

# Нормальнопроводящие линейные ускорители электронов непрерывного действия для прикладных целей

Юров Д.С.

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., проф.  
Шведунов В.И.

# Содержание диссертации

1. Особенности работы линейных ускорителей электронов в непрерывном режиме.
2. Линейный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ.
3. Система формирования поля облучения.
4. Узел ввода мощности с регулируемым коэффициентом связи.

# Особенности работы ускоряющих структур непрерывного действия

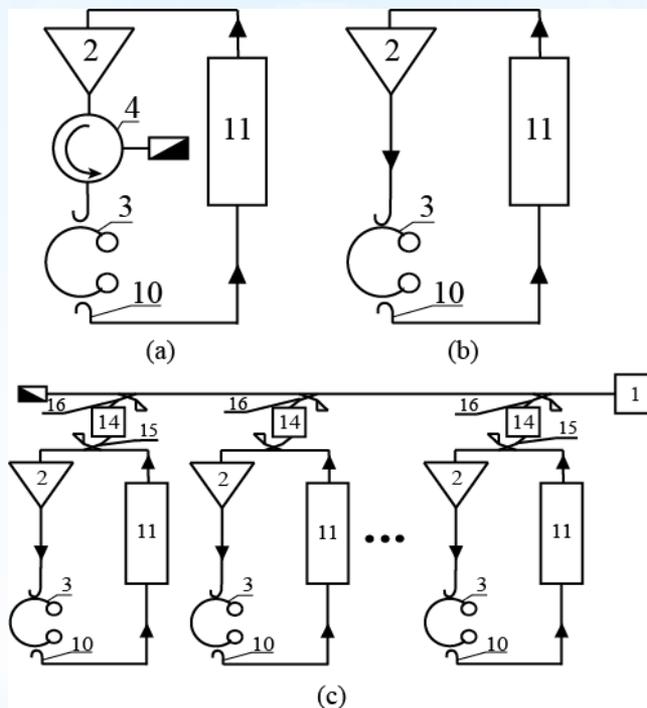
## 1. Высокие тепловые нагрузки во время работы ускорителя.

Приводят к заметному изменению электродинамических характеристик структуры: сдвигу резонансной частоты, появлению или изменению полосы запираения в дисперсионной характеристике, снижению эффективного шунтового сопротивления из-за увеличения сопротивления материала стенок.

## 2. Низкий уровень ускоряющего поля.

Обуславливает низкий темп набора энергии частицами, в результате чего на значительном участке структуры электроны остаются нерелятивистскими.

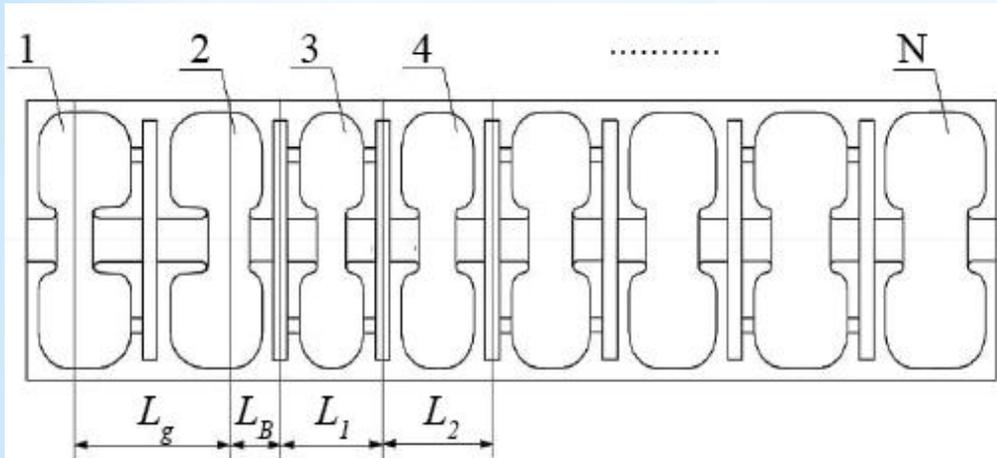
# Схема автоколебательного режима работы клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи



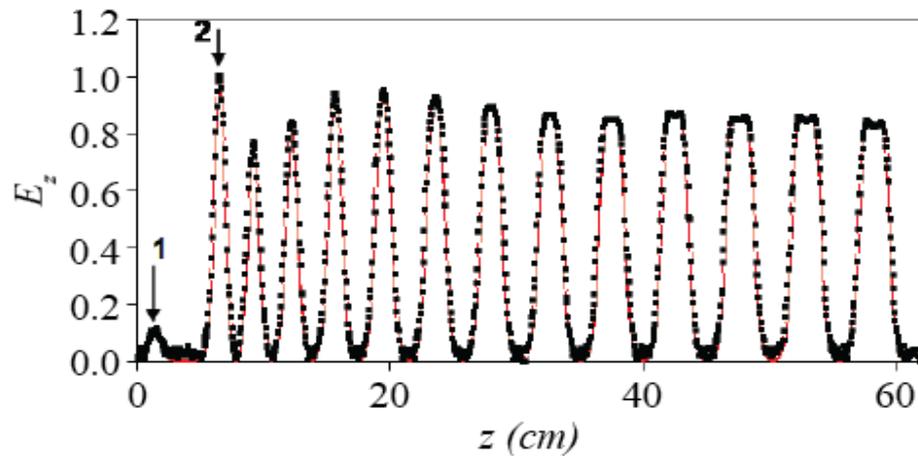
- (a) - односекционный ускоритель с ферритовым развязывающим устройством.  
(b) - односекционный ускоритель без ферритового развязывающего устройства.  
(c) - многосекционный ускоритель.

2 - клистрон, 3 - ускоряющая структура, 4 - циркулятор, 10 - петля связи, 11 - цепь обратной связи, 12 - переключатель высокочастотных каналов, 14 - фазовращатель, 15, 16 - направленные ответвители.

# Ускоряющая структура с низкой энергией инжекции

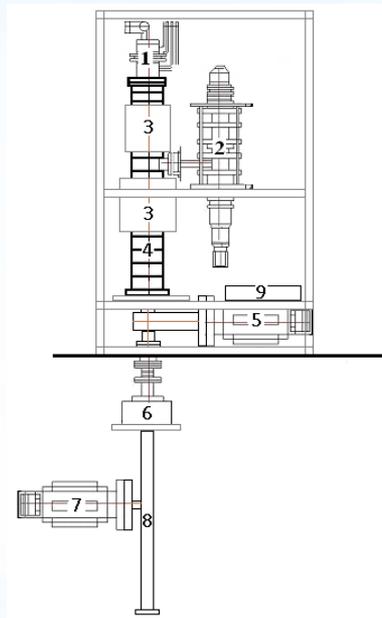


- 1 - группирующий резонатор
- 2 - бустерный резонатор

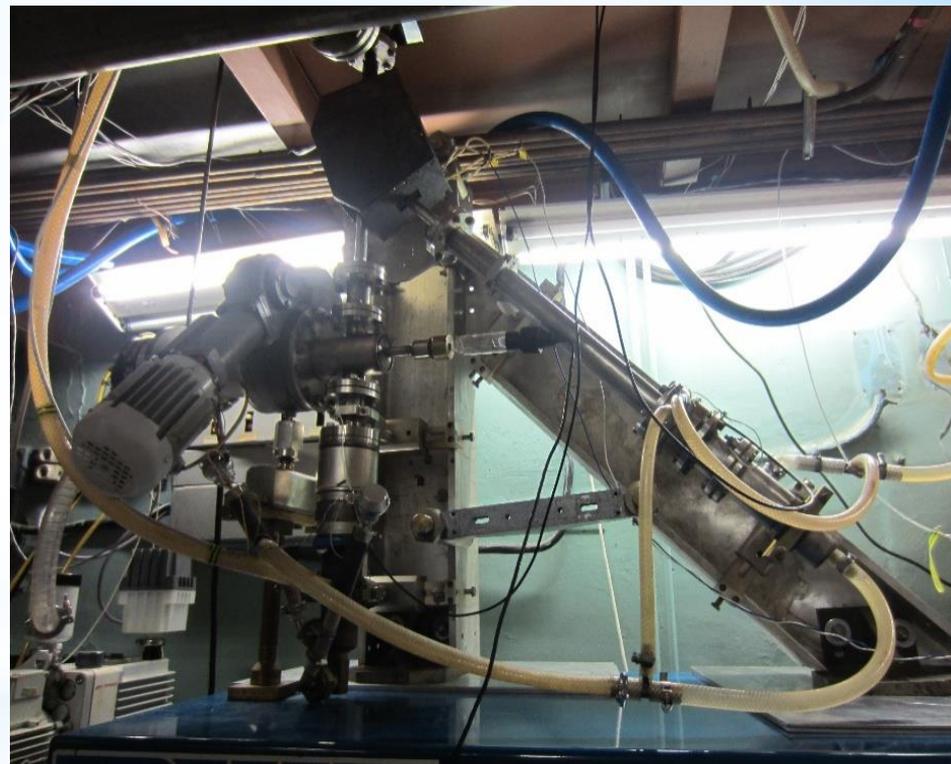
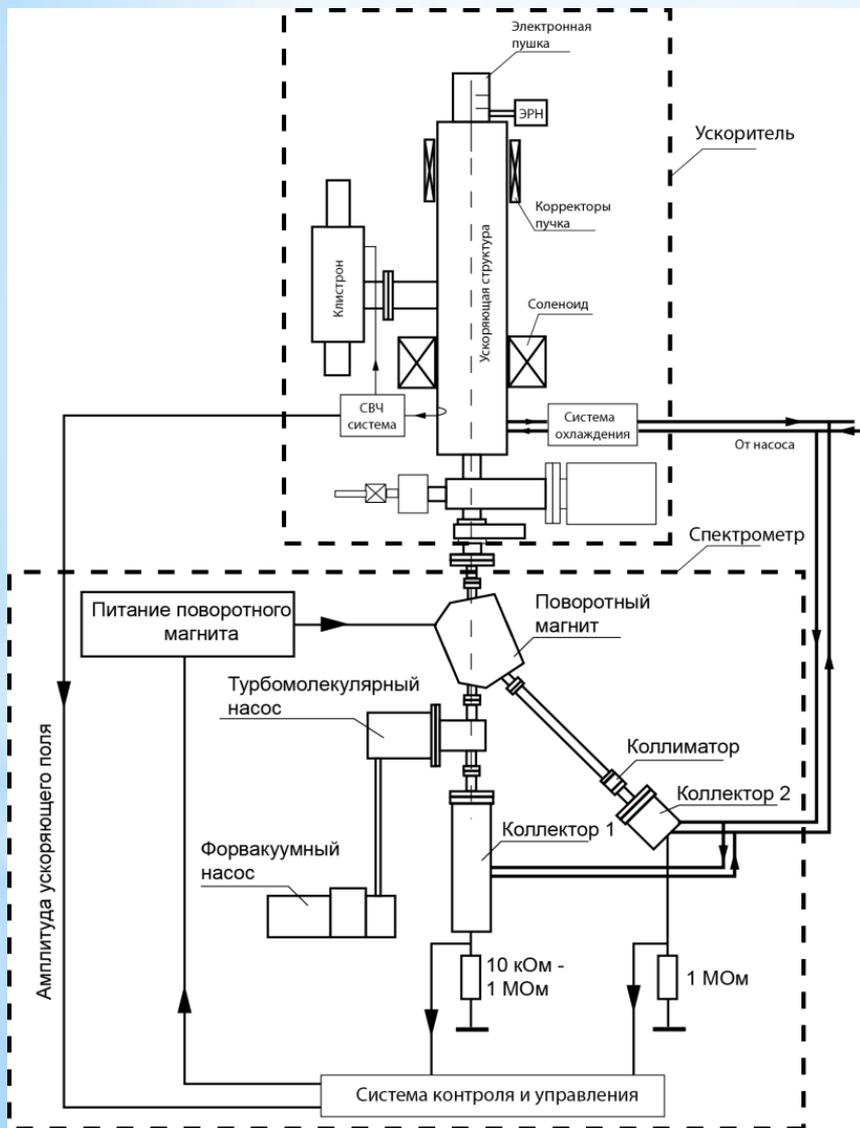


# Ускоритель непрерывного действия с энергией пучка 1 МэВ и максимальной мощностью пучка 25 кВт.

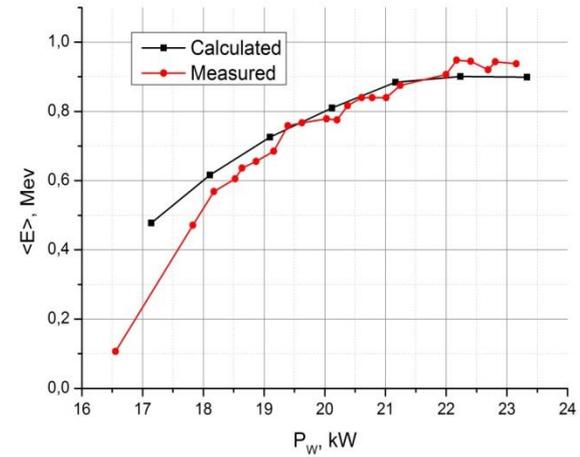
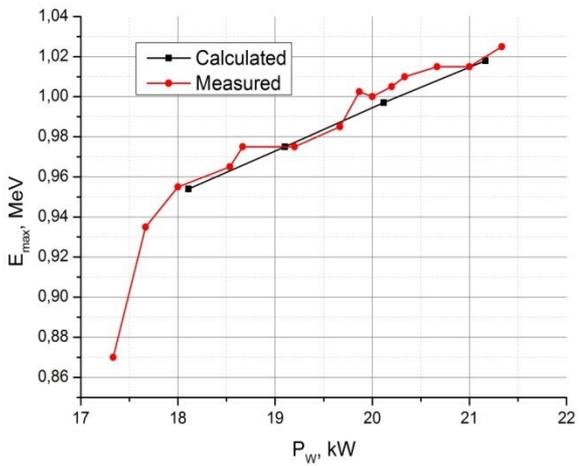
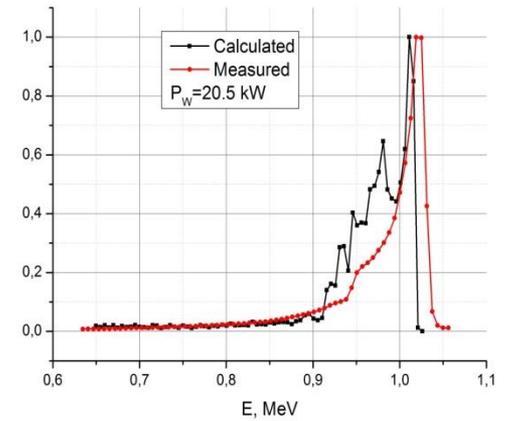
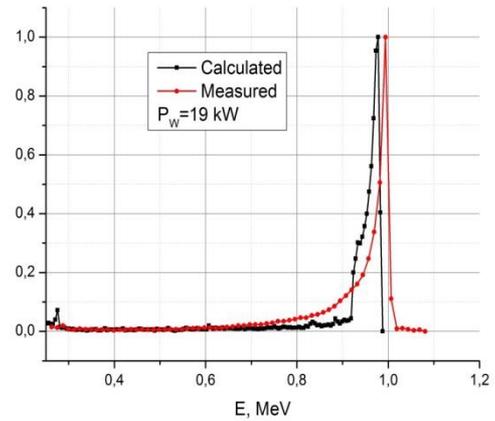
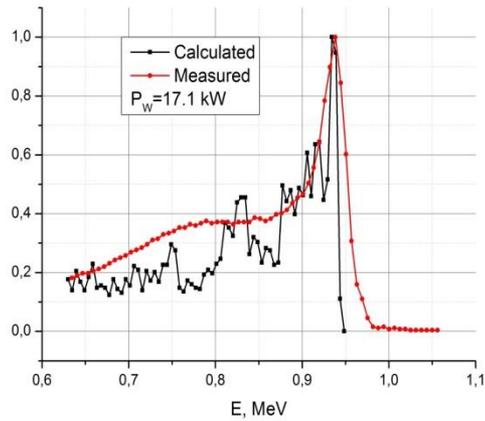
Энергия пучка	1 МэВ
Ток пучка	0-25 мА
Максимальная мощность пучка	25 кВт
Напряжение питания клистрона и пушки	15 кВ
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность клистрона	50 кВт
Потребляемая мощность	~75 кВт
КПД	~33%
Габариты	500x1100x1400 мм <sup>3</sup>



# Измерения спектра ускоренного пучка



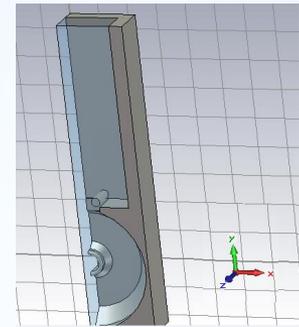
# Результаты измерений спектра



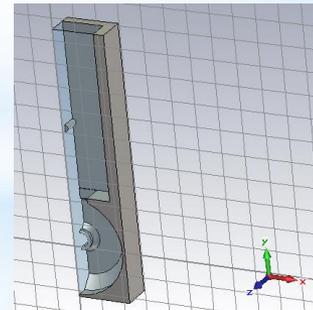
# Система регулировки коэффициента связи

Для согласования клистрона и ускоряющей структуры в широком диапазоне нагрузки током пучка разрабатывается система регулировки коэффициента связи  $\beta$ .  $\beta = 1 + \frac{P_b}{P_w}$ ,  $P_b$  - мощность пучка,  $P_w$  - мощность СВЧ потерь в стенках структуры.

1. Конфигурация с 4 плунжерами вблизи диафрагмы узла ввода мощности

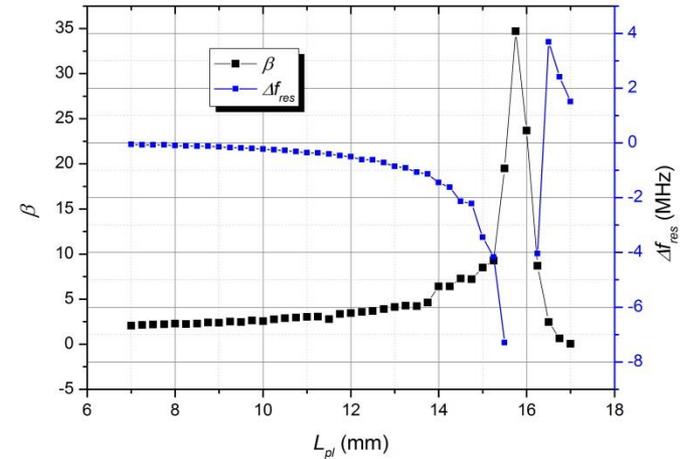


2. Конфигурация с 2 плунжерами друг напротив друга по центру широкой стенки волновода

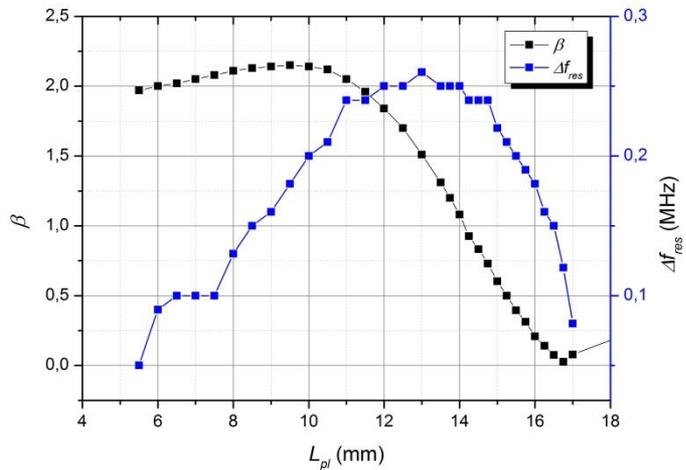


3. Конфигурация с одним плунжером по центру широкой стенки волновода

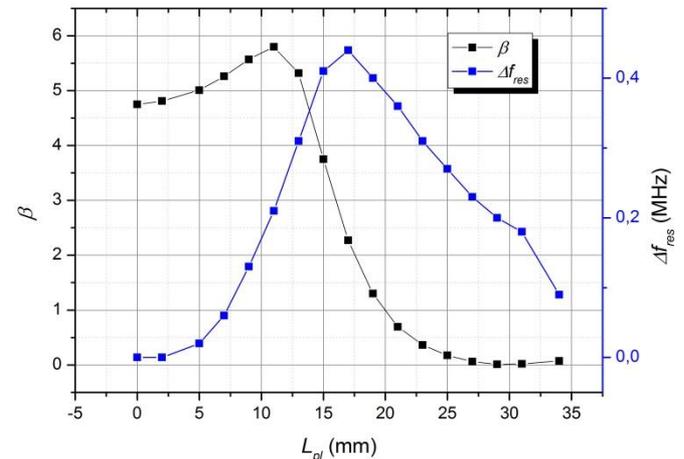
# Система регулировки коэффициента связи. Измерения тестового макета



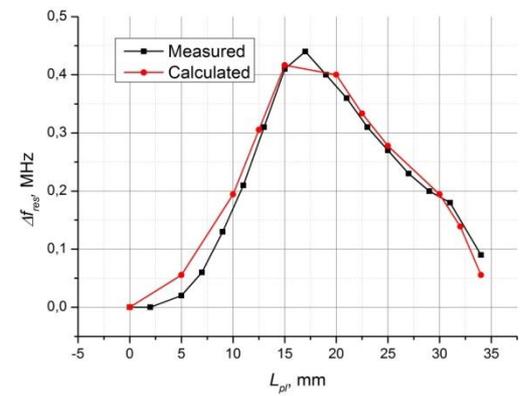
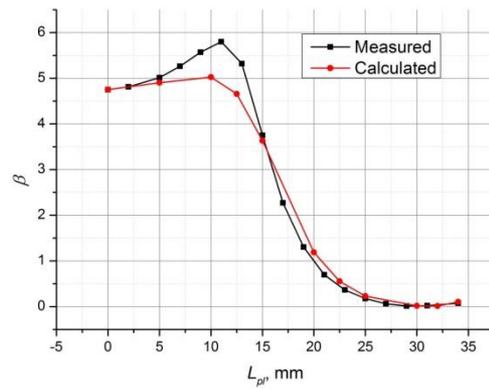
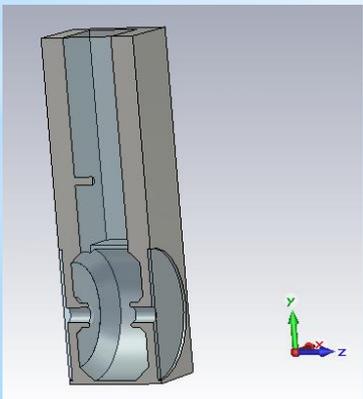
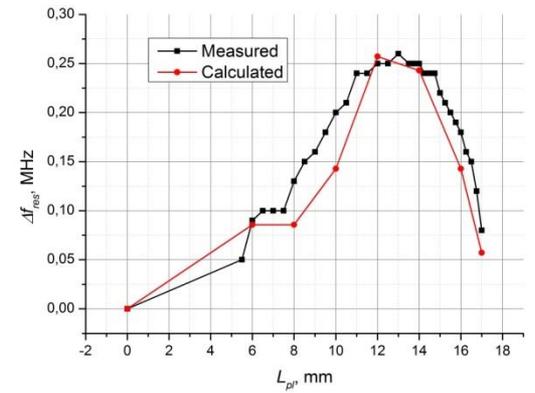
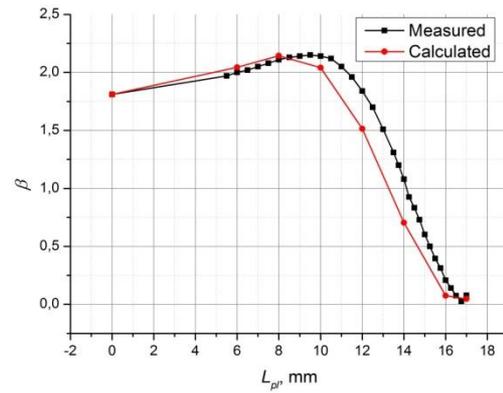
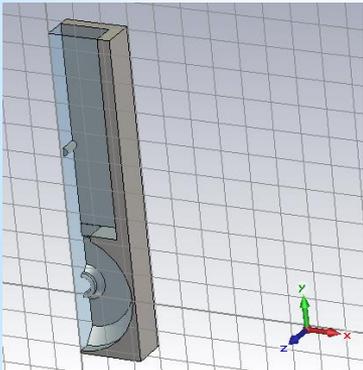
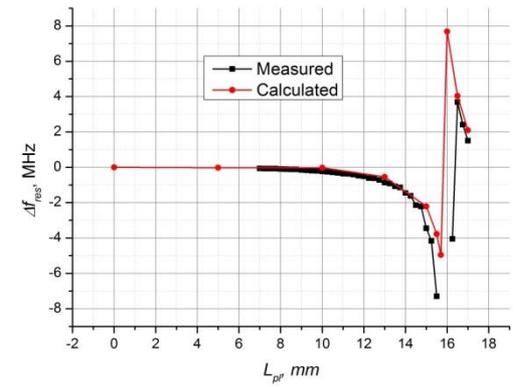
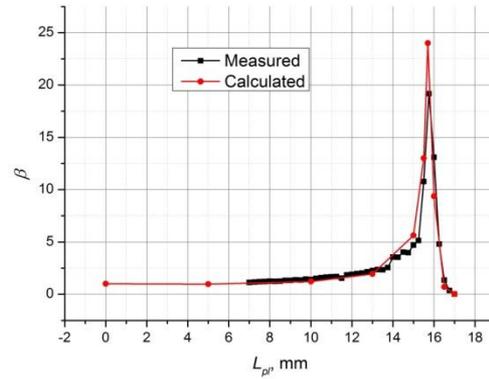
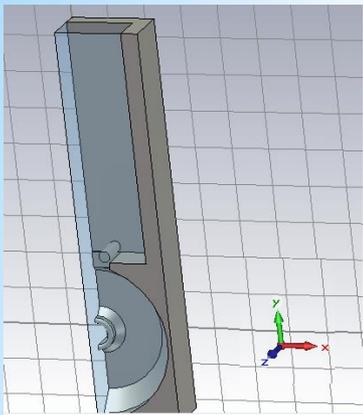
4 плунжера



2 плунжера

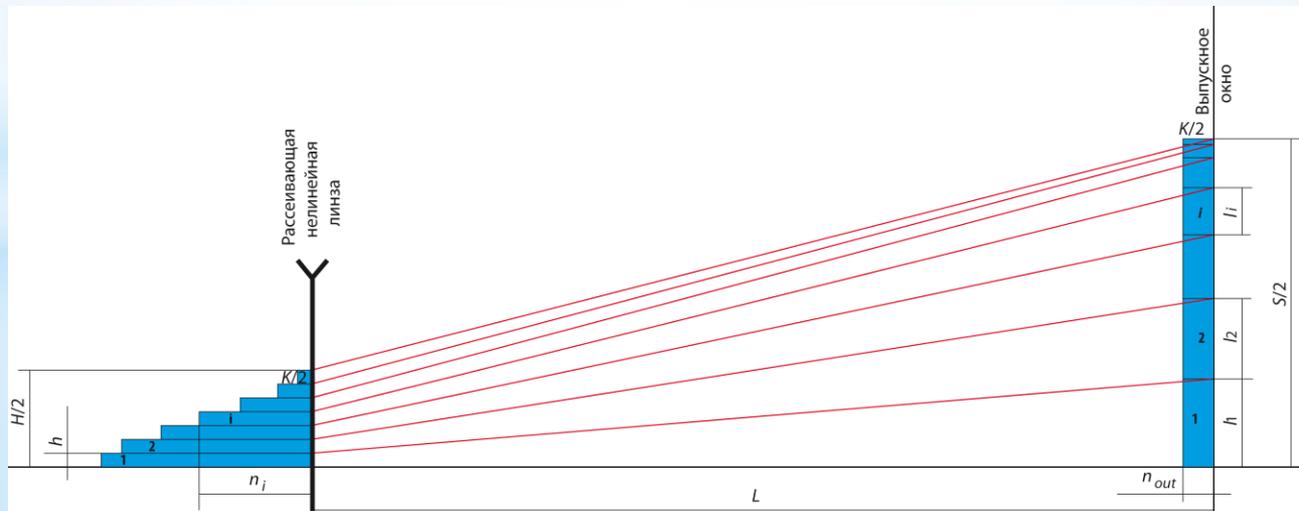


1 плунжер

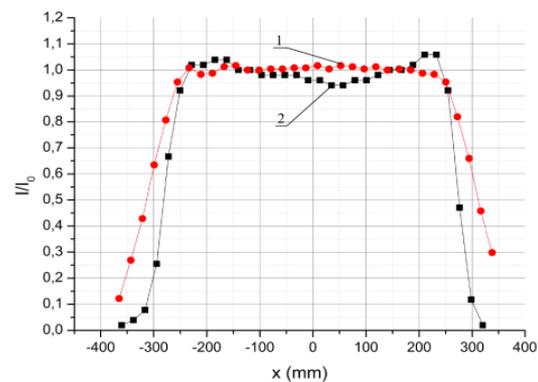
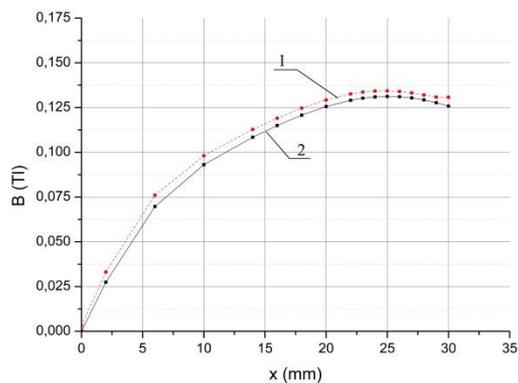
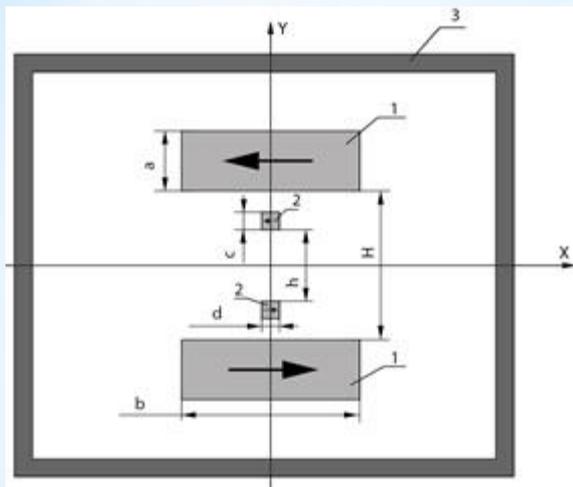


# Система формирования поля облучения

Нами была разработана система на основе магнитных редкоземельных материалов, формирующая пучок с равномерным распределением тока на выпускном окне камеры развертки в направлении, перпендикулярном движению облучаемой продукции. Такая система уменьшает пиковые дозовые нагрузки на облучаемую продукцию, а в случае импульсных ускорителей еще и значительно упрощает настройку процесса облучения, так как в данном случае нет необходимости тщательно контролировать соотношение скорости развертки, скорости подачи материала и частоты следования импульсов.



# Система формирования поля облучения



1 - сканирующий электромагнит  
2 - система на основе редкоземельных магнитных материалов

# Основные результаты диссертационной работы

1. Показано, что линейные ускорители электронов непрерывного действия, работающие в диапазоне длин волн 10 - 20 см, могут использоваться в качестве нового типа промышленных среднеэнергетичных (0.5-5МэВ) ускорителей и составить реальную конкуренцию доминирующим в данной области энергий ускорителям прямого действия, рециркуляционным ускорителям типа «Родотрон» и импульсным резонаторным ускорителям. До выполнения настоящей работы линейные ускорители электронов непрерывного действия рассматривались лишь в качестве экспериментальных установок для лабораторных исследований.
2. Создан действующий прототип линейного ускорителя электронов непрерывного действия для прикладных целей на энергию 1 МэВ и максимальную мощность пучка 25 кВт, в том числе:
  - проведена оптимизация геометрии ускоряющей структуры
  - проведены расчеты трехмерной динамики пучка в электронной пушке и ускоряющей структуре, системы высокочастотного питания
  - проведены измерения и настройка электродинамических характеристик ускоряющей структуры
  - разработана система контроля и управления ускорителя, позволяющая использовать его в качестве промышленной установки
  - разработана методика измерения параметров ускоренного пучка
  - измерены параметры пучка ускорителя, демонстрирующие хорошее согласие с расчетными данными

# Основные результаты диссертационной работы

3. Разработана концепция, проведены расчеты и экспериментальная проверка нового принципа формирования поля излучения для промышленных ускорителей, позволяющего создавать равномерное распределение заряда шириной до 1 м на длине около 1 м с помощью нелинейной квадрупольной линзы, основанной на редкоземельных постоянных магнитах. Разработанный принцип позволяет на порядки снизить пиковую дозовую нагрузку на облучаемую продукцию и значительно упростить процесс планирования облучения и настройки параметров режима облучения для заданных характеристик продукции.

4. Разработан метод оперативного регулирования коэффициента связи питающего волновода с ускоряющей структурой со стоячей волной, который применим как для ускорителей непрерывного действия, так и для импульсных ускорителей. Разработанный метод впервые обеспечивает возможность регулирования в широких пределах тока ускоренного пучка ускорителей со стоячей волной, сохраняя минимальный уровень отраженной СВЧ энергии, что предотвращает опасность разрушения вакуумного СВЧ окна, увеличивает КПД ускорителя и позволяет использовать один и тот же ускоритель для решения разнообразных прикладных задач.

**Спасибо за внимание!**