

**Динамика пучка в ускорителях
электронов медицинского
назначения и системах
формирования поля облучения**

Аспирант: Борисов М. А.

Научный руководитель: Шведун В. И.

Москва 2024

Содержание

- Введение
- Методика расчета и ускорители электронов для лучевой терапии
- Система формирования поля облучения
- Ускорители электронов для наработки медицинских изотопов

Актуальность работы

Ускорители электронов прикладного назначения нашли широкое применение в медицине.

- В наибольшей степени они востребованы в лучевой терапии как источники тормозного излучения или электронов.
- Использование излучения электронных ускорителей для стерилизации медицинских изделий, обработки медицинских препаратов также насчитывает не одно десятилетие.
- Наконец, изучение возможности применения электронных ускорителей для наработки медицинских изотопов

Цели работы

- Опираясь на результаты выполненных ранее работ по линейному ускорителю электронов для комплекса лучевой терапии КЛТ-6, с учетом выявленных в ходе испытаний проблем, провести оптимизацию ускоряющей структуры и электронной пушки с целью подавления эффекта обратной бомбардировки катода, приводящему к нестабильному поведению мощности дозы.
- Разработка и оптимизация компактной системы сканирования электронного пучка с одновременным поворотом его на 90^0 относительно оси ускорителя для комплексов обработки продукции.
- Исследования динамики пучка в ускорителях электронов, предназначенных для наработки медицинских изотопов. Особое внимание было уделено оптимизации ускоряющей системы разрезного микротрона для существенного увеличения токопрохождения пучка по орбитам.

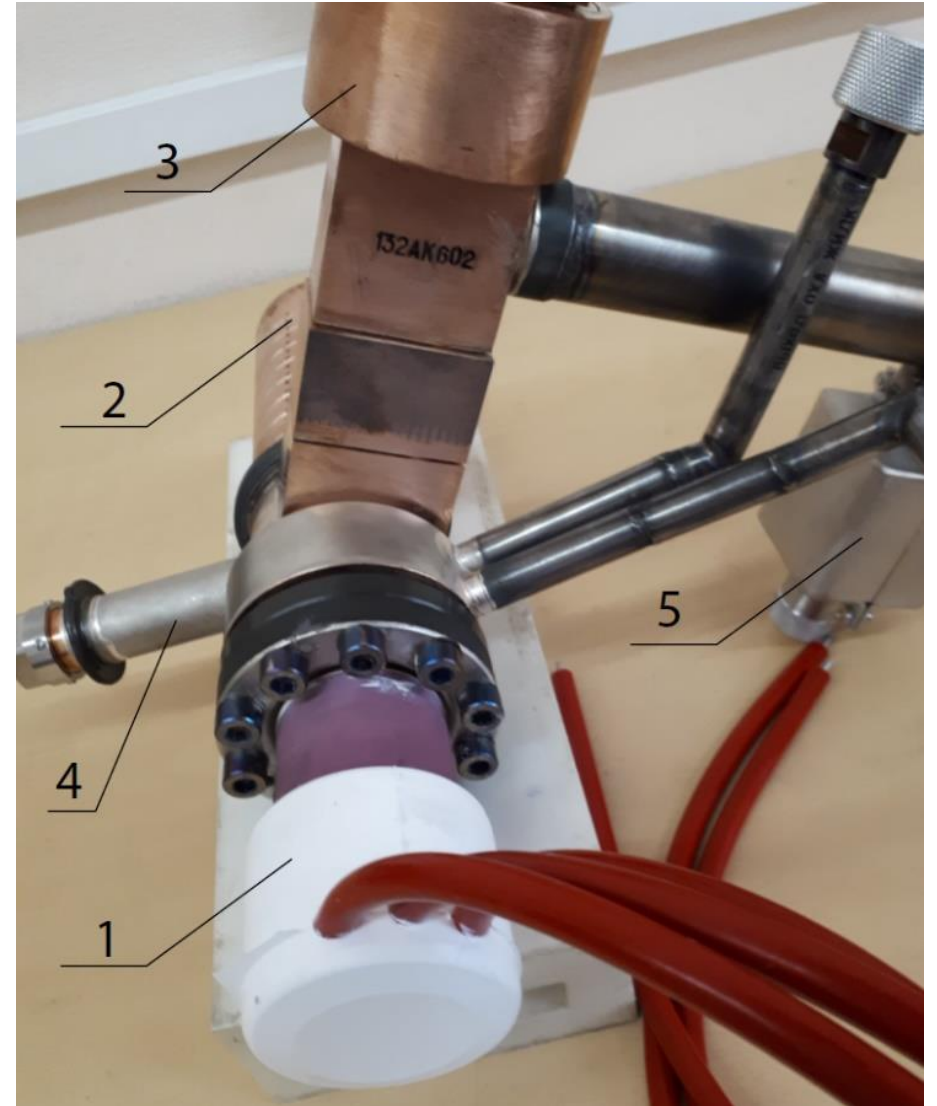
Расчет ускоряющей системы ускорителя электронов для лучевой терапии

Параметр	Величина
Высокая энергия	6 МэВ
Глубина максимальной поглощённой дозы на оси пучка излучения в водном фантоме, d_{max} , без выравнивающего фильтра	$1,5 \pm 0,2$ см
Процентная глубинная доза на глубине 10 см в водном фантоме, PDD10, без выравнивающего фильтра	$63,8 \pm 0,9$ %
Отношение ткань-фантом, $TPR_{20,10}$, без выравнивающего фильтра	$0,634 \pm 0,01$
Низкая энергия, не более	2,5 МэВ
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме высокой энергии	1 - 10 Гр/мин
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме низкой энергии	0,01 – 0,5 Гр/мин
Макс. частота повторения	400 Гц
Стабильность энергии	$\pm 3\%$
Стабильность мощности дозы	$\pm 10\%$
Время непрерывной работы при максимальной мощности дозы и энергии, минимальное	30 мин.

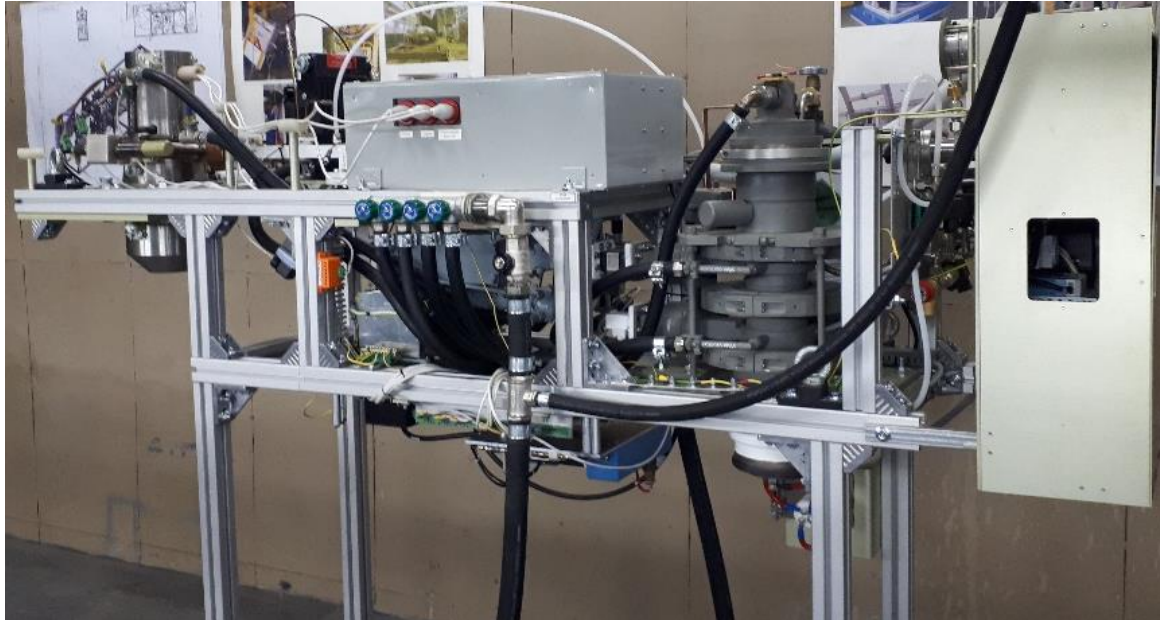
КЛТ-6



Опытный образец ускоряющей системы:
1 – электронная пушка, 2 – ускоряющая структура, 3 – вакуумное СВЧ окно, 4 – антенна, 5 – электроразрядный насос.



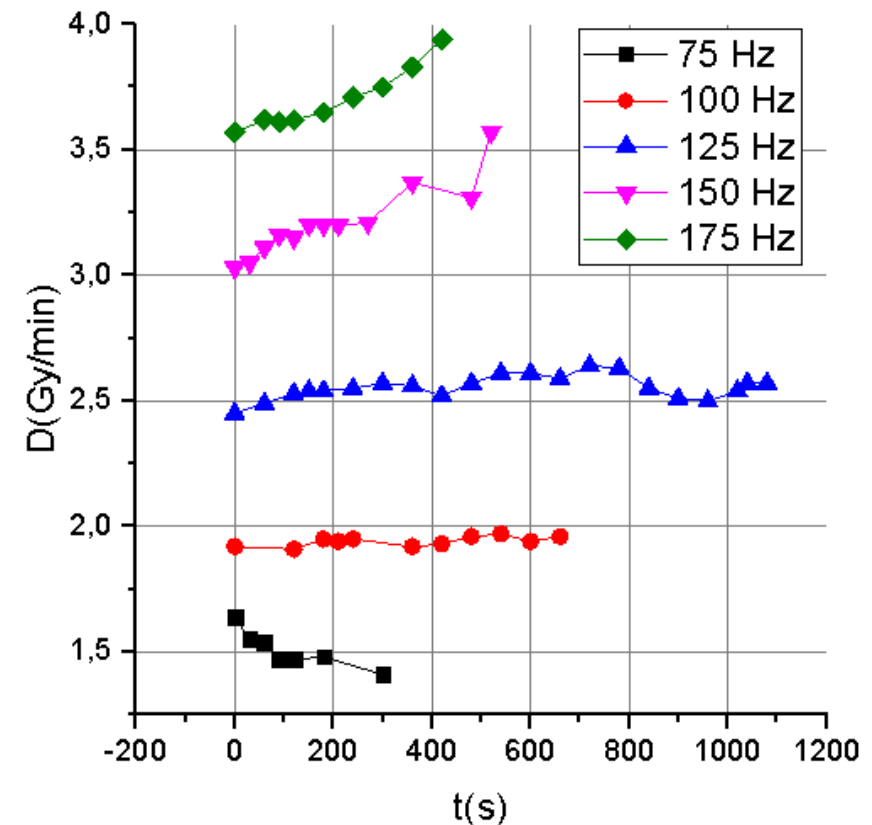
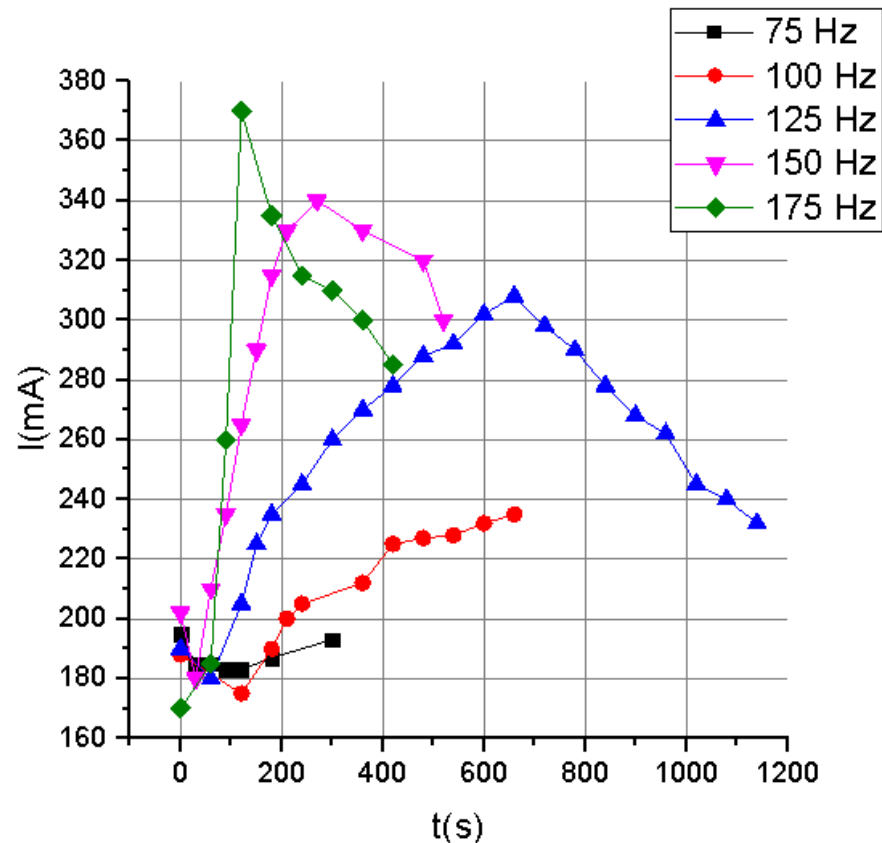
Комплекс лучевой терапии «Оникс»



Стенд для испытаний ускорителя электронов для лучевой терапии (сверху), ускоритель, установленный в гантри (справа)



Обратная бомбардировка катода



Зависимость от времени при различных частотах следования импульсов (слева) амплитуды импульса тока пушки; (справа) мощности дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени

Обратная бомбардировка катода

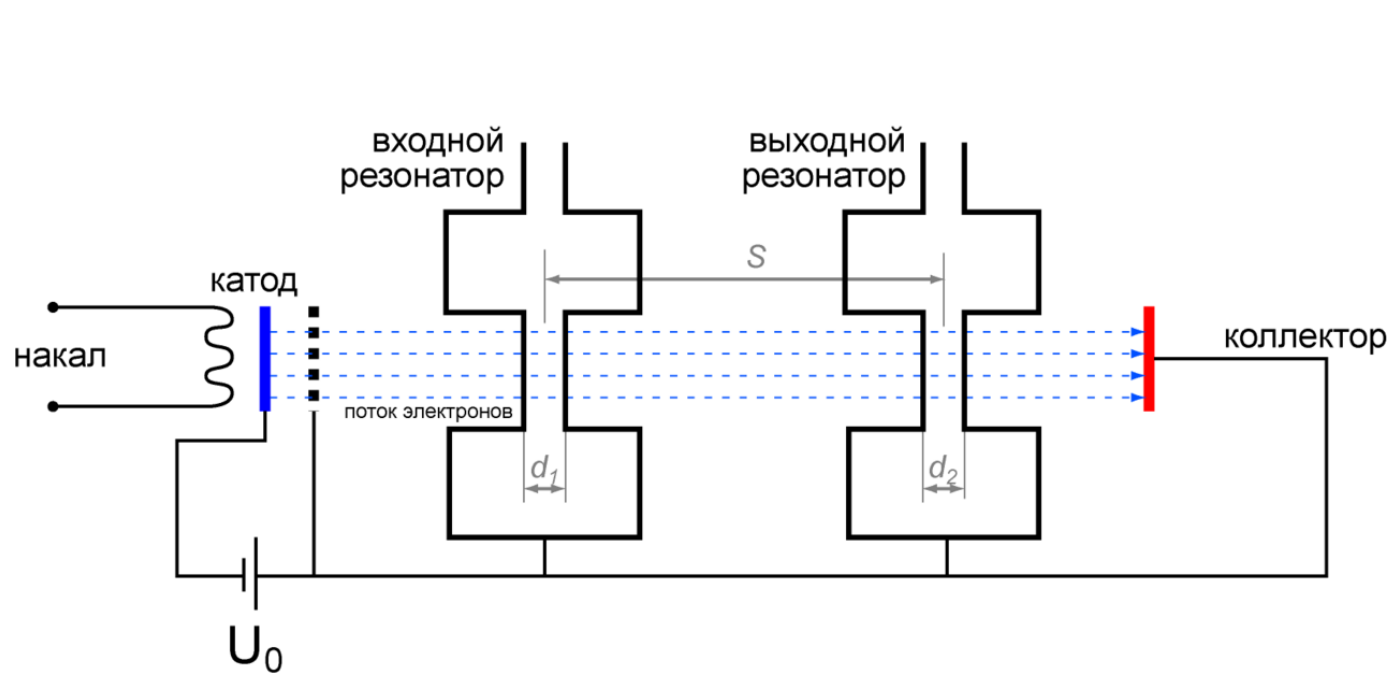
Причины

- Увеличение температуры катода вследствие попадания на него потока электронов из ускоряющей структуры
- Испарение активного вещества барьера с поверхности катода и его оседание на остальных элементах пушки. Вывод об образовании дополнительной эмитирующей поверхности подтверждается результатами анализа элементного состава вещества на поверхности фокусирующего электрода вблизи катода, сделанного при вскрытии пушки

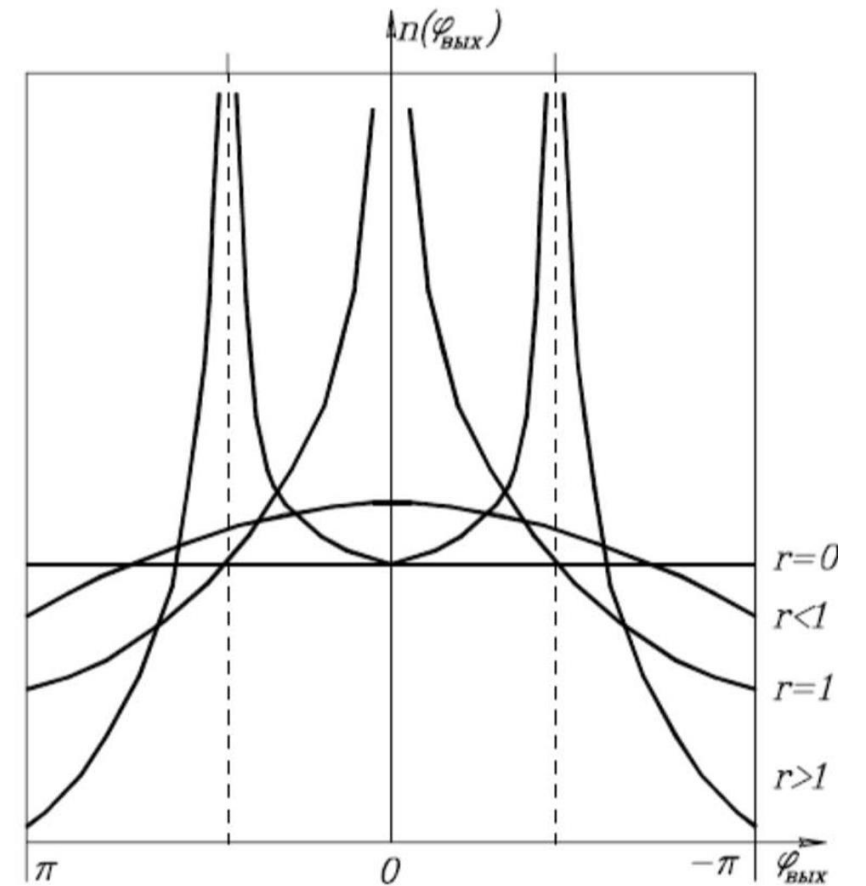
Подавление эффекта обратной бомбардировки катода путем:

- Введения диафрагмы на входе в ускоряющую структуру
- Введения отверстия на оси катода
- Оптимизации ускоряющей структуры
- Уменьшения максимальной амплитуды поля ускоряющей структуры

Клистронная группировка



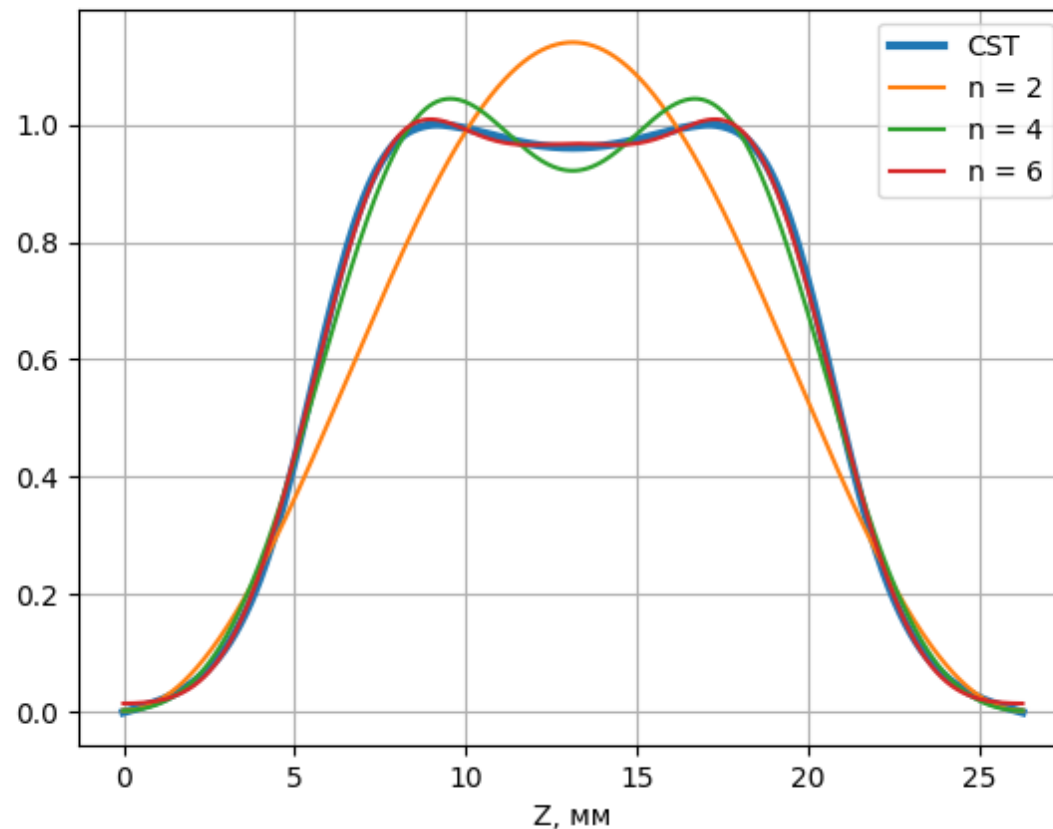
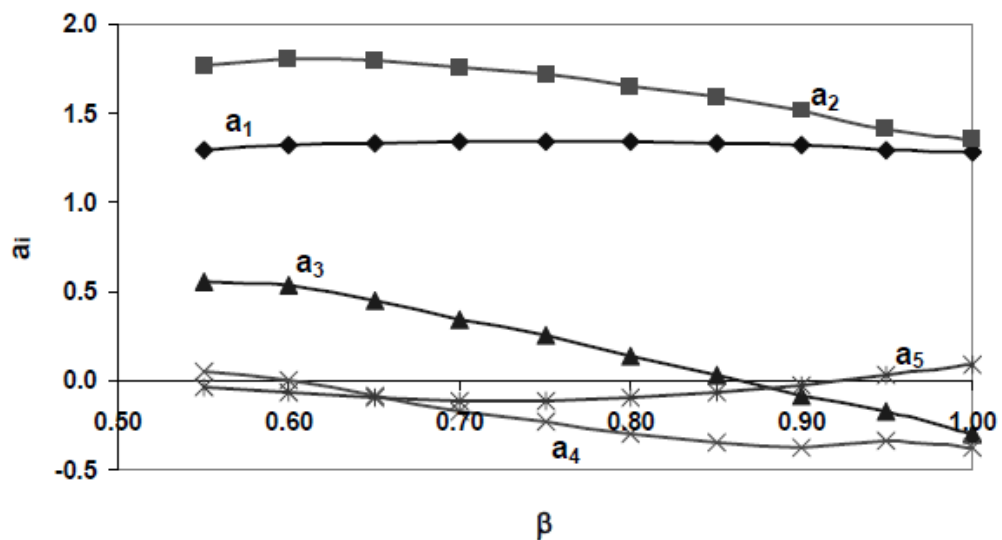
Схематичное изображение устройства клистрона



Зависимость формы пучка в выходном резонаторе от параметра группировки r

Полиномиальная оптимизация

$$\left\{ \begin{array}{l} E_z(\beta_i, z) = \sum_{n=1}^N a_n^i \cos \left[\frac{4\pi z(n-1)}{\beta_i \lambda} \right] \\ E_r(r) = -\frac{r}{2} E'_z + \frac{r^3}{16} \left(E''_z + \frac{\omega^2}{c^2} E'_z \right) \\ B_\varphi(r) = \frac{\omega}{c^2} \left[\frac{r}{2} E_{z,0} - \frac{r^3}{16} \left(E''_{z,0} + \frac{\omega^2}{c^2} E_{z,0} \right) \right] \end{array} \right.$$

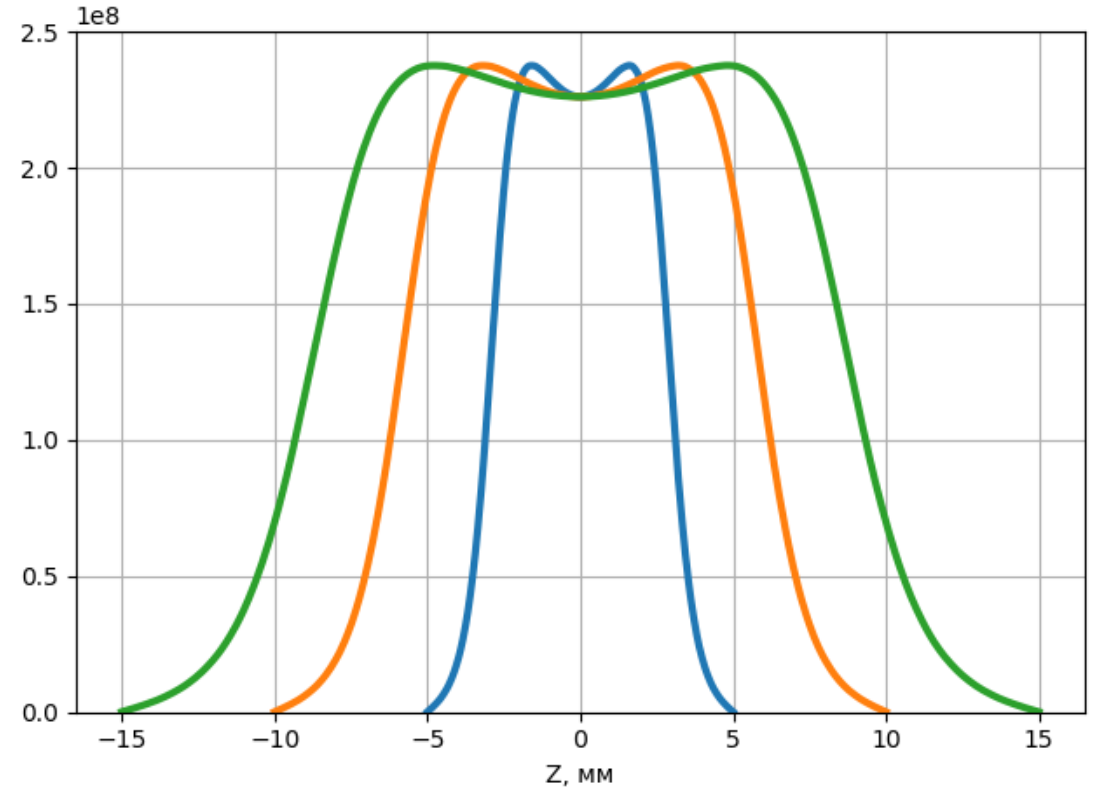


Оптимизация ускоряющей структуры

Оптимизация распределения поля в ускоряющей структуре производилось при помощи программы, позволяющей изменять ширину и амплитуду распределения поля от регулярной ячейки. Таким образом программа может самостоятельно подбирать распределение поля всей ускоряющей структуры, которое далее используется для расчета траекторий движения частиц.

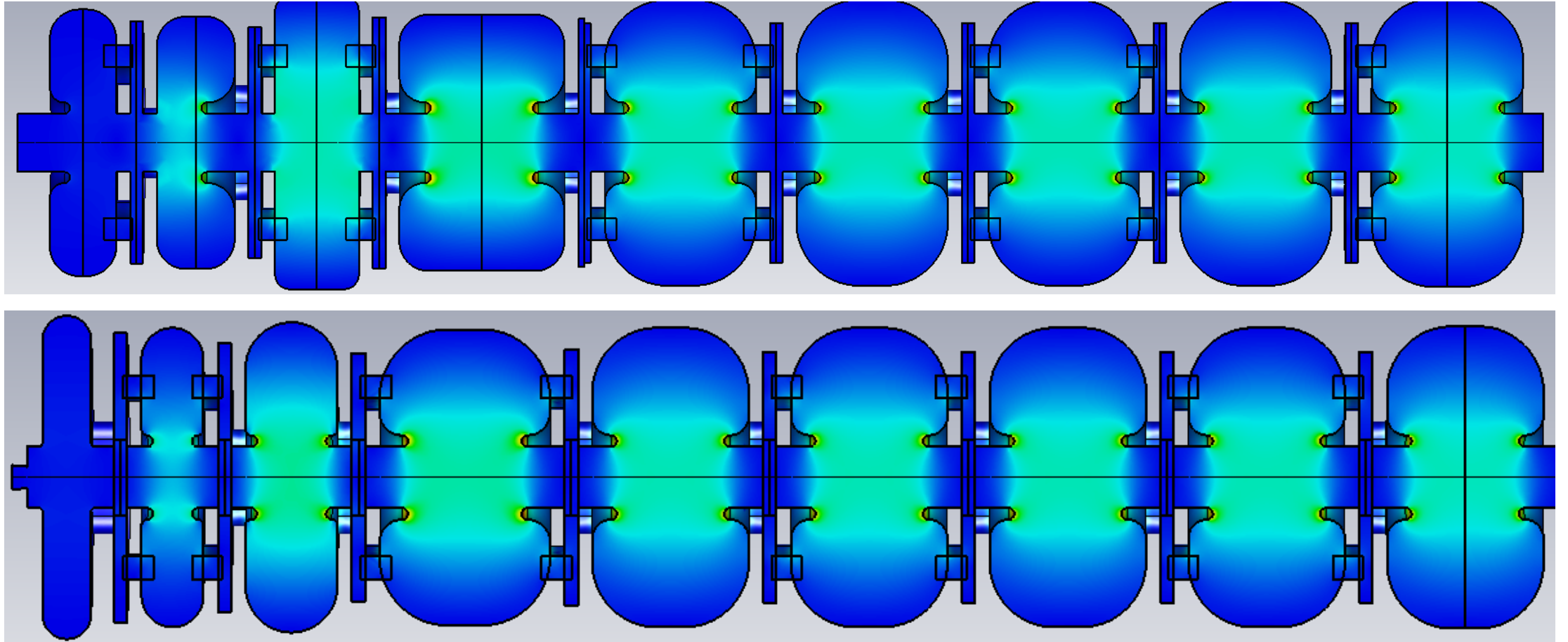
Требования:

- Коэффициент захвата
- Энергетический спектр
- Максимальная амплитуда поля



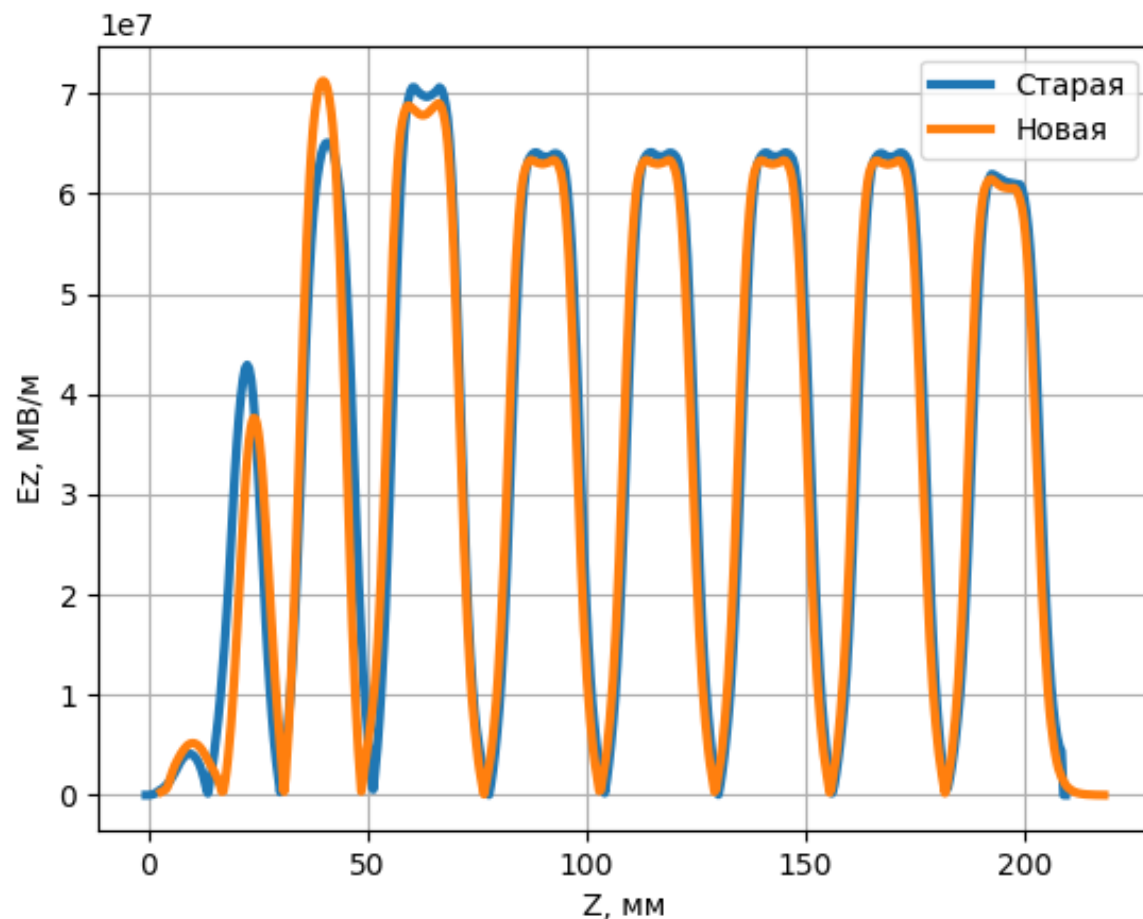
Распределение ускоряющего поля на оси при одинаковом распределении поля, но разными параметрами размеров поля.

Сравнение геометрий ускоряющих структур



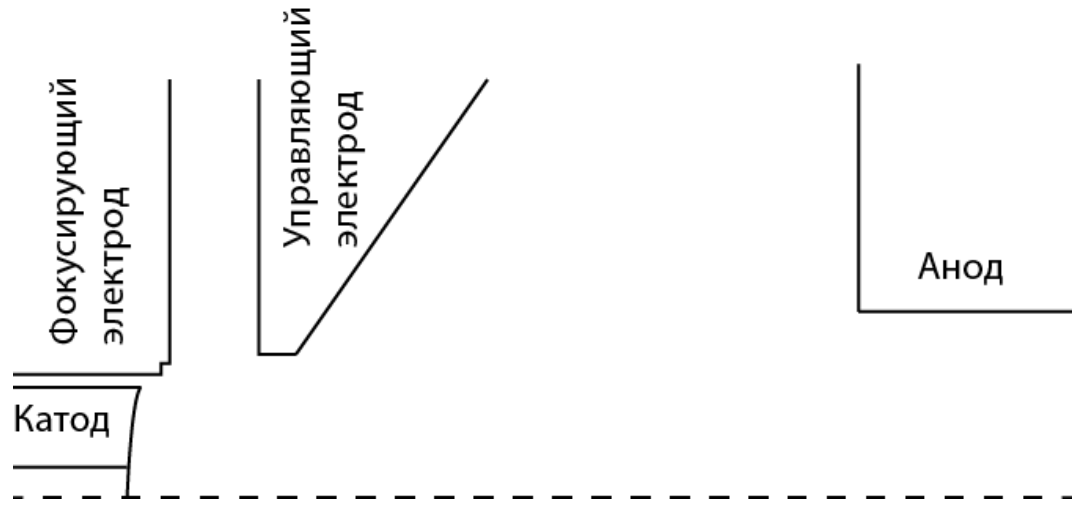
Сравнение геометрий ускоряющих структур (сверху) старой; (снизу) новой, рассчитанной в настоящей работе.

Сравнение распределения и параметров

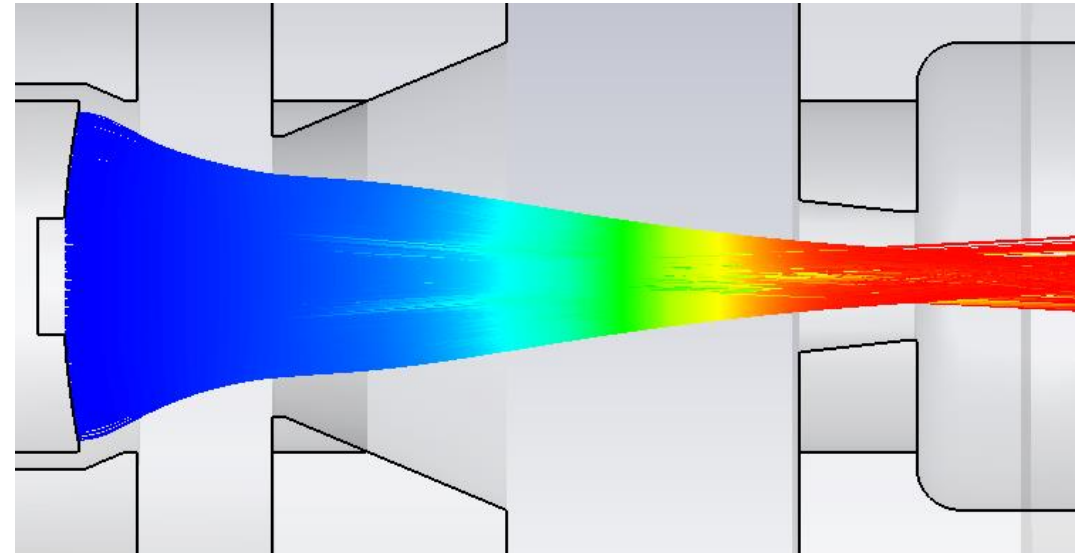


Параметры	Старая	Новая
Общая длина, мм	208.92	205.19
Рассеиваемая мощность, МВт	2.34	2.21
Максимальная амплитуда поля на оси, МВ/м	70.6	71.2
Максимальная амплитуда поля на поверхности, МВ/м	182.7	189.9

Электронная пушка



Геометрия электронной пушки



Расчет траектории движения частиц в пушке

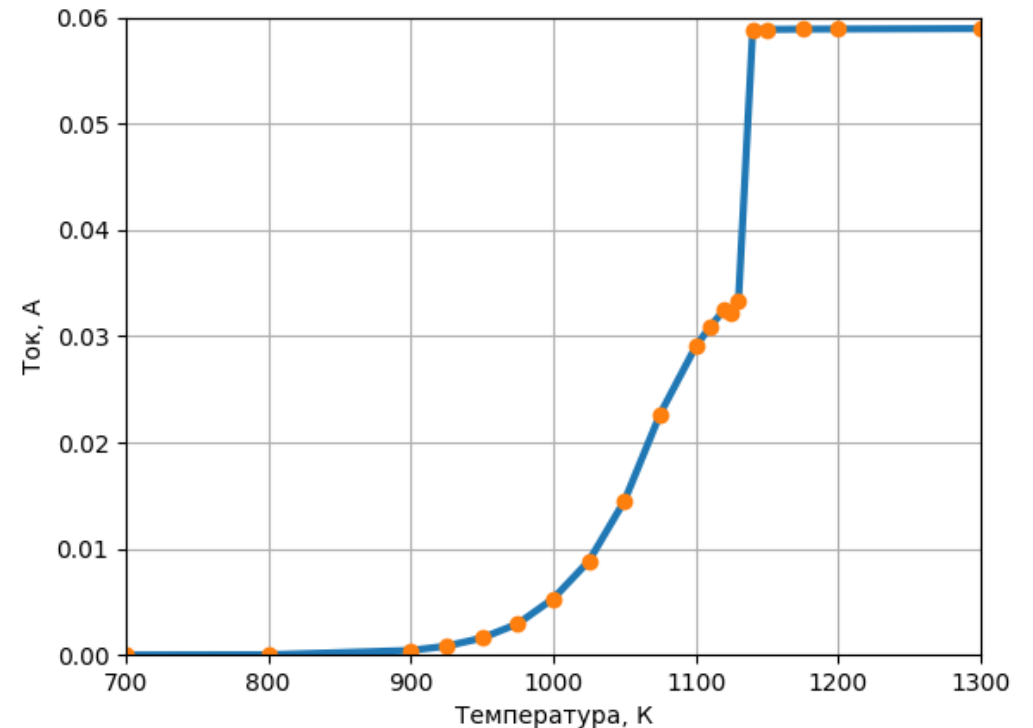
Режимы работы пушки

Основной эффект – термоэлектронная эмиссия. Определяется формулой Ричардсона-Дешмана:

$$J_T = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right),$$

$$\text{где } A_0 = \frac{4\pi q m k^2}{h^3} \approx 1.2 * 10^6 \text{ Ам}^{-2} \text{К}^{-2}$$

Однако с ростом тока возрастает и пространственный заряд вблизи катода, что приводит к искажению электрического поля вблизи эмитирующей поверхности.



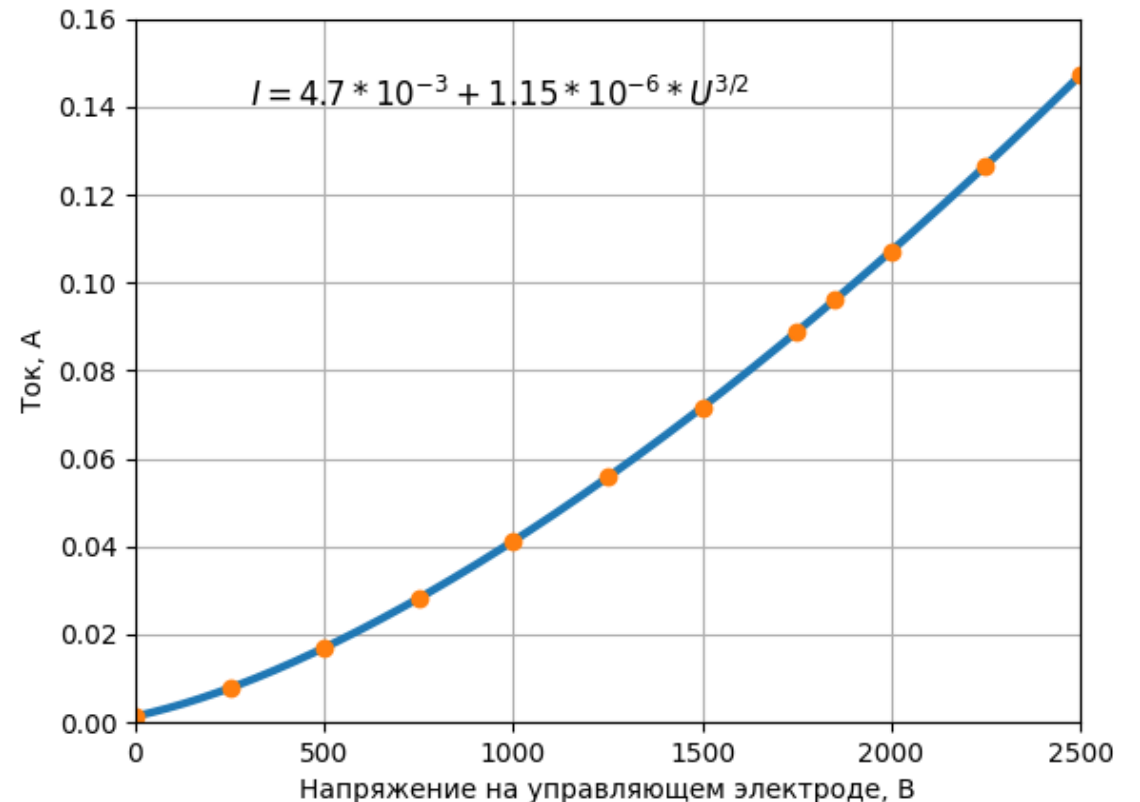
Накальная характеристика
электронной пушки

Закон Чайда-Ленгмюра

Работа пушки в режиме насыщения пространственного заряда описывается законом трех вторых

$$I = gU^{3/2}$$

где I – ток, U – напряжение и g – первеанс, зависящий лишь от геометрии и взаимного расположения катода-анода.



Вольт амперная характеристика электронной пушки

Сравнение параметров пучка на мишени

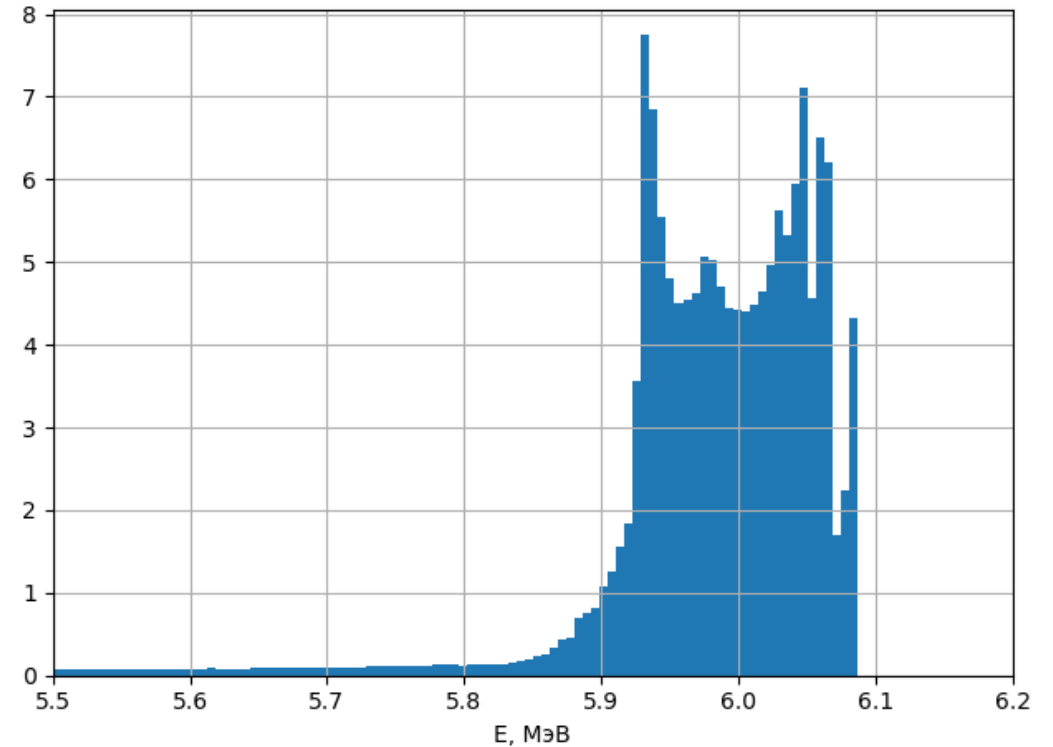
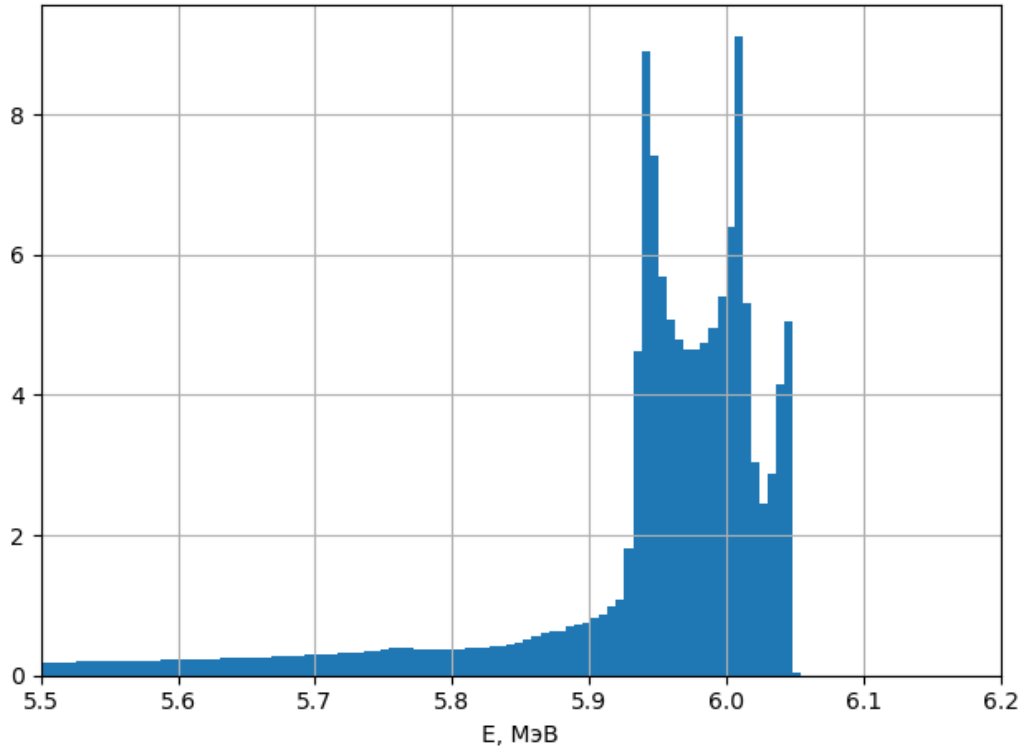
Значение мощности дозы в направлении вперед рассчитывалось по эмпирической формуле, модифицированной для учета формы энергетического спектра:

$$D \approx \frac{0.33I}{Q} * \frac{\sum_i^N E_i^3}{N} \text{ (Гр/мин)}$$

где E_i – энергия i -й частицы в МэВ,
 I – импульсный ток, Q – скважность,
 N – количество частиц в ансамбле.

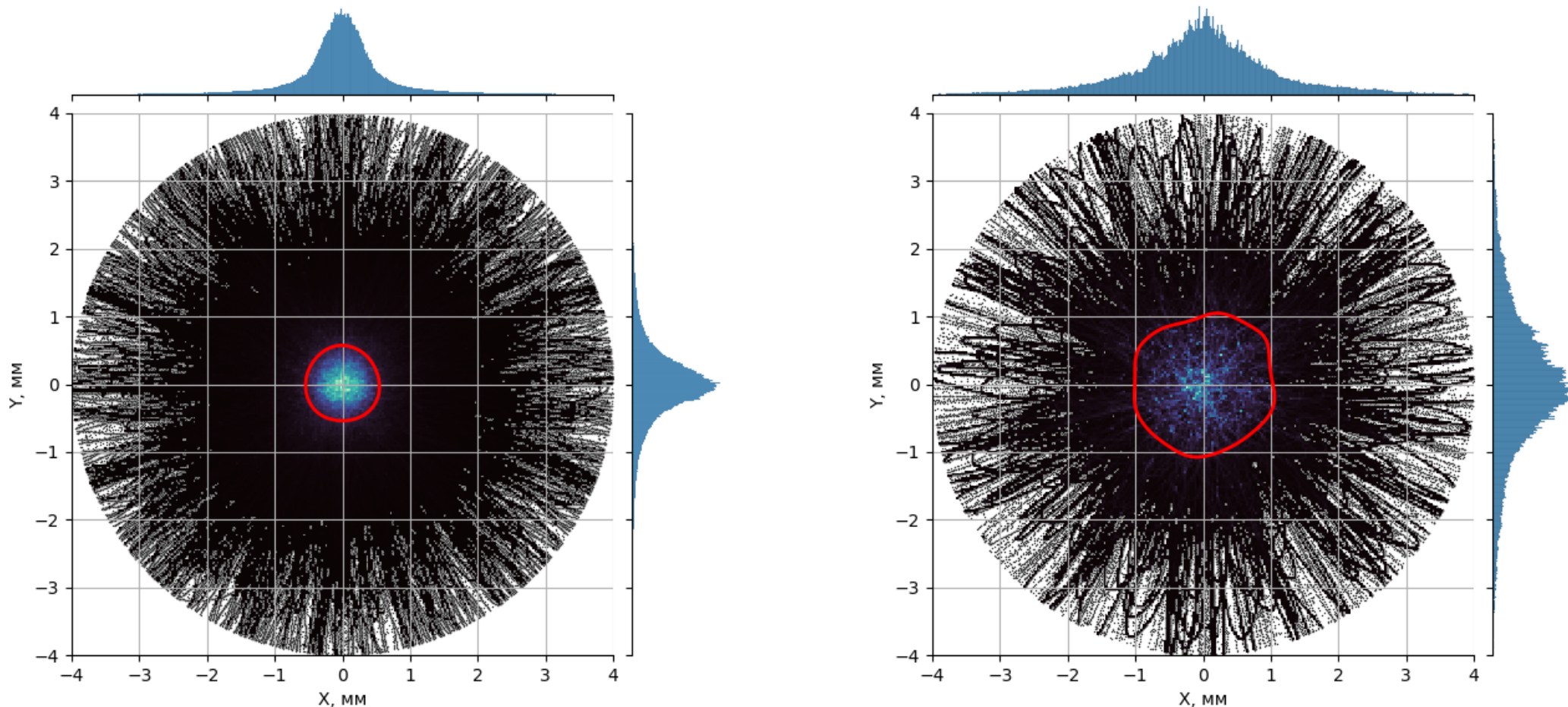
Параметры	Старая	Новая
Коэффициент захвата, %	66.1	77.5
Обратный поток, %	13.9	2.1
Частиц с энергией < 5.7 МэВ, %	22.14	10.91
Разброс по энергии, МэВ	1.1	0.79
Рабочий ток пушки, мА	253	200
% оседающих на катоде	6.54	0.9
% попадающих в отверстие катода	0.995	1.2
% оседающих на апертуре		7.4

Сравнение спектров



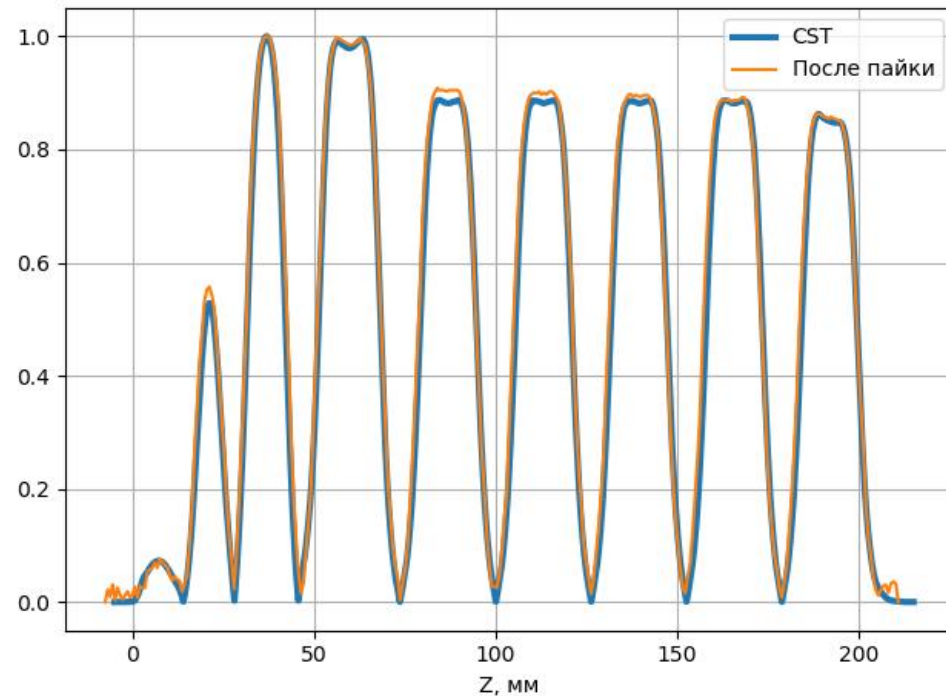
Энергетические спектры ускоренного пучка на тормозной мишени для старого (слева) и нового (справа) вариантов ускоряющей системы

Сравнение поперечных размеров пучка

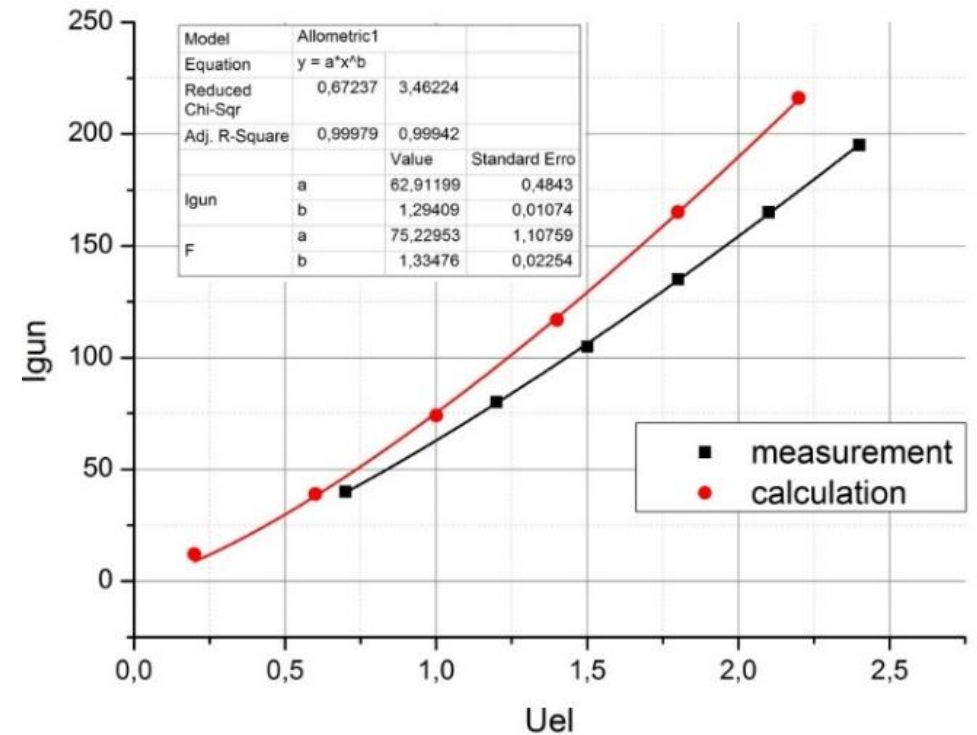


Поперечное распределение частиц на тормозной мишени для старого (слева) и нового (справа) вариантов ускоряющей системы. В красной области находится 50 % частиц.

Результаты экспериментальной проверки

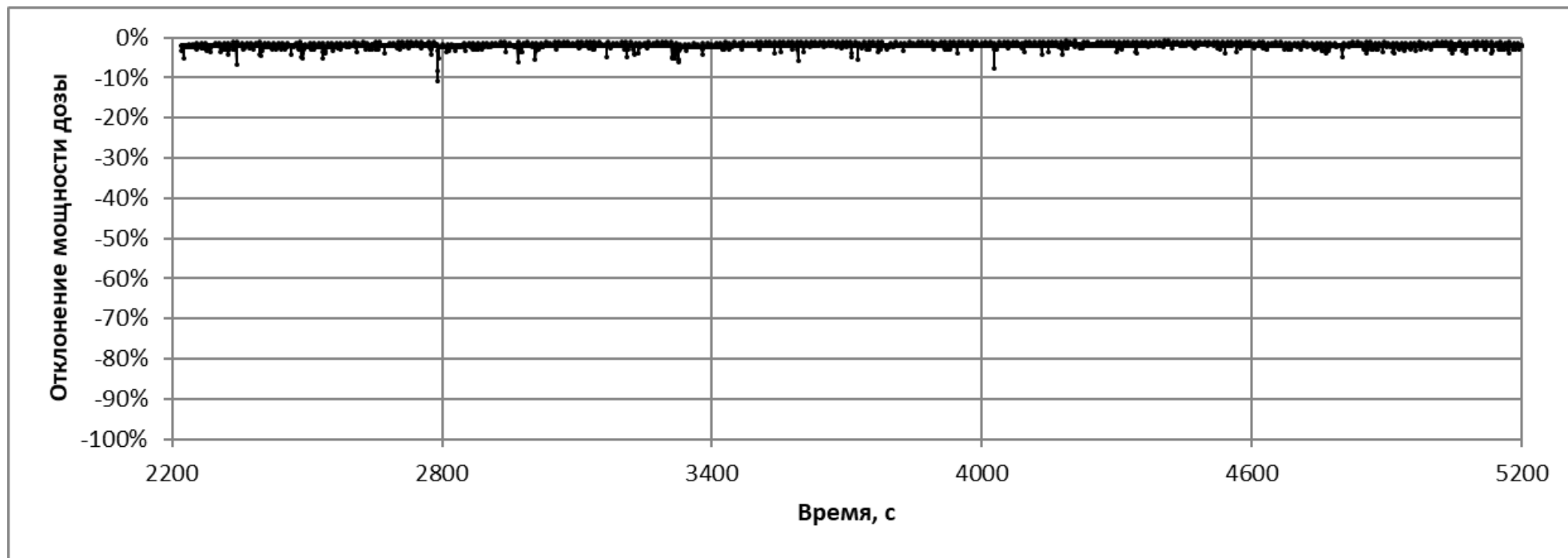


Сравнение расчетного распределения ускоряющего поля на оси с результатами измерений на спаянной ускоряющей структуре



Сравнение расчетной и измеренной зависимостей тока пушки от напряжения на управляющем электроде

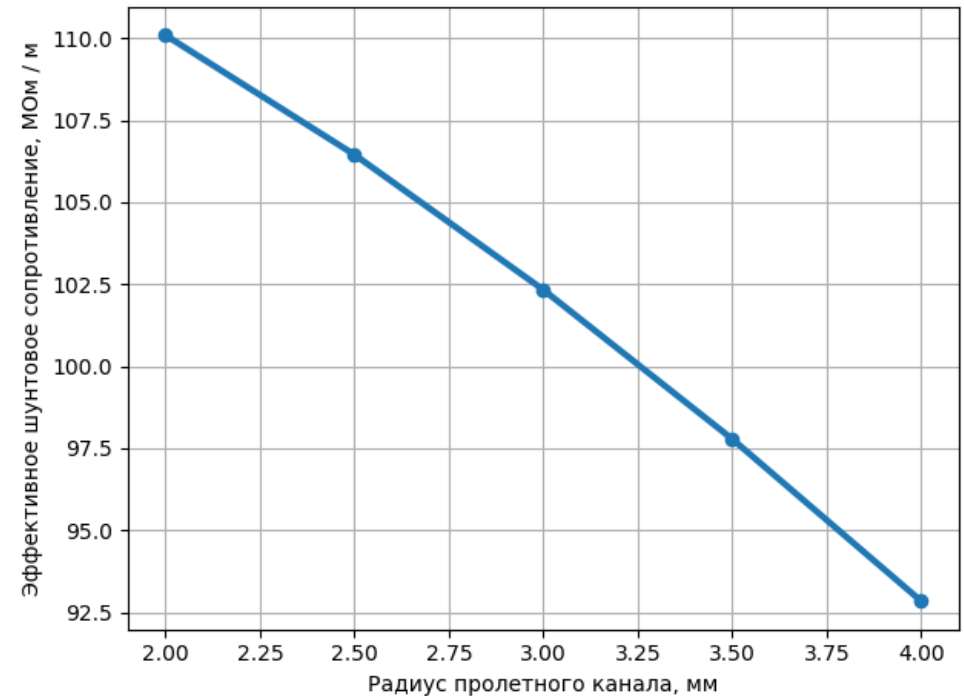
Отклонения измеряемой мощности дозы от среднего значения



Снижение напряженности поля, повышение эффективности ускоряющей структуры

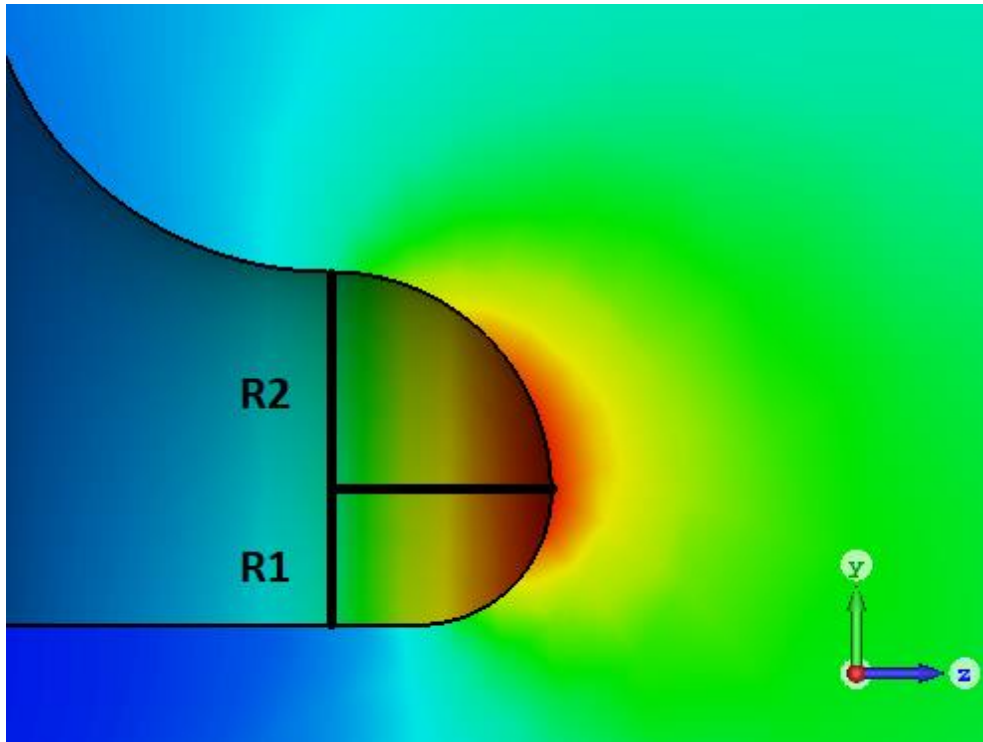
Увеличение длины ускоряющей структуры снижает затраты СВЧ мощности на создание ускоряющего поля. Дополнительное снижение затрат СВЧ мощности было достигнуто за счет уменьшения диаметра пролетного канала регулярных ячеек.

$$P_w = \frac{(\Delta E)^2}{Z_{eff}L}$$

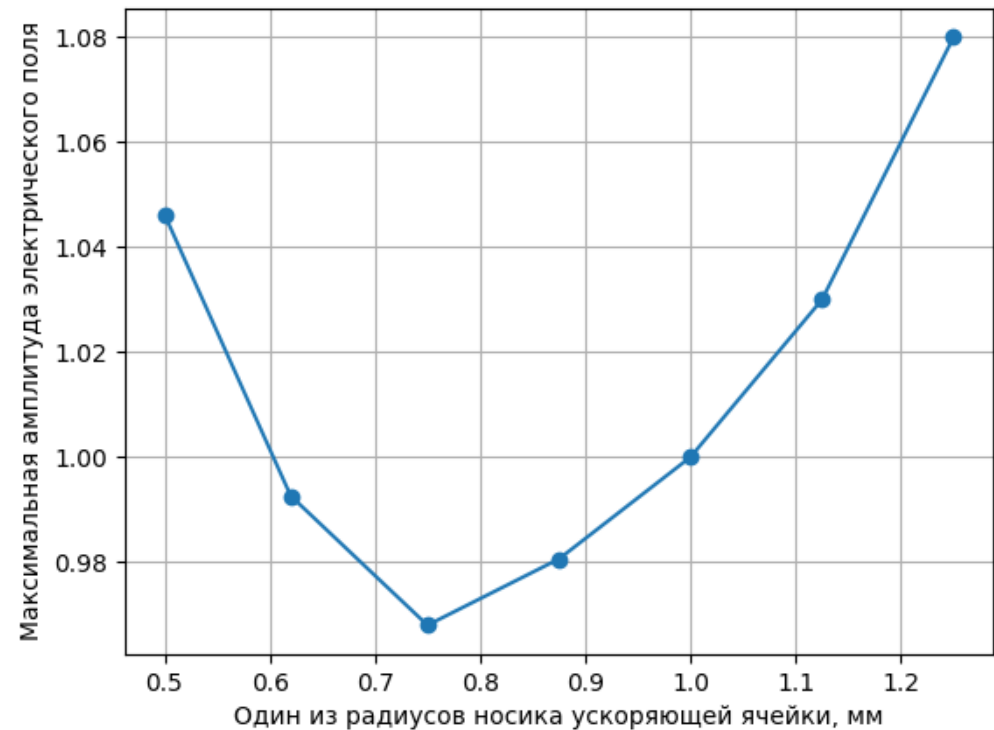


Зависимость погонного эффективного шунтового сопротивления регулярной ячейки от диаметра пролетного канала.

Изменение формы носиков

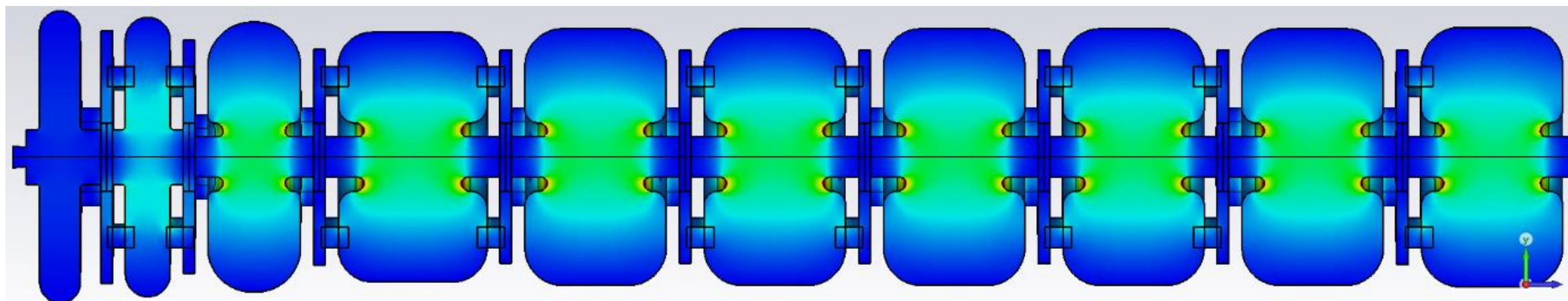
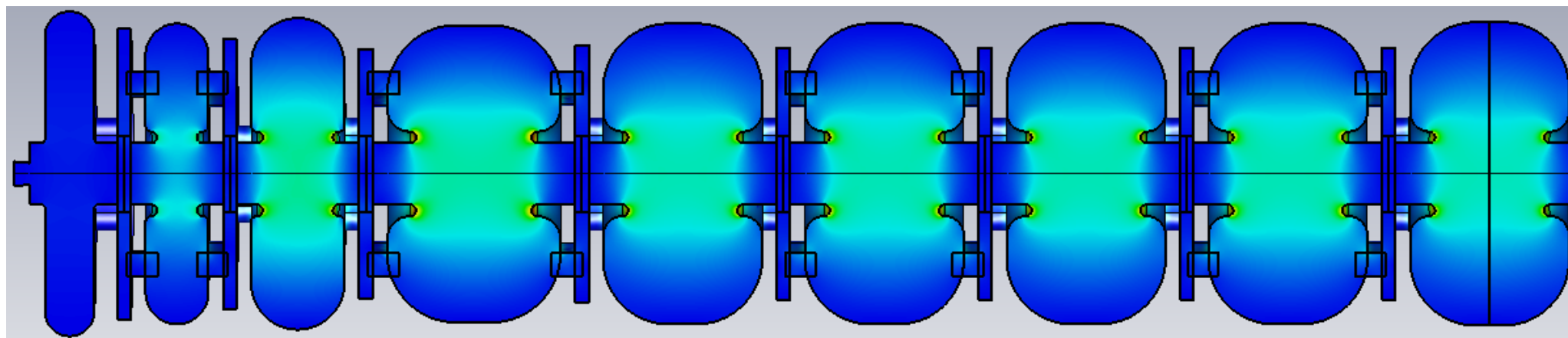


Электрическое поле вблизи носика с различными радиусами скругления верхней и нижней частей

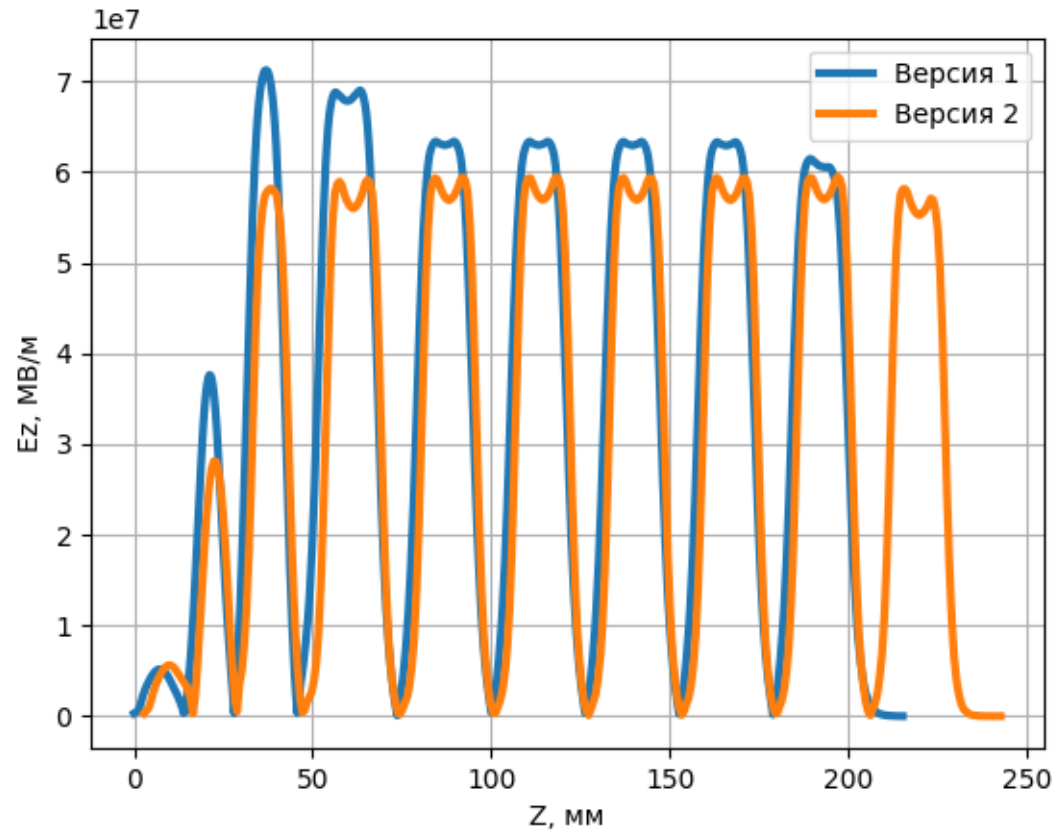


Изменение максимальной напряженности электрического поля в зависимости от радиуса R1

Сравнение геометрий ускоряющих структур



Сравнение параметров ускоряющих структур



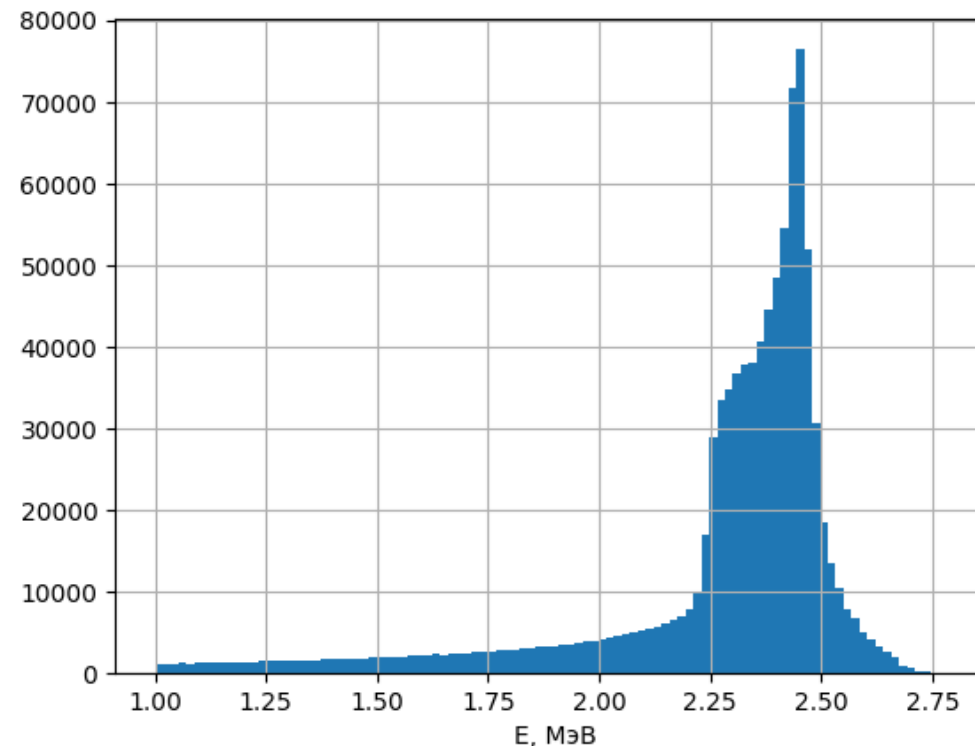
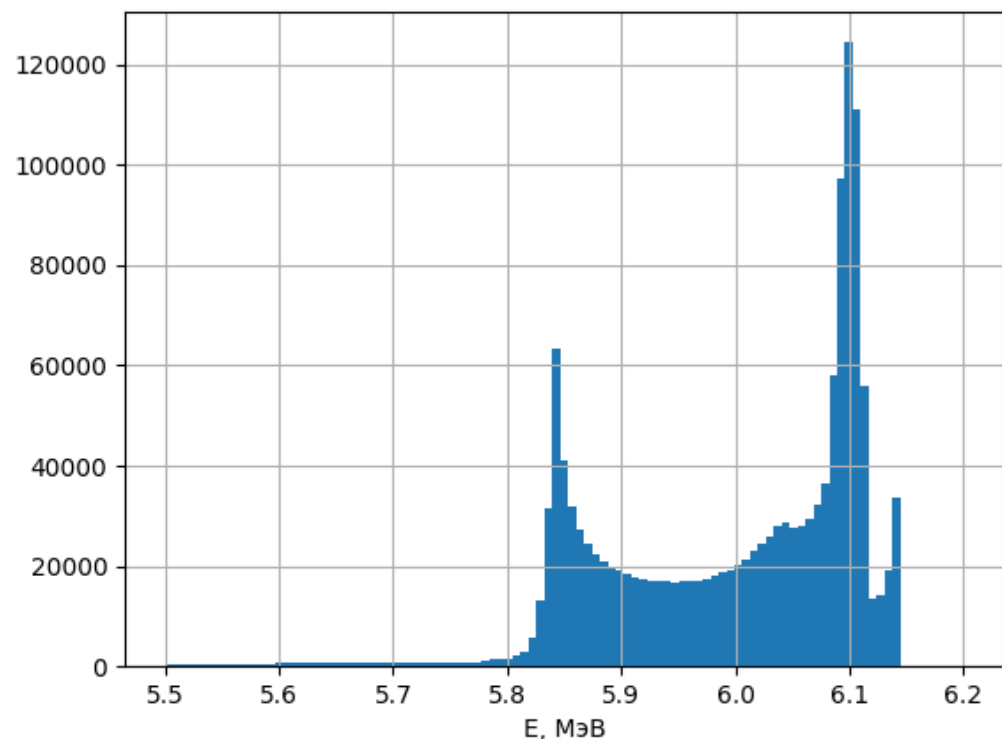
Сравнение распределения ускоряющего поля на оси экспериментального (Версия 1) и окончательного (Версия 2) вариантов

Параметры	Версия 1	Версия 2
Общая длина, мм	205.19	229.83
Рассеиваемая мощность, МВт	2.21	1.86
Максимальная амплитуда электрического поля на оси, МВ/м	71.2	59.6
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности структуры, МВ/м	189.9	134.4

Сравнение параметров пучка на мишени

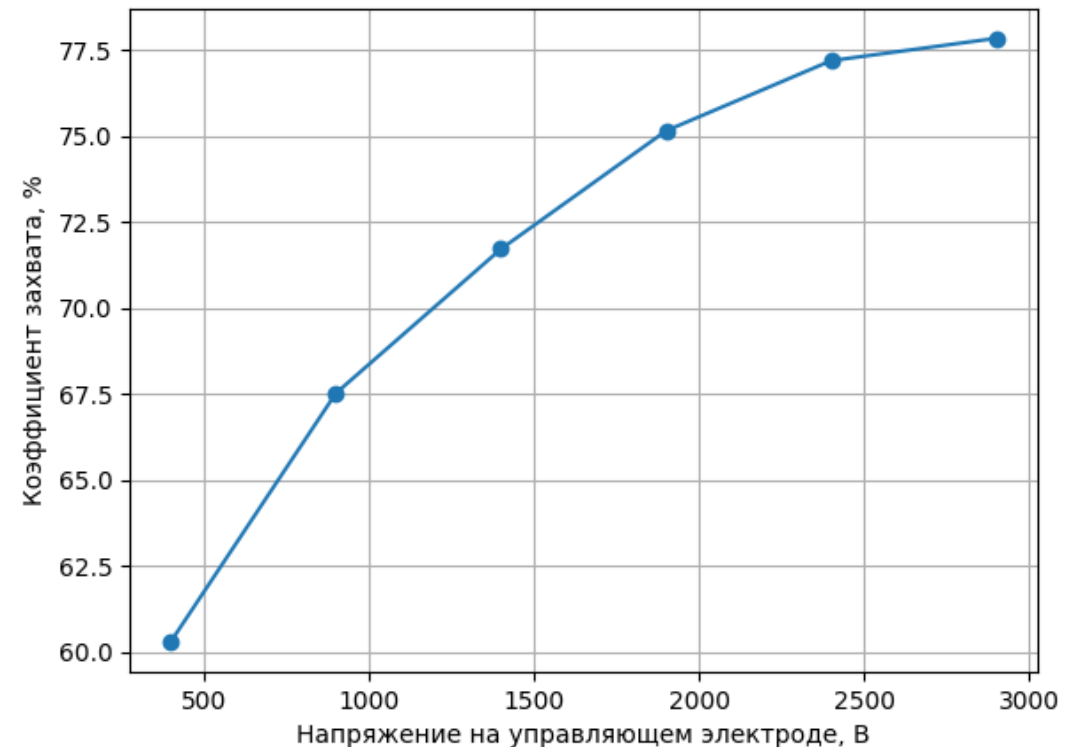
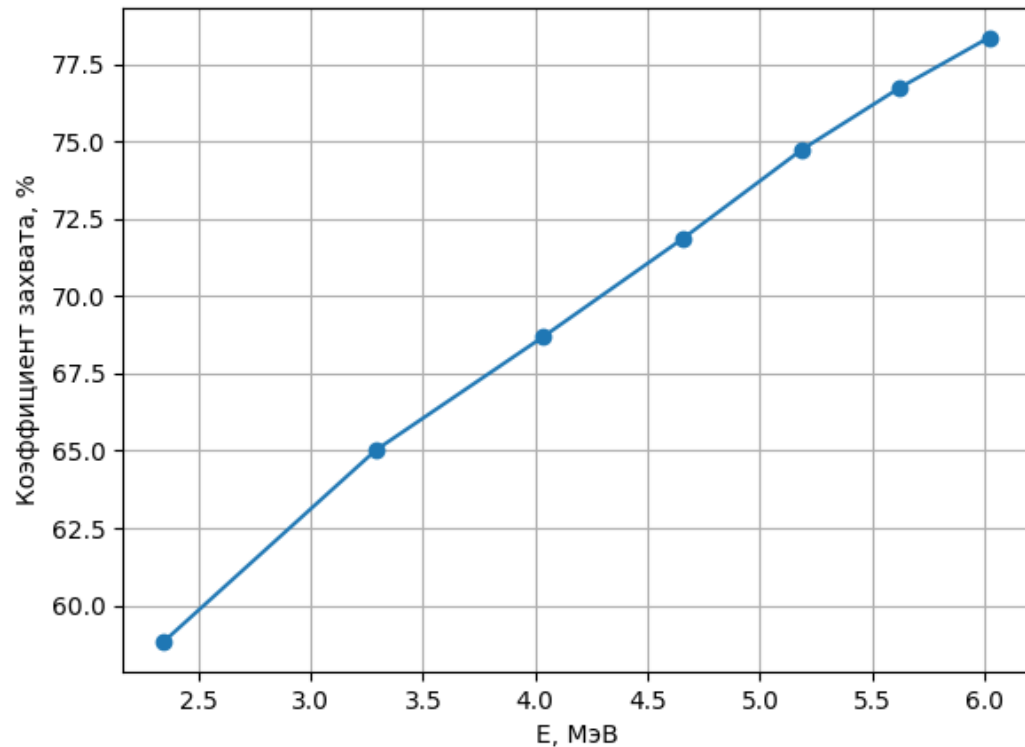
Параметры	Версия 1	Версия 2
Коэффициент захвата, %	77.5	78.3
Обратный поток, %	2.1	1.8
Частиц $E < 5.7$ МэВ, %	10.91	8.96
Разброс по энергии, МэВ	0.79	0.69
Рабочий ток пушки, мА	200	195
% оседающих на катоде	0.9	0.69
% попадающих в отверстие катода	1.2	1.21
% оседающих на апертуре	7.4	7.3

Спектры пучков на выходе



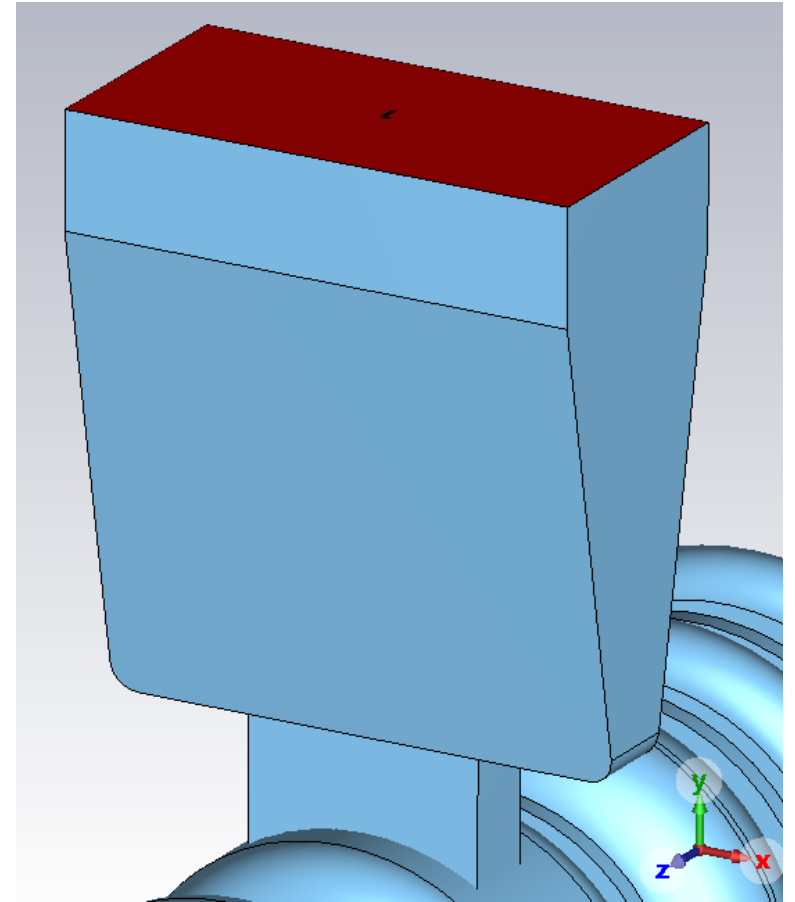
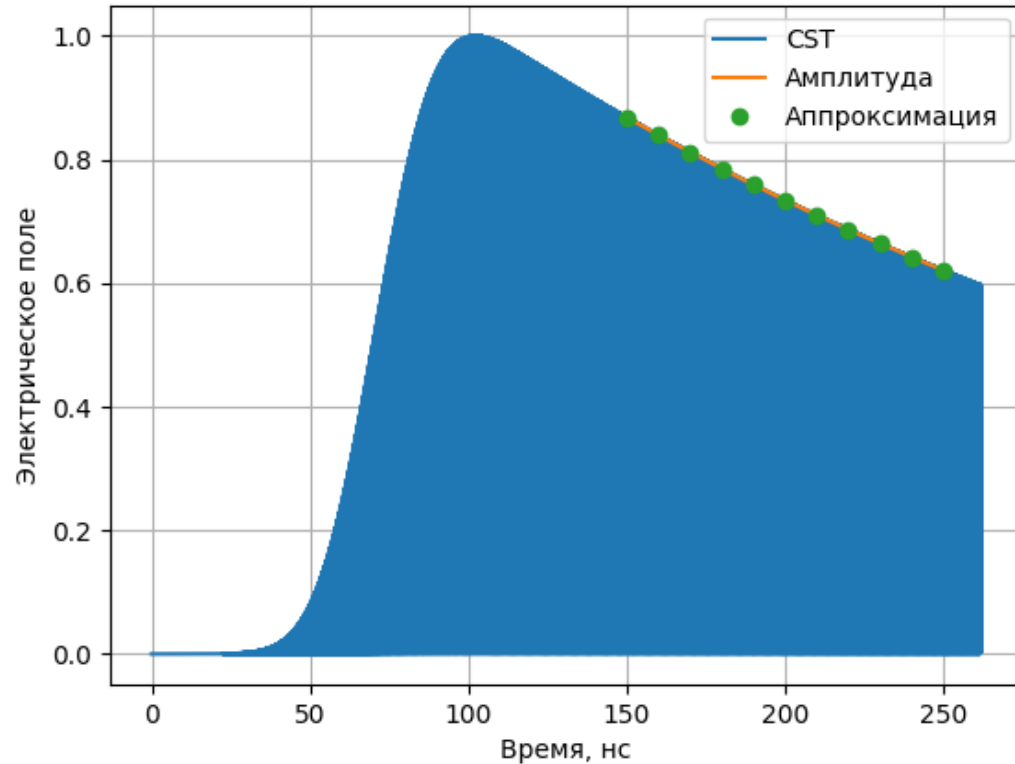
Энергетические спектры ускоренного пучка при различных уровнях ускоряющего поля. (слева) – режим высокой энергии, (справа) – режим низкой энергии.

Изменение коэффициента захвата



Зависимость коэффициента захвата (а) от средней энергии пучка на выходе и (б) от напряжения на управляющем электроде для средней энергии 6 МэВ.

Расчет узла ввода мощности



$$\left\{ \begin{array}{l} A = A_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\text{внеш}}}} \\ Q_{\text{внеш}} = \pi f \tau_{\text{внеш}} \\ \beta = Q_0 / Q_{\text{внеш}} \end{array} \right.$$

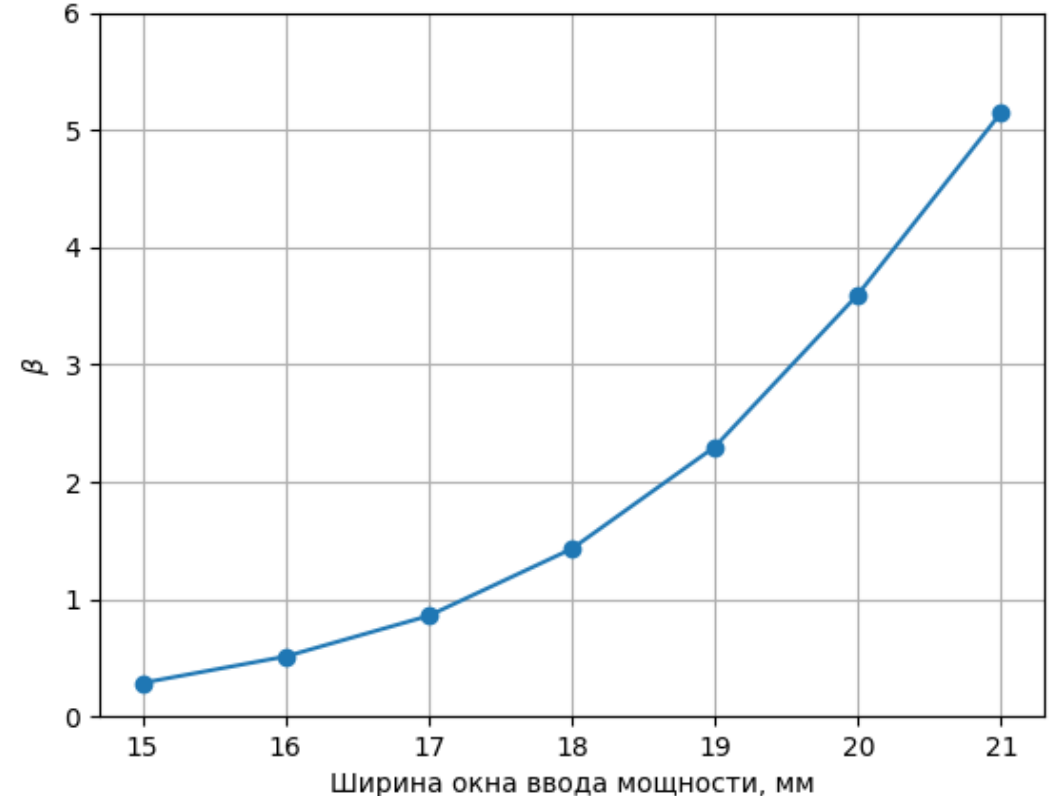
где f – частота, A – амплитуда поля, $\tau_{\text{внеш}}$ – постоянная времени затухания поля, Q_0 – собственная добротность

Расчет узла ввода мощности

Оптимальный коэффициент связи рассчитывался по формуле

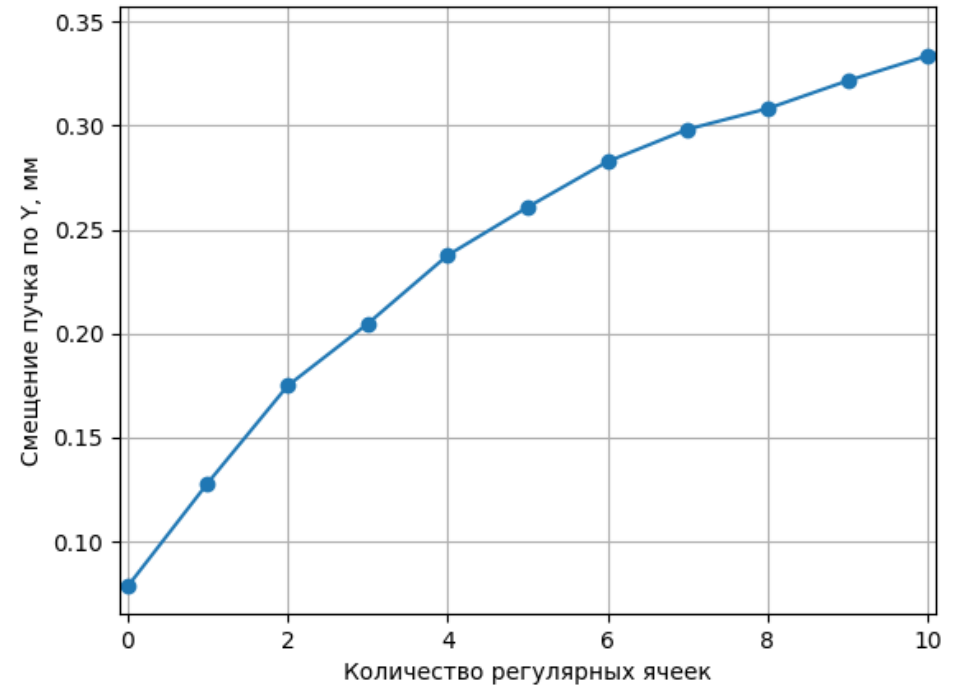
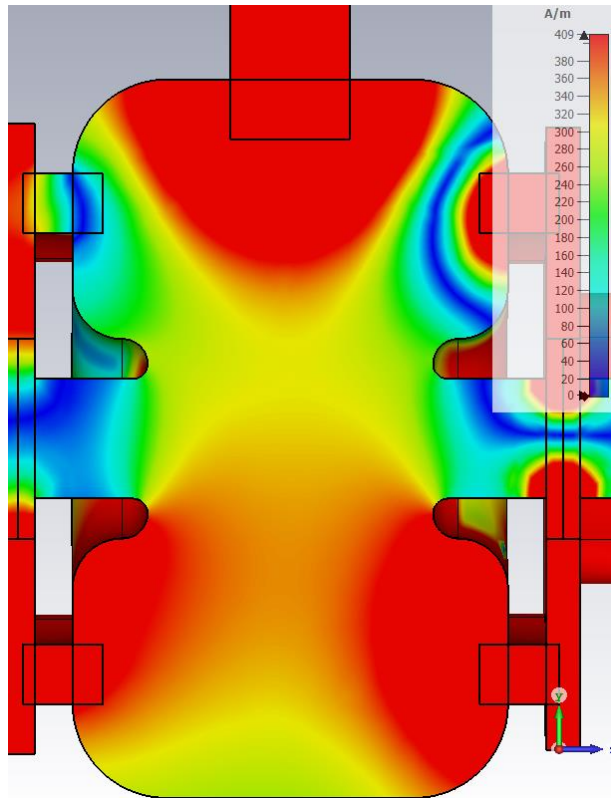
$$\beta = 1 + \frac{P_b}{P_a}$$

где β – коэффициент связи, P_b – мощность пучка, P_a – мощность, рассеиваемая в структуре



Зависимость коэффициента связи от ширины окна ввода мощности

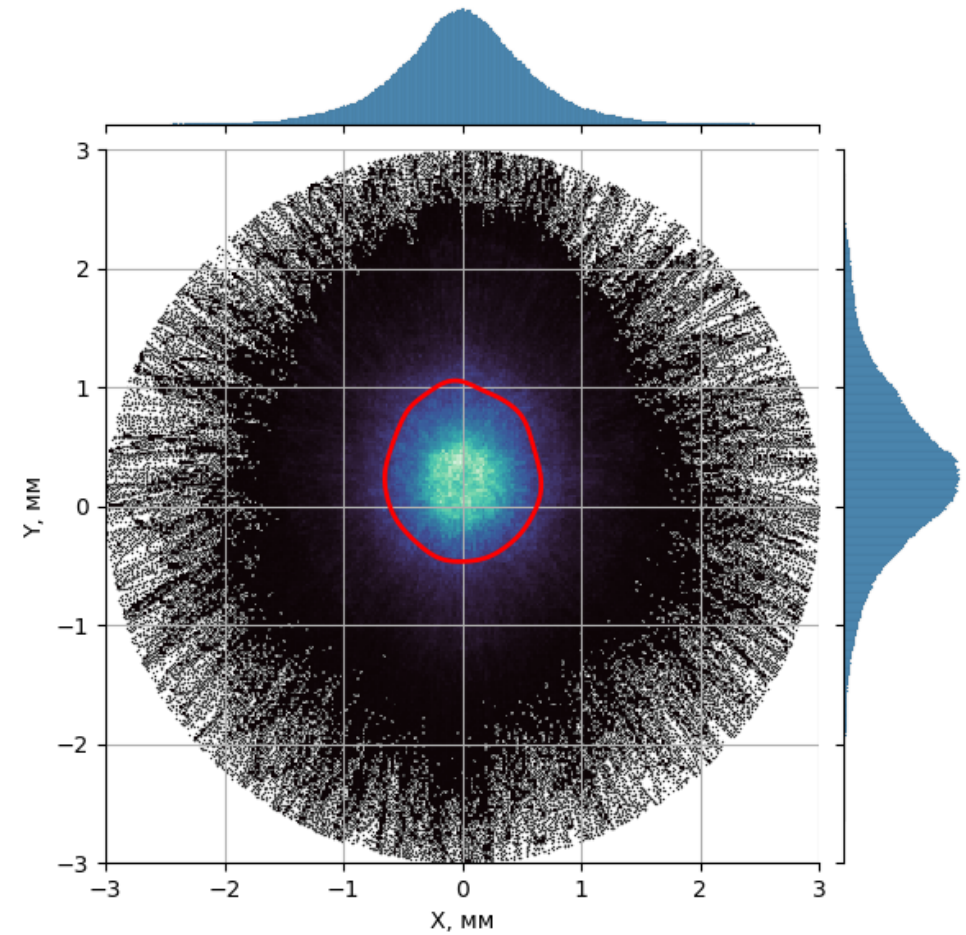
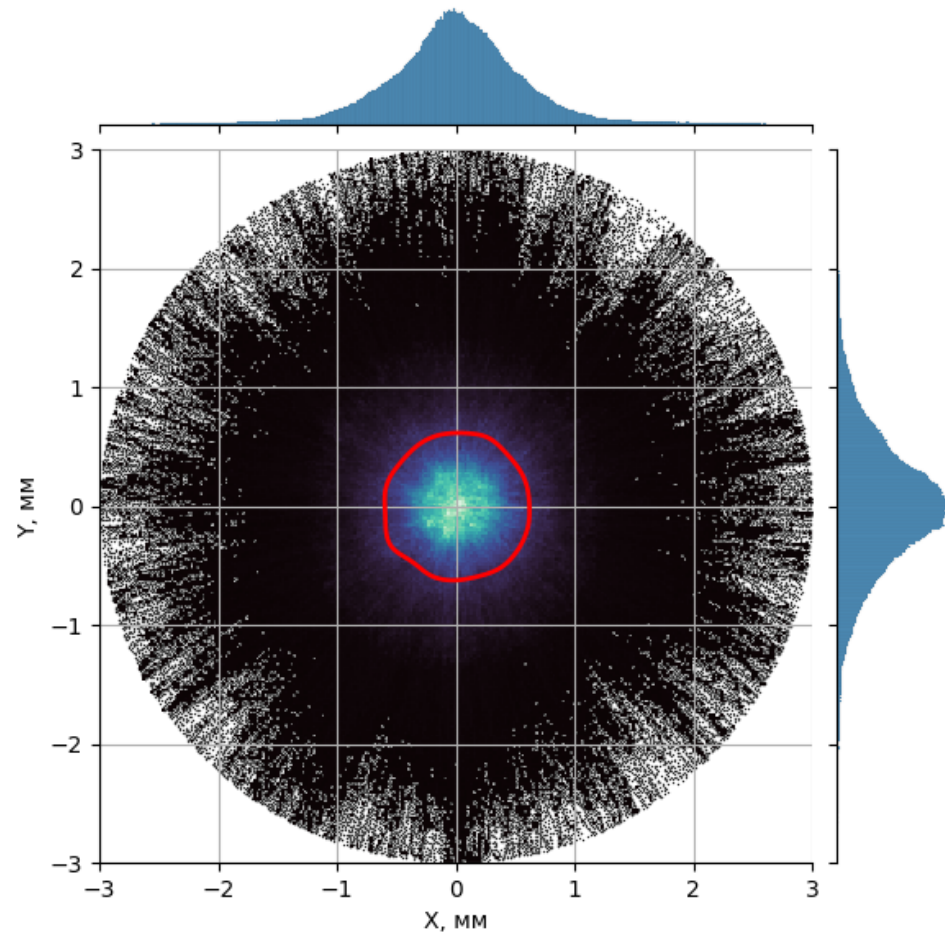
Влияние узла ввода мощности на положение центра пучка на мишени



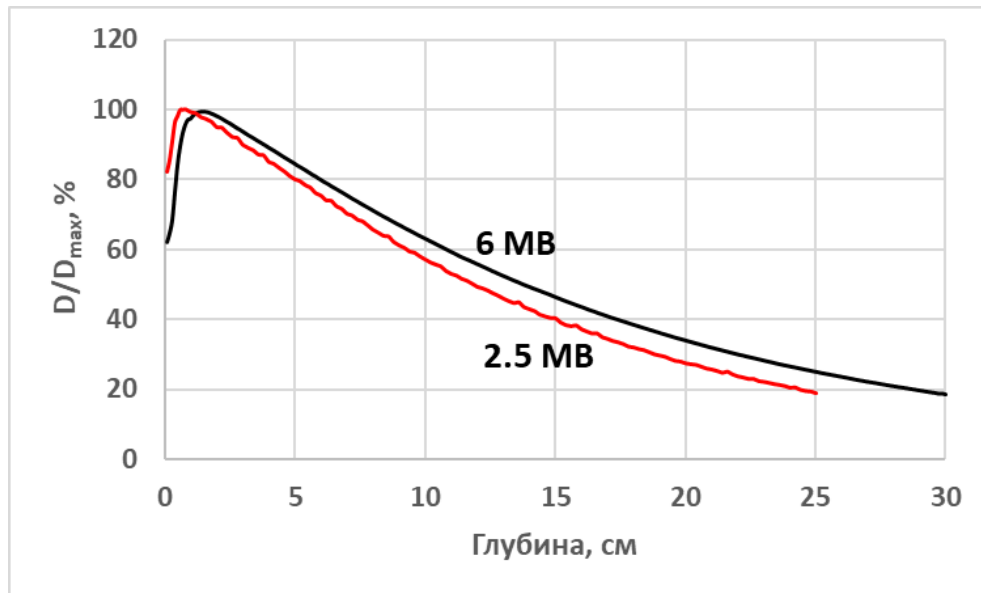
Распределение магнитной компоненты поля в ячейке (слева), разрез опытной ускоряющей структуры в области тормозной мишени (справа)

Зависимость смещения пучка на тормозной мишени от количества регулярных резонаторов

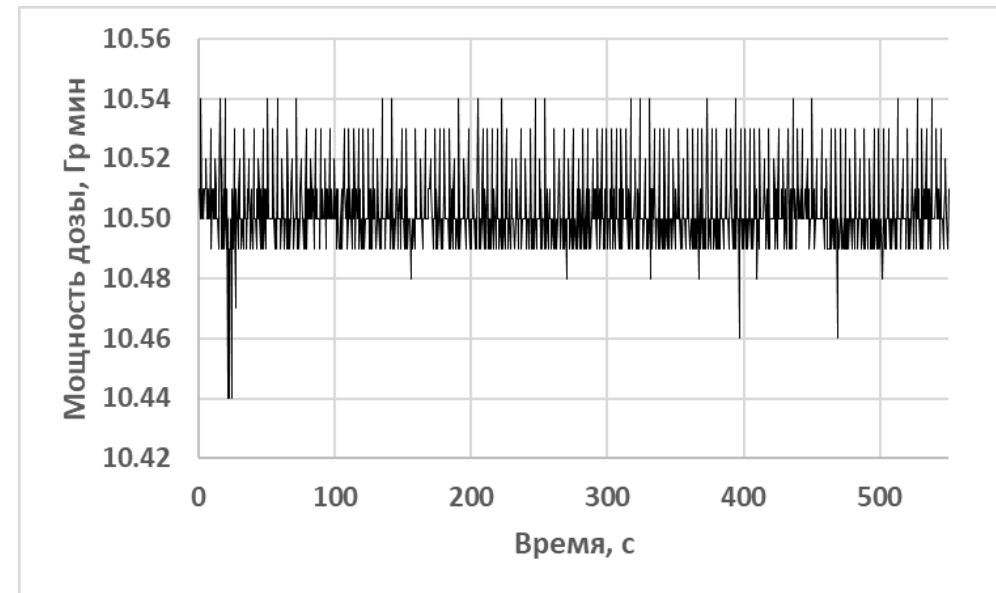
Сравнение поперечного распределения пучка на мишени с и без узла ввода мощности



Результаты экспериментальной проверки

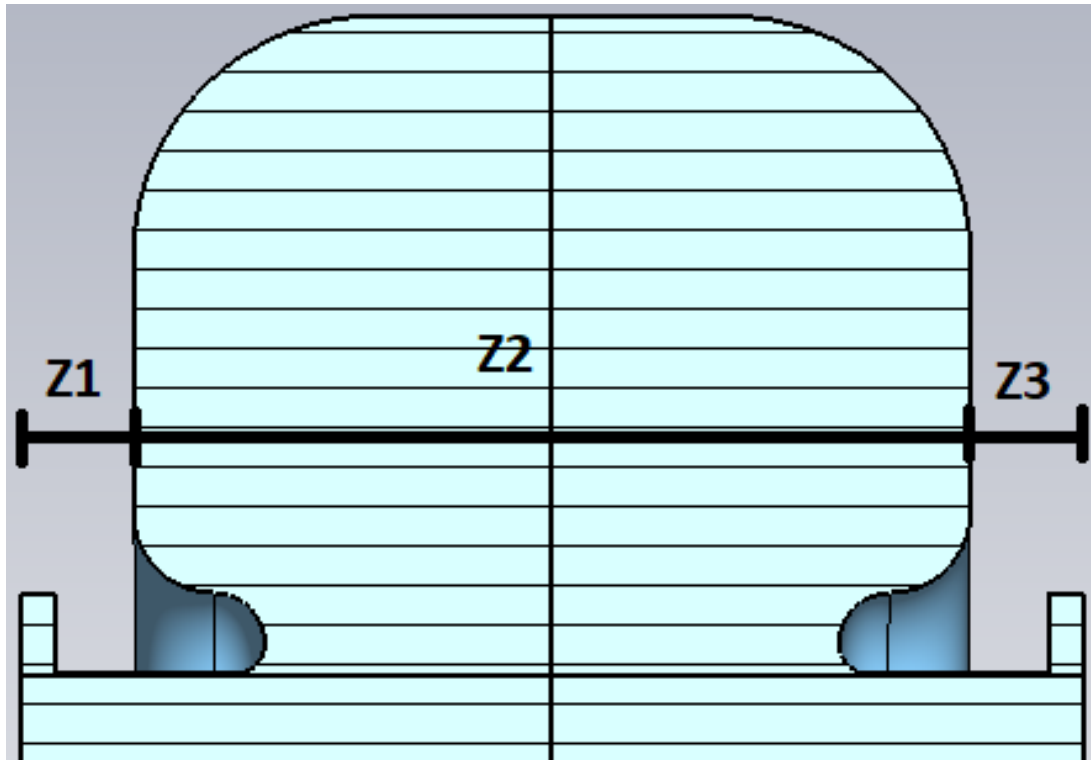


Процентные глубинные дозы для энергий 2.5 МэВ и 6 МэВ

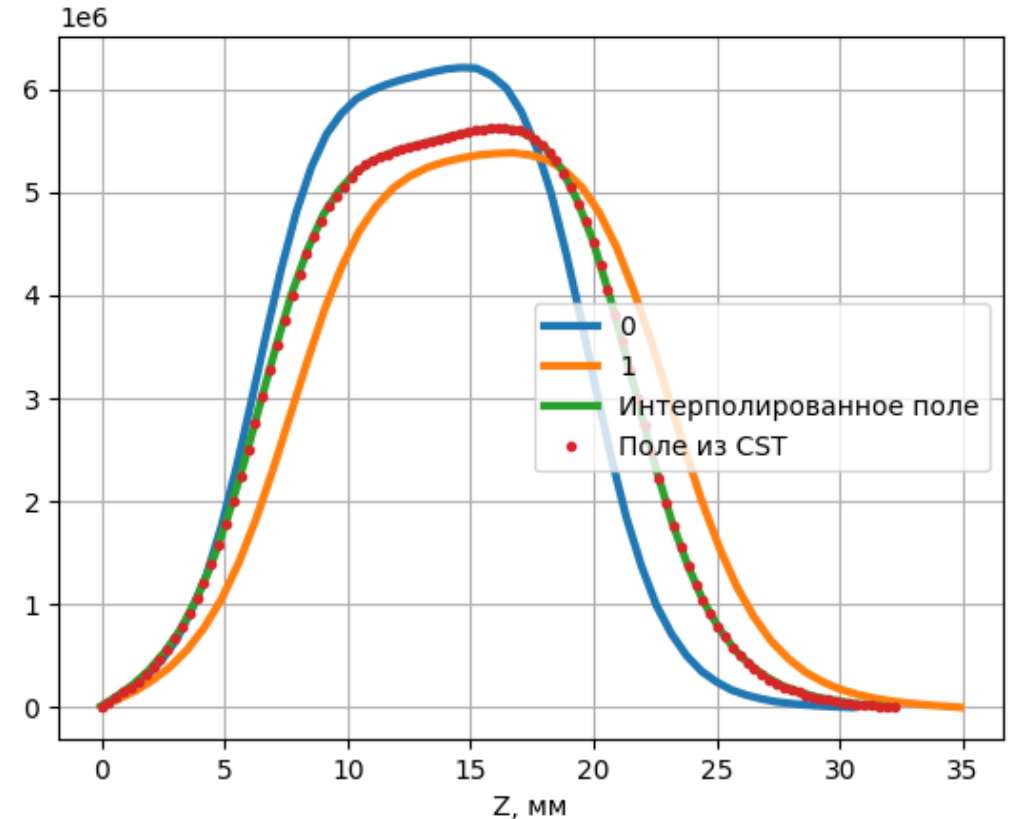


Зависимость мощности дозы от времени при максимальной частоте следования импульсов

Новый подход

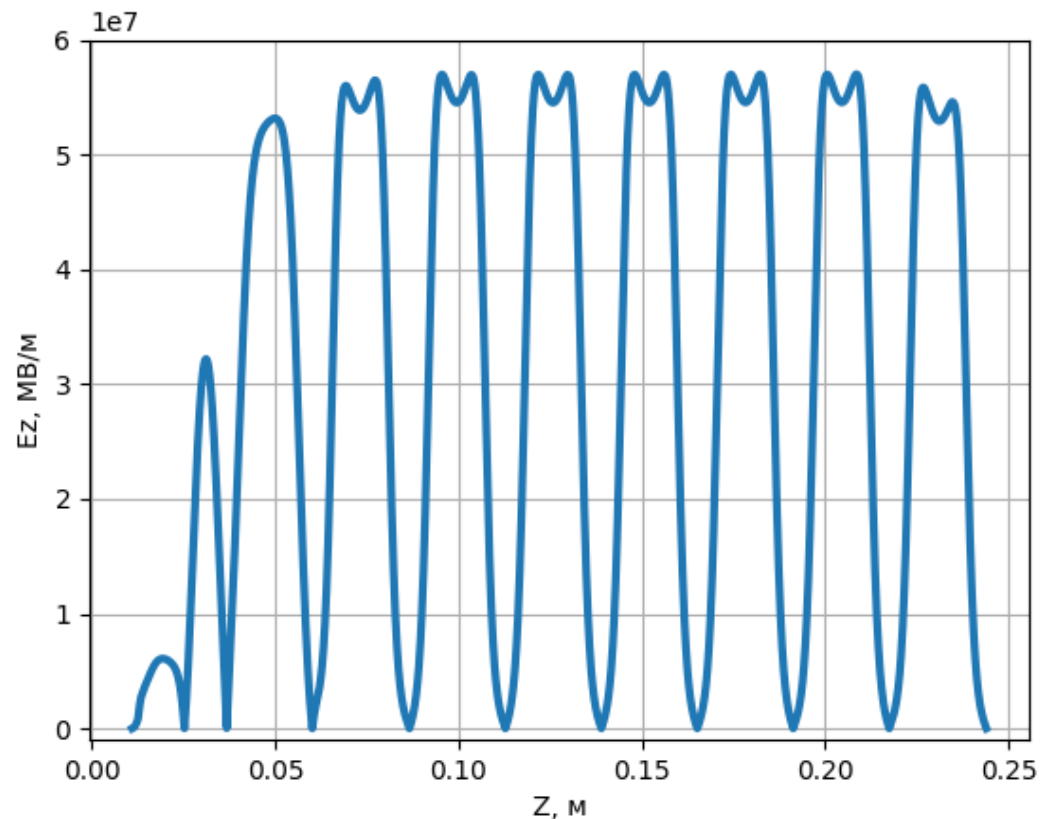


Пример параметризации геометрии ячейки

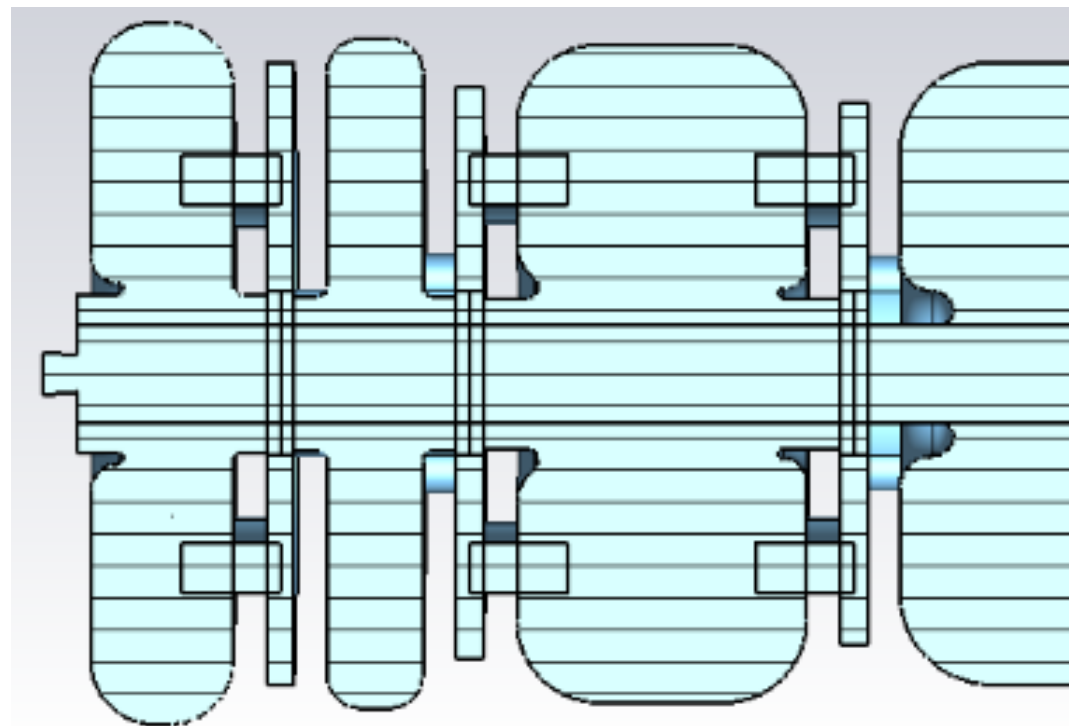


Пример интерполяции распределения со случайной комбинацией параметров

Предварительный вариант ускоряющей структуры



Предварительное распределение ускоряющего поля на оси

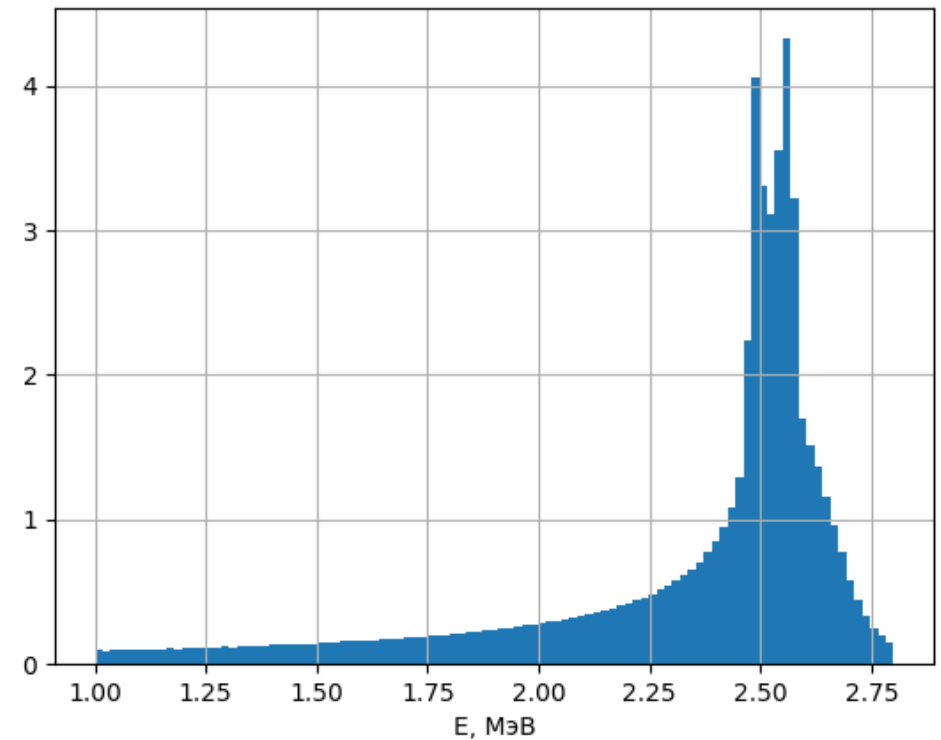
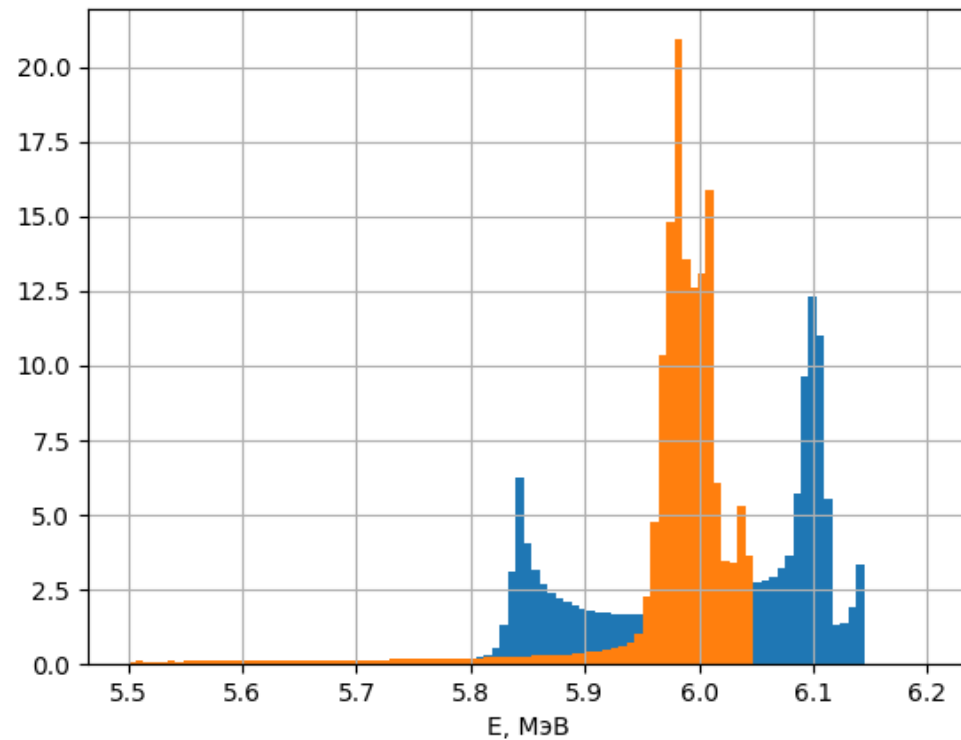


Предварительная геометрия начальной части ускоряющей структуры

Параметры	Версия 1	Версия 2	Версия 3
Общая длина, мм	205.19	229.83	232.97
Рассеиваемая мощность, МВт	2.21	1.86	1.87
Максимальная амплитуда электрического поля на оси, МВ/м	71.2	59.6	56.7
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности структуры, МВ/м	189.9	134.4	120.4

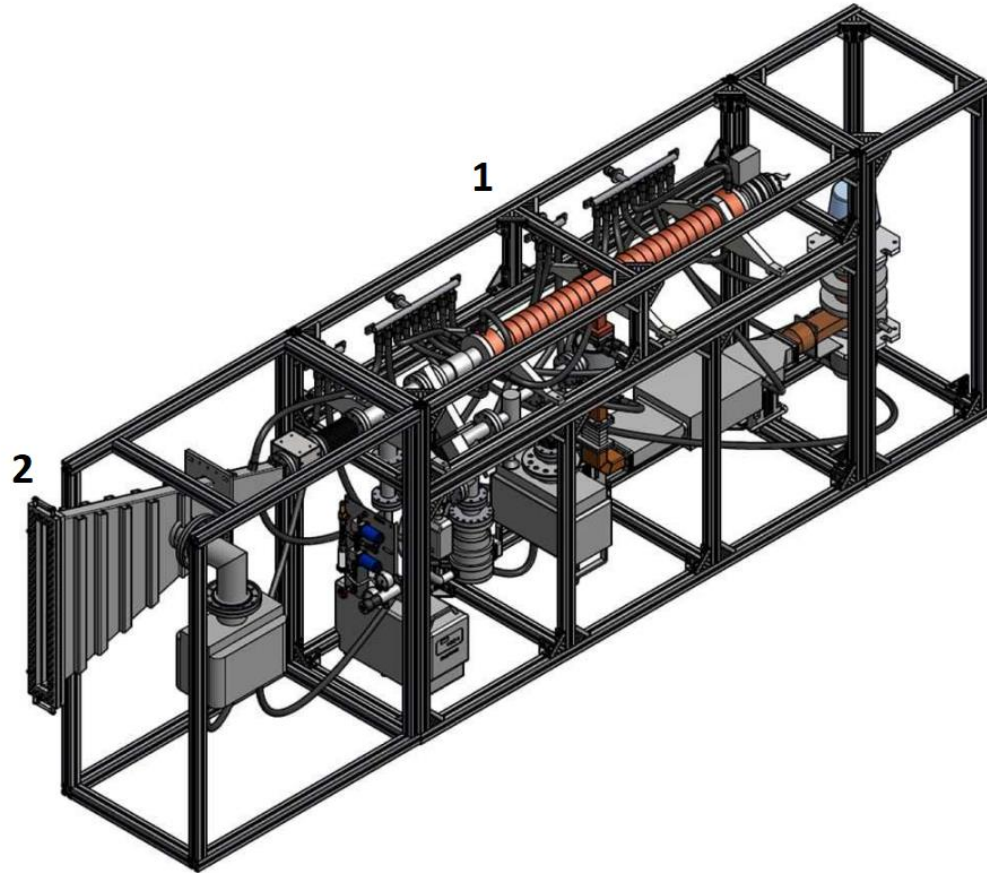
Коэффициент захвата, %	77.5	78.3	78.2
Обратный поток, %	2.1	1.8	2.35
Частиц $E < 5.7$ МэВ, %	10.91	8.96	13.6
Разброс по энергии, МэВ	0.79	0.69	0.87
Рабочий ток пушки, мА	200	195	200
% оседающих на катоде	0.9	0.69	0.87
% попадающих в отверстие катода	1.2	1.21	1.48
% оседающих на апертуре	7.4	7.3	7.3

Спектры пучков на выходе



Энергетические спектры ускоренного пучка при различных уровнях ускоряющего поля. (слева) – режим высокой энергии, (справа) – режим низкой энергии.

Стерилизация



Так одним из самых популярных методов стерилизации продукции на данный момент является ее обработка заряженными частицами.

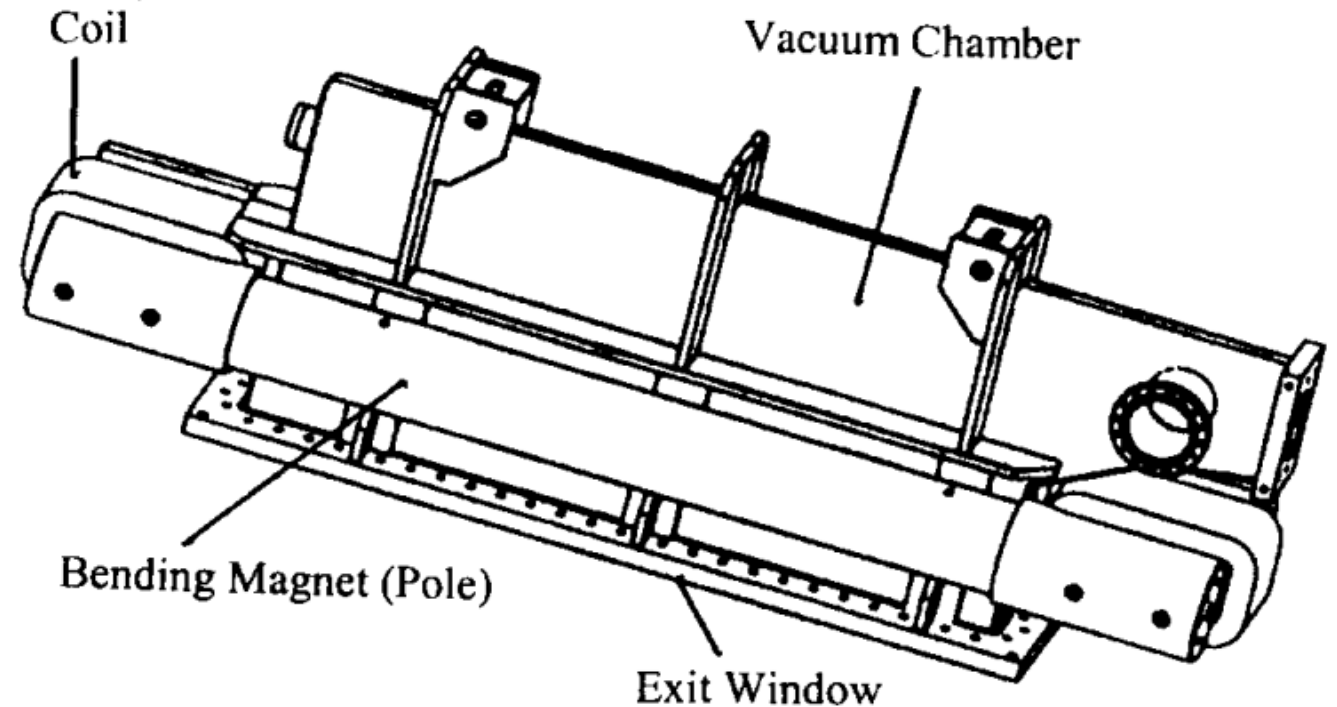
Основные плюсы:

- Высокая производительность
- Некоторые виды продукции должны обрабатываться лишь при помощи ускорителей

Основная проблема – компактность, так как ускорители необходимо устанавливать перпендикулярно линии конвейера. Для решения этой проблемы было решено разработать магнит развертки, поворачивающий частицы на 90° .

Примеры в литературе

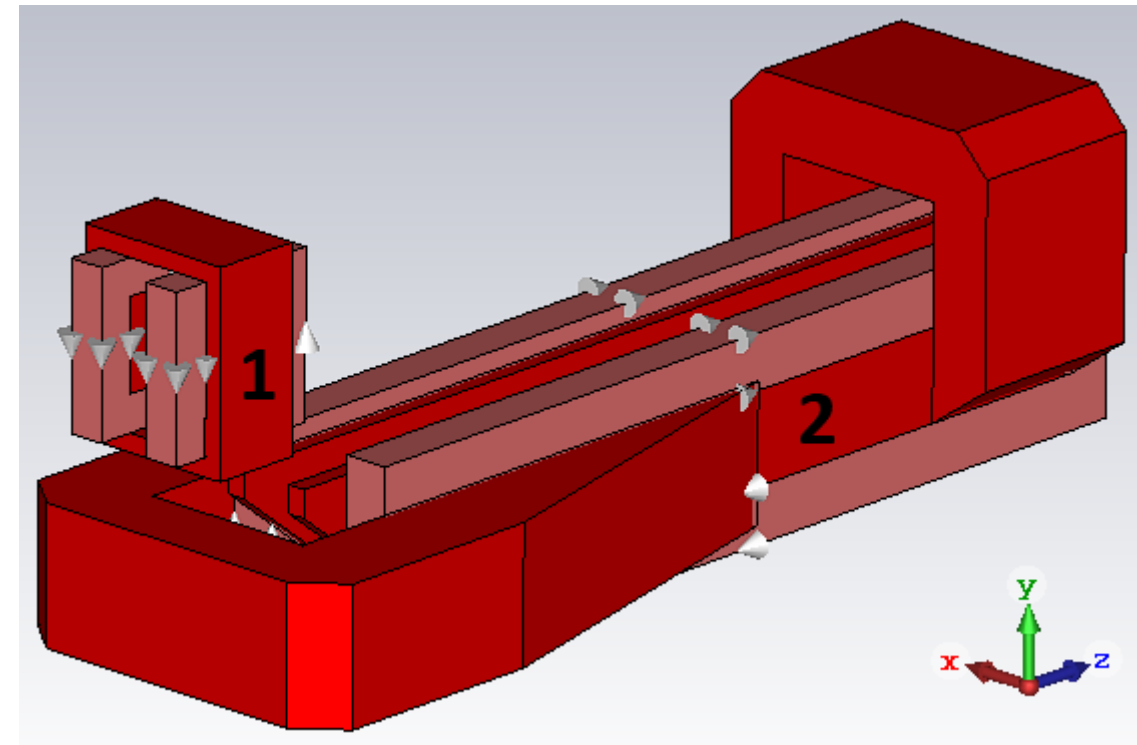
Ivanov A. S. et al. New irradiation field shaping systems of high voltage electron accelerators for industry //Proceedings of International Conference on Particle Accelerators. – IEEE, 1993. – C. 555-557.
Jongen Y. et al. Realignment of a diverging electron beam: a new beam delivery system for rhodotrons //Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 97CH36167). – IEEE, 1997. – T. 3. – C. 3857-3859.



Магнит с рассеянным полем

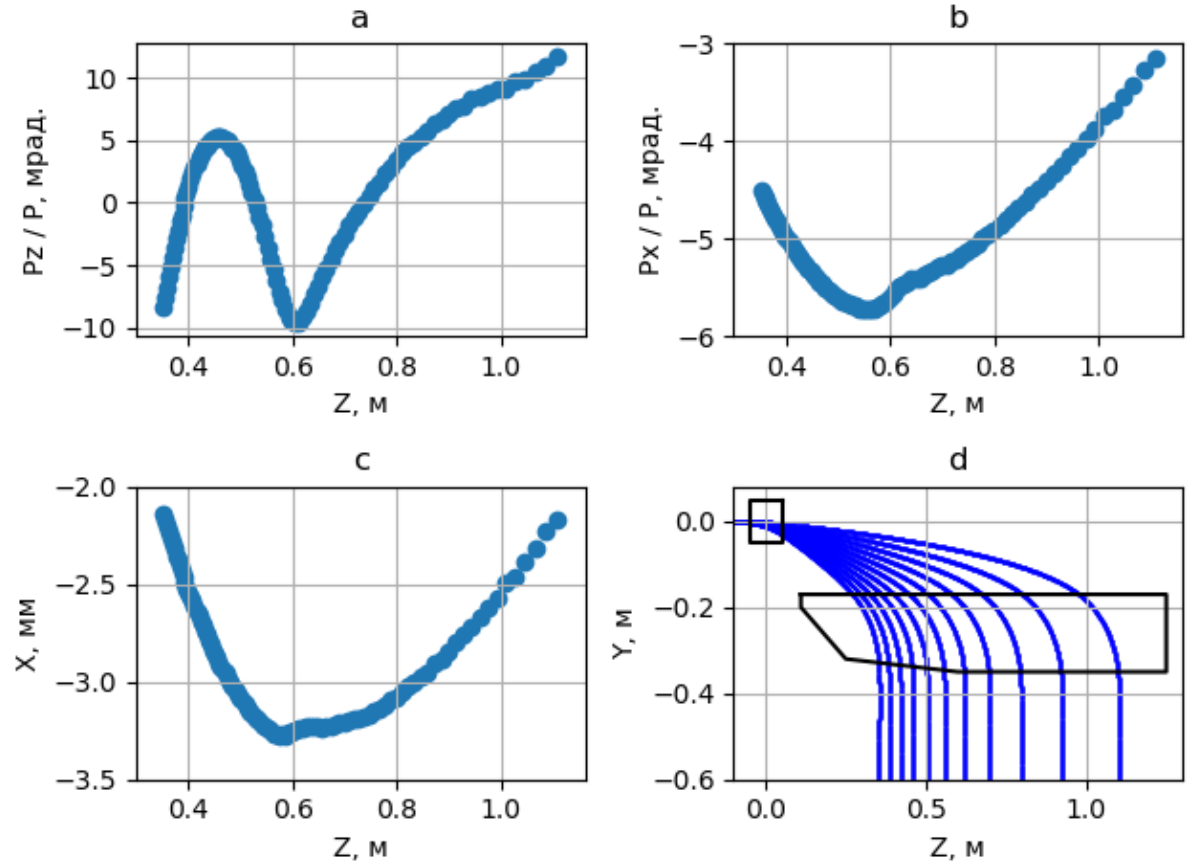
Основанная идея – частичный поворот частиц происходит в рассеянном поле магнита поворота. Производилась оптимизация взаимного расположения магнитов 1 и 2. А также геометрия полюса магнита 2

Параметры магнита с рассеянным полем	
Масса магнита, кг	367
Размеры магнита X-Y-Z, см	42 X 48 X 129
Поле магнита развертки, Тл	0.02 – 0.1
Максимальное поле на оси поворотного магнита, Тл	0.165



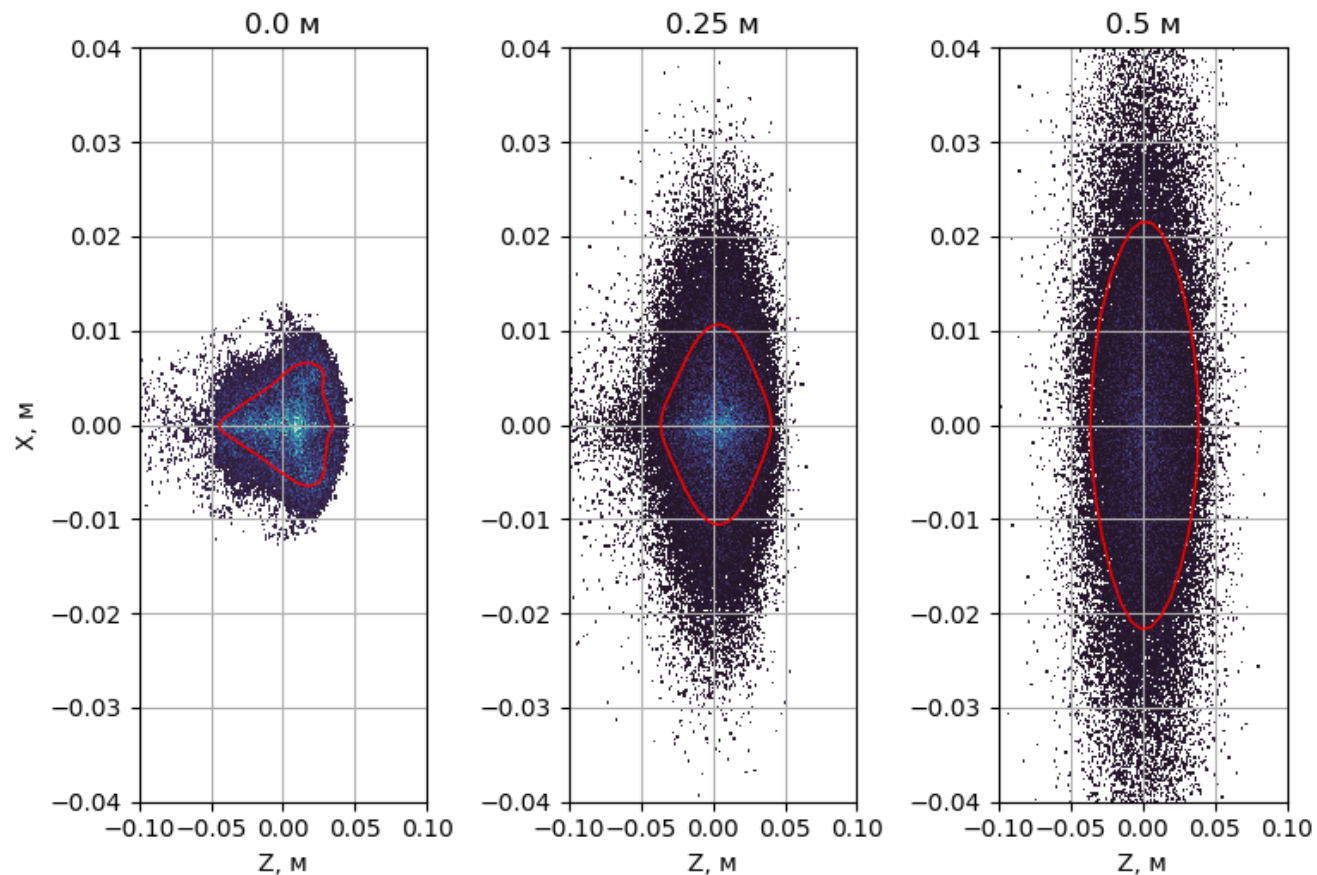
Параметры частиц на выходе

На рисунке представлены параметры монохроматических частиц с энергией 10 МэВ на выходе из магнита. Видно, что посредством оптимизации полюса второго магнита можно минимизировать разброс по угла по направлению X, тем самым повысив равномерность дозового распределения.



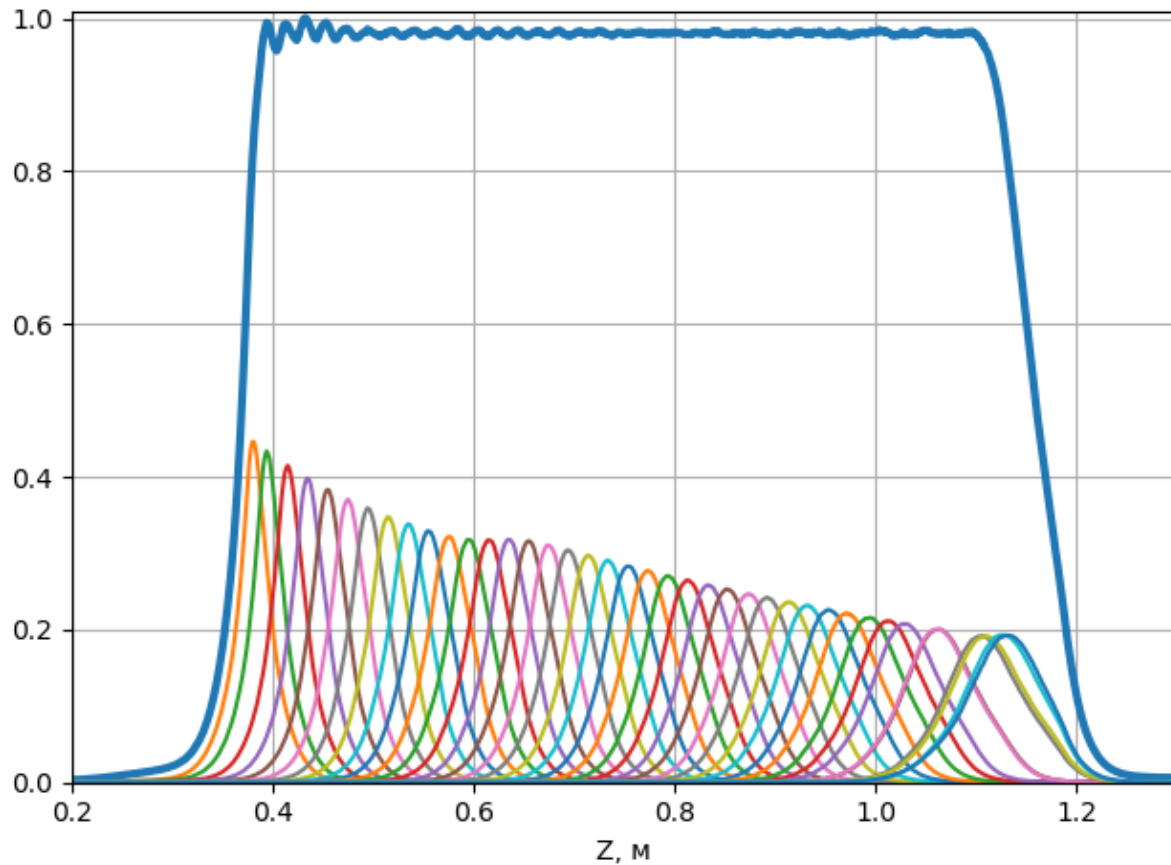
Формирование поля облучения без учета конвейера

Распределение частиц на облучаемом объекте зависит от рассеяния электронов на фольге выпускного окна вакуумной камеры. Учет рассеяния на фольге производится исходя из известности зависимости среднеквадратичного угла рассеяния от энергии электронов и толщины фольги, которая в данном случае фиксирована и равняется 50 мкм.

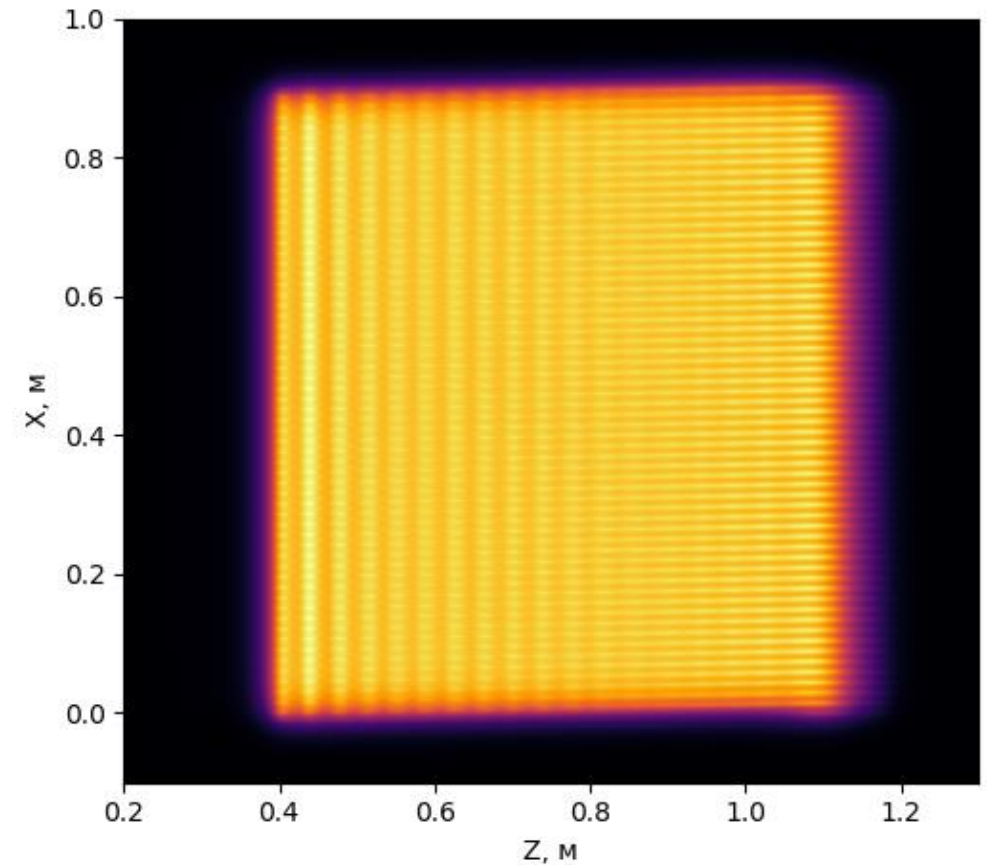


Распределение пучка на выходе из магнита и на расстоянии 0.25 и 0.5 м.

Учет скорости движения конвейера

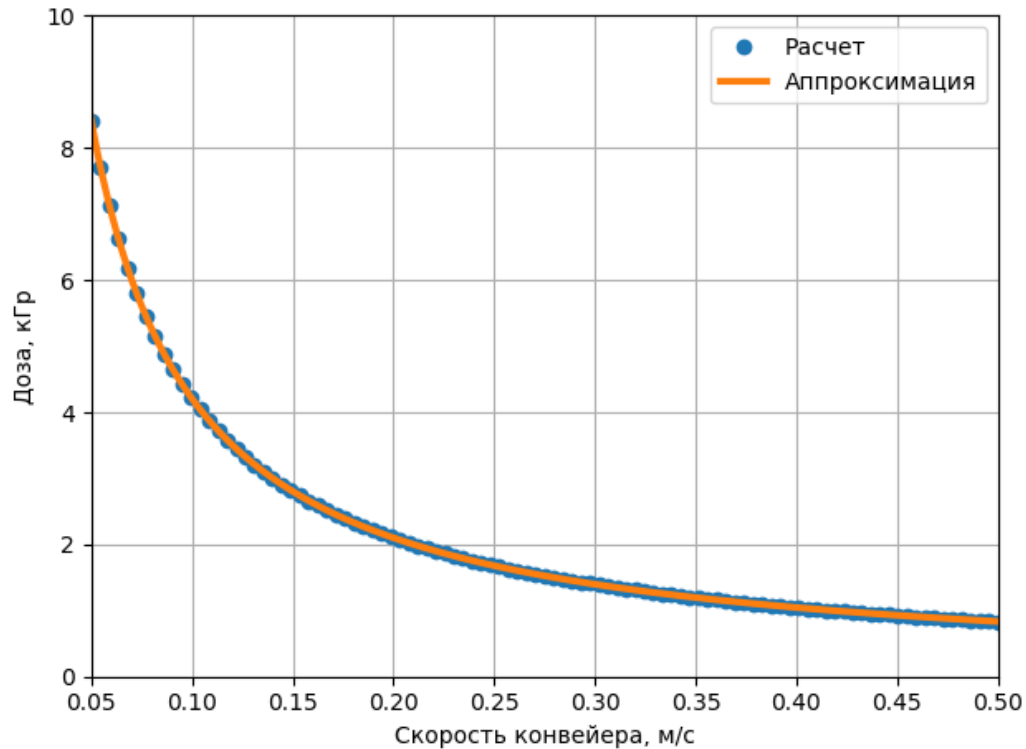


Распределения частиц от ускорителя на выходе из магнита с рассеянным полем без учета конвейера для 40 пучков в развертке



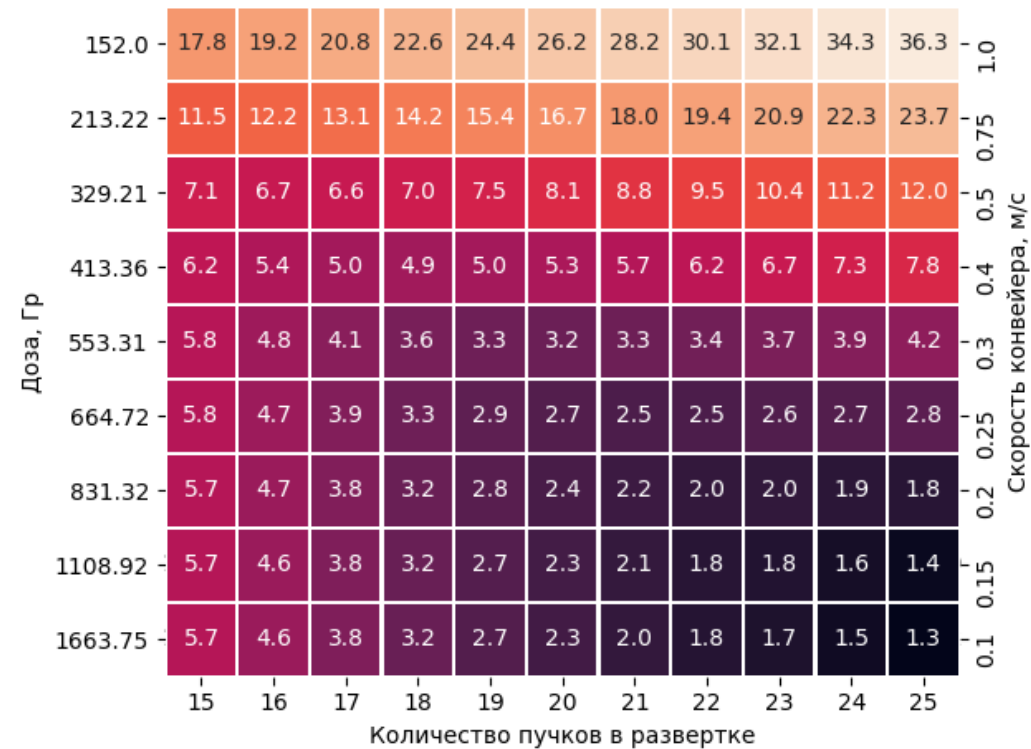
Пример распределения частиц на конвейере при использовании 20 пучков в развертке и скорости 0.3 м/с.

Расчет неоднородности поля облучения и переданной дозы



Зависимость переданной дозы от скорости конвейера.

$$D(\text{Гр}) \approx 3.4 \times 10^{-14} F(\text{м}^{-2})$$



Распределение соответствий количества пучков в развёртке и скорости конвейера к среднеквадратичному отклонению при длительности импульса 4 мкс.

Наработка медицинских изотопов: ^{99m}Tc

Изотоп ^{99m}Tc является одним из самых востребованных медицинских изотопов. Нашел широкое применение в медицинской диагностике.

Основной способ получения: $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc} + e^- + \bar{\nu}_e$ (так называемые генераторы технеция). Это связано с малым периодом полураспада: $T_{1/2} (^{99m}\text{Tc}) \approx 6 \text{ ч}$. $T_{1/2} (^{99}\text{Mo}) \approx 66 \text{ ч}$.

Основной способ получения ^{99}Mo это распад ^{235}U . Однако после прекращения работы ряда реакторов, в мире наблюдается недостаток данного изотопа.

Альтернативный способ получения ^{99}Mo

Table 2 Radioactivities produced from the bremsstrahlung γ -ray beam irradiation of 3 min on a 1 g $^{\text{nat}}\text{MoO}_3$ target using a 30 MeV electron beam with a 1 μA intensity

Nucleus	Half-life	Activity ($t = 0$) Bq/ $\mu\text{Ah/g-MoO}_3$	Activity ($t = 24$ h) Bq/ $\mu\text{Ah/g-MoO}_3$
^{90}Mo	5.7 h	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^3$	$(9.0 \pm 0.5) \times 10^1$
^{90}Nb	14.6 h	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^3$	$(1.3 \pm 0.2) \times 10^1$
$^{91\text{m}}\text{Nb}$	61 days	≤ 80	≤ 80
^{91}Mo	15.5 m	Not determined	Not determined
$^{92\text{m}}\text{Nb}$	10.2 days	$(7.7 \pm 0.9) \times 10^1$	$(7.2 \pm 0.9) \times 10^1$
^{95}Nb	35 days	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^2$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^2$
$^{95\text{m}}\text{Nb}$	3.6 days	$(4.5 \pm 0.4) \times 10^2$	$(3.7 \pm 0.3) \times 10^3$
^{96}Nb	23 h	$(1.08 \pm 0.04) \times 10^4$	$(5.2 \pm 0.1) \times 10^2$
^{97}Nb	72 m	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^5$	$(3.2 \pm 0.4) \times 10^{-1}$
$^{98\text{m}}\text{Nb}$	51 m	$(2.5 \pm 0.5) \times 10^3$	$(7.9 \pm 1.6) \times 10^{-6}$
^{99}Mo	66 h	$(1.05 \pm 0.06) \times 10^5$	$(8.1 \pm 0.4) \times 10^4$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^4$	$(7.4 \pm 0.9) \times 10^4$

Takeda T. et al. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ production via the (γ, n) reaction on natural Mo //Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – T. 318. – No. 2. – C. 811-821.

Основные уравнения

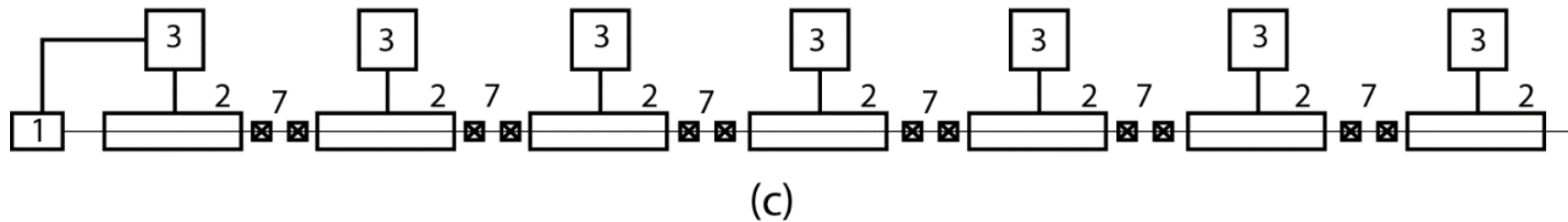
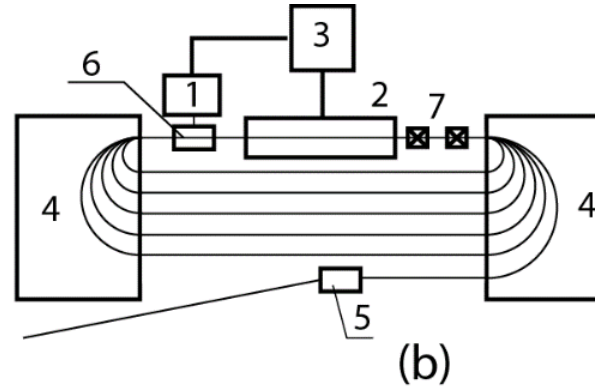
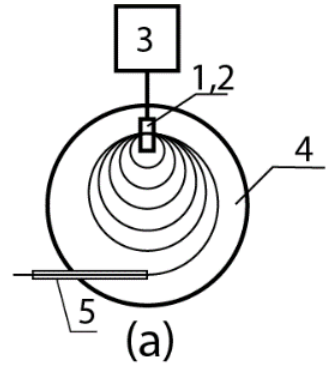
Для обеспечения синхронизма между ускоряющим полем и частицей, необходимо связать величину магнитного поля и прирост энергии за оборот:

$$B = \frac{2\pi\Delta E_p}{e c \lambda}$$

Основная система уравнений:

$$\begin{cases} \delta E_{n+1} = \delta E_n + E_{\text{макс}} * \cos(\delta\varphi_n + \varphi_p) - \Delta E_p \\ \delta\varphi_{n+1} = \delta\varphi_n + 2\pi\nu \frac{\delta E_{n+1}}{\Delta E_p} \end{cases}$$

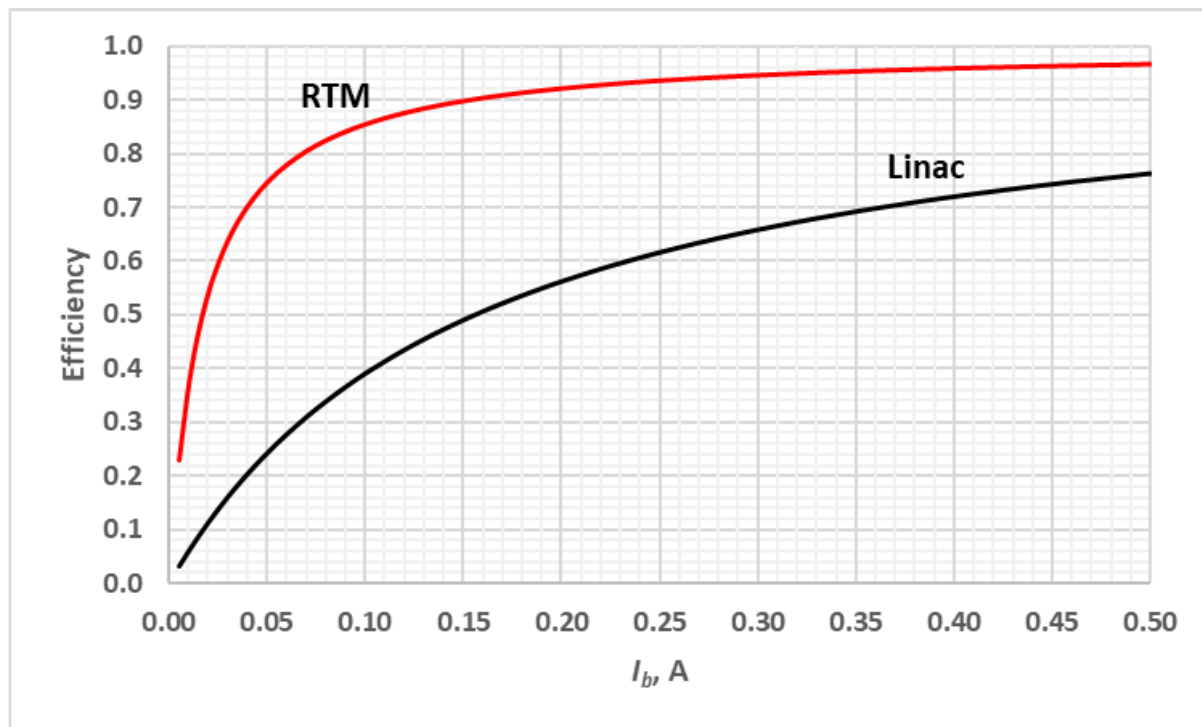
Устройство разрезного микротрона



(a) Классический микротрон, (b) разрезной микротрон, (c) линейный ускоритель

Сравнение с линейным ускорителем

Главное преимущество разрезного микротрона перед линейным ускорителем – более эффективное использование СВЧ мощности, так как разрезной микротрон является циклическим ускорителем.



$$\text{Эффективность} = \frac{\text{мощность пучка}}{\text{мощность СВЧ поля}}$$

Главный недостаток – более сложная конструкция, узкая область устойчивых фазовых колебаний в продольной плоскости

Зависимость электронного КПД РМ и линейного ускорителя от тока ускоренного пучка

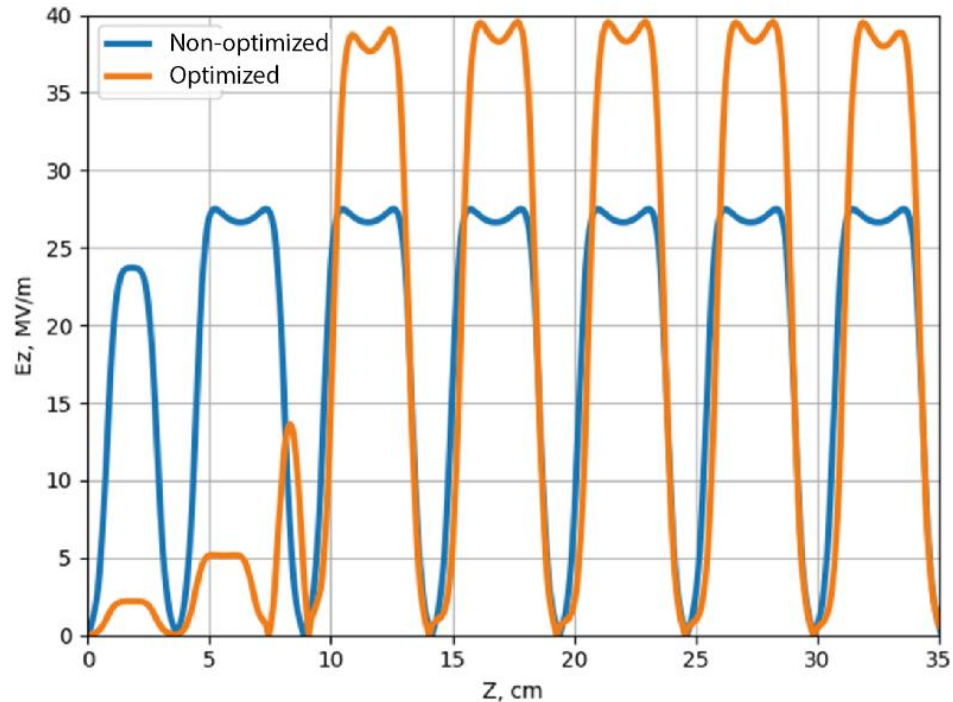
Многоцелевой импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ



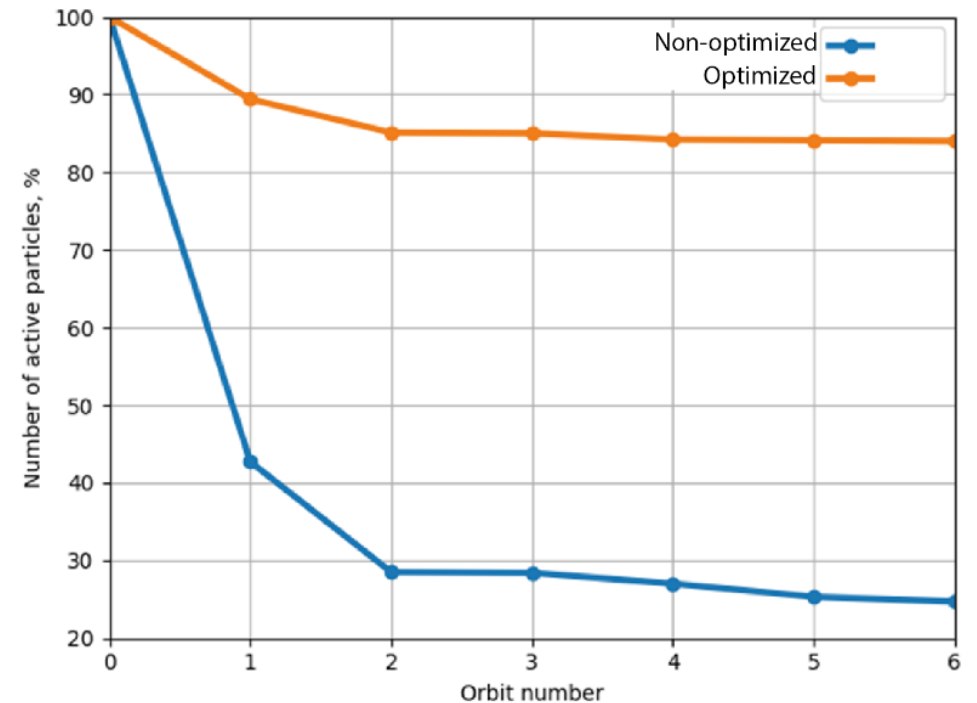
Внешний вид разрезного микротрона
RTM-55 НИИЯФ МГУ

Характеристики	
Выходная энергия	55 МэВ
Прирост энергии за оборот	5 МэВ
Средний выходной ток	≈ 10 мкА
Общая масса	≈ 2000 кг

Оптимизация начальной части линейного ускорителя разрезного микротрона

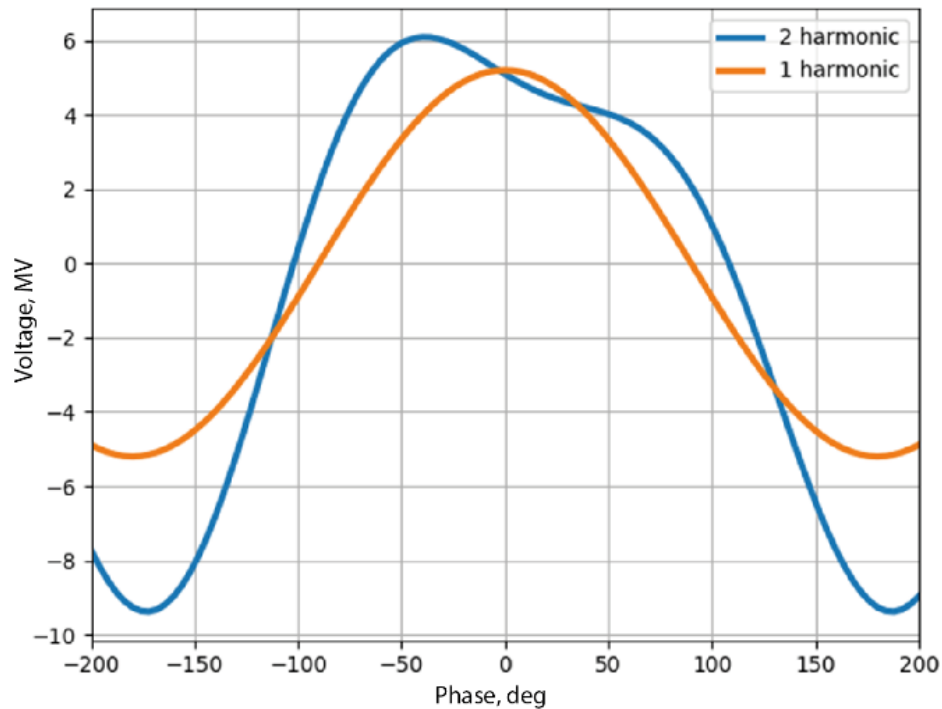


Распределение поля линейного ускорителя разрезного микротрона. (синий) – текущее, (оранжевый) - новое

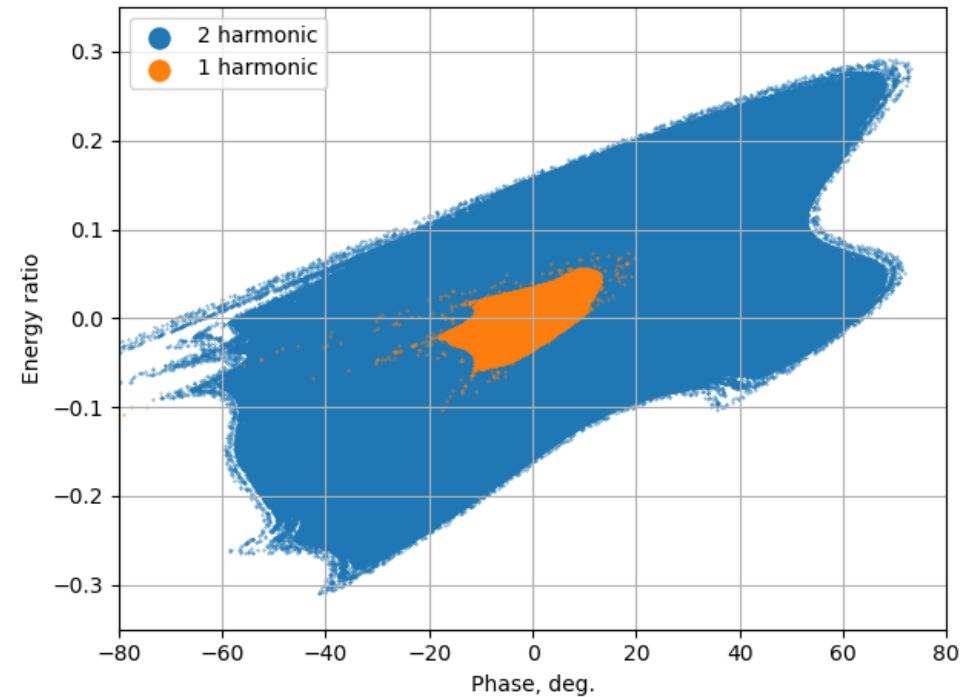


Коэффициенты захвата частиц в зависимости от орбиты для ускоряющей структуры RTM55 и ускоряющей структуры с оптимизированной начальной частью

Дополнительная гармоника



Напряжение в ускорителе в зависимости от фазы для одной (оранжевый) и двух (синий) гармоник



Сравнение продольных акцептансов для случая одной (оранжевый) и двух (синий) гармоник

Результаты проделанной работы

- Смоделированы различные варианты ускоряющих структур для комплекса лучевой терапии. Два из них были реализованы в железе и решили поставленные перед ними задачи: решение проблемы обратной бомбардировки катода, уменьшение затрат на СВЧ мощность
- Смоделирован магнит развертки с поворотом пучка на 90° .
- Проведен расчет разрезного микротрона для целей наработки изотопов. Для повышения коэффициента захвата было предложено использовать полноценную начальную часть линейного ускорителя для формирования пучка. Также для увеличения аксептанса была рассмотрена возможность использования дополнительной гармоник.

Публикации

- Глава 3: Система сканирования пучка промышленного ускорителя электронов / М. А. Борисов, В. И. Шведунوف // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* — 2024., № 2..
- Глава 4: Borisov, M., Ermakov, A., Khankin, V., Kubyshin, Y., & Shvedunov, V. (2021). Racetrack Microtron—Pushing the Limits. *Symmetry*, 13(12), 2244.

Спасибо за внимание!