гармоника)

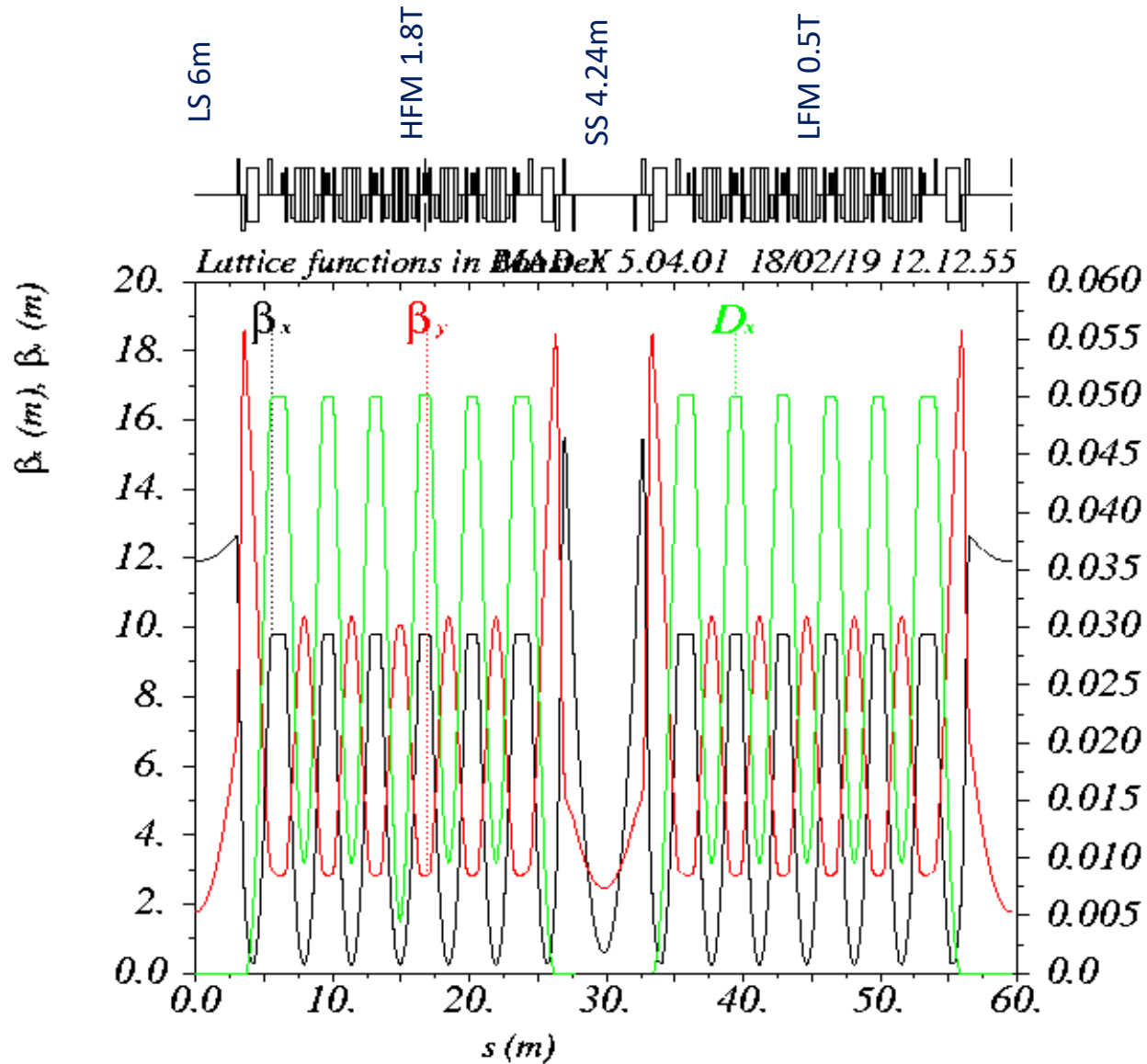
СКИФ 158.76 м x 3 = 476.14 м (567 гармоника)

14 каналов из IDs

8 каналов из HFM (1.8 T)

8 каналов из LFM (0.52 T)

# Магнитная структура (DT)



Для постановки сильнополевых вигглеров, во избежание роста эмиттанса дублетный промежуток конвертируется в триплетный с малыми значениями как горизонтальной, так и вертикальной бетатронной функции.

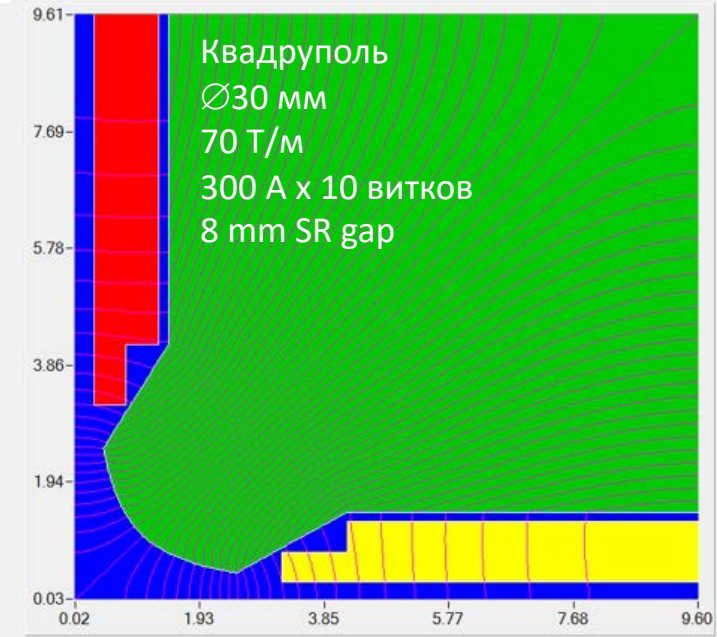
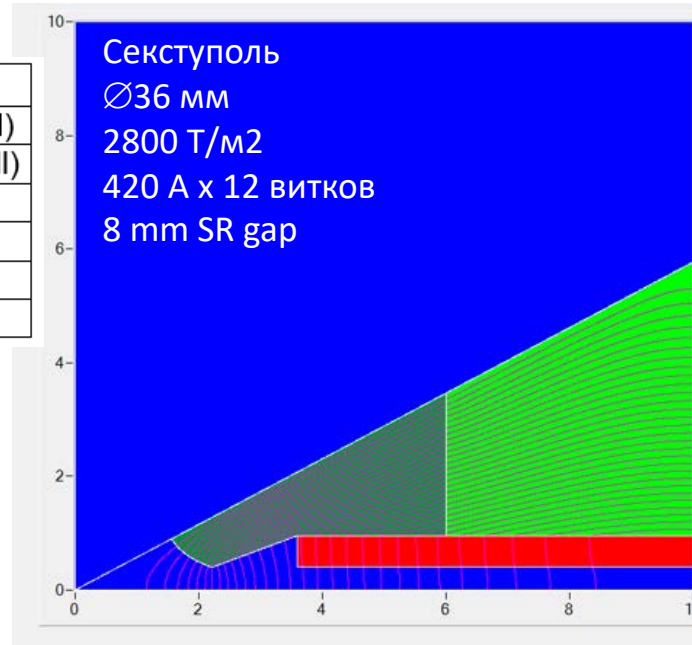
При этом остальная структура кольца не трогается.

# Магниты

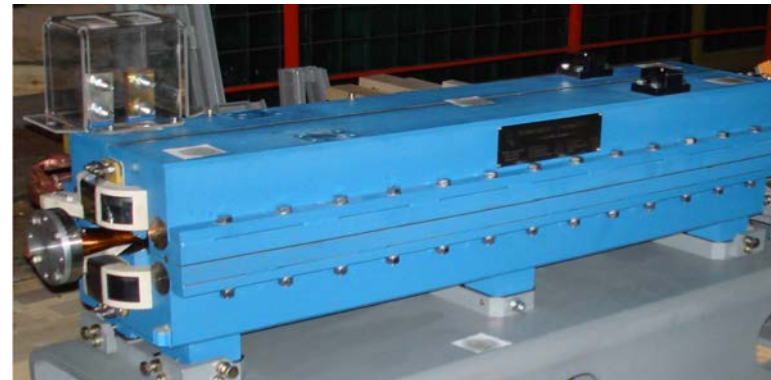
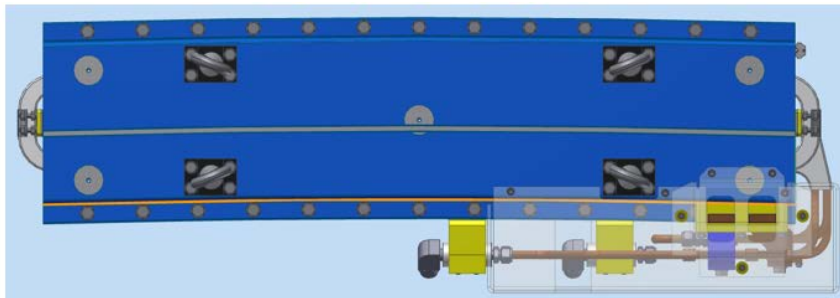
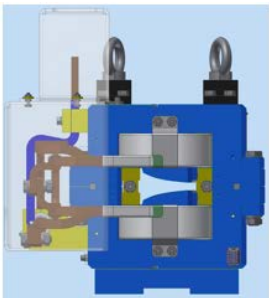
Name	N	L, m	R, m	$\theta$ , mrad	B, T	G, T/m	Comment
BD	144	0.14	60.03	-2.365	-0.166	55.477	Reverse bend (LFM cell)
BDI	16	0.14	27.15	-5.23	-0.368	52.460	Reverse bend (HFM cell)
BM0	32	0.93	24.65	37.874	0.406	-2.810	Dispersion suppressor
BF	72	1.3	19.07	68.175	0.524	-7.807	LFM (regular)
BFI	16	0.47	16.82	27.945	0.595	-10.279	LFM (HFM cell)
BI	8	0.1	5.552	18.012	1.801		HFM

Name	N	L, m	G, T/m
QM14	16	0.2	5.04
QM01	32	0.2	40.45
QM12	16	0.25	48.18
QM02	16	0.25	58.49
QM03	16	0.25	64.85
QM13	16	0.25	65.67

Name	N	L, m	S, T/m <sup>2</sup>
SF	160	0.3	1995.0
SD	64	0.3	2616.1
SD	32	0.15	2616.1



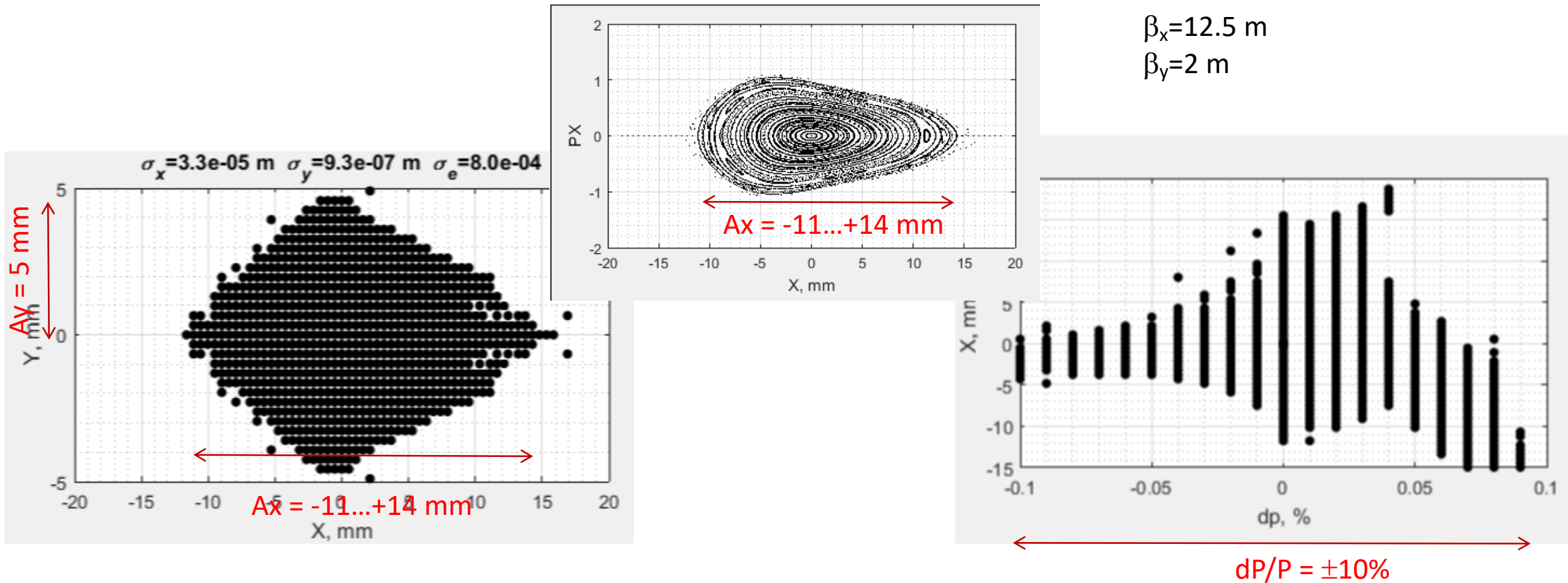
Магнит бустера NSLS II – аналог магнита для «СКИФ»



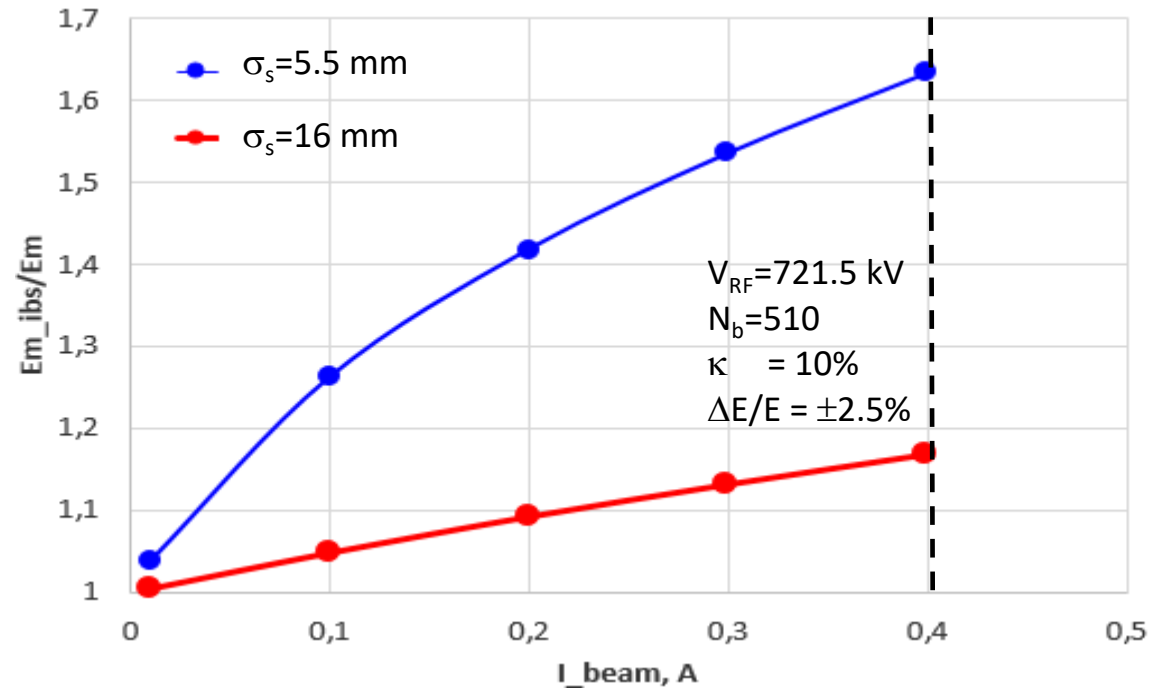
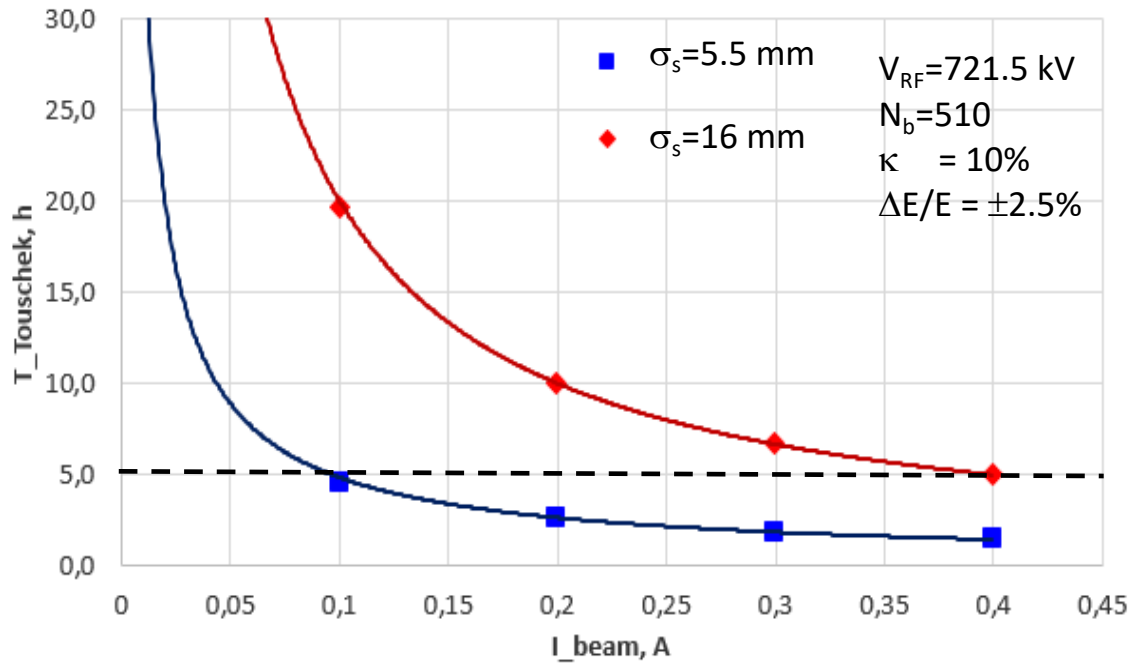


# Динамическая апертура

Достаточная по времени жизни и для эффективной простой схемы инжекции динамическая апертура достигается при двух семействах хроматических секступольных линз. Постановка дополнительных секступолей и октуполей не требуется.



# Внутрисгустковое рассеяние (1)



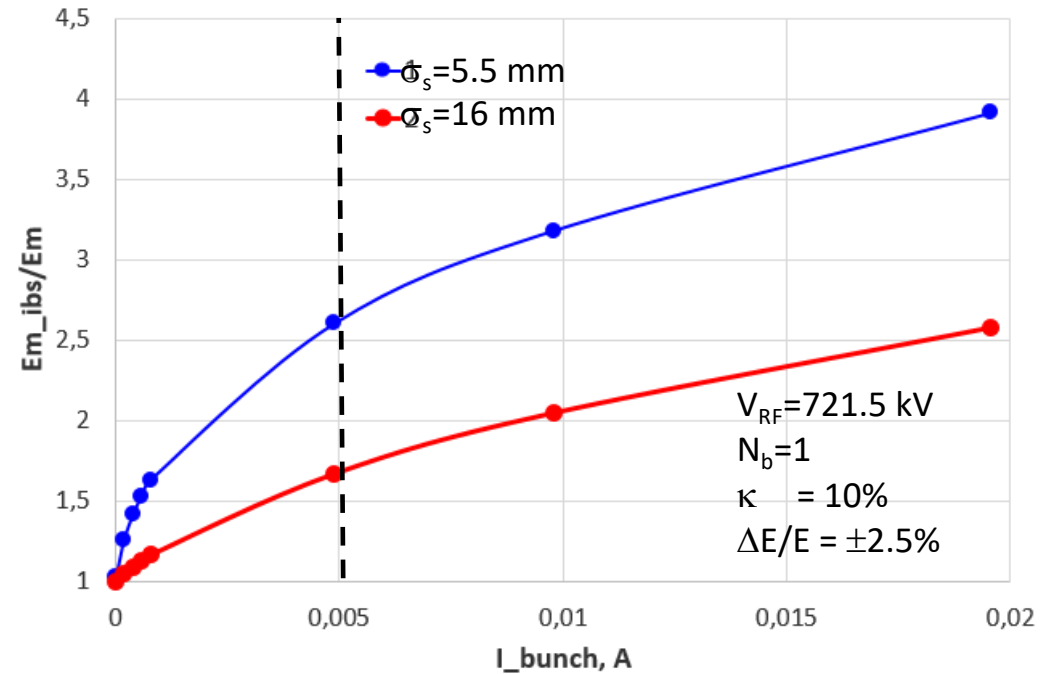
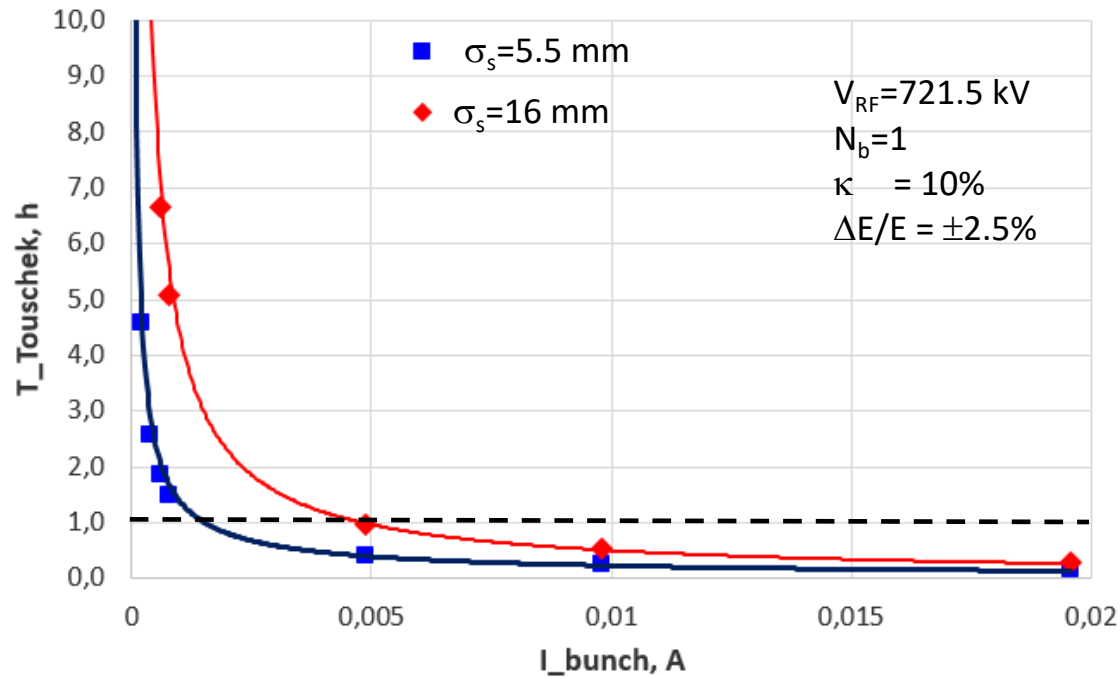
**Многосгустковый режим (510 сгустков из 567).**

Ток 400 мА (0.783 мА/сгусток,  $7.77 \times 10^9$  е/сгусток).

Бетатронная связь 10% (вертикальный эмиттанс  $\approx$  дифракционному для 1 Å)

При 3-х кратном удлинении сгустка 3-ей гармоникой ВЧ «тушековское» время жизни 5 час и увеличение горизонтального эмиттанса 83 пм  $\rightarrow$  96 пм ( $\approx 1.17$  раза). Без удлинения – 1.5 часа, 135 пм ( $\approx 1.63$  раза) (с учетом IBS,  $\sigma_{\text{sibs}} = 6.4$  мм).

# Внутрисгустковое рассеяние (2)



## Односгустковый режим (5 мА/сгусток)

Бетатронная связь 10% (вертикальный эмиттанс  $\approx$  дифракционному для 1 Å)

При 3-х кратном удлинении сгустка 3-ей гармоникой ВЧ «тушековское» время жизни 1 час и увеличение горизонтального эмиттанса 83 пм  $\rightarrow$  138 пм ( $\approx 1.67$  раза). Без удлинения – 0.4 часа, 215 пм ( $\approx 2.6$  раза) (с учетом IBS,  $\sigma_{\text{sibs}} = 9$  мм). Для 15 сгустков ток 75 мА.

# Источники излучения

Таблица с оптическими параметрами точек излучения

	$\beta_x$ , м	$\beta_y$ , м	$\eta_x$ , мм	$\sigma_x$ , мм	$\sigma'_x$	$\sigma_y$ , мм	$\sigma'_y$
D	12.48	1.99	0	0.033	$2.65 \cdot 10^{-6}$	$8.6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
T	0.6	2.5	0	$7.1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$
HFM	0.29	9.2	2.16	$5.3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-7}$
LFM	0.23	9.6	9.6	0.01	$2 \cdot 10^{-5}$	0.01	$9.2 \cdot 10^{-7}$

Таблица с возможными режимами работы

	Ток, мА	Эмиттанс, пм	Кол-во банчей	Ток в банче, мА
Основной	400	100	510	0.7
Щадящий	40	85	510	0.07
70ти банчевый	355	140	70	5
12ти банчевый	60	140	12	5
8ми банчевый	40	140	8	5

# Вигглеры

	Bare	1W4.5	2W4.5	3W4.5	1W7.5
E, MeV	3000.	3000.	3000.	3000.	3000.
Π, m	476.141	476.141	476.141	476.141	476.141
f0, Hz	629 630.	629 630.	629 630.	629 630.	629 630.
I, A	0.004539	0.004539	0.004539	0.004539	0.004539
N	$4.5 \times 10^{10}$	$4.5 \times 10^{10}$	$4.5 \times 10^{10}$	$4.5 \times 10^{10}$	$4.5 \times 10^{10}$
q	567.	567.	567.	567.	567.
Fr <sub>f</sub> , Hz	$3.57 \times 10^8$	$3.57 \times 10^8$	$3.57 \times 10^8$	$3.57 \times 10^8$	$3.57 \times 10^8$
U0+Nw Uw, keV	416.	646.616	877.232	1107.85	1056.6
Uw, keV	0.	230.616	230.616	230.616	640.6
Vr <sub>f</sub> , keV	850.	1120.	1390.	1650.	1590.
η	0.000123114	0.000123114	0.000123114	0.000123114	0.000123114
γs	0.00165682	0.00184028	0.00199824	0.00212798	0.00209763
δrf	0.0302265	0.0300353	0.0301688	0.0301027	0.0300199
σE	0.00086	0.00086	0.00086	0.00086	0.00086
σS	0.00484267	0.00435991	0.00401524	0.00377045	0.00382499
ε <sub>x</sub> , m rad	$9. \times 10^{-11}$	$9. \times 10^{-11}$	$9. \times 10^{-11}$	$9. \times 10^{-11}$	$9. \times 10^{-11}$
ε <sub>y</sub> , m rad	$4.5 \times 10^{-13}$	$4.5 \times 10^{-13}$	$4.5 \times 10^{-13}$	$4.5 \times 10^{-13}$	$4.5 \times 10^{-13}$
Nwigners	0.	1.	2.	3.	1.
λ <sub>w</sub> , m	0.	0.05	0.05	0.05	0.2
B <sub>w</sub> , T	0.	4.5	4.5	4.5	7.5
L <sub>w</sub> , m	0.	2.	2.	2.	2.
Nλ	1.	40.	40.	40.	10.
I5 <sub>w</sub> , m <sup>-1</sup>	0.	$6.15042 \times 10^{-7}$	$6.15042 \times 10^{-7}$	$6.15042 \times 10^{-7}$	0.000126552
I5 <sub>x</sub> , m <sup>-1</sup>	$4.84221 \times 10^{-6}$	$4.84221 \times 10^{-6}$	$4.84221 \times 10^{-6}$	$4.84221 \times 10^{-6}$	$4.84221 \times 10^{-6}$
I2 <sub>w</sub> , m <sup>-1</sup>	0.	0.20222	0.20222	0.20222	0.561722
I2, m <sup>-1</sup>	0.367377	0.367377	0.367377	0.367377	0.367377
$\frac{\epsilon_{xw}}{\epsilon_x} = \frac{I5x+Nw I5w}{I2+Nw I2w} \frac{I2}{I5x}$	1.	0.7269	0.596907	0.52089	10.7296

Bare – структура без вигглеров

1W4.5 – один вигглер (4.5 Т, 5 см, 2 м)

2W4.5 – два вигглера (4.5 Т, 5 см, 2 м)

3W4.5 – два вигглера (4.5 Т, 5 см, 2 м)

1W7.5 – один вигглер (7.5 Т, 20 см, 2 м)

# Вигглер (1)

Оценено влияние вигглера с параметрами:

$\lambda=5$  см  $B = 4$  Т  $N_{\text{per}}=40$   $L = 2$  м

1 вигглер:

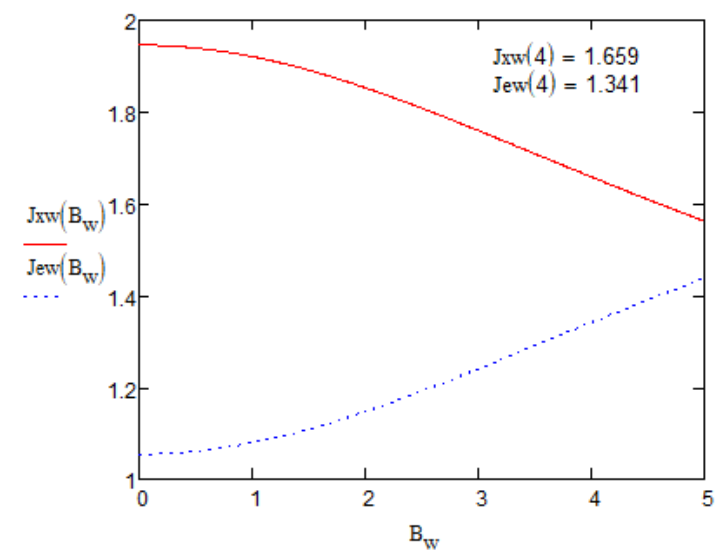
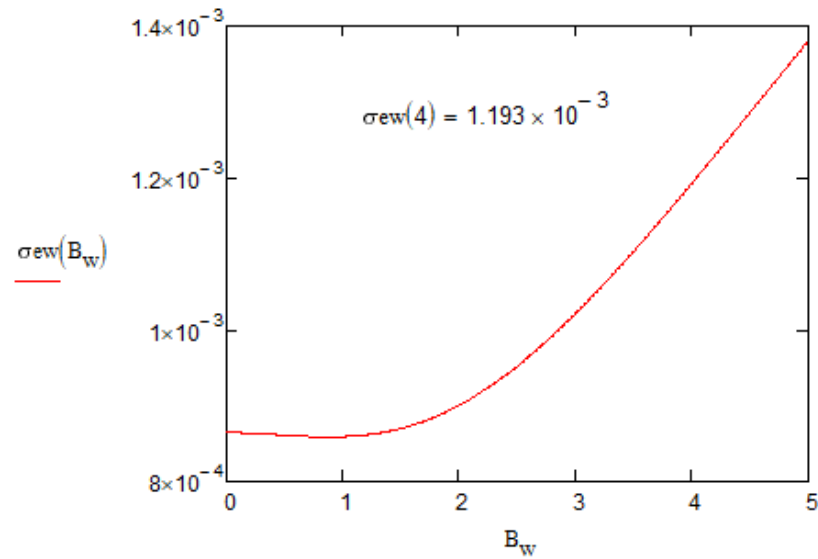
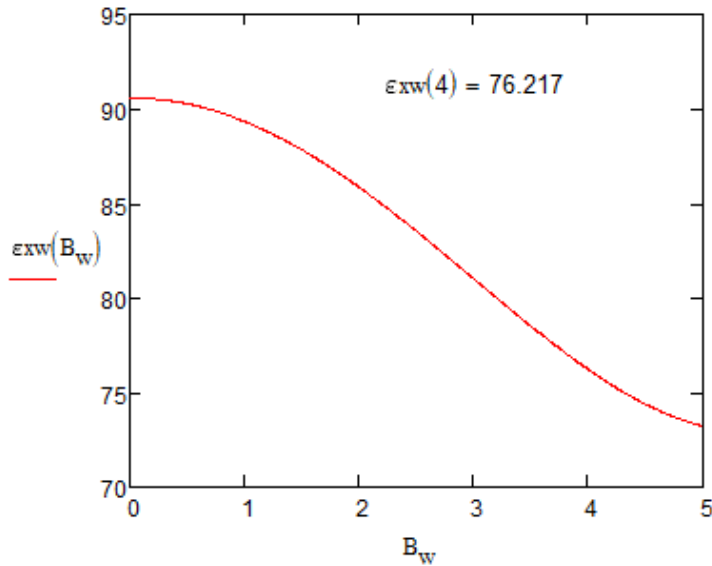
90 пм  $\rightarrow$  76 пм

2 вигглера:

90 пм  $\rightarrow$  65 пм

3 вигглера:

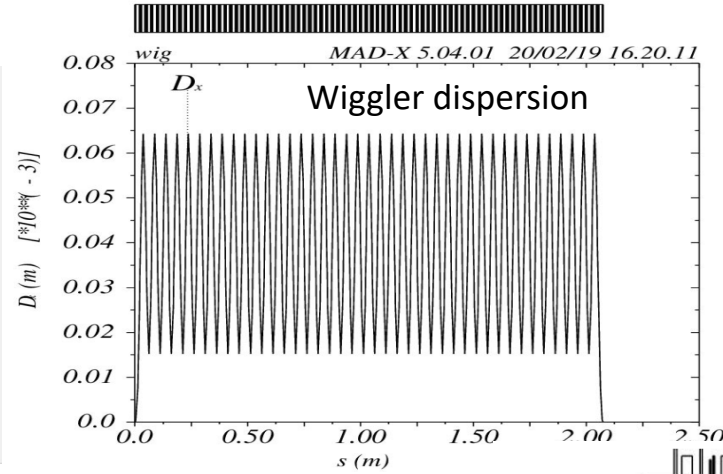
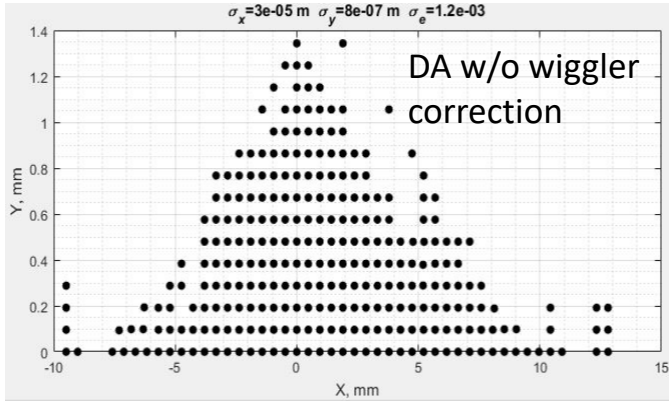
90 пм  $\rightarrow$  45 пм



	$\Delta v_y$	$\varepsilon_{xw}$ (pm)	$J_x/J_e$	$\sigma_e/E$
Bare lattice	0	90	1.94/1.06	$8.6 \times 10^{-4}$
Simulation	0.013	76	1.6/1.4	$1.21 \times 10^{-3}$
Theory	0.013	76	1.6/1.4	$1.19 \times 10^{-3}$

# Вигглер (2)

$\lambda=5$  см  $B = 4$  Т  $N_{\text{per}}=40$   $L = 2$  м



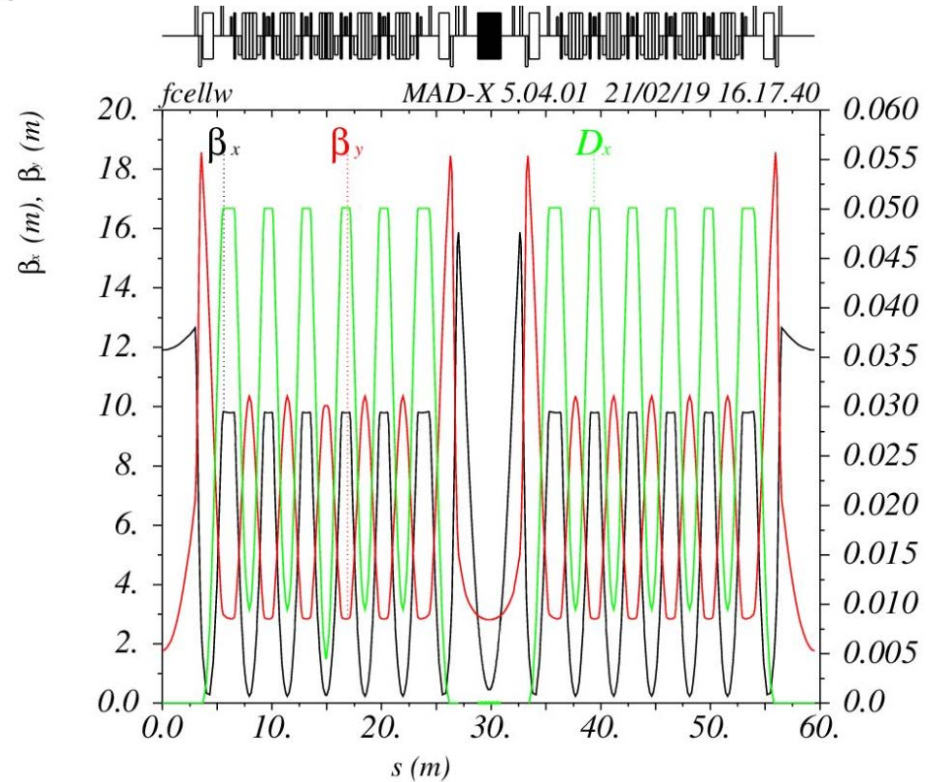
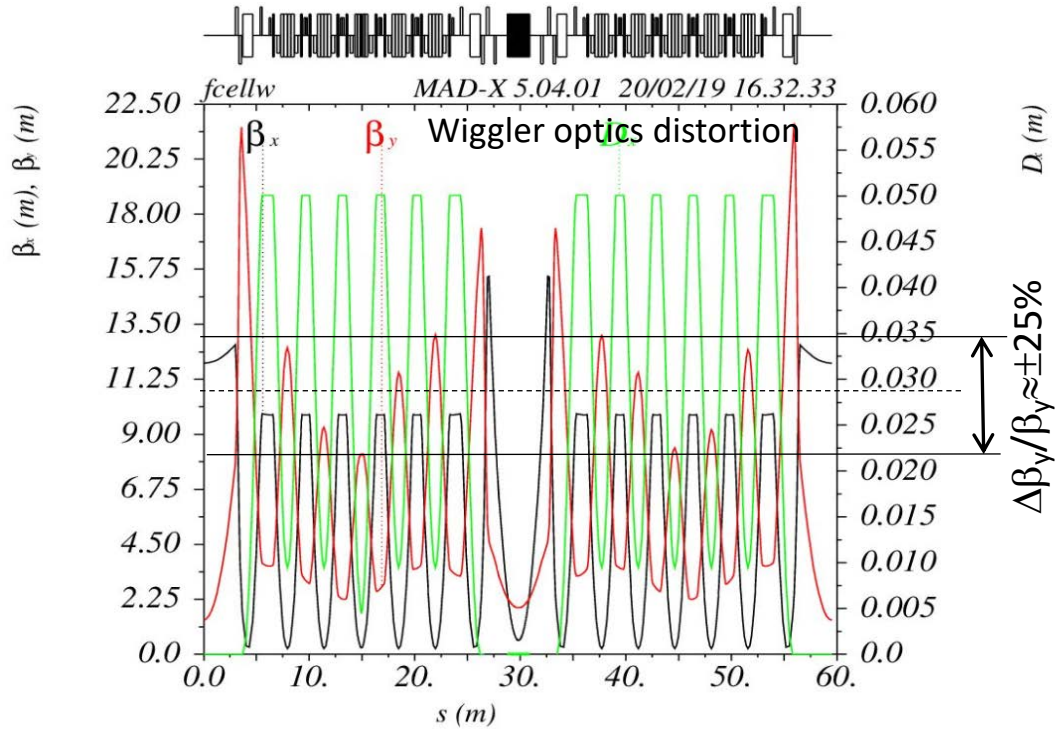
Локальная коррекция (только триплетом)

$K1\_qm12 -4.8147 \rightarrow -4.7703$  m<sup>-2</sup>

$K1\_qm13 +6.5620 \rightarrow +5.9983$  m<sup>-2</sup>

$K1\_qm12 -0.5036 \rightarrow +0.5574$  m<sup>-2</sup>

$\Delta v_x=0.01$   $\Delta v_y=0.001$



# Вакуумная система

## Требования:

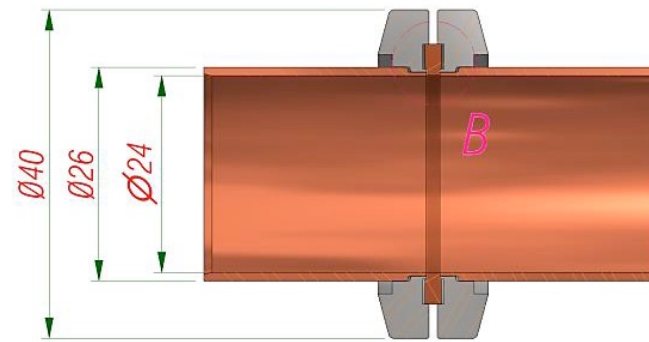
- Среднее динамическое давление в азотном эквиваленте  $\sim 1$  nTorr - требованием на время жизни пучка не менее 20 часов, определяемого потерями, вызванными тормозным и упругим рассеянием на молекулах остаточных газов
- Импеданс: гладкость камеры, применение материалов с высокой электропроводностью (медь, алюминий)
- Погрев после сборки недопустим (за исключением камер вигглеров и ондуляторов) – минимизация кол-ва сиффонных элементов

## Откачивающая система:

- традиционные магнитоэрозийные насосы на каналах вывода СИ (между накопителем и Front-ends)
- Распределенная откачка 1 – нераспыляемые геттеры (TiZrV) – мало-апертурные камеры вигглеров и ондуляторов
- Распределенная откачка 2 - напыление геттера in-situ специализированными устройствами

## Секторизация

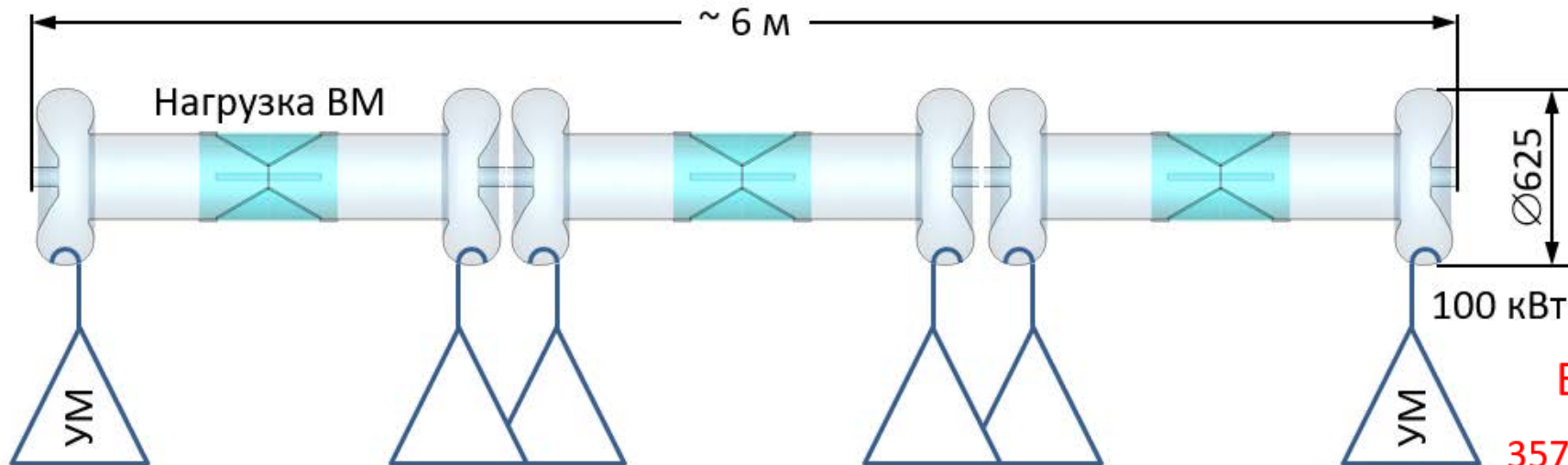
- Шиберы с RF контактами (отсекающие все прямолинейные промежутки) – разработка и производство ИЯФ
- Пневматические быстрые шиберы (покупные) – на всех каналах вывода СИ (между накопителем и Front-ends) и канале инъекции



Фланцевые соединения  
сохраняющие «гладкость» камеры пучка



# Ускоряющая система



**ВЧ система основного кольца:**  
357 МГц, 1.7 МВ, 400 мА, 1.1 МэВ/оборот

Параметры 1-го резонатора для осн. моды.

Коэф-т пролета	T		0.8
Характ. (пролетное) сопротивление	R/Q	Ом	84
Добротность	$Q_0$		26 600
Шунтовое (пролетное) сопротивление	$R_{ш1}T^2$	МОм	2.23
Уск. напряжение на 1 резонаторе	$V_{уск1}$	МВ	0.283
Полное напряжение на 1 резонаторе	$V_1$	МВ	0.354
Мощность потерь в стенках	$P_{Cu1}$	кВт	17.96
Мощность в пучок	$P_{b1}$	кВт	73.73
Полная мощность	$P_1$	кВт	91.70
Полная мощность + 10%	$1.1P_1$	кВт	100.87

Мощность ВЧ системы «от сети»

МВт

1.2

1 УМ «Триада-ТВ»

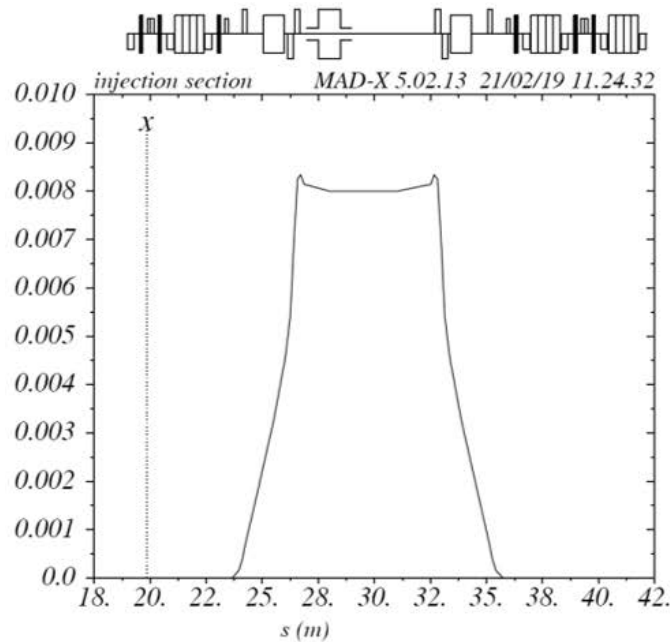
Сумматор



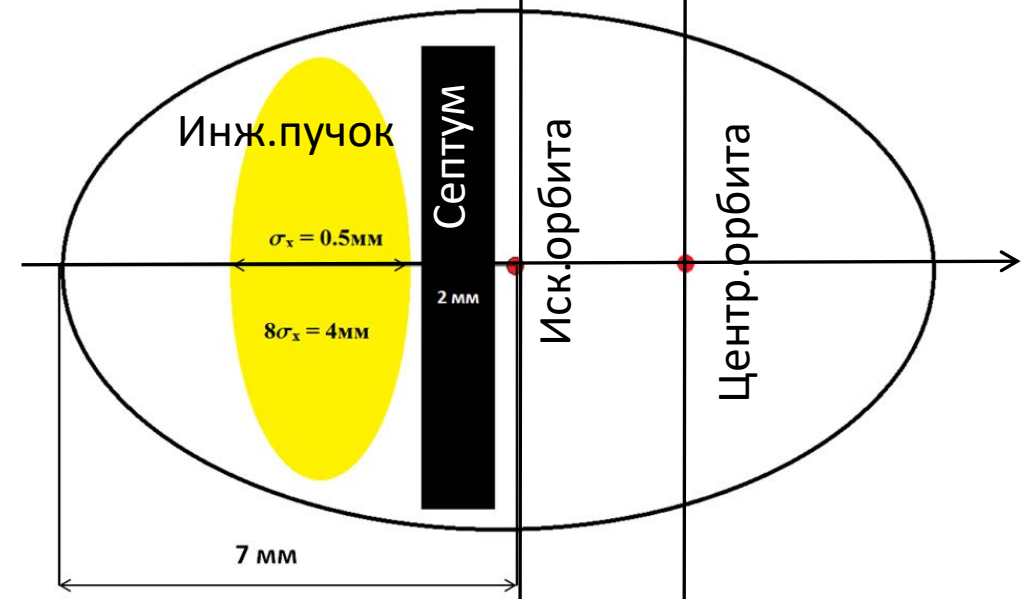
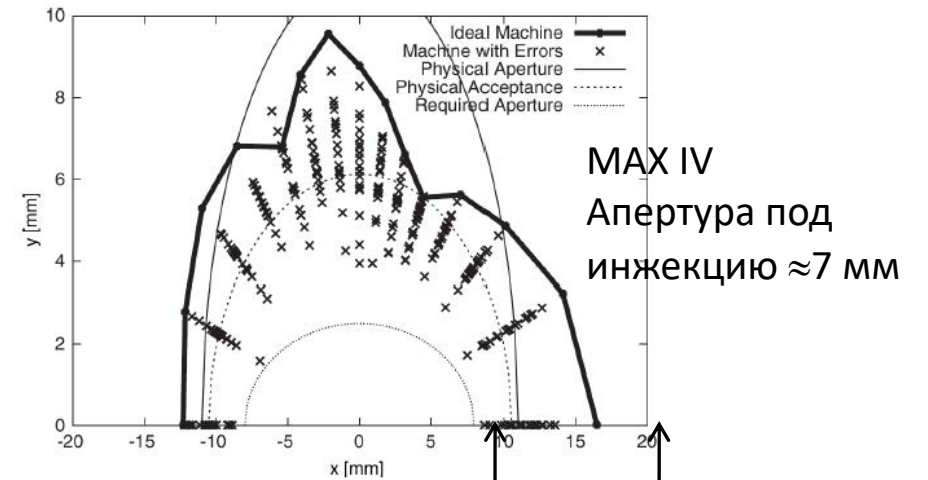
ВхШхГ=(2+0.5)х1.8х1.2 м

# Инжекция

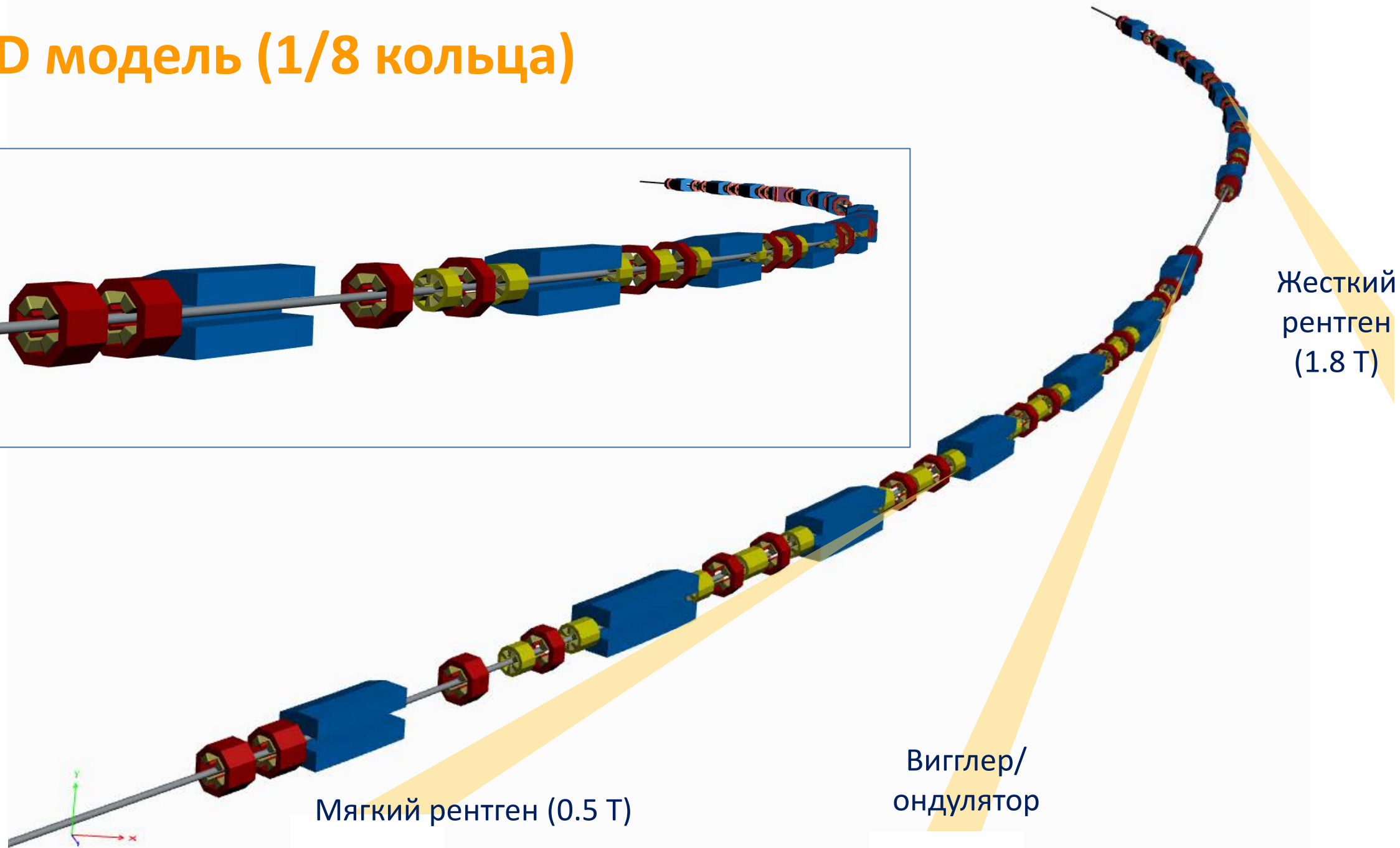
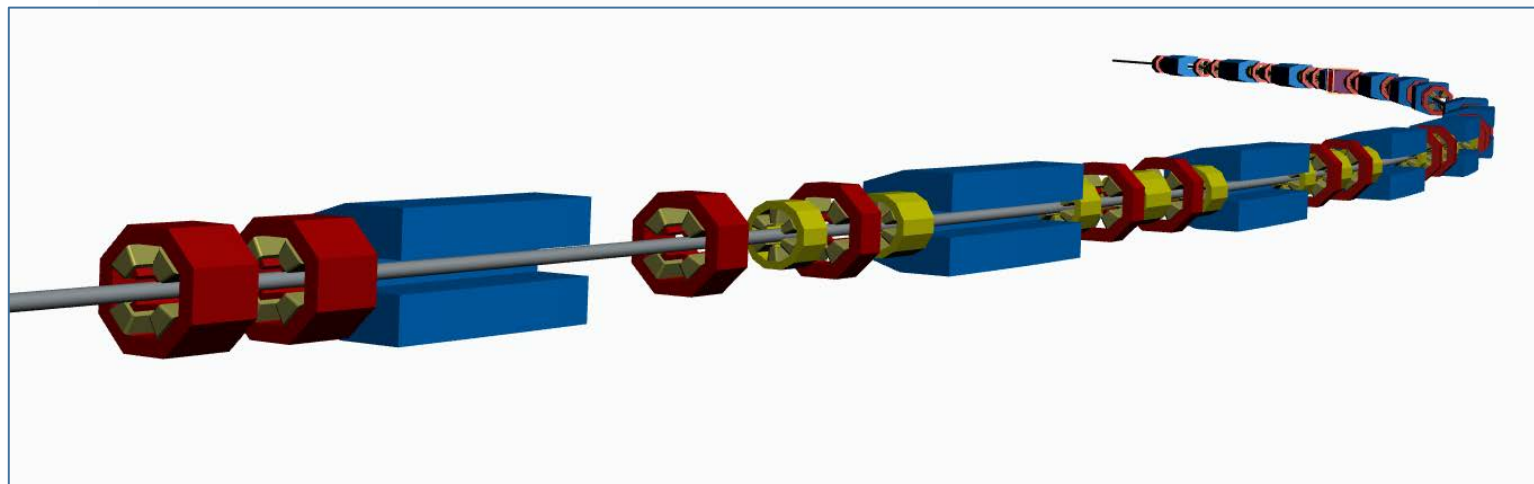
Динамическая апертура позволяет инжектировать пучок «традиционно» – в горизонтальной плоскости с искажением орбиты накопленного пучка к «ножу» впускного магнита.



Пластины	L(m)	Fi(mrad)	H(Тл)	U(кВ)
Kick1	0.25	2.5	0.04	10
Kick2	0.25	2.3	0.04	10
Kick3	0.25	2.3	0.04	10
Kick4	0.25	2.5	0.04	10
			H(Тл)	
Sep1	0.4	30	0.75	
Sep2	1.4	200	1.43	



# 3D модель (1/8 кольца)



Жесткий  
рентген  
(1.8 Т)

Мягкий рентген (0.5 Т)

Вигглер/  
ондулятор

# Заключение

- Есть первое приближение источника СИ СКИФ (3 ГэВ, 476 м,  $\approx 80$  пм при нулевом токе,  $\kappa = 10\%$ ).
- При номинальном токе 400 мА в многосгустковом режиме внутрисгустковое рассеяние увеличивает эмиттанс до  $\approx 100$  пм при «тушековском» времени жизни 5 час (длина сгустка  $\approx 16$  мм обеспечивается ВЧ-3).
- 16 промежутков (из них 14 для IDs) двух типов: 6 м ( $\beta_x = 12.2$  м,  $\beta_y = 2$  м) для инжекции, резонаторов и ондуляторов, и 4.24 м ( $\beta_x = 0.57$  м,  $\beta_y = 2.4$  м) для сильнополевых вигглеров.
- Предполагается 30 каналов вывода СИ. 14 из IDs, 8 из сильнополевых магнитов (1.8 Т) и 8 из регулярных магнитов (0.5 Т).
- Поперечная динамическая апертура достаточна для простой и эффективной инжекции. Продольная апертура достаточна для обеспечения требуемого времени жизни.
- Магниты не сложные и (первая оценка) реализуемые.

**Можно переходить к технической фазе Концептуального проекта.**