

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
физический факультет

И. Владимиров

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЙ
ЯРКОСТЬЮ ПУЧКА: ДИНАМИКА,
ДИАГНОСТИКА, МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ
(по мотивам диссертационной работы)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В.И. Шведунов

Актуальность темы диссертации

Получение ярких интенсивных релятивистских электронных пучков является в последние 20 лет одним из ключевых направлений развития ускорительной физики и техники. Такие пучки необходимы для источников синхротронного излучения четвертого поколения (включая рентгеновские лазеры на свободных электронах и ускорители с рекуперацией энергии), для линейных коллайдеров, для источников рентгеновского излучения на основе комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронах, для исследования новых методов ускорения частиц (в том числе методов лазерного ускорения и ускорения в плазме).

Актуальность темы диссертации

В таких проектах к параметрам пучка предъявляются жесткие требования. Поэтому важным является контроль и сравнение реальных характеристик пучка электронов с проектными его характеристиками на всех этапах ускорения.

В существующих и проектируемых источниках электромагнитного излучения важное место занимают магнитные системы на основе редкоземельных магнитных материалов, например, ондуляторы. Однако существует общая проблема настройки таких систем, вытекающая из свойств редкоземельных материалов.

Цели и задачи исследования

1. Определить параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, минимально достижимым нормализованным поперечным эмиттансом, длительностью в несколько пс и энергией, регулируемой в пределах 35-50 МэВ.
2. Изучить методику измерения продольного эмиттанса пучка для экспериментов GunLab и BERLinPro.
3. Изучить настройку магнитной системы на основе редкоземельного магнитного материала, взяв в качестве примера магнитную систему разрезного микротрона Технического университета Каталонии.

Научная новизна

1. Рассчитаны параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом меньше 4 мм мрад и регулируемой энергией 35-50 МэВ.
2. Предложена методика измерения продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора.
3. Получена теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и дисперсию пучка электронов.
4. Предложена методика настройки магнитной системы на основе редкоземельного магнитного материала.

Апробация работы и публикации

Результаты исследования докладывались на следующих конференциях и школах:

1. 23 всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц (24-28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург, Россия);
2. 5th International Particle Accelerator Conference (15-20 июня 2014 г, Дрезден, Германия);
3. XV и XVI межвузовские научные школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (25-26 ноября 2014 г., 24-25 ноября 2015 г., Москва, Россия);
4. II международная конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (25-27 января 2016 г., НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия).

Апробация работы и публикации

Материалы работы опубликованы в статьях, удовлетворяющих требованиям ВАК:

1. *Владимиров И., Пахомов Н., Шведунов В., Кубышин Ю., Ригла Х., Захаров В.* Квадрупольная линза и магниты вывода компактного разрезного микротрона. // Вестник МГУ, 6, 2014, С. 70-74;

2. *Vladimirov I., Pakhomov N., Shvedunov V., Kubyshin Y., Rigla J., Zakharov V.* End magnets with rare earth permanent magnet material for a compact race-track microtron. // The European Physical Journal Plus, 129, 2014, P. 271-292;

3. *Владимиров И., Каманин А., Пахомов Н., Шведунов В., Кампс Т., Фёлькер Й.* Спектрометр для эксперимента GunLab // Вестник МГУ, 1, 2016;

4. *Владимиров И., Ииханов Б., Овчинникова Л., Шведунов В., Юров Д.* Источник электронов с высокой яркостью пучка // (принят к публикации) Вестник МГУ, 3, 2016.

Структура диссертации

1. Расчет динамики пучка в источнике электронов с высокой яркостью пучка.
2. Методика измерения продольного эмиттанса пучка.
3. Магнитные системы на основе редкоземельного магнитного материала.

1. Расчет динамики пучка в источнике электронов с высокой яркостью пучка

Яркость источника:

$$B = Q / (\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z),$$

где Q – заряд сгустка; ε_x , ε_y – среднеквадратичные нормализованные поперечные эмиттансы:

$$\varepsilon_x = \beta\gamma\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}, \varepsilon_y = \beta\gamma\sqrt{\langle y^2 \rangle \langle y'^2 \rangle - \langle yy' \rangle^2};$$

β – относительная скорость пучка; γ – его относительная энергия; x , y – поперечные координаты; $x' = p_x/p_z$, $y' = p_y/p_z$, p_x , p_y , p_z – компоненты импульса; ε_z – среднеквадратичный эмиттанс в продольной плоскости:

$$\varepsilon_z = \sqrt{\langle \Delta z^2 \rangle \langle \Delta E^2 \rangle - \langle \Delta z \Delta E \rangle^2},$$

Δz – отклонение продольной координаты от центра сгустка; ΔE – отклонение энергии от средней энергии сгустка.

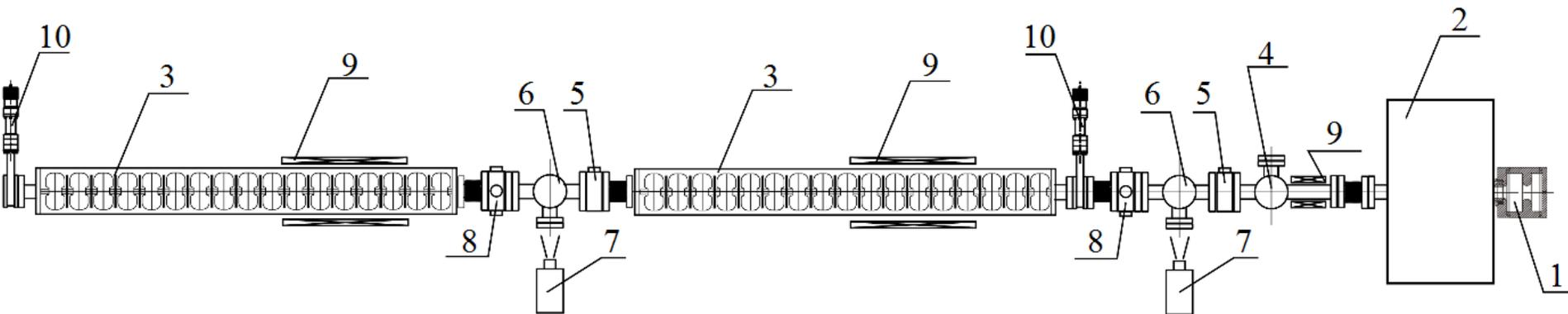
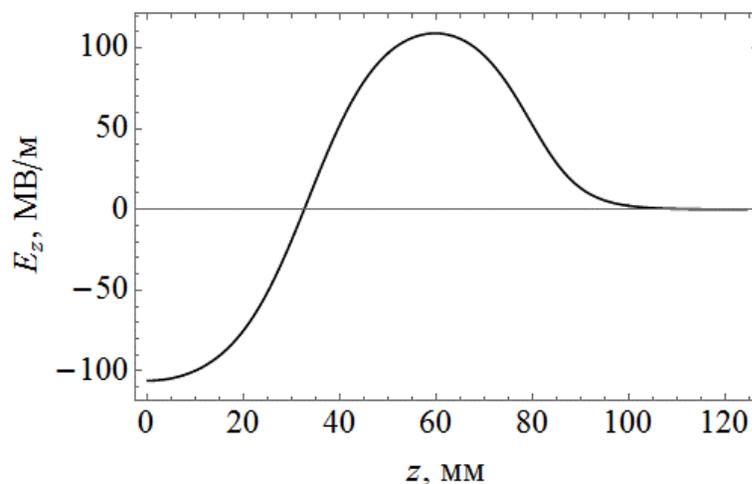
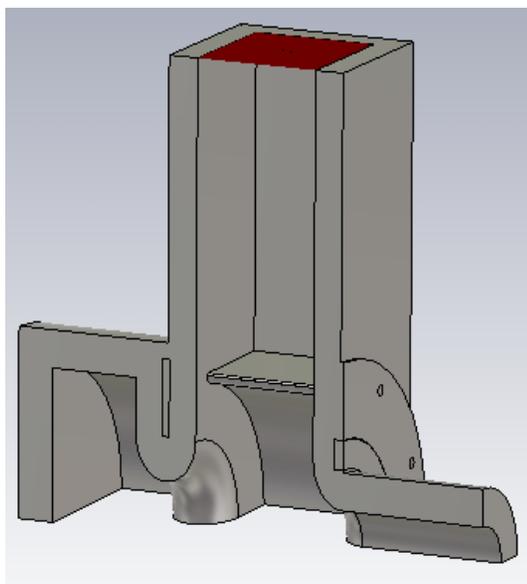


Схема источника электронов: 1 – СВЧ пушка, 2 – соленоид, 3 – секции линейного ускорителя, 4 – камера ввода лазерного импульса, 5 – датчик заряда, 6 – камера флуоресцентного экрана, 7 – ПЗС камера, 8 – датчик положения пучка, 9 – корректоры пучка, 10 – вакуумный затвор.

Основные параметры источника электронов

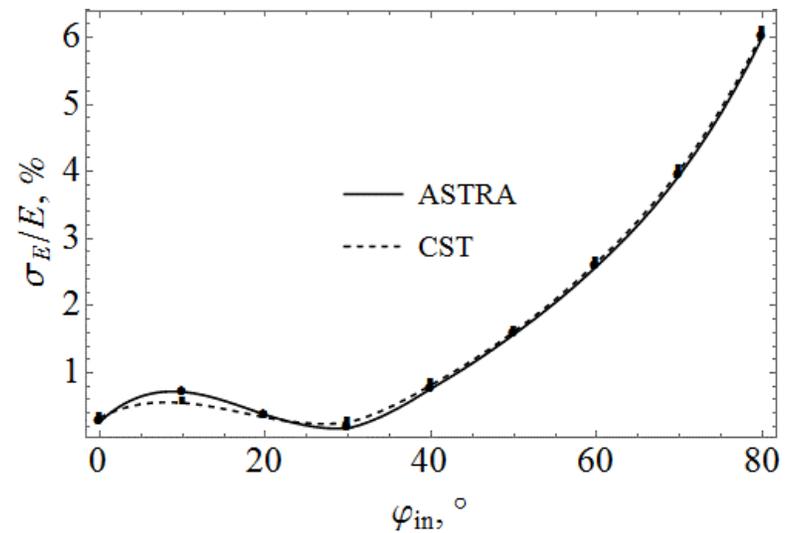
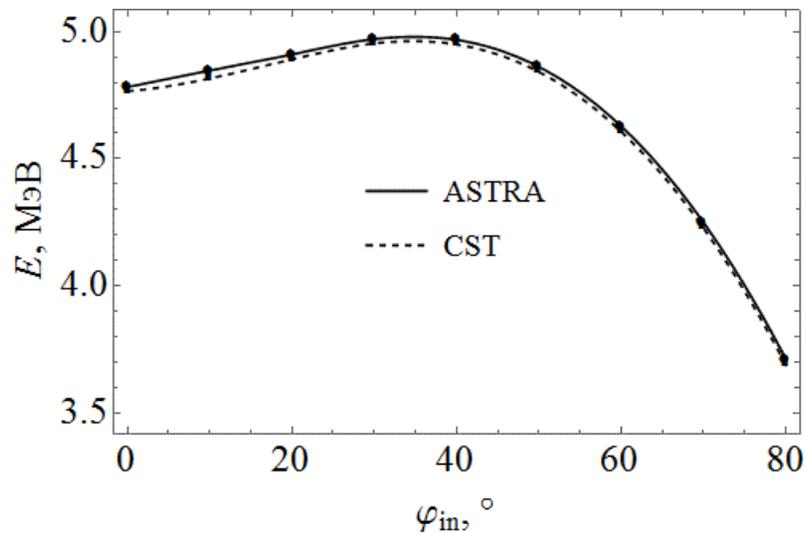
Параметр	источник	LCLS	ThomX
Интервал регулирования энергии ускоренного пучка, МэВ	35-50	135	50-70
Заряд ускоренного сгустка электронов, нКл	1	1	1
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс, мм мрад	< 4	1.2	4
Среднеквадратичная длина сгустка, мм	1	0.12-3.3	1.11
Среднеквадратичный разброс по энергии, %	0.1	-	0.36
Максимальная частота повторения циклов ускорения, Гц	50	120	50

В качестве прототипа была выбрана пушка для проекта LCLS. Пушка состоит из двух связанных резонаторов общей длиной $1.6 \lambda/2$, где λ – длина волны ускоряющего поля, и работает на π -колебании с частотой 2856 МГц.



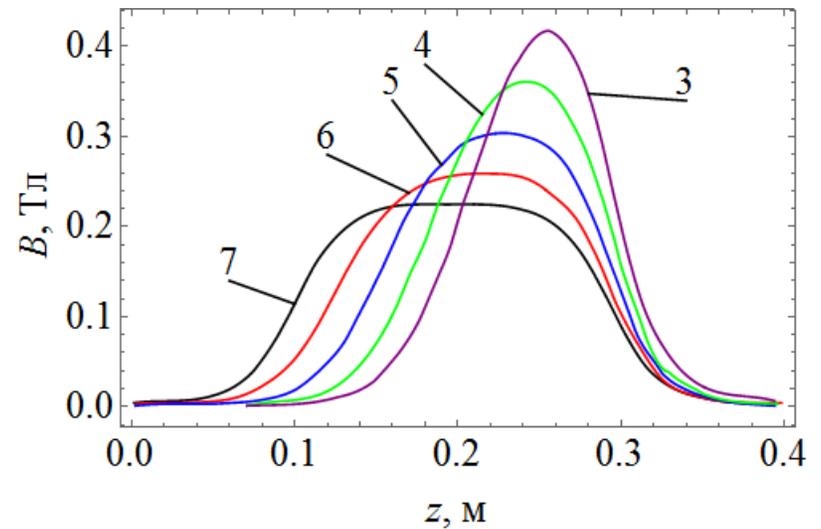
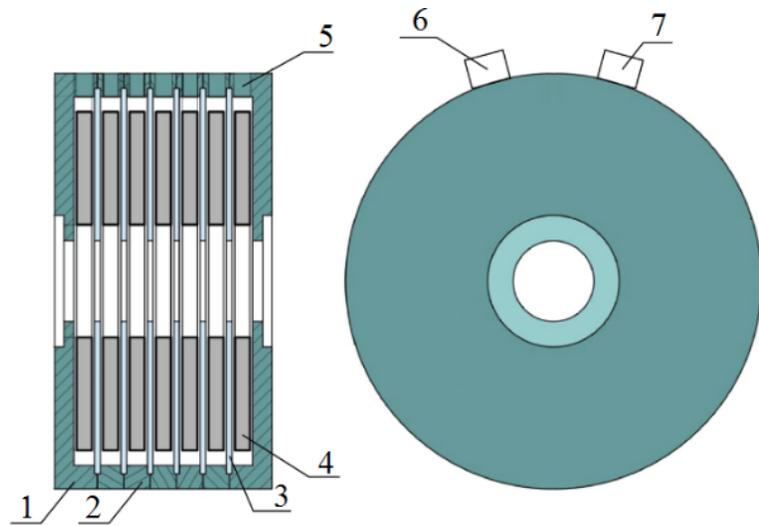
Четверть СВЧ пушки и распределение электрического поля E_z вдоль оси пушки.

Амплитуда поля СВЧ пушки (**106 МВ/м**) и фаза инжекции пучка (**30°**) выбраны таким образом, чтобы пучок электронов ускорялся до 5 МэВ и имел минимальный разброс по энергиям.



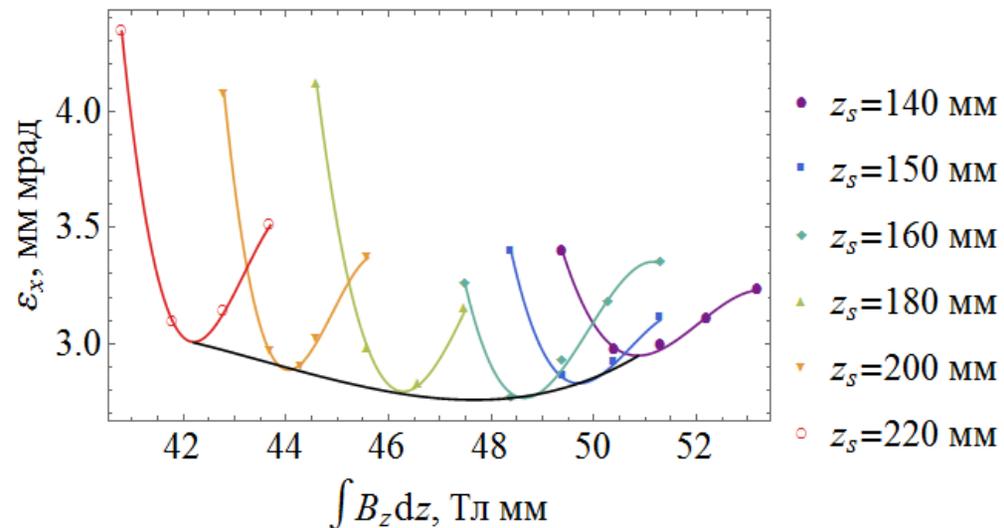
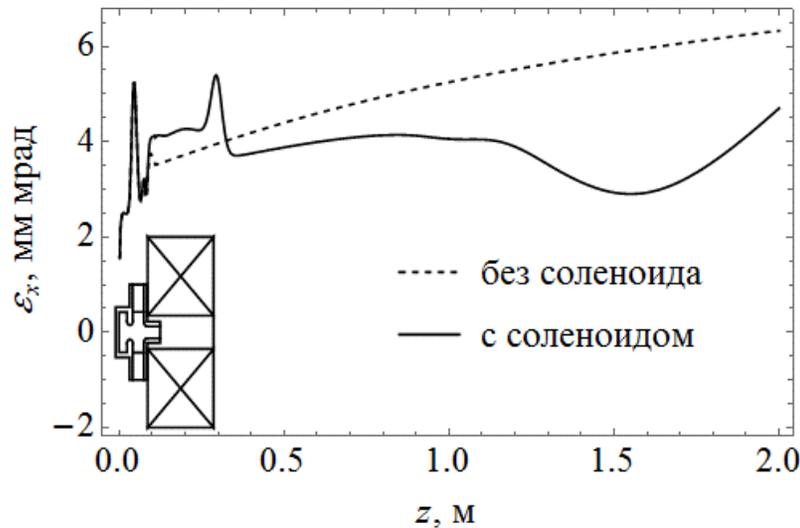
Средняя кинетическая энергия E и относительное среднеквадратичное отклонение σ_E/E в зависимости от фазы инжекции φ_{in} пучка в СВЧ пушке.

Отправной точкой для выбора соленоида являлась конструкция, разработанная для проекта LCLS.



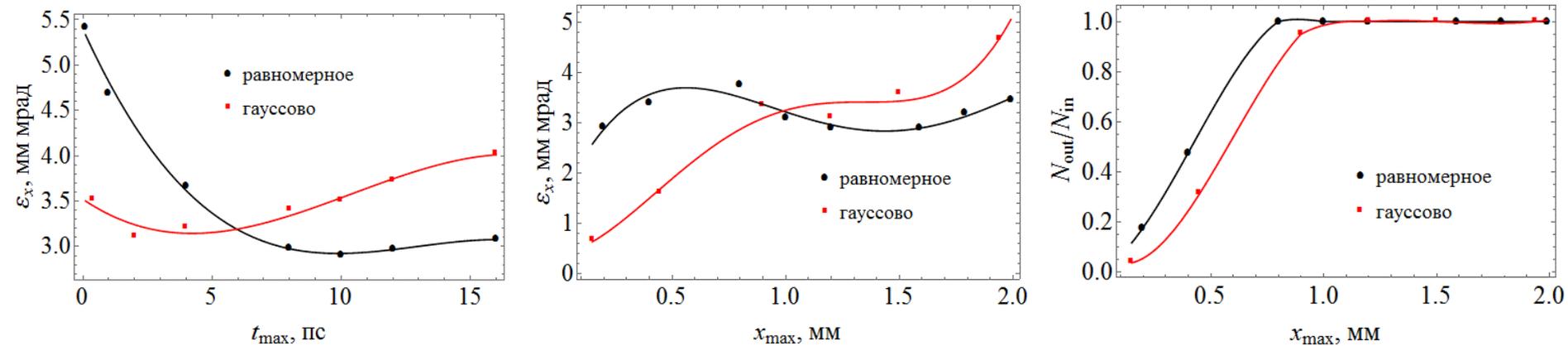
(Слева) Аксиально-симметричный соленоид: 1 – торцевая часть, 2 – кольцо, 3 – разравнивающая пластина, 4 – катушка, 5 – отверстие в кольце, 6, 7 – колодки для крепления токоподводящих проводов и шлангов системы охлаждения. (Справа) Распределение поля при последовательном отключении катушек при сохранении интеграла поля 44.3 Тл мм: 7, 6, 5, 4, 3 – включены семь, шесть, пять, четыре и три соседние катушки, соответственно

Интеграл магнитного поля соленоида (44.3 Тл мм) и его положение (200 мм) относительно катода выбраны таким образом, чтобы пучок приобрел минимальный поперечный эмиттанс.



(Слева) Изменения нормализованного поперечного эмиттанса ϵ_x . (Справа) Наименьший нормализованный поперечный эмиттанс пучка ϵ_x при разных положениях соленоида z_s и интегралах его магнитного поля $\int B_z dz$. z_s - расстояние от центра соленоида до катода.

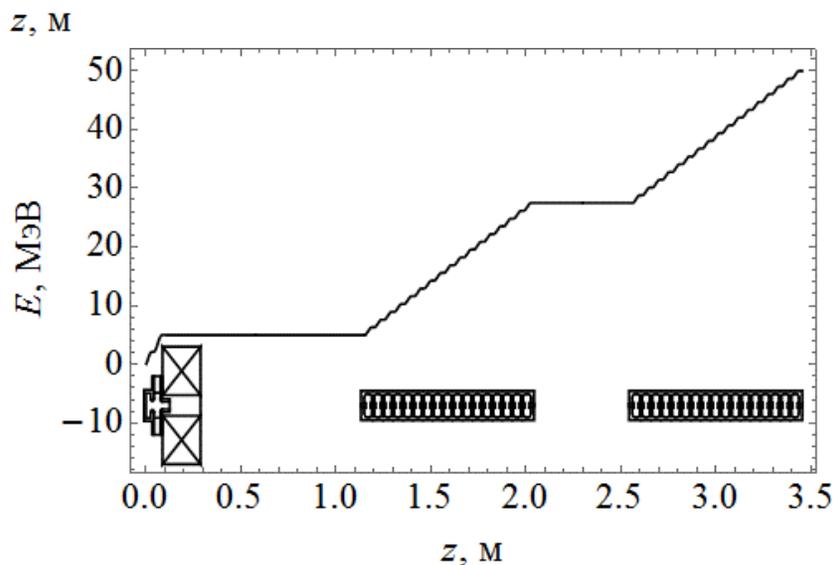
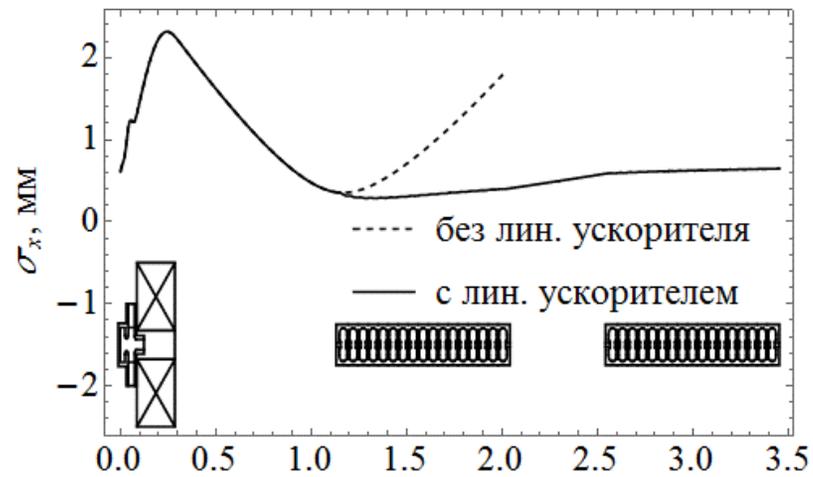
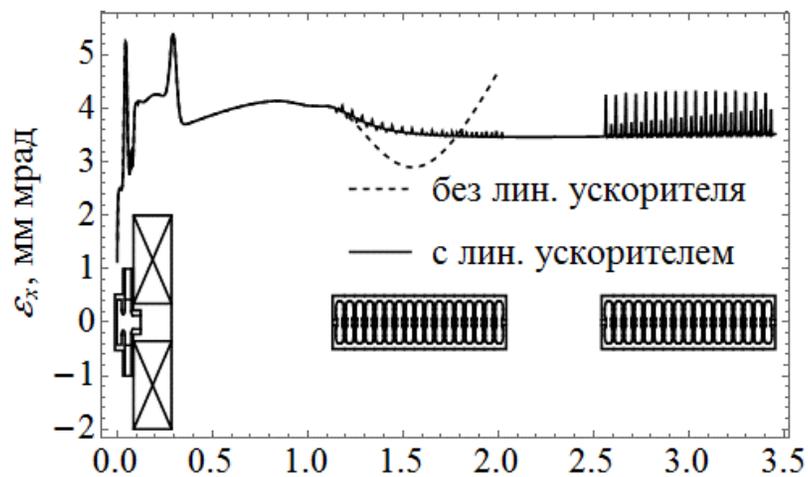
Чтобы инжектировать в СВЧ пушку сгусток электронов с зарядом 1 нКл, нужно облучить медный фотокатод лазерным импульсом с $\lambda = 248 - 266$ нм и $E = 0.1 - 2$ мДж. Длительность (10 пс), радиус поперечного сечения (1.2 мм) и распределение фотонов в лазерном импульсе (равномерное) выбраны так, чтобы минимизировать поперечный эмиттанс.



x_{\max} – радиус поперечного сечения лазерного импульса, t_{\max} – длительность лазерного импульса, $N_{\text{out}}/N_{\text{in}}$ – доля ускоренных электронов сгустка. С уменьшением радиуса электроны начинают оседать на катоде, в результате чего падает заряд сгустка и уменьшается эмиттанс.

Линейный ускоритель представляет собой ускоряющую структуру со стоячей волной с внутренними ячейками связи, работающей на $\pi/2$ -колебании.

Параметр	Значение
Частота	2856 МГц
Кол-во секций	2
Длина секции	~ 0.9 м
Кол-во ячеек в секции	17
Мах прирост энергии	22.5 МэВ
Мах затраты мощности	~ 7 МВт
Эффективное шунтовое сопротивление	84 Мом/м

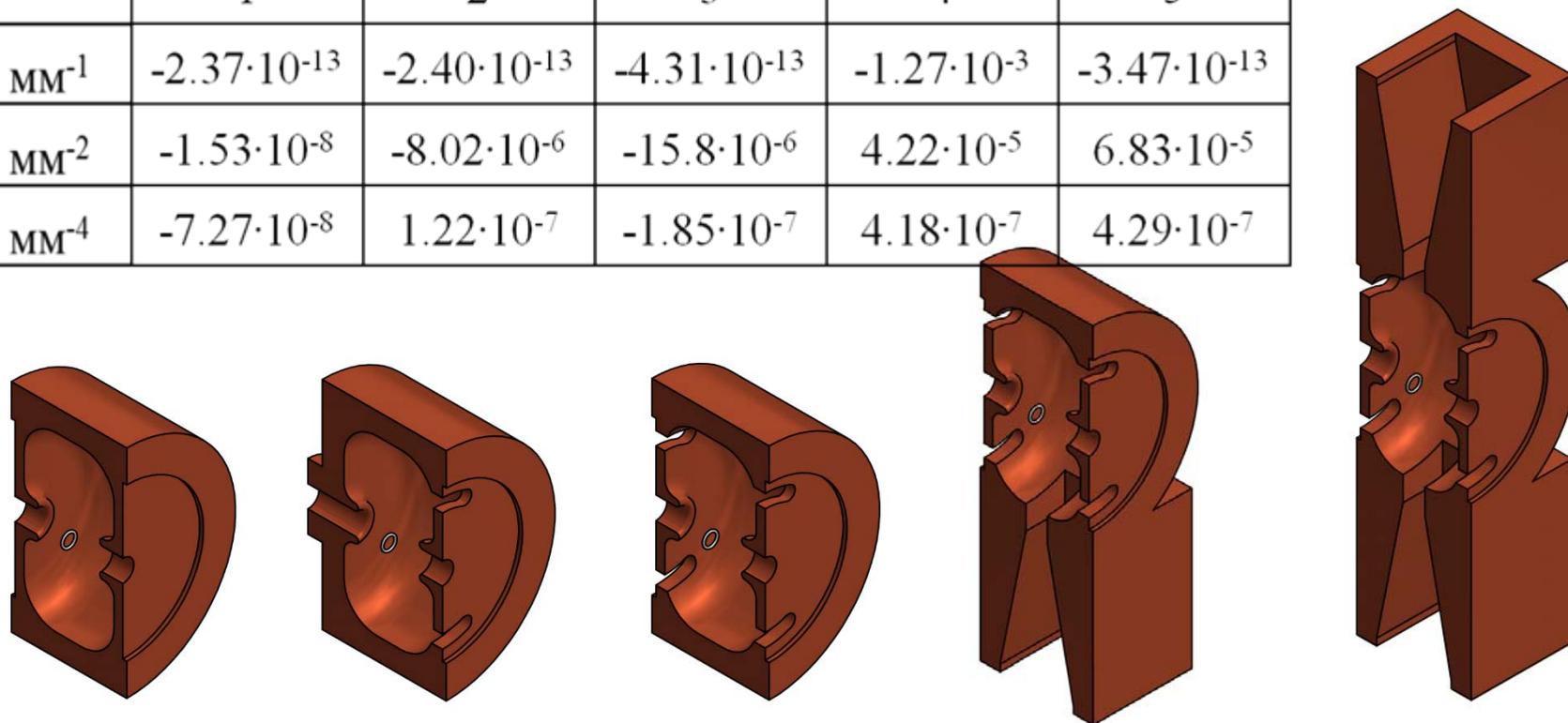


Изменение поперечного эмиттанта ε_x , среднеквадратичного радиуса σ_x и средней энергии пучка E .

Электромагнитное поле можно разложить по мультипольным компонентам:

$$E_z(\theta) = E_0 \left(1 - \frac{k_c^2}{4} r^2 + a_1 r \sin \theta - a_2 r^2 \cos 2\theta + a_4 r^4 \cos 4\theta \right)$$

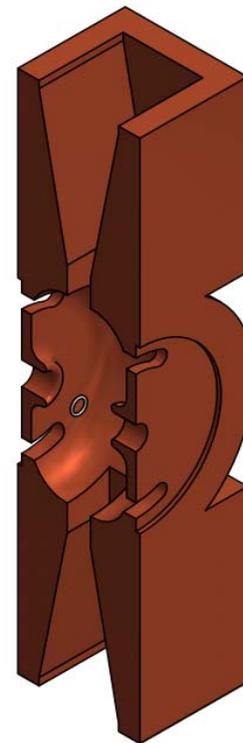
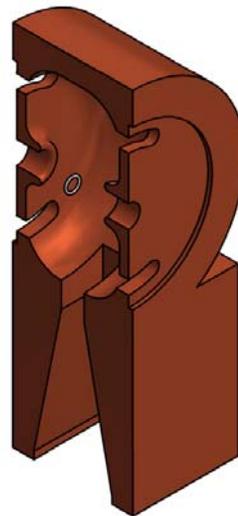
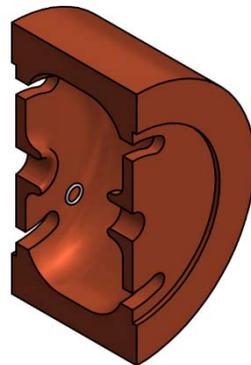
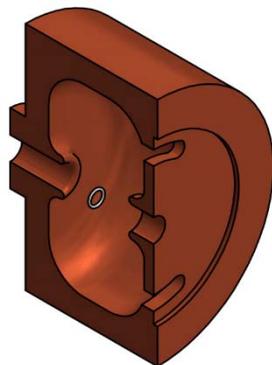
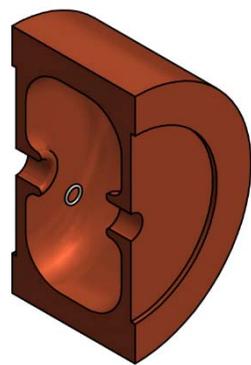
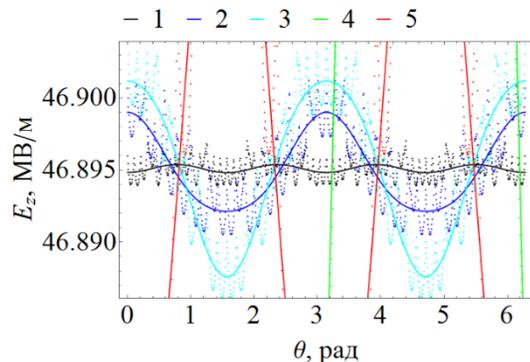
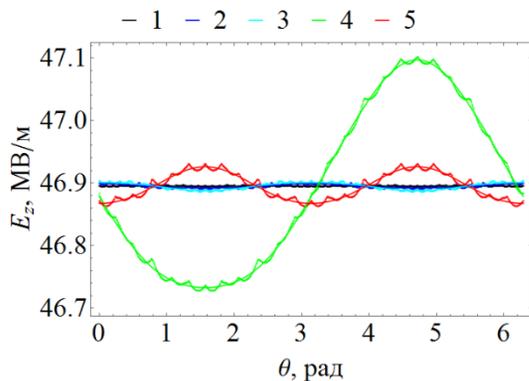
	1	2	3	4	5
$a_1, \text{мм}^{-1}$	$-2.37 \cdot 10^{-13}$	$-2.40 \cdot 10^{-13}$	$-4.31 \cdot 10^{-13}$	$-1.27 \cdot 10^{-3}$	$-3.47 \cdot 10^{-13}$
$a_2, \text{мм}^{-2}$	$-1.53 \cdot 10^{-8}$	$-8.02 \cdot 10^{-6}$	$-15.8 \cdot 10^{-6}$	$4.22 \cdot 10^{-5}$	$6.83 \cdot 10^{-5}$
$a_4, \text{мм}^{-4}$	$-7.27 \cdot 10^{-8}$	$1.22 \cdot 10^{-7}$	$-1.85 \cdot 10^{-7}$	$4.18 \cdot 10^{-7}$	$4.29 \cdot 10^{-7}$



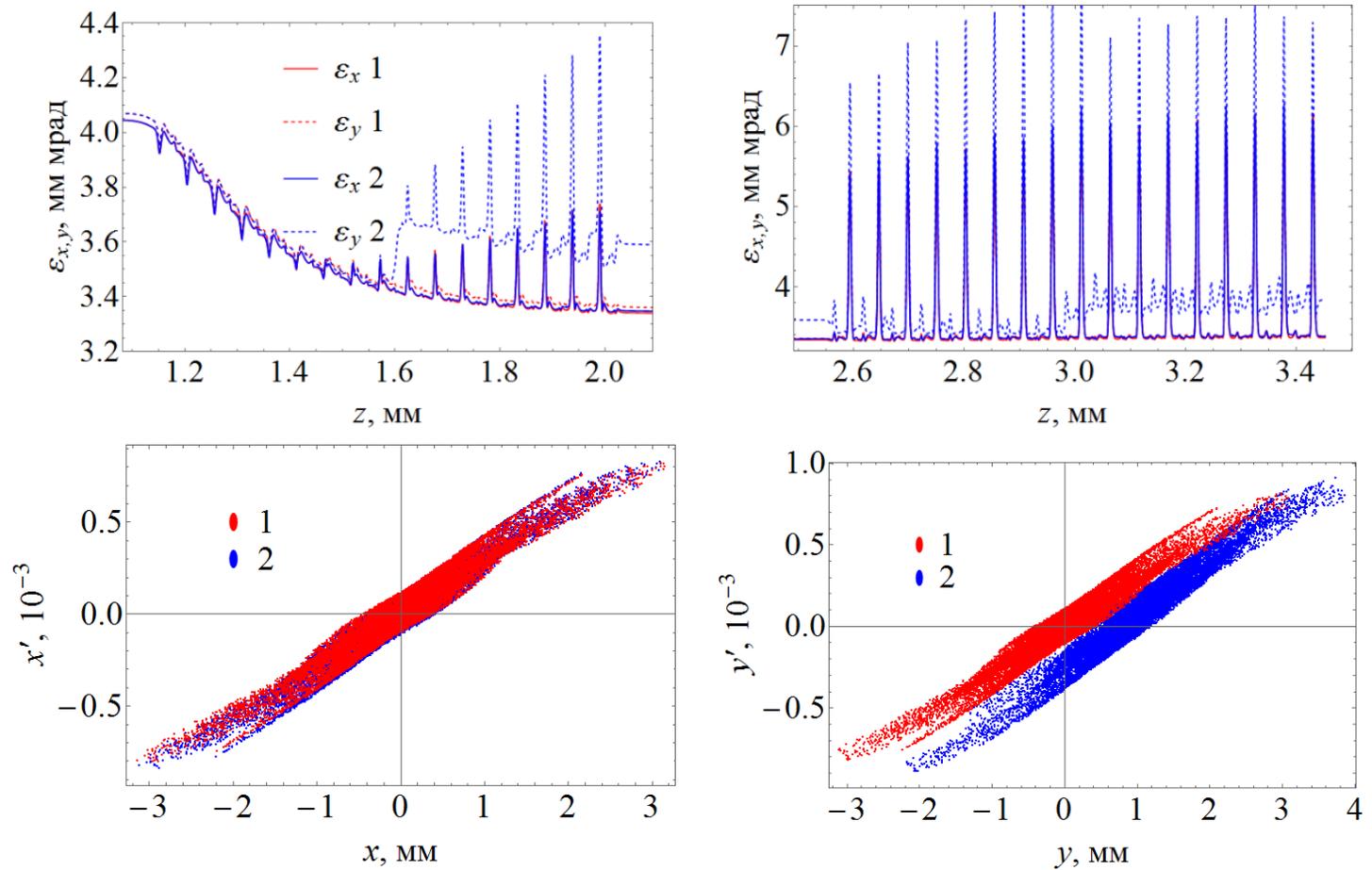
Слева направо: 1 – ячейка без щелей связи, 2 – концевая ячейка, 3 – регулярная ячейка, 4 – ячейка с одним окном для ввода мощности, 5 – ячейка с двумя окнами ввода мощности.

Электромагнитное поле можно разложить по мультипольным компонентам:

$$E_z(\theta) = E_0 \left(1 - \frac{k_c^2}{4} r^2 + a_1 r \sin \theta - a_2 r^2 \cos 2\theta + a_4 r^4 \cos 4\theta \right)$$



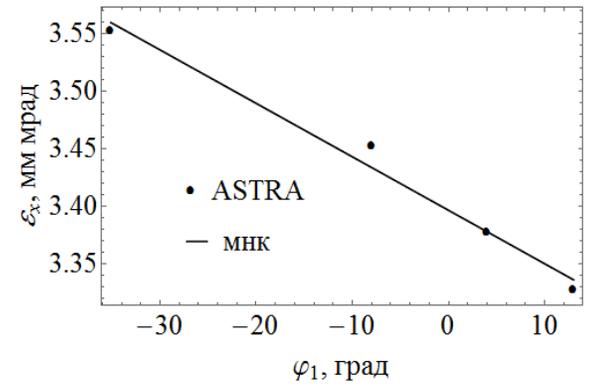
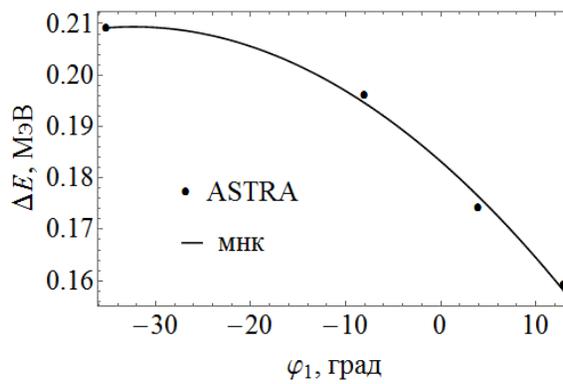
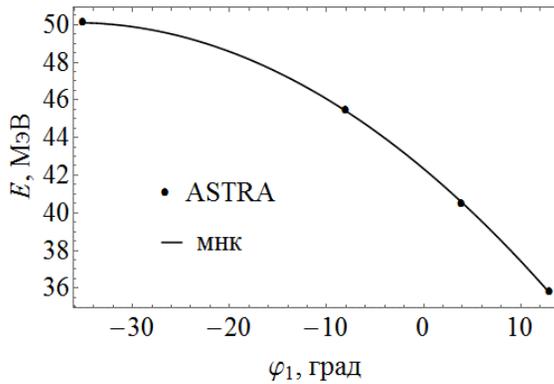
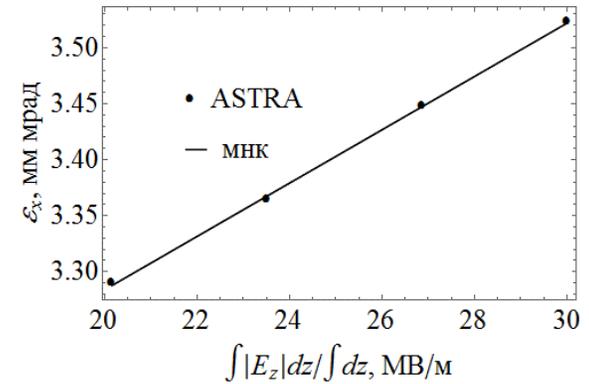
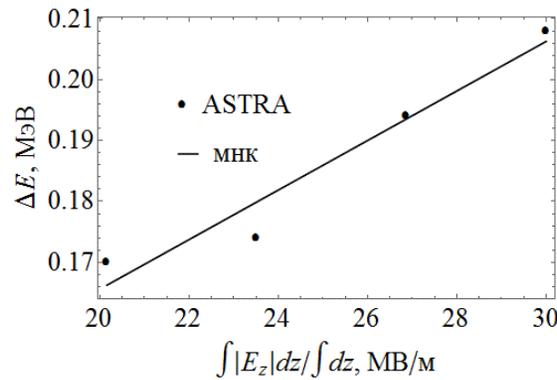
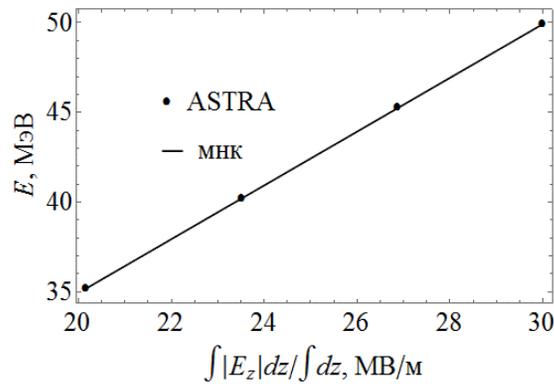
Слева направо: 1 – ячейка без щелей связи, 2 – концевая ячейка, 3 – регулярная ячейка, 4 – ячейка с одним окном для ввода мощности, 5 – ячейка с двумя окнами ввода мощности.



Изменение нормализованных поперечных эмиттансов $\epsilon_{x,y}$ в первой (слева) и второй (справа) секциях и фазовые портреты (x, x') и (y, y') пучка, ускоренного до средней кинетической энергии 40 МэВ. 1 – ускорение в структуре с девятой ячейкой с двумя окнами ввода мощности, 2 – ускорение в структуре с девятой ячейкой с одним окном ввода мощности.

Были предложены два способа регулирования конечной энергии пучка электронов:

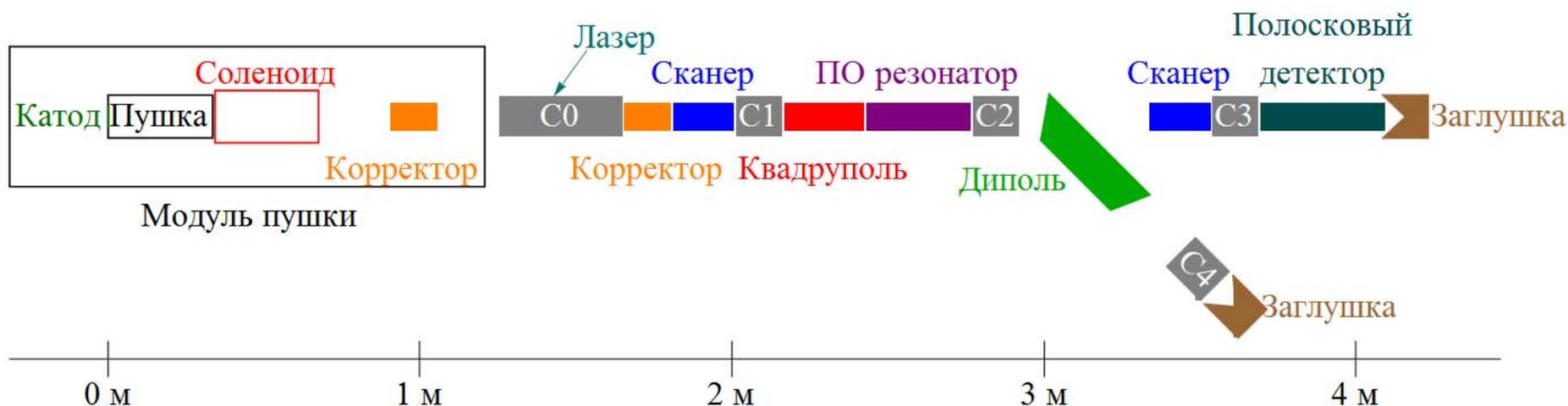
1. Одновременное одинаковое изменение величины поля секций (метод 1).
2. Изменение фазы влета в первую и во вторую секции при постоянной нормировке поля (метод 2).



Характеристики пучка в двух методах регулирования энергии. Сверху – метод 1, меняется нормировка ускоряющего поля $\int |E_z| dz / \int dz$. Снизу – метод 2, меняется фаза поля первой секции φ_1 . E – кинетическая энергия, ΔE – полный разброс кинетических энергий частиц пучка, ϵ_x – нормализованный поперечный эмиттанс

2. Методика измерения продольного эмиттанса пучка

В ЛЭУ МГУ был спроектирован спектрометр и была изучена методика измерения продольного эмиттанса пучка СВЧ пушки для экспериментов GunLab и BERLinPro (Берлинский центр материалов и энергии имени Гельмгольца). Основная цель эксперимента GunLab состоит в исследовании и развитии сверхпроводящих СВЧ фотоинжекторов.

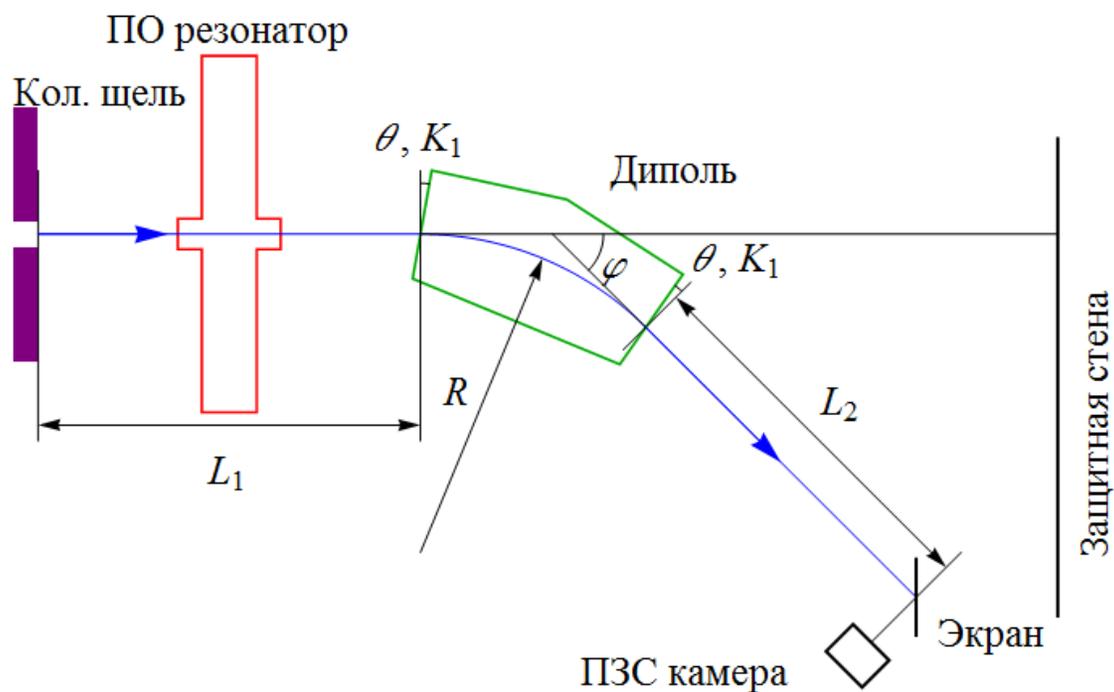


Линия диагностики пучка в эксперименте GunLab.

Основные параметры эксперимента GunLab

Параметр	Значение
Длина волны лазерного излучения	515, 258 нм
Длительность лазерных импульсов	3-16 пс
Среднеквадратичный радиус лазерного излучения на катоде	0.5 мм
Частота ЭМ поля СВЧ пушки	1.3 ГГц
Амплитуда электрического поля	30 МВ/м
Интеграл квадрата поля соленоида	1 Тл ² мм
Энергия пучка электронов	1-3.5 МэВ
Заряд пучка электронов	0-100 пКл

Для измерения продольного эмиттанса требуются вертикально-отклоняющий ВЧ резонатор и дипольный магнит, поворачивающий пучок в горизонтальной плоскости: вертикальные координаты частиц пучка на экране связаны со временем пролета резонатора; горизонтальные координаты частиц связаны с их импульсом p_z .



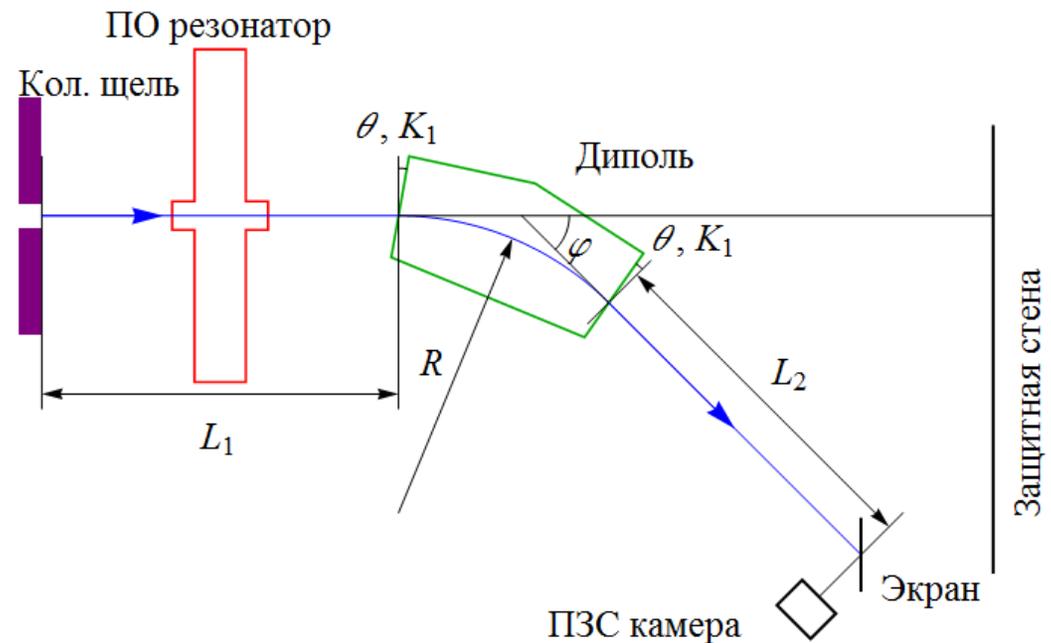
Основные параметры системы измерения продольного ЭМИТТАНСА

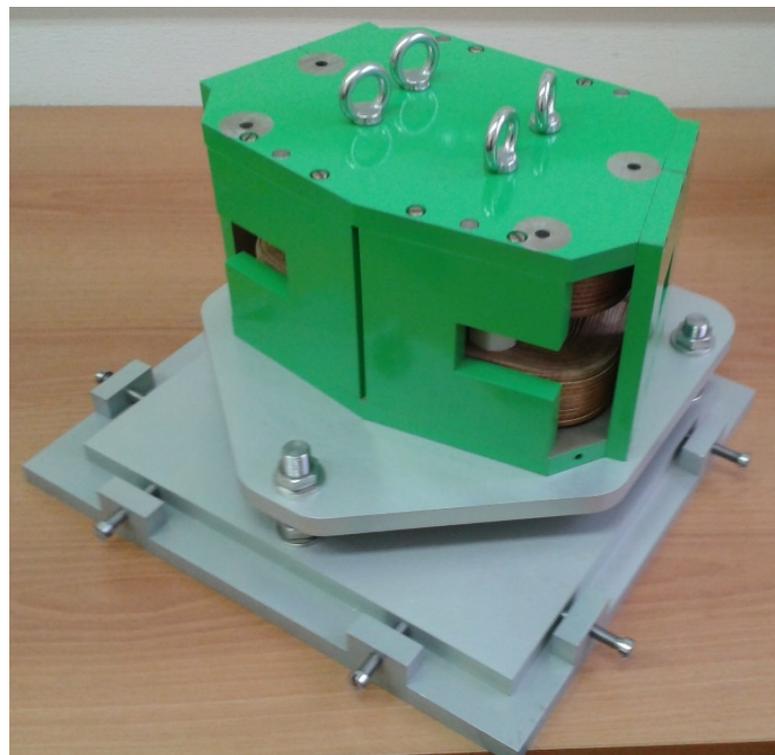
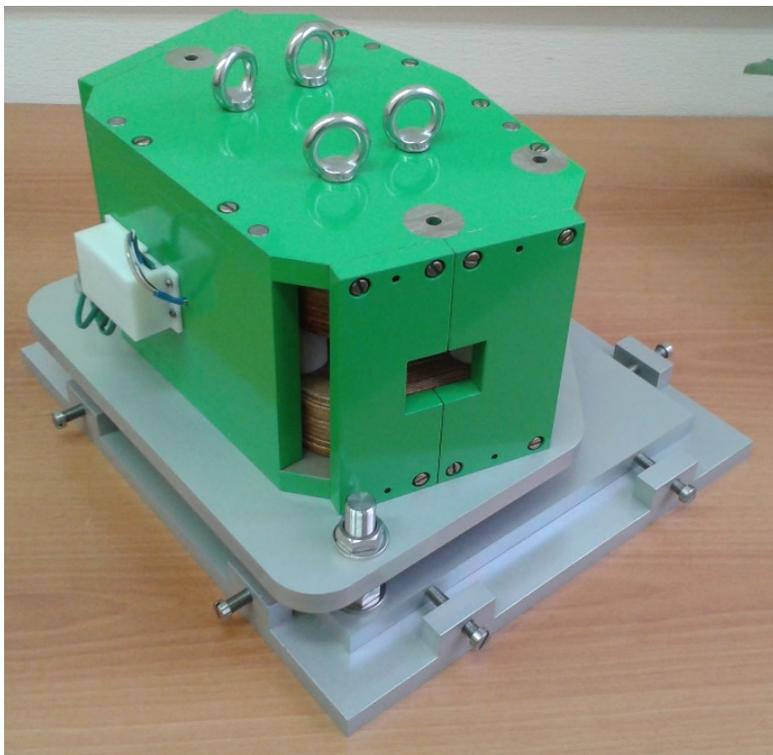
Параметр	Значение	Параметр	Значение
G	35 мм	φ	45°
L_1	0.8 м	θ	7.593°
L_2	1 м	K_1	0.246
R	0.25 м		

G – зазор между полюсами магнита,

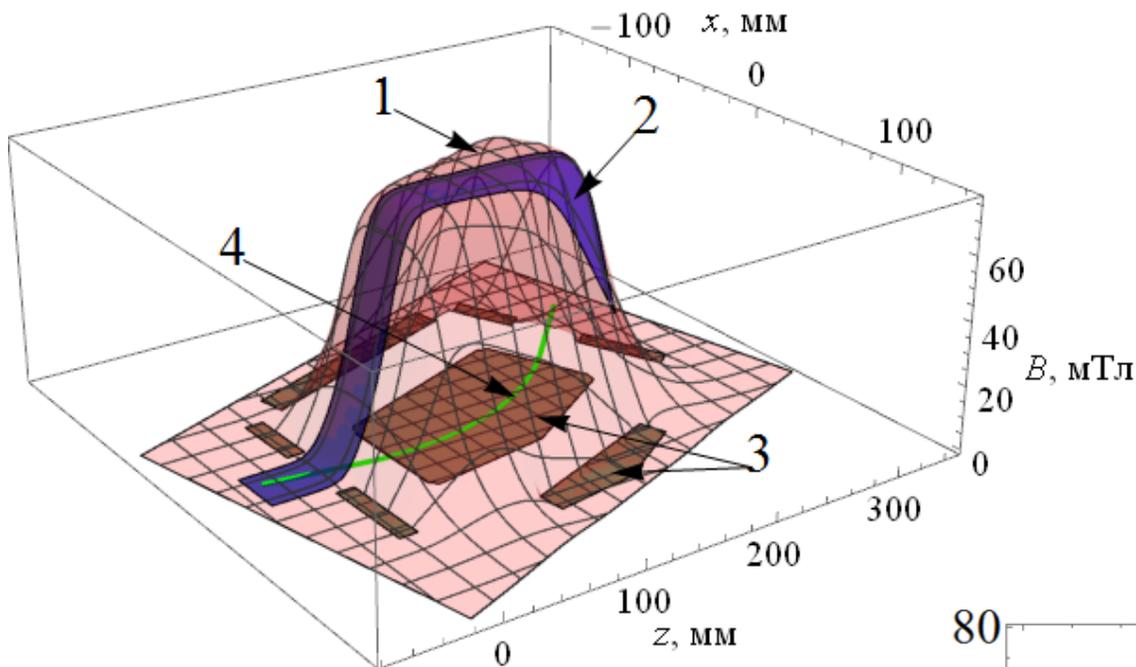
$$K_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B_y(z)(B_0 - B_y(z))}{GB_0^2} dz -$$

интеграл краевого поля.



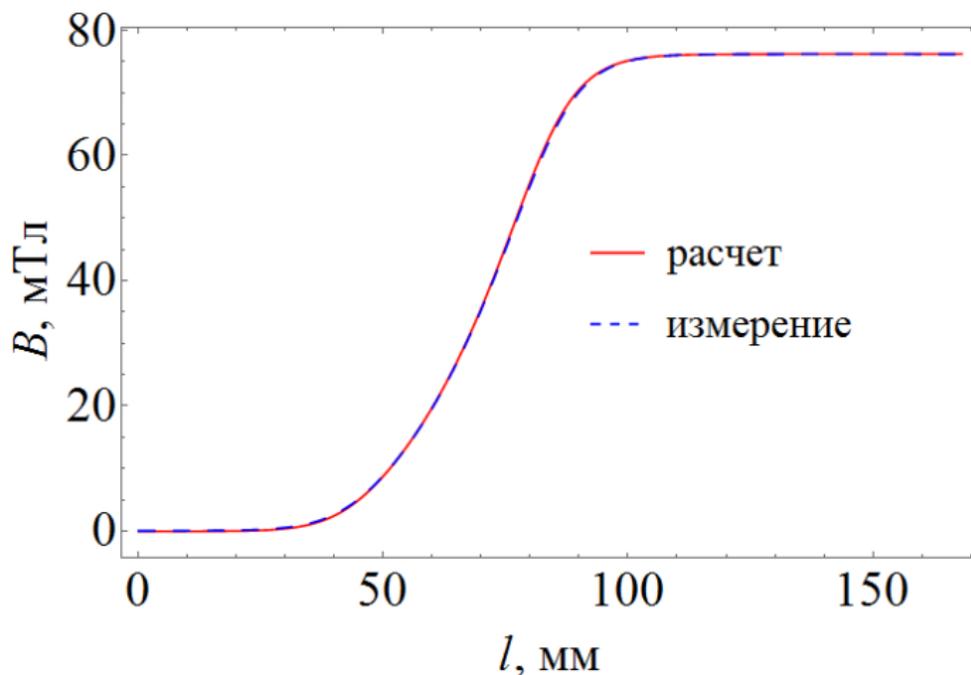


Дипольный магнит для эксперимента был спроектирован и собран в ЛЭУ МГУ.



Распределения расчетного (1) и измеренного (2) магнитных полей в медианной плоскости xz при токе через обмотки 3 А (348 витков в каждой обмотке). 3 – контуры полюса и ярма магнита, 4 – опорная траектория пучка.

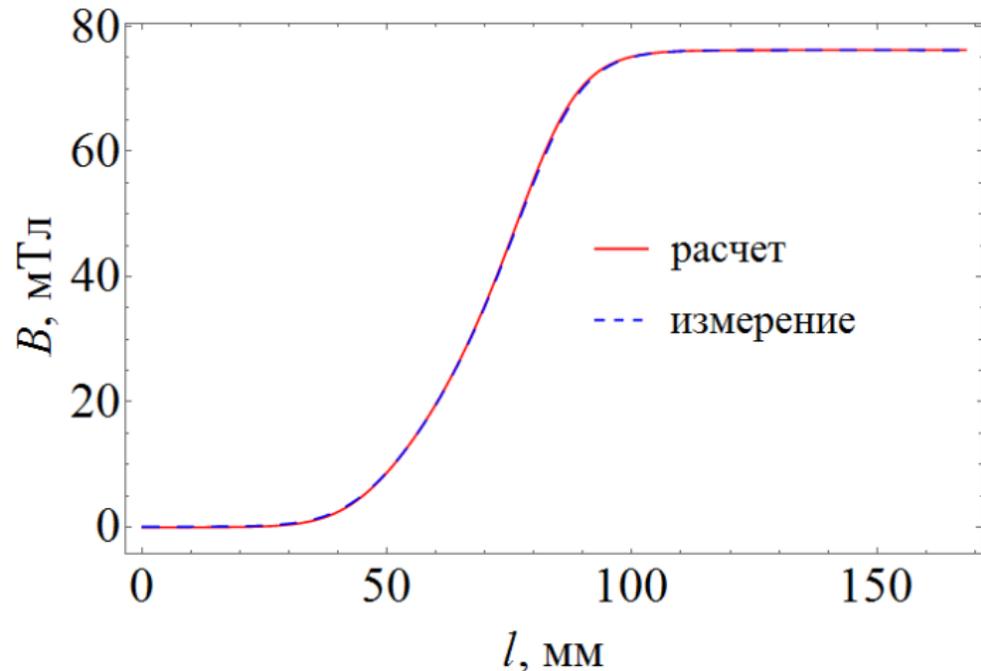
Распределение расчетного и измеренного магнитных полей вдоль половины опорной траектории пучка в дипольном магните.



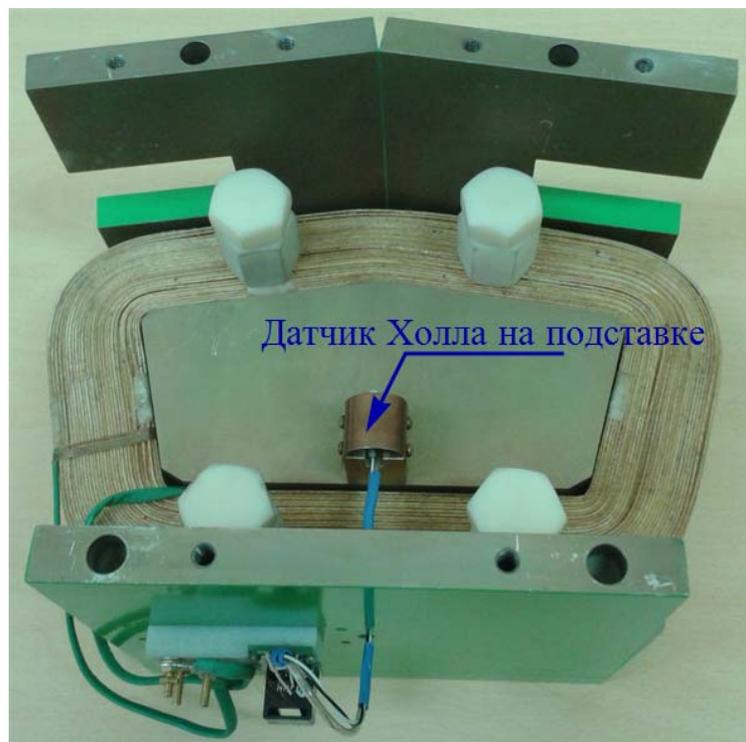
Измеренное и расчетное магнитные поля сравнивались по значениям интеграла краевого поля $K_1 = \int B(l)(B_0 - B(l))/(GB_0^2) dl$ и эффективной длины траектории $L = 2 \int B(l)/B_0 dl$.

	Расчет	Измерение
K_1	0.246	0.251
L	196.7 мм	196.6 мм

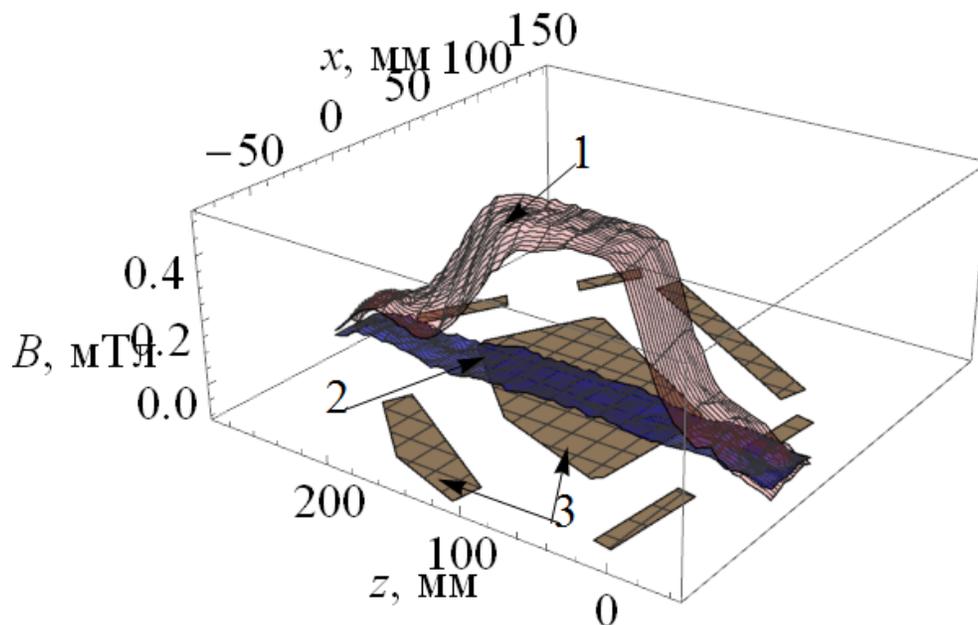
Распределение расчетного и измеренного магнитных полей вдоль половины опорной траектории пучка в дипольном магните.



Важной особенностью дипольного магнита является датчик Холла, постоянно установленный в магнитном поле дипольного магнита и позволяющий с точностью лучше 1 Гс контролировать его величину.

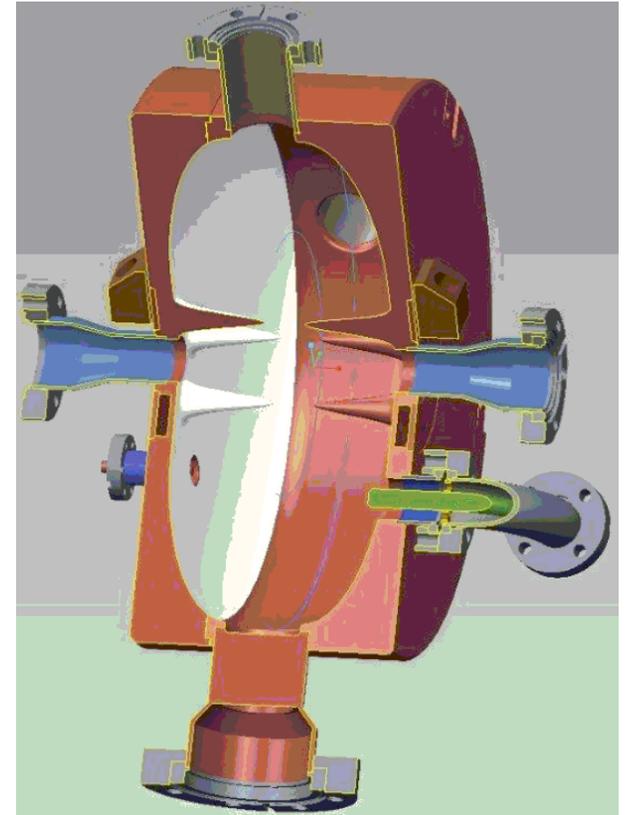


Поскольку дипольный магнит постоянно находится на линии транспортировки, его остаточное поле будет влиять на траекторию пучка. Величина остаточного поля зависит от предыстории включения-выключения питания магнита. Датчик Холла, установленный в магните, позволяет контролировать уровень остаточного поля и осуществлять его минимизацию за счет подачи на обмотки компенсирующего тока.

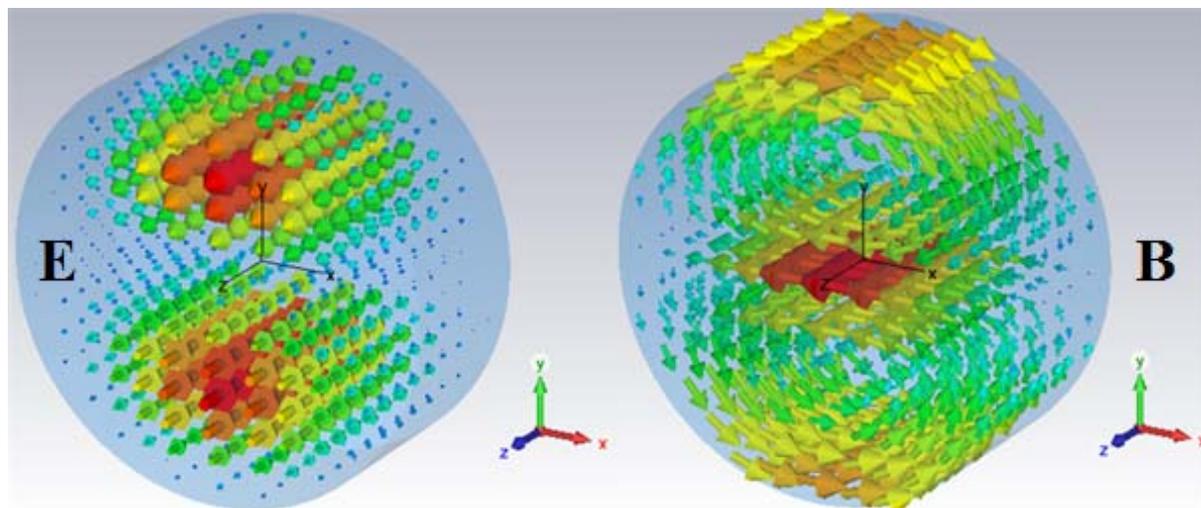
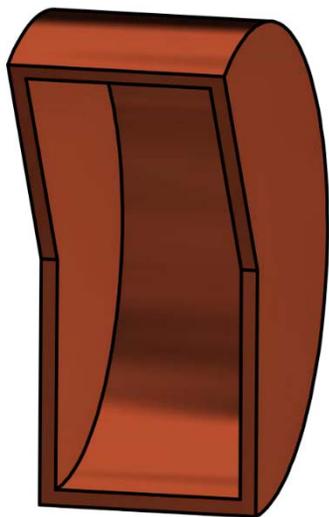


Распределение в медианной плоскости диполя остаточного магнитного поля (1) и поля при токе 15.1 мА (2). 3 – контуры полюса и ярма магнита.

Проектирование вертикально-отклоняющего ВЧ резонатора с частотой 1.3 ГГц для эксперимента ведется в ускорительном комплексе DELTA в Дортмунде.

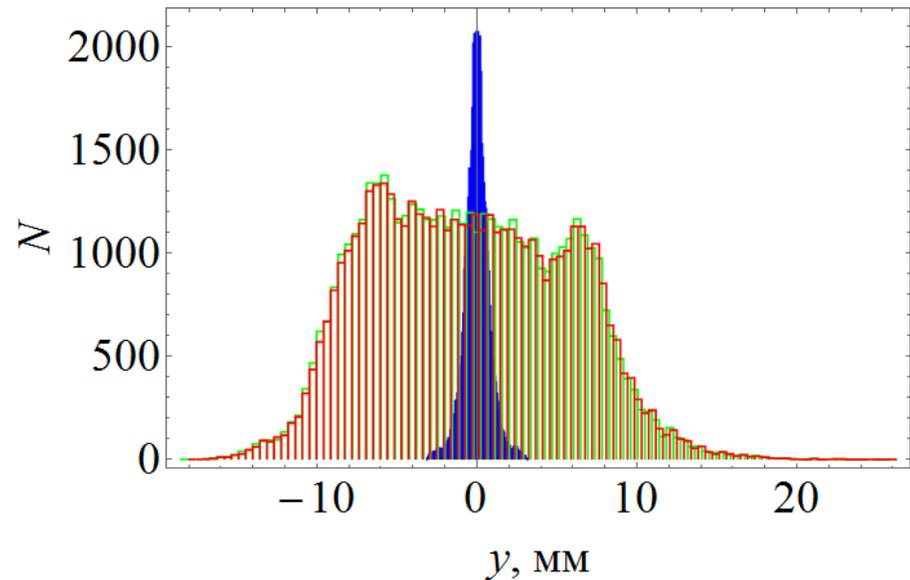
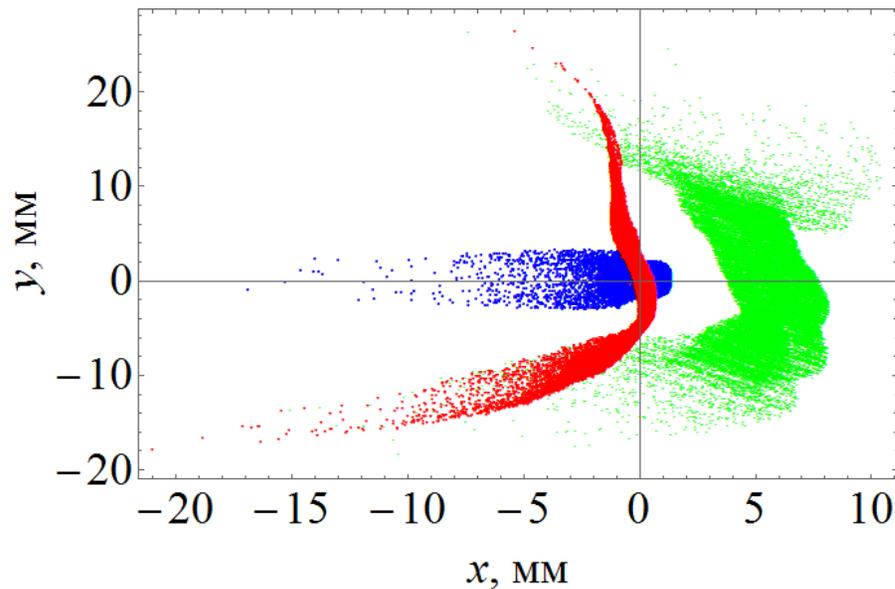


При изучении измерения продольного эмиттанса мы использовали поле цилиндрического резонатора без пролетного канала вместо поля реального вертикально-отклоняющего ВЧ резонатора.



В цилиндрическом резонаторе без пролетного канала возбуждаются колебания электромагнитного поля моды TM_{110} с частотой 1.3 ГГц. Длина резонатора равна половине длине волны.

Было промоделировано движение пучка электронов с импульсом 3.06 МэВ/с в системе измерения. Резонатор расположен по середине первого участка дрейфа, а амплитуды электрического и магнитного полей равны $E_0 = 5$ МВ/м, $B_0 = E_0/c = 16.7$ мТл.



Синим показано пятно пучка на экране, прошедшего только дипольный магнит (резонатор выключен). Зеленым показано пятно пучка на экране, прошедшего резонатор и дипольный магнит. Красным показано пятно пучка на экране, прошедшего резонатор с выключенным электрическим полем, и дипольный магнит.

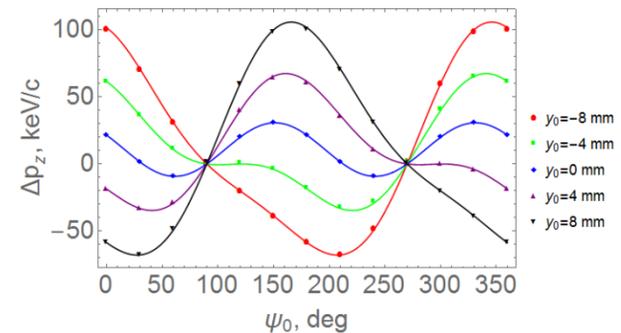
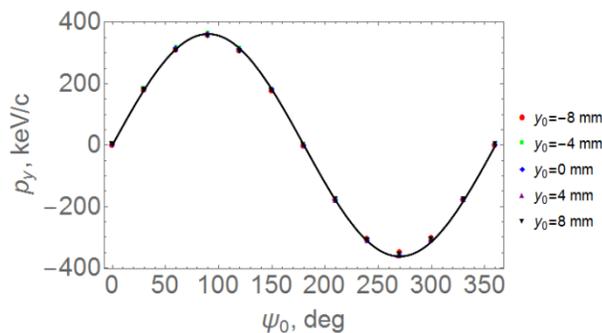
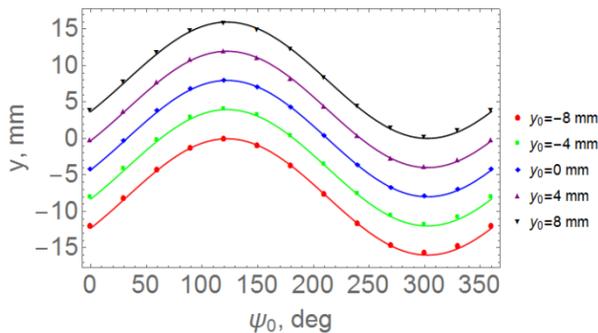
Электромагнитное поле моды TM_{110} цилиндрического резонатора без пролетного канала можно представить в виде $\mathbf{E} = i\mathbf{e}_z\omega B_0 y e^{-i(\omega t + \psi_0)}$, $\mathbf{B} = \mathbf{e}_x B_0 e^{-i(\omega t + \psi_0)}$. В таком поле можно решить уравнения движения электрона:

$$y = y_0 - \frac{eB_0\beta\lambda^2}{2\pi^2 m_0 \gamma c} \left(\cos \psi - \frac{\pi}{2} \sin \psi \right), \quad (1)$$

$$p_y = \frac{eB_0\beta\lambda}{\pi} \sin \psi, \quad (2)$$

$$p_z = p_{z0} + \frac{e^2 E_0 B_0 \beta \lambda^2}{2\pi^2 m_0 \gamma c^2} \cos \psi \left(\cos \psi - \frac{\pi}{2} \sin \psi \right) - \frac{2eE_0 y_0}{c} \cos \psi. \quad (3)$$

y_0 , p_{z0} – координата и импульс электрона на входе в резонатор, ψ – фаза поля в момент влета электрона. Считается, что $p_{y0} = 0$.



Допустим, что на входе в систему измерения пучок имеет нулевой поперечный размер и все частицы пучка движутся почти строго вдоль оси z , то есть для всех частиц пучка $x = y = 0$, $x' = y' = 0$; разброс частиц пучка по импульсу существенно меньше импульса опорного электрона и частицы движутся со скоростью света.

Зная координаты частиц пучка на выходе из резонатора y , p_y , p_z (1-3) и матрицу преобразования \tilde{m} системы, состоящей из участка дрейфа, дипольного магнита и еще одного участка дрейфа, можем найти координаты электрона на экране:

$$x_s = \tilde{m}_{16} \frac{p_z - p_0}{p_0}, \quad (4)$$

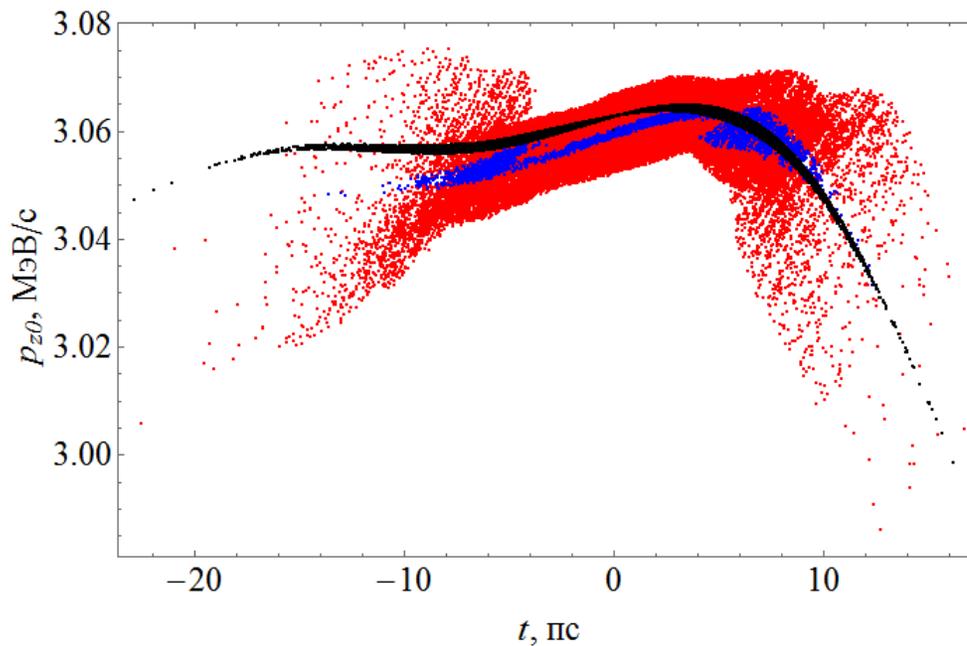
$$y_s = \tilde{m}_{33} y + \tilde{m}_{34} \frac{p_y}{p_0}. \quad (5)$$

Из системы уравнений (4-5) находим фазу влета в резонатор ψ и импульс электрона p_{z0} как функции координат x_s, y_s электрона на экране:

$$\psi = \arcsin \frac{y_s}{\sqrt{A^2+B^2}} - \arcsin \frac{A}{\sqrt{A^2+B^2}}, \quad (6)$$

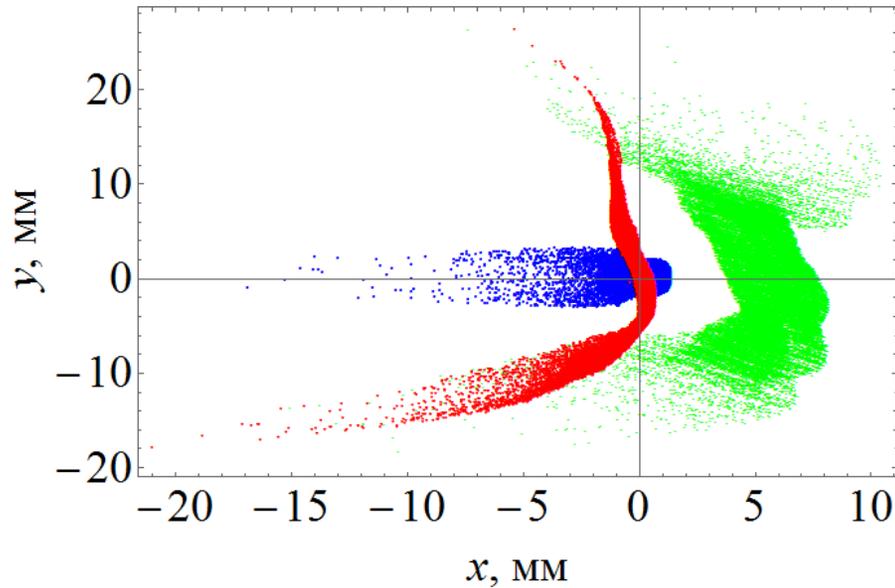
$$p_{z0} = \left(1 + \frac{x_s}{\tilde{m}_{16}}\right) p_0 - \frac{e^2 B_0^2 \beta \lambda^2}{2\pi^2 m_0 \gamma c} \cos \psi \left(\cos \psi - \frac{\pi}{2} \sin \psi \right), \quad (7)$$

$$A = -\frac{e B_0 \beta \lambda^2}{2\pi^2 m_0 \gamma c} \tilde{m}_{33}, B = \frac{e B_0 \beta \lambda^2}{4\pi m_0 \gamma c} \tilde{m}_{33} + \frac{e B_0 \beta \lambda}{\pi p_0} \tilde{m}_{34}. \quad (8)$$



На рисунке продемонстрирован результат восстановления продольного фазового портрета. Черным представлен истинный фазовый портрет пучка ($\varepsilon_z = 18.6$ пс кэВ/с). Красным показан восстановленный портрет пучка ($\varepsilon_z = 33.3$ пс кэВ/с). Если описанный метод применить к пучку, попавшему в систему измерения через дополнительную горизонтальную коллимационную щель шириной 0.1 мм, получается синий портрет ($\varepsilon_z = 17.3$ пс кэВ/с).

Так как пятно пучка (зеленый), прошедшего через резонатор и дипольный магнит, смещается по горизонтали относительно пятна пучка (синий), прошедшего только через дипольный магнит, значит его средний импульс изменился в резонаторе.



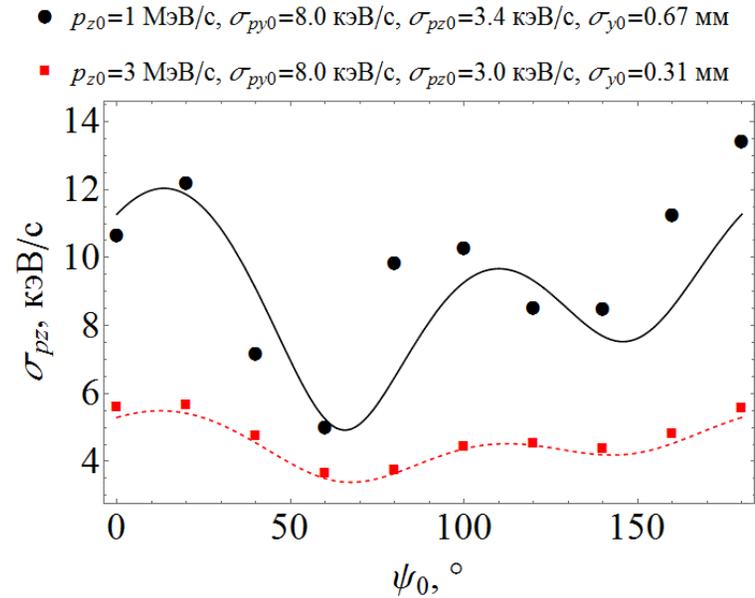
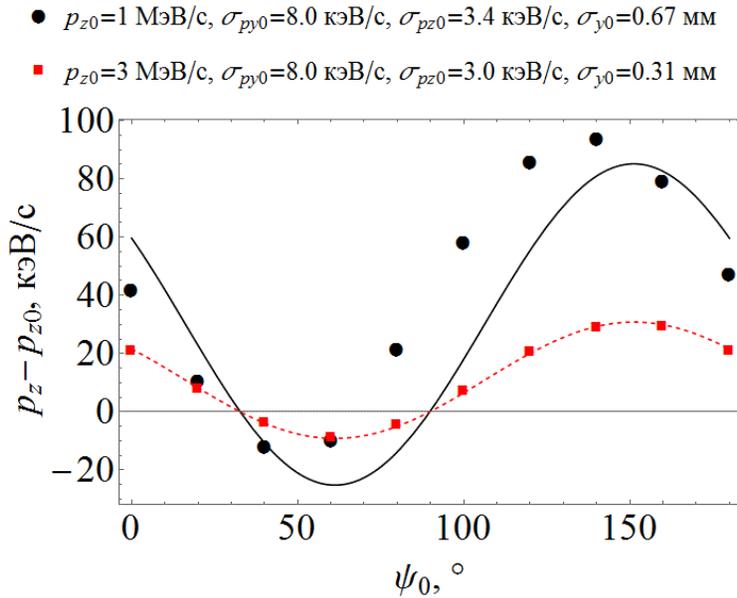
Зная (1-3), можно оценить изменение среднего импульса и дисперсию пучка после резонатора:

$$p_z - p_{z0} = \frac{e^2 E_0 B_0 \beta \lambda^2}{2\pi^2 m_0 \gamma c^2} \cos \psi_0 \left(\cos \psi_0 - \frac{\pi}{2} \sin \psi_0 \right),$$

$$\begin{aligned} \sigma_{pz} &= \left(\sigma_{pz0}^2 + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{2eE_0\sigma_{y0}}{c} \right)^2 + \left(\frac{eE_0\sigma_{py0}\lambda}{2m_0\gamma c^2} \right)^2 \right) (1 + \cos(2\psi_0)) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{e^2 E_0 B_0 \beta \lambda^2}{4\pi^2 m_0 \gamma c^2} \right)^2 \left(\left(1 - \frac{\lambda}{4\pi z_{\max}} \sin \left(\frac{4\pi z_{\max}}{\lambda} \right) \right) \left(\pi \sin(4\psi_0) - \cos(4\psi_0) + \frac{\pi^2}{4} \cos(4\psi_0) \right) \right) \right)^{1/2}, \end{aligned}$$

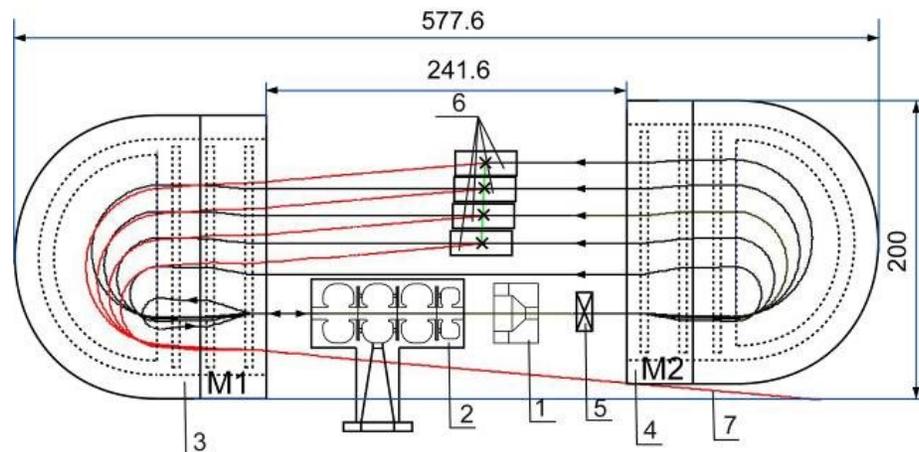
где z_{\max} - длина пучка, σ_{y0} - среднеквадратичный вертикальный размер пучка, σ_{py0} - среднеквадратичный разброс по импульсам p_{y0} , σ_{pz0} - среднеквадратичный разброс по импульсам p_{z0} , ψ_0 - фаза влета опорного электрона пучка.

Изменение среднего импульса $p_z - p_{z0}$ (слева) и дисперсия σ_{pz} (справа) пучков электронов, прошедших резонатор, в зависимости от фазы ψ_0 влета опорного электрона. Точки – численный расчет в ASTRA, линии – аналитические функции.

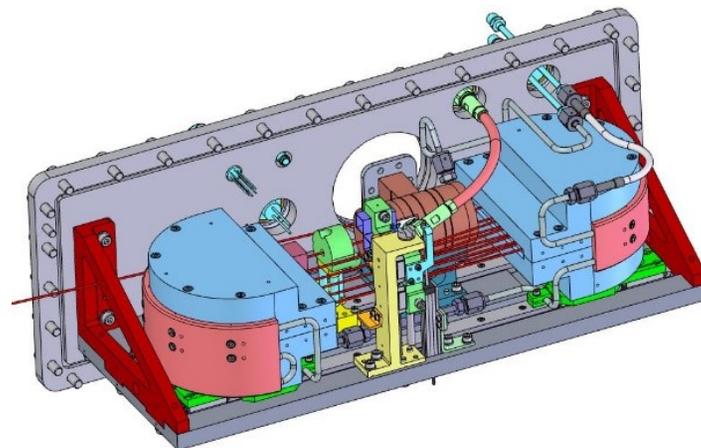


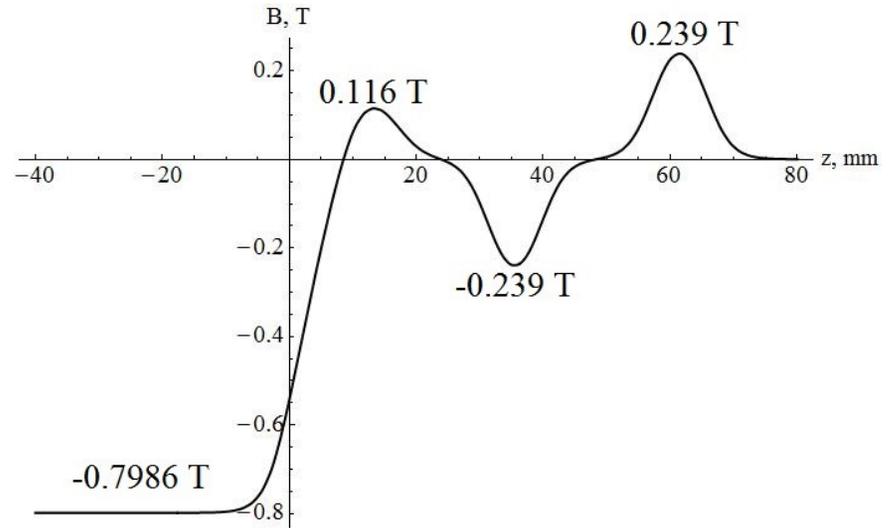
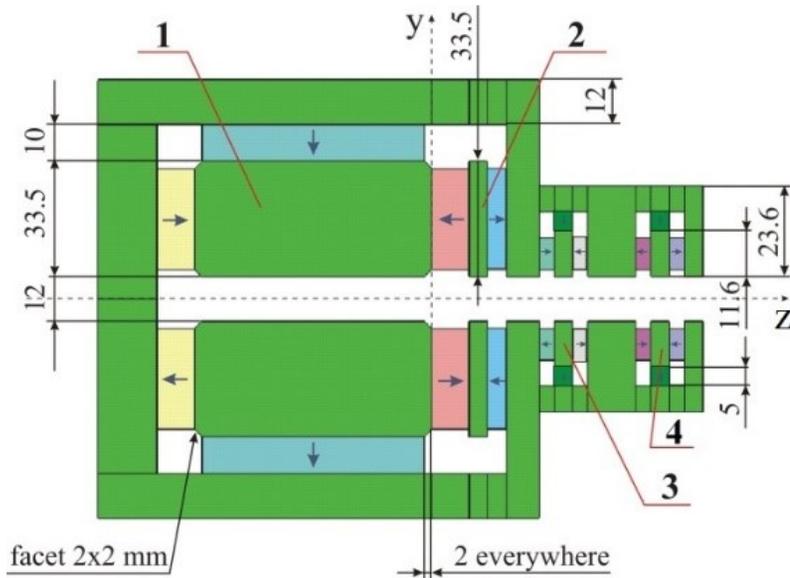
3. Магнитные системы на основе редкоземельного магнитного материала

Методика настройки магнитной системы на основе редкоземельного магнитного материала обрабатывалась на поворотных магнитах разрезного микротрона для интраоперационной терапии.

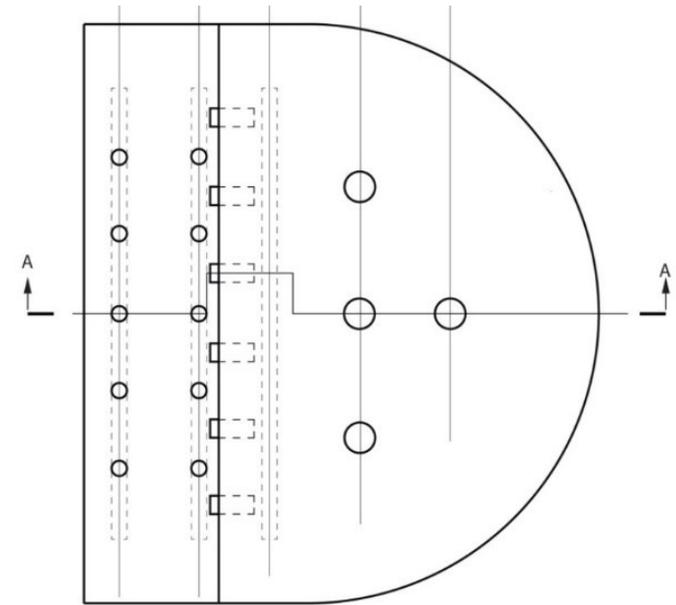
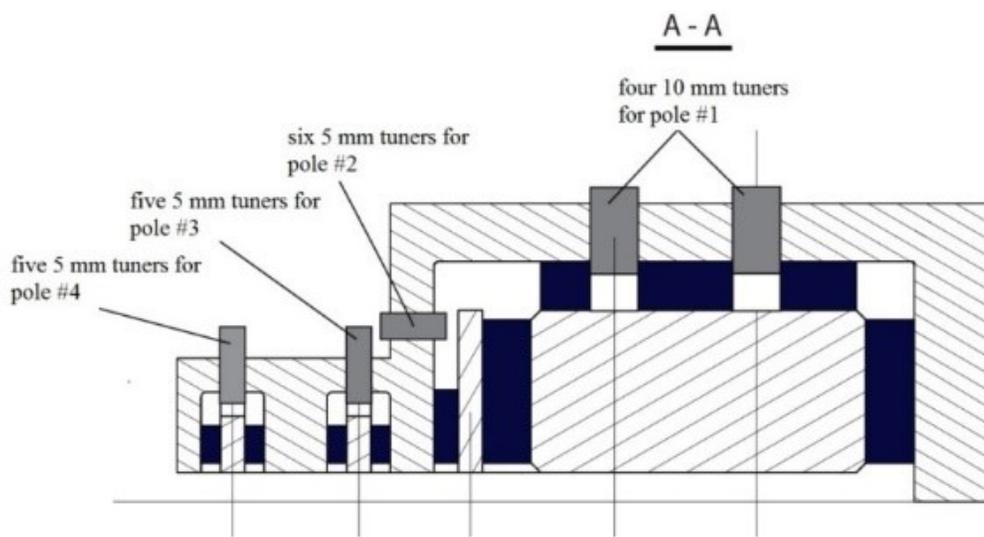


Энергии пучков, МэВ	6, 8, 10, 12
Рабочая частота, МГц	5712
Поле поворотных магнитов, Тл	0.8
Мощность дозы, Гр/мин	10-30
Габаритные размеры, мм	578×200×123
Вес, кг	< 100



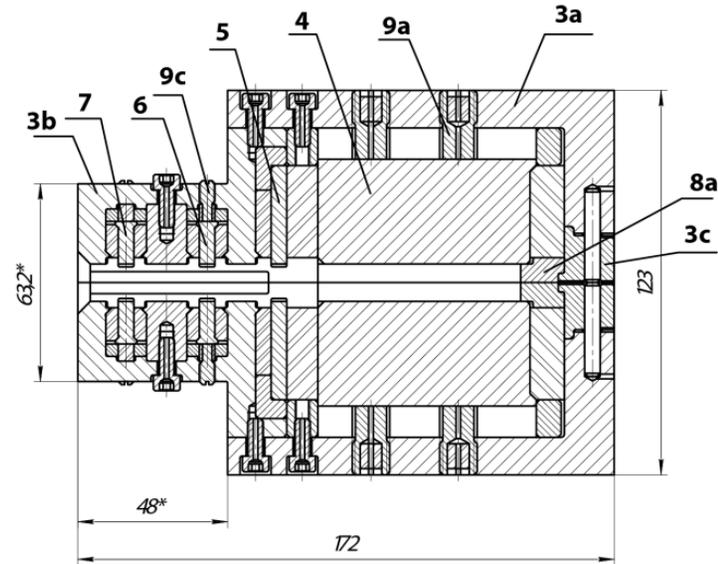
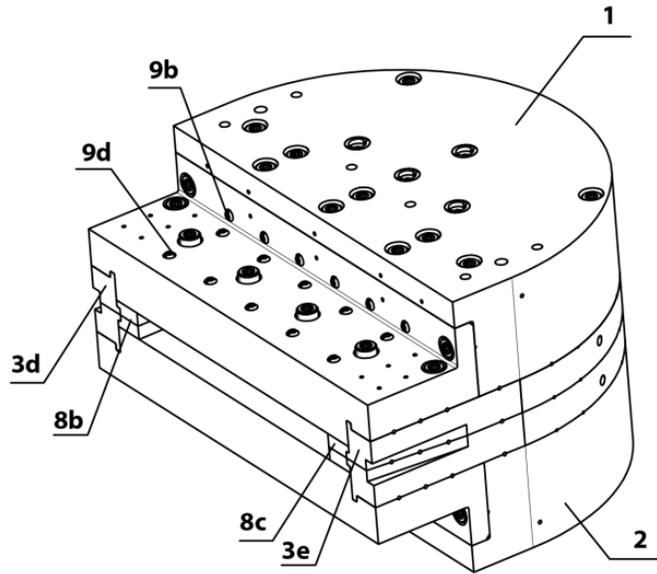


(Слева) Поворотный магнит в разрезе, стрелочками показаны направления намагничивания блоков. (Справа) Распределение магнитной индукции в медианной плоскости поворотного магнита.



Каждый из четырех полюсов поворотного магнита снабжен настроечными плунжерами (ванадий-пермендюр). Ввинчивание-вывинчивание плунжеров позволяет регулировать уровень поля полюса.

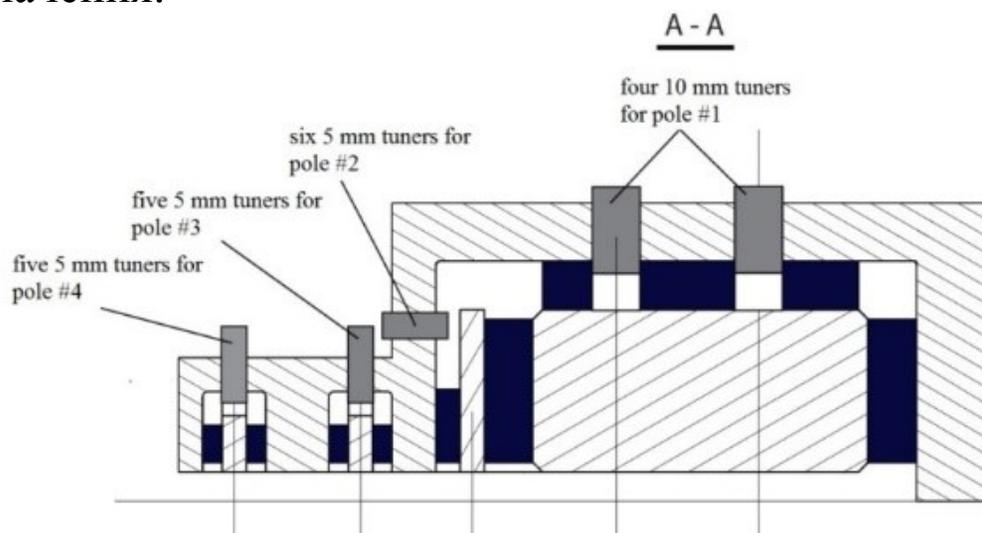
Полюс	#1	#2	#3	#4
$ \Delta B_n/B_n , \%$	5.2	7.9	5.8	5.9

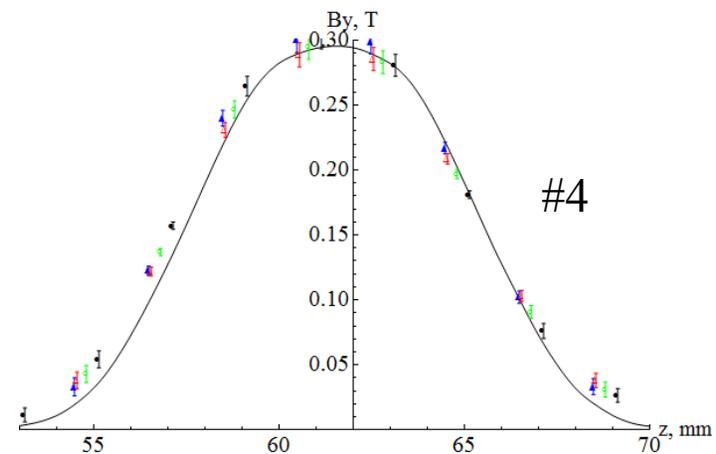
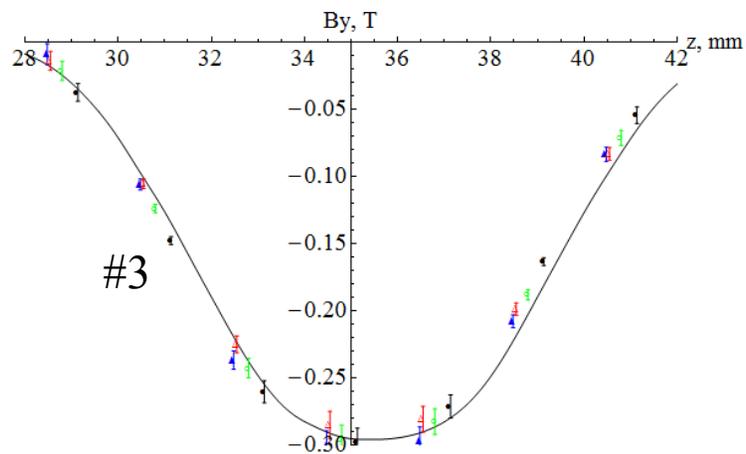
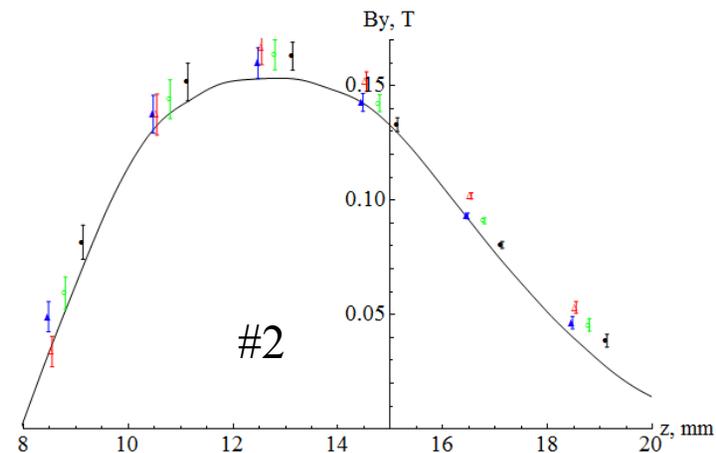
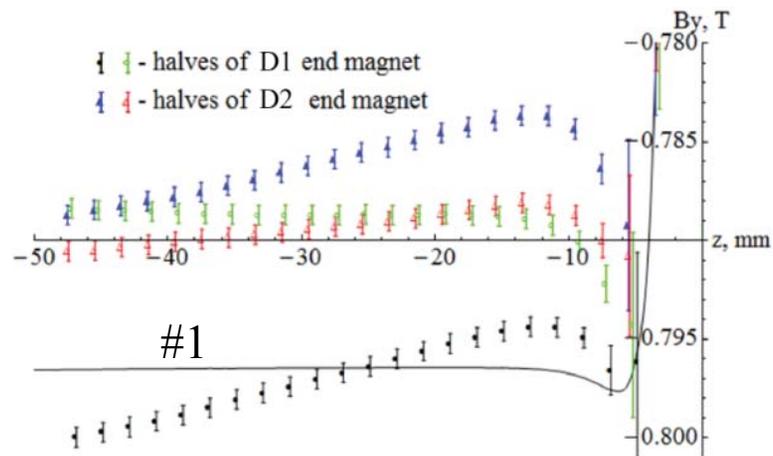


Сборка поворотного магнита производится без использования клея. Его конструкция позволяет производить независимую настройку нижней и верхней частей.

Методика настройки магнитного поля заключается в следующем.

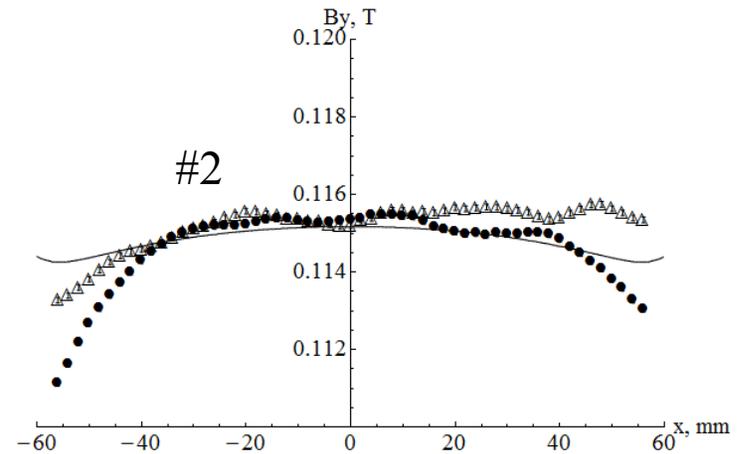
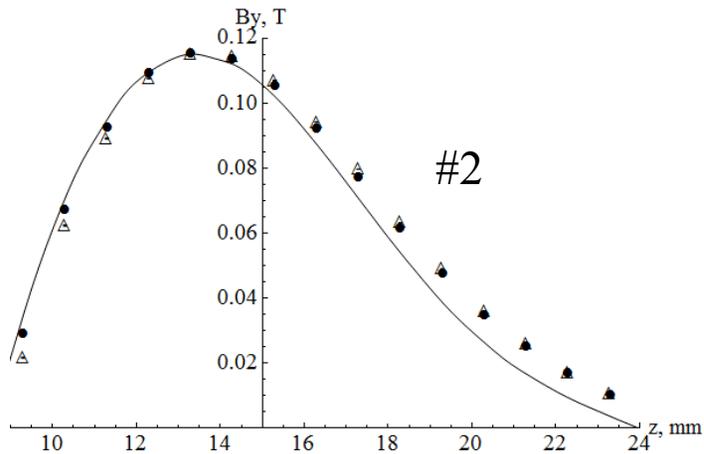
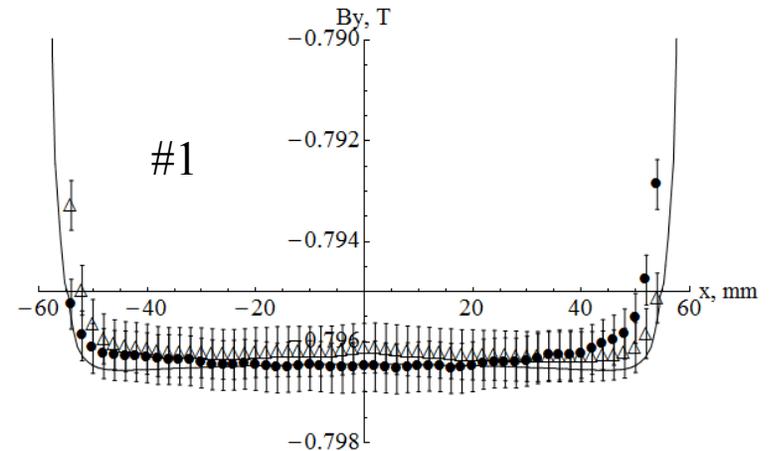
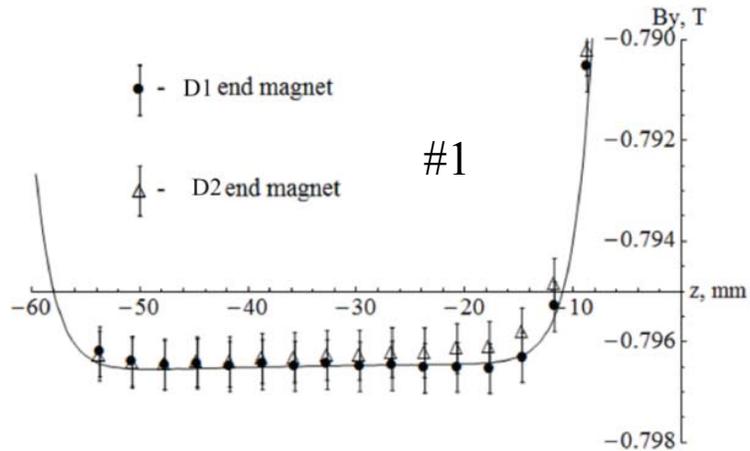
1. Настройка половин магнитов при установке их на стальную плиту достаточной толщины и качества поверхности. Амплитуды поля подстраиваются под проектные значения.



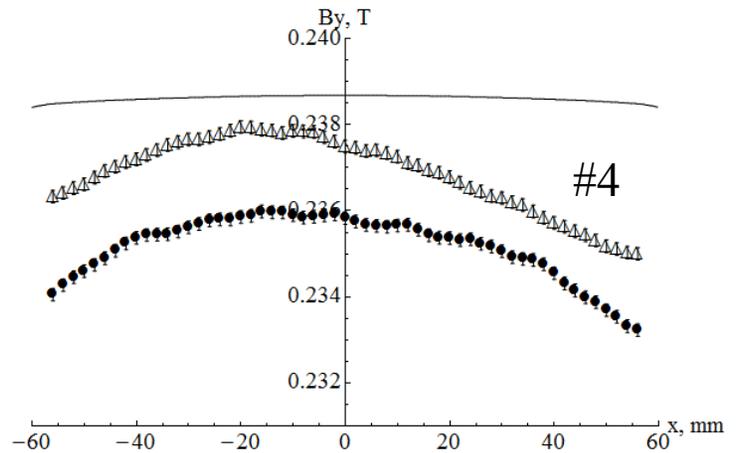
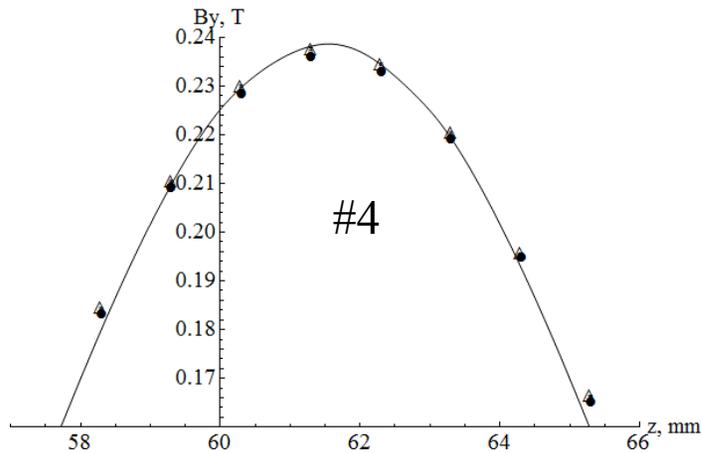
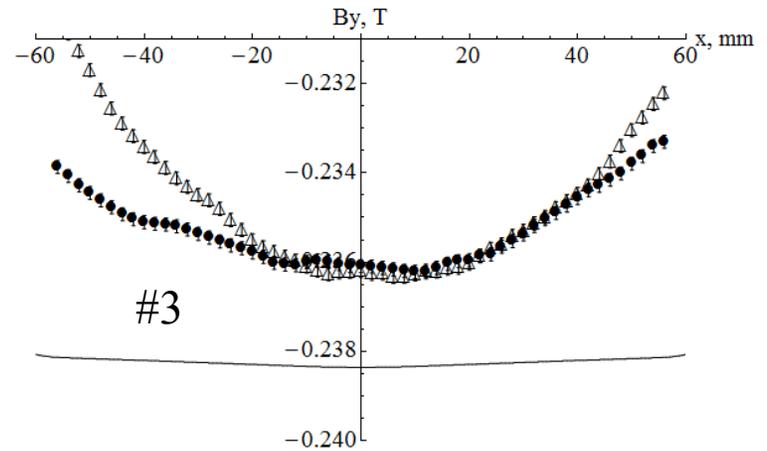
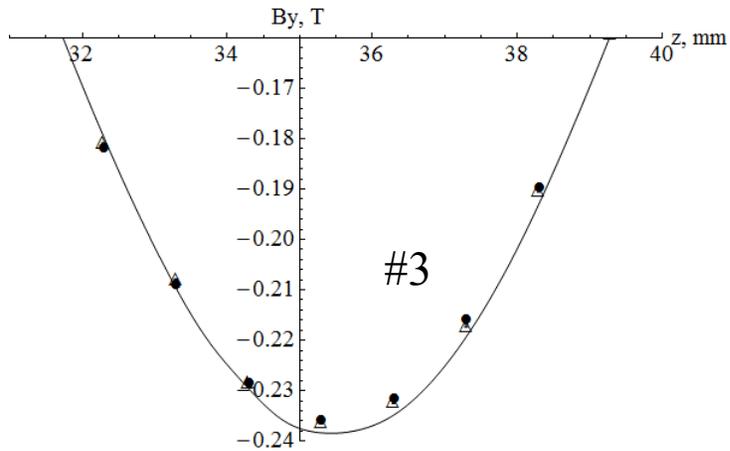


Распределения компоненты B_y магнитной индукции поперек полюсов #1, #2, #3, #4. Сплошная линия – расчетное поле на высоте 3 мм от медианной плоскости.

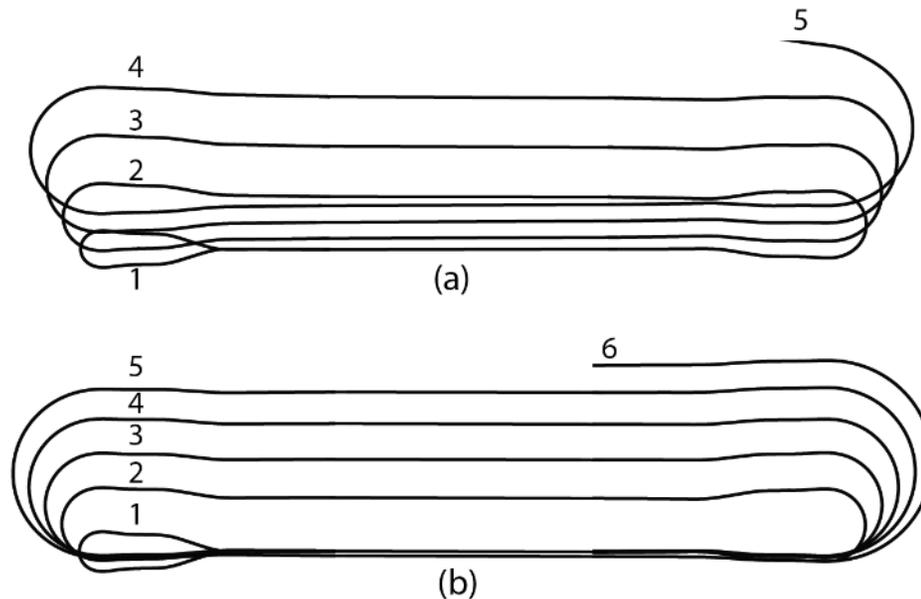
2. После совпадения амплитуд магнитного поля половин поворотных магнитов в пределах 1% осуществлялась сборка магнитов и измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости.



2. После совпадения амплитуд магнитного поля половин поворотных магнитов в пределах 1% осуществлялась сборка магнитов и измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости.



3. Конечными критериями качества настройки поля были, во-первых, расчеты положения орбит в измеренных полях отдельно в каждом магните и их сравнение с проектным положением. Во-вторых, расчеты траектории синхронной частицы в упрощенной модели разрезного микротрона с измеренными полями без учета фазового движения. Прохождение через ускоритель частицы по орбитам с отклонениями от оси линейного ускорителя, заметно меньшими диаметра пролетного отверстия, являлось критерием удовлетворительной настройки магнитов.



Основные результаты

1. Рассчитаны параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом меньше 4 мм мрад и регулируемой энергией 35-50 МэВ.
2. Предложена методика измерения продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора.
3. Получена теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и дисперсию пучка электронов.
4. Предложена методика настройки магнитной системы на основе редкоземельного магнитного материала.

Спасибо за внимание!