

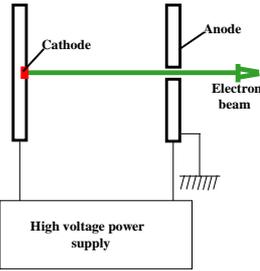
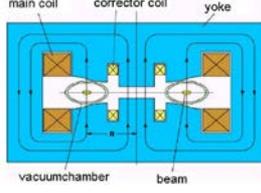
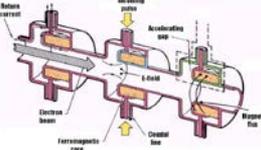
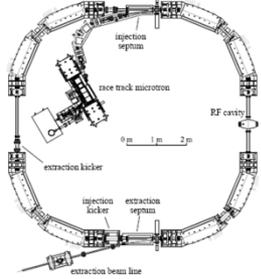
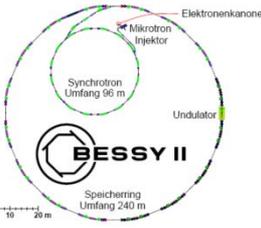
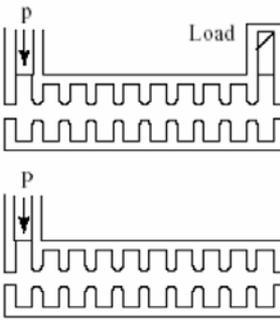
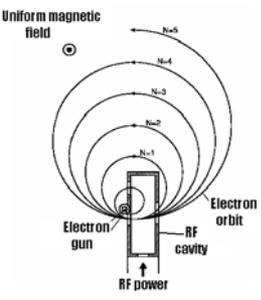
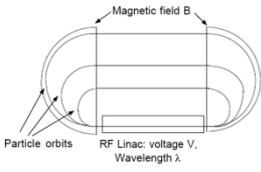
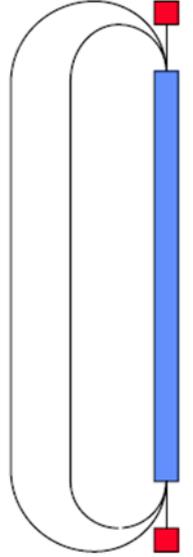
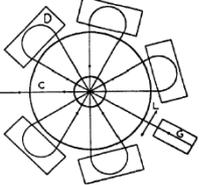
Новое поколение ускорителей электронов НИИЯФ МГУ

В.И. Шведунов

НИИ ядерной физики МГУ имени М.В. Ломоносова

28 мая 2013

Основные типы ускорителей электронов были предложены, их принципы проверены к началу 50-х годов 20 в.

Ускорители прямого действия	Бетатроны	Синхротроны и накопители	Линейные СВЧ ускорители	Микротрон, разрезной микротрон	Рециркуляционные ускорители
  	   	  	  	  	 

Некоторые применения электронных ускорителей

Применение	Область энергий	Важные параметры	Количество
Фундаментальные исследования	5 МэВ – 140 ГэВ → 500 ГэВ → → 3 ТэВ →	Энергия, светимость, яркость, скважность, монохроматичность и др.	~ 100
Источники синхротронного излучения	0.3 – 8 ГэВ	Накопленный ток, время жизни пучка, яркость, спектр излучения	~50-70
Медицина	4 МэВ – 50 МэВ	Надежность, контроль радиационного поля	~7000
Технологические процессы в промышленности	0.1 МэВ – 10 МэВ	Надежность, средняя мощность, эффективность	~1000 - 2000
Стерилизация, дезинсекция, очистка воды, и т.п.	5 МэВ – 10 МэВ	Надежность, средняя мощность, эффективность	~200-300
Досмотровые комплексы, дефектоскопия	2.5 МэВ– 10 МэВ	Надежность, параметры радиационного поля	~500

Производители электронных ускорителей

Компания	Тип ускорителей	Назначение
Varian Medical Systems Inc. (США)	Линейные ускорители 3-25 МэВ	Лучевая терапия, досмотровые комплексы, дефектоскопы
Elekta (Швеция)	Линейные ускорители 3-25 МэВ	Лучевая терапия
Ion Beam Applications (IBA) (Бельгия)	Rhodotron, Dynamitron, до 10 МэВ, до 1 МВт	Стерилизация, радиационные технологии в промышленности
Siemens (Германия)	Линейные ускорители 3-25 МэВ	Лучевая терапия, досмотровые комплексы, дефектоскопы
Nuctech (Китай)	Линейные ускорители 3-25 МэВ	Лучевая терапия, досмотровые комплексы, дефектоскопы
Mitsubishi Heavy Industries (Япония)	Линейные ускорители	Научные проекты, стерилизация, радиационные технологии в промышленности
Nissin High Voltage (Япония)	Ускорители прямого действия 0.4- 3 МэВ	Радиационные технологии в промышленности
Mevex (Канада)	Линейные ускорители 3-35 МэВ	Радиационные технологии в промышленности
EB TECH Co., Ltd. (Южная Корея)	Ускорители прямого действия, линейные ускорители 3-25 МэВ	Лучевая терапия, досмотровые комплексы, дефектоскопы
НИИЭФА им. Ефремова	Ускорители прямого действия, линейные ускорители 3-25 МэВ	Лучевая терапия, досмотровые комплексы, дефектоскопы, радиационные технологии в промышленности
ИЯФ им. Г.И. Будкера	Ускорители прямого действия, ВЧ ускорители 0.4-5 МэВ	Стерилизация, радиационные технологии в промышленности

Этапы разработки электронных ускорителей в НИИЯФ МГУ

1983-1992 гг. – проект разрезного микротрона непрерывного действия

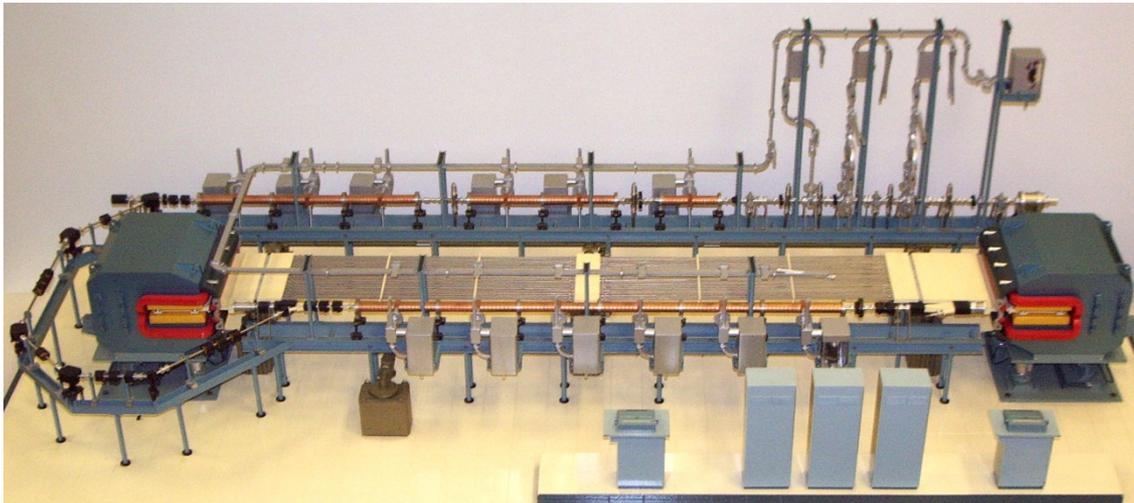
1993-2002 гг. – разработка компактных ускорителей электронов непрерывного действия прикладного назначения, разработка импульсных разрезных микротронов в сотрудничестве с учеными США, Германии

2003-2012 гг. – прототипы и предсерийные образцы импульсных разрезных микротронов и линейных ускорителей для систем безопасности, дефектоскопии, стерилизации в сотрудничестве с Российскими организациями

2013 - гг. – продолжение разработок новых ускорителей, участие в производстве ускорителей прикладного назначения

РАЗРЕЗНОЙ МИКРОТРОН НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 175 МэВ

1983-1992 гг.



Энергия инъекции	6 MeV
Прирост энергии	6 MeV
Макс. энергия	175 MeV
Средний ток	100 μ A
Рабочая частота	2450 MHz
Магнитное поле	1.027 T
Мощность клистрона	22 kW
Число клистронов	12+1

Сотрудничество с НПО "Торий", НПО "Исток", ФИАН, МИФИ, МРТИ, НИИЭФА, ОИЯИ, ЕрФИ, СГУ

В 1992-1995 гг. инжектор разрезного микротрона использовался для экспериментов по ядерной резонансной флюоресценции

Итоги 1-го этапа

Получены, созданы, освоены программы численного моделирования ускоряющих структур, магнитных систем, оптики и динамики пучка. Выполнены первые трехмерные расчеты.

Получен опыт разработки ускоряющих структур, магнитных систем, систем СВЧ питания, систем диагностики пучка, вакуумных систем, систем охлаждения, цифровых системы контроля и управления.

Получен опыт работы с ускоряющими структурами в непрерывном режиме, обнаружен нелинейный эффект при работе ускоряющих структур в условиях высоких тепловых нагрузок.

Получен опыт работы с ускоренным пучком электронов.

Защищены три кандидатские и одна докторская диссертации, выполнено большое число дипломных работ.

Этапы разработки электронных ускорителей в НИИЯФ МГУ

1983-1992 гг. – проект разрезного микротрона непрерывного действия

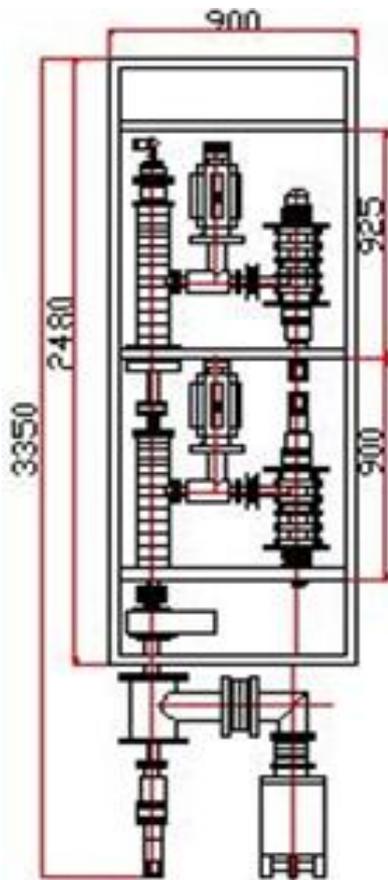
1993-2002 гг. – разработка компактных ускорителей электронов непрерывного действия прикладного назначения, разработка импульсных разрезных микротронов в сотрудничестве с учеными США, Германии

2003-2012 гг. – прототипы и предсерийные образцы импульсных разрезных микротронов и линейных ускорителей для систем безопасности, дефектоскопии в сотрудничестве с Российскими организациями

2013 - гг. – продолжение разработок новых ускорителей, участие в производстве ускорителей прикладного назначения

КОМПАКТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 1.2 МэВ и МОЩНОСТЬ ПУЧКА 60 кВт

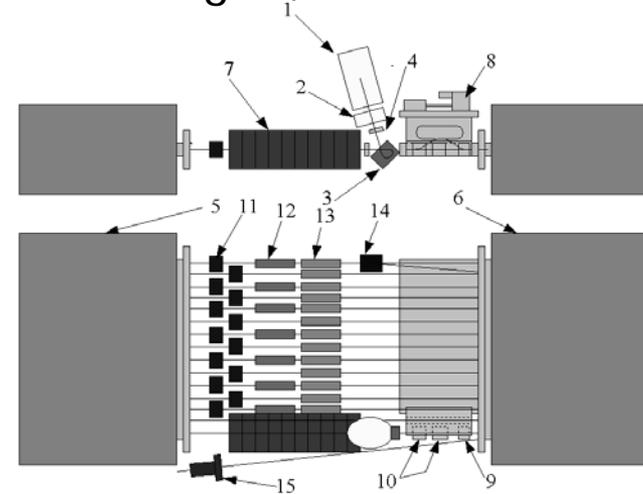
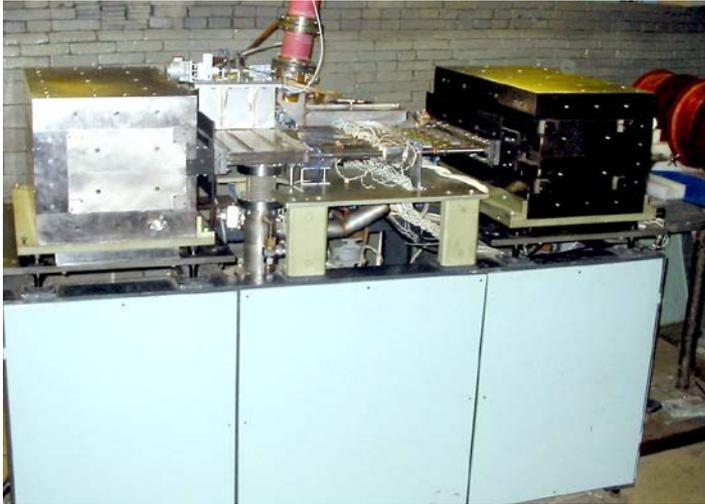
Совместно с World Physics Technologies, США



Энергия пучка	1.2 МэВ
Ток пучка	0 - 50 мА
Максимальная мощность	60 kW
Напряжение питания клистрона и пушки	15 kV
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность клистрона	50 кВт
Потребляемая мощность	~150 kW
КПД	~40%

ИМПУЛЬСНЫЙ РАЗРЕЗНОЙ МИКРОТРОН НА ЭНЕРГИЮ 70 МэВ

Совместно с World Physics Technologies, США



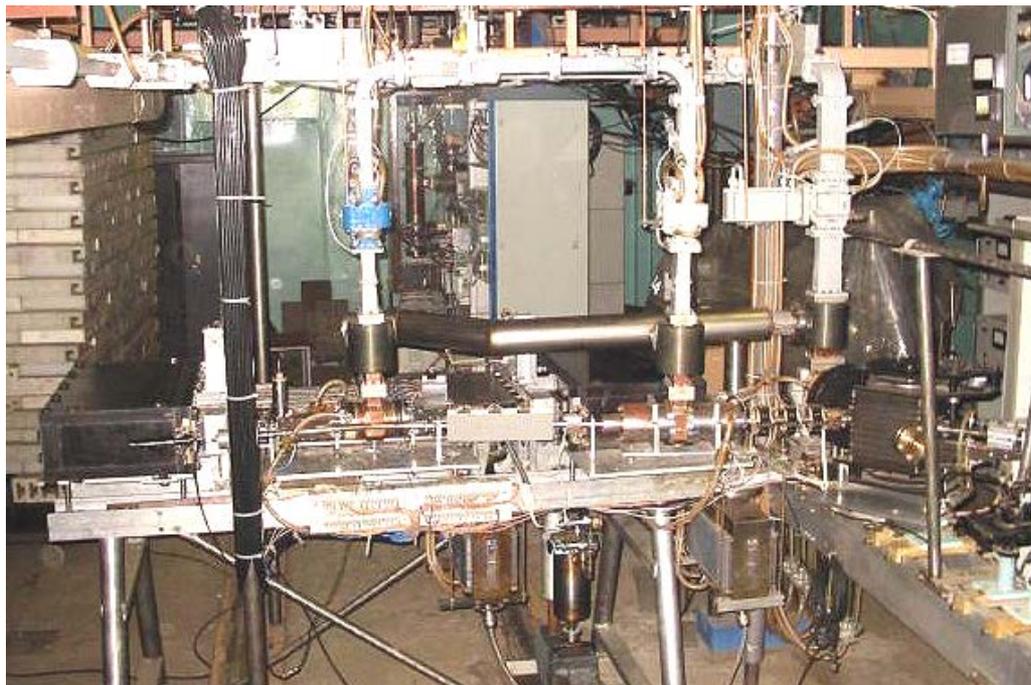
Особенности:

- Большие поворотные магниты с уровнем поля ~ 1 Т на основе редкоземельных магнитов (РЗМ)
- Прямоугольная ускоряющая структура с высокочастотной квадрупольной фокусировкой
- Устройство регулирования длины первой орбиты
- Компактные квадрупольные триплеты на основе РЗМ
- Автоколебательная система СВЧ питания

Энергия инжекции	48 кэВ
Прирост энергии/оборот	4.8 МэВ
Число орбит	14
Энергия на выходе	14.8 - 68.3 МэВ
Ток пучка	40 - 5 нА
Кратность	1λ/орбиту
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Уровень поля	0.963 Т
Размеры	2.2x1.8x0.9 м ³

УСКОРИТЕЛЬ С БОЛЬШОЙ ЯРКОСТЬЮ ПУЧКА НА ЭНЕРГИЮ 35 МэВ

Совместно с World Physics Technologies, США



Энергия инъекции	4.85 МэВ
Прирост энергии	2.43 МэВ
Энергия на выходе	4.85-34.2 МэВ
Нормализованный эмиттанс	10 мм мрад
Продольный эмиттанс	200 кэВ град
Длительность сгустка	5 пс
Частота повторения	1-150 Гц
Заряд сгустка	150 пК
Рабочая частота	2,856 МГц
Импульсная СВЧ мощность	<3 МВт
Поле магнитов	0.486 Т

Участие в работах по ускорителям непрерывного действия МАМІ-В, МАМІ-С (Германия)

Разработка новой системы группирования пучка с увеличенным коэффициентом захвата.

Оценка предельного заряда сгустков, ускоряемых в разрезном микротроне.

Оценка порогового тока обрыва пучка в двухстороннем микротроне (МАМІ-С).

Расчет роста эмиттанса пучка за счет синхротронного излучения в двухстороннем микротроне (МАМІ-С).

Разработка ускоряющей структуры С-диапазона для двухстороннего микротрона (МАМІ-С).

Изготовление и испытания ускоряющих структур S-диапазона для двухстороннего микротрона (МАМІ-С).

Итоги 2-го этапа

Полностью освоены расчеты ускоряющих структур и магнитных систем с помощью трехмерных программ.

Получен опыт работы с ускоряющими структурами и системами СВЧ питания в импульсном режиме.

Получен опыт создание больших магнитных систем ускорителей с использованием редкоземельного магнитного материала.

Получен опыт создания импульсных разрезных микротронов.

Дальнейшее развитие получили системы контроля и управления.

Создан парк ускорителей с энергией от 0.5 до 70 МэВ, использующийся для фундаментальных и прикладных исследований.

Защищено семь кандидатских диссертаций, выполнено большое число дипломных работ.

Этапы разработки электронных ускорителей в НИИЯФ МГУ

1983-1992 гг. – проект разрезного микротрона непрерывного действия

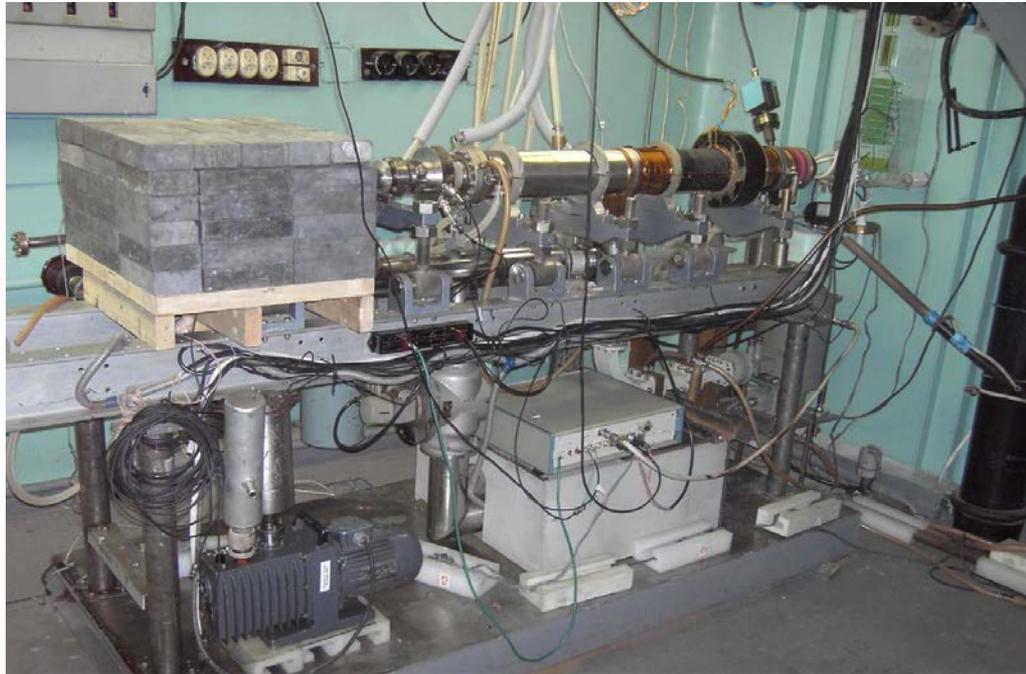
1993-2002 гг. – разработка компактных ускорителей электронов непрерывного действия прикладного назначения, разработка импульсных разрезных микротронов в сотрудничестве с учеными США, Германии

2003-2012 гг. – прототипы и предсерийные образцы импульсных разрезных микротронов и линейных ускорителей для систем безопасности, дефектоскопии, стерилизации в сотрудничестве с Российскими организациями

2013 - гг. – продолжение разработок новых ускорителей, участие в производстве ускорителей прикладного назначения

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЭНЕРГИЮ 10 МэВ

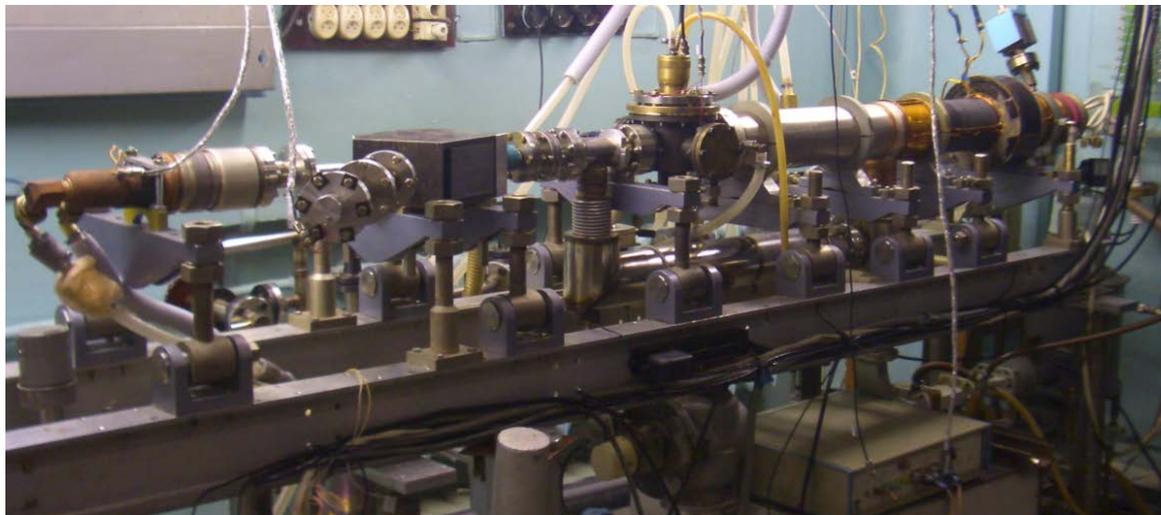
Совместно с ФГУП «НПП «Торий»



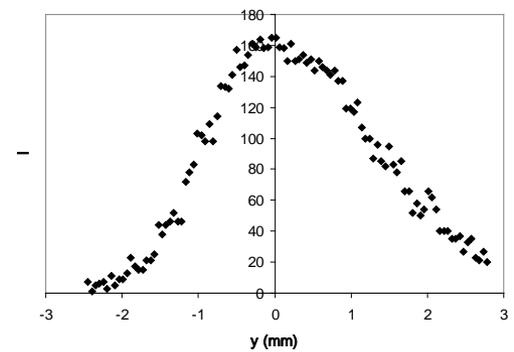
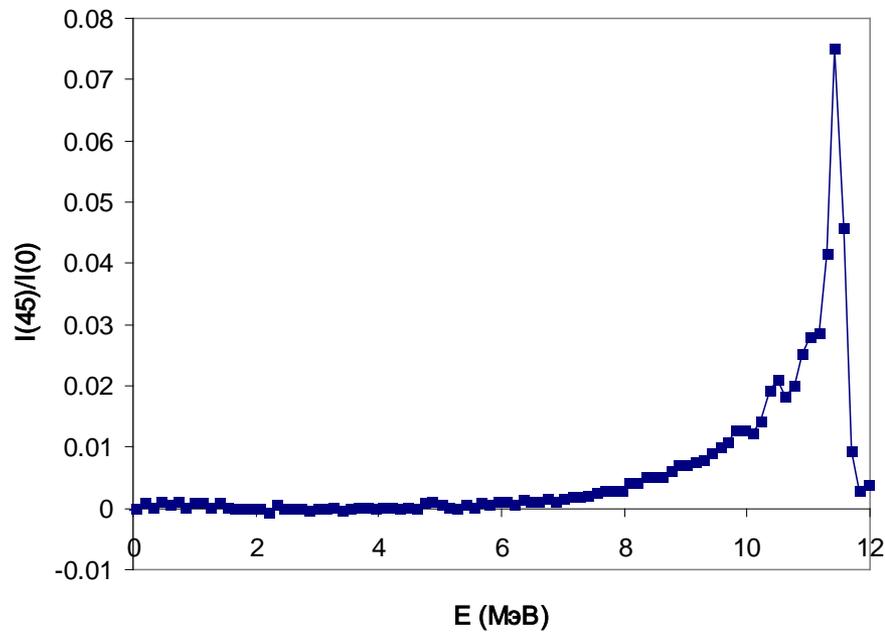
Параметры:

Энергия пучка	10 МэВ
Импульсный ток	430 мА
Средняя мощность пучка	15 кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	25 кВт
Полный КПД	20%

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЭНЕРГИЮ 10 МэВ

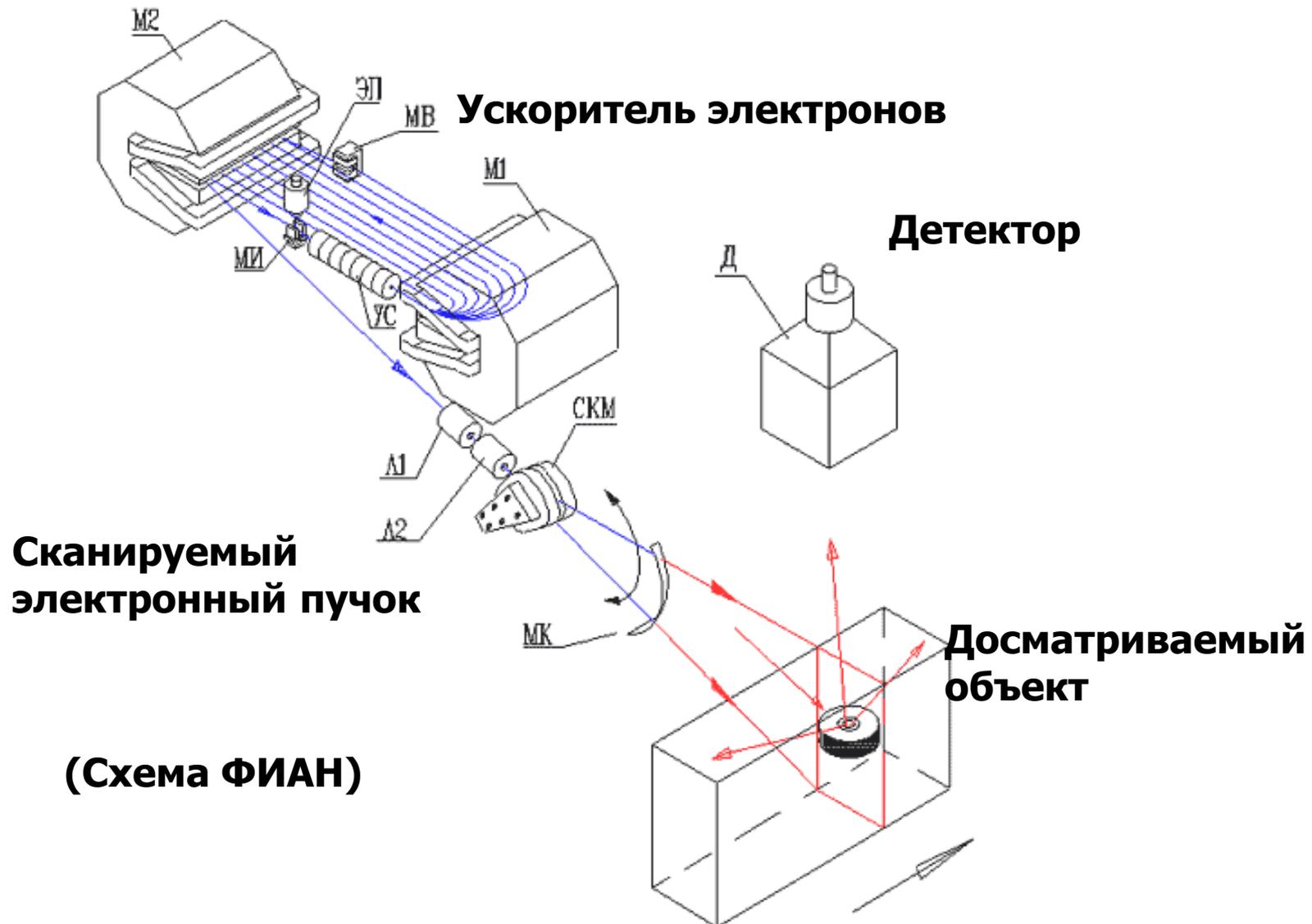


Энергетический спектр, изображение и профиль пучка

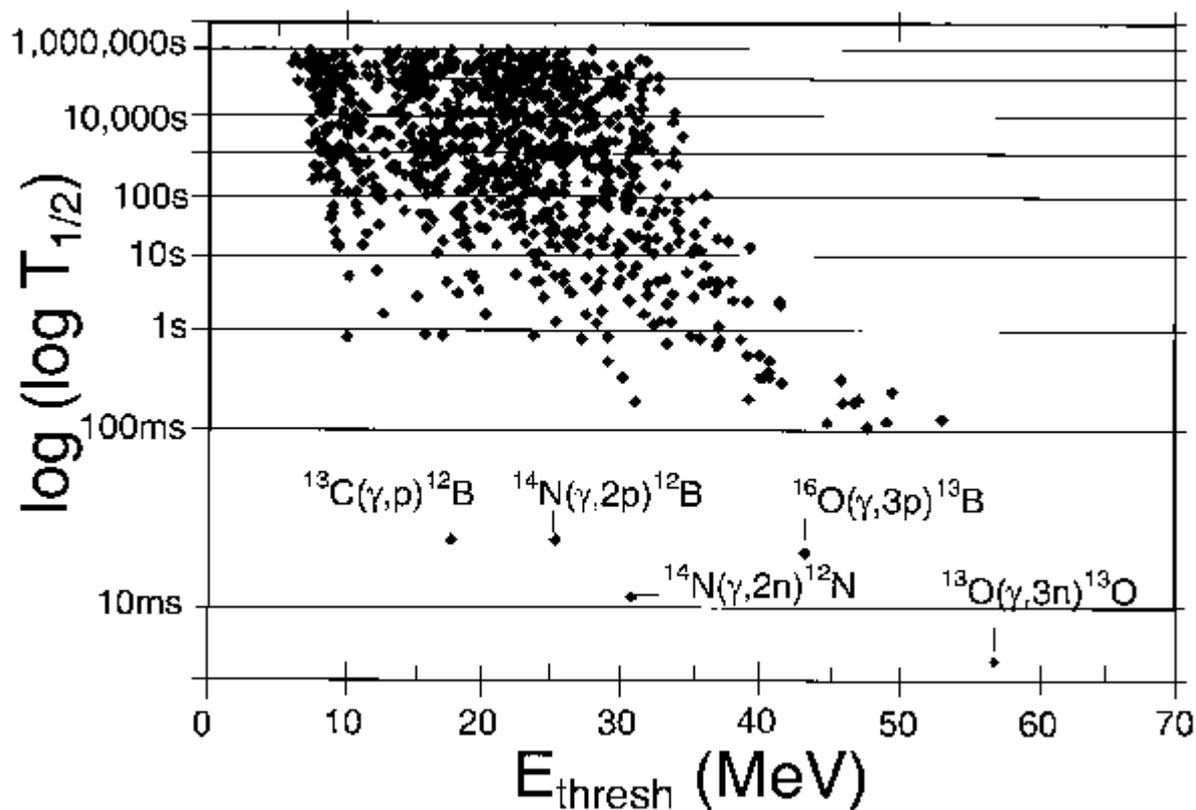


Детектирование взрывчатых веществ с помощью фотоядерных реакций

Совместно с ФИАН

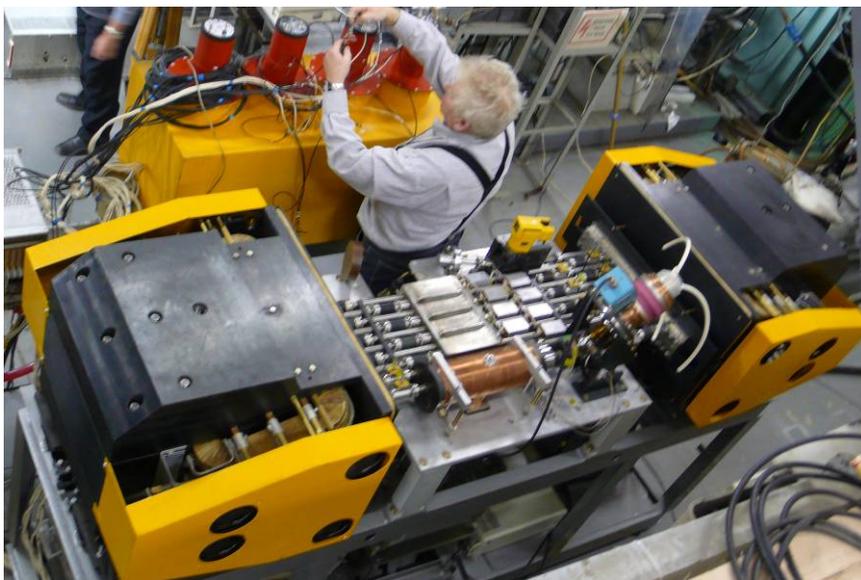


Образование β активных ядер в фотоядерных реакциях на стабильных изотопах с содержанием $>1\%$ в результате вылета трех или меньшего числа нуклонов



ИМПУЛЬСНЫЙ РАЗРЕЗНОЙ МИКРОТРОН НА ЭНЕРГИЮ 55 МэВ

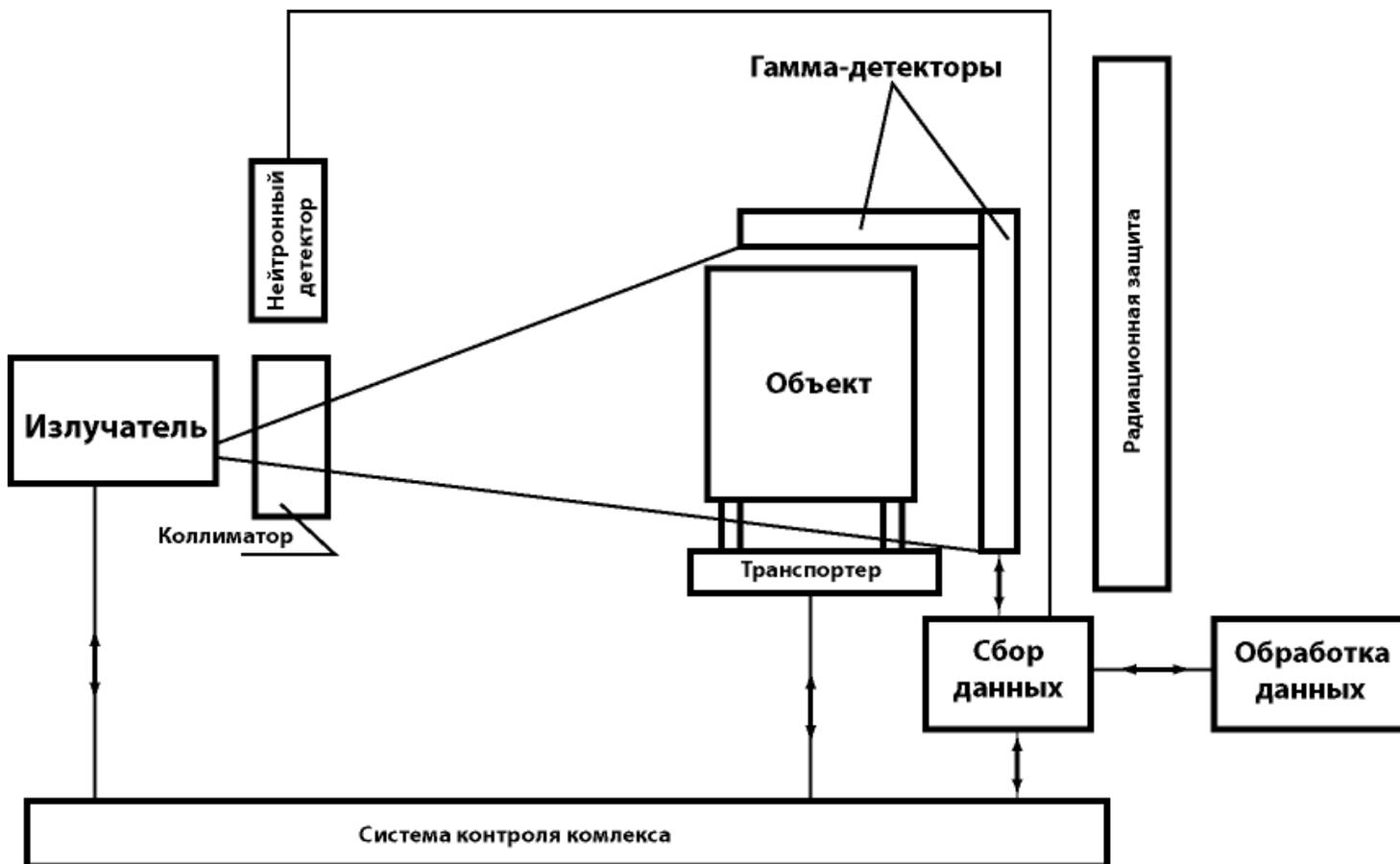
Совместно с ФИАН



Энергия инжекции	50 кэВ
Прирост энергии/оборот	5 МэВ
Число орбит	10
Энергия на выходе	55.6 МэВ
Ток пучка	20 мА
Кратность	1λ/орбиту
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Уровень поля	1.0 Т
Размеры	2.5x1.8x0.9 м ³

Инспекционно-досмотровые комплексы

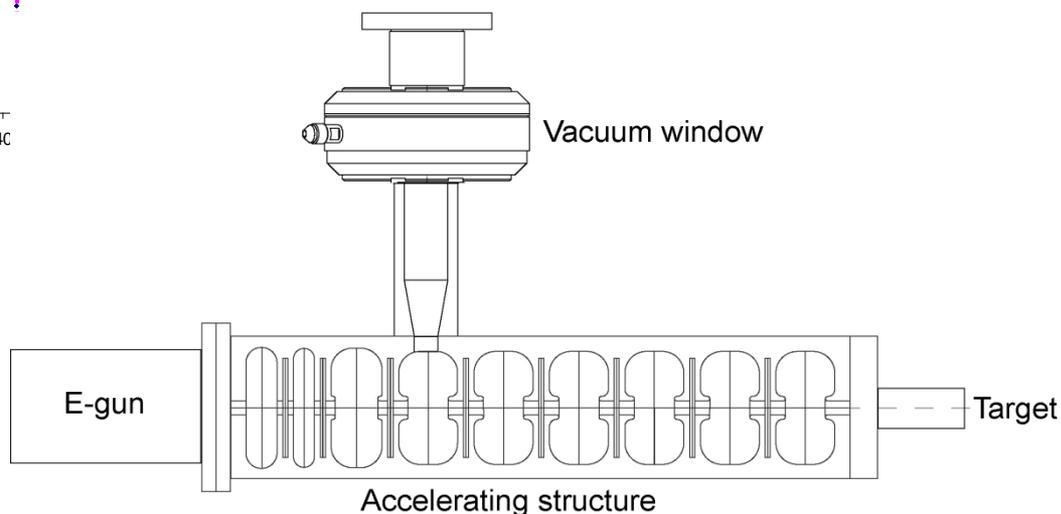
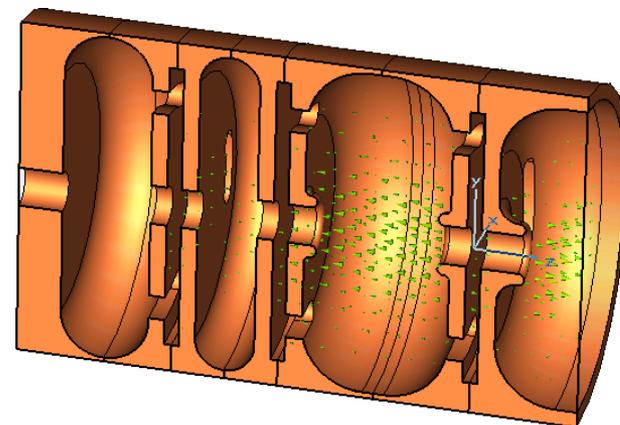
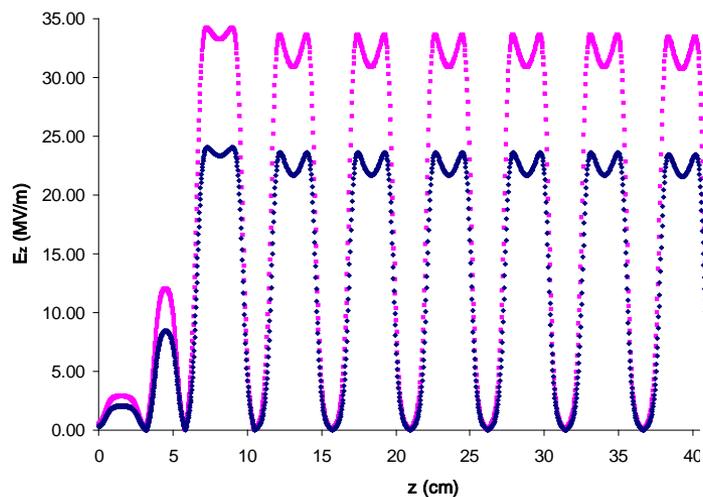
Совместные работы с ФГУП «НПП «Торий», Скантроник Системс и т.д.



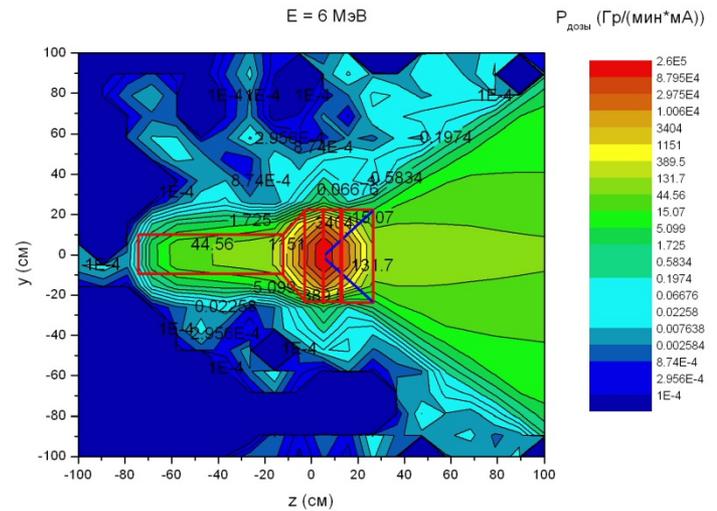
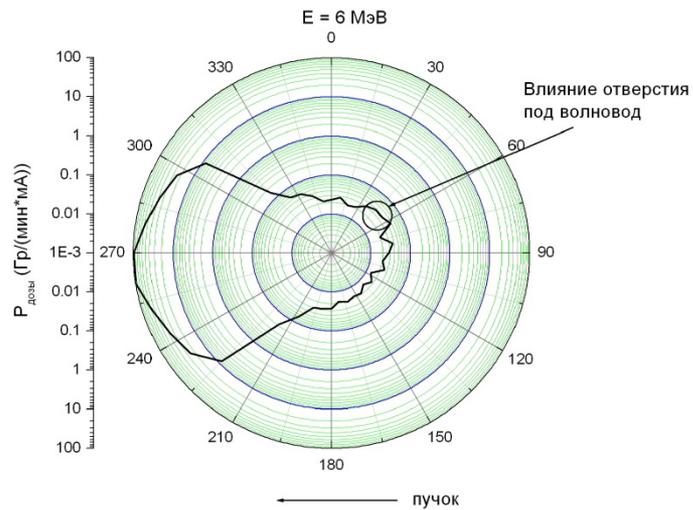
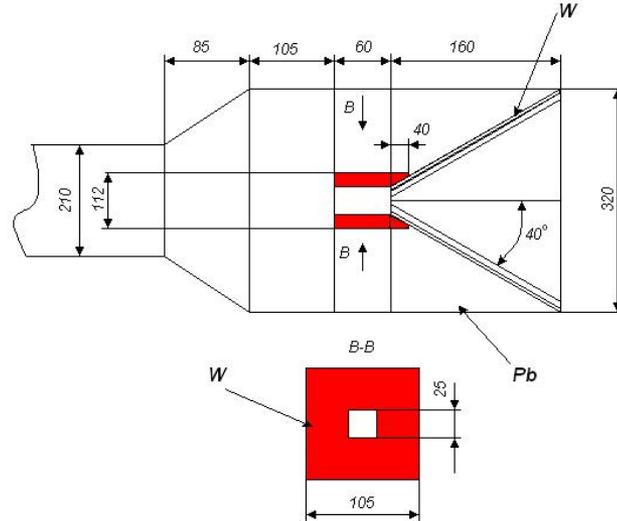
Требования к ускорителю для ИДК

	Параметр	Величина
1.2.1	Значение высокой энергии	6 МэВ ($\pm 5\%$)
1.2.2	Значение низкой энергии	3,5 МэВ ($\pm 5\%$)
1.2.3	Мощность дозы при высокой энергии	0,2 Гр/мин на 1 м ($\pm 10\%$)
1.2.4	Мощность дозы при низкой энергии	0,2 Гр/мин на 1 м ($\pm 10\%$)
1.2.5	Мощность дозы при переключении энергии	0,4 Гр/мин на 1 м ($\pm 10\%$)
1.2.6	Частота повторения при высокой энергии	200 Гц
1.2.7	Частота повторения при низкой энергии	200 Гц
1.2.8	Частота повторения при переключении энергии	2x200 Гц
1.2.9	Диапазон варьирования интервала между импульсами	150 – 2500 мксек
1.2.10	Время задержки сигнала «Запуск» относительно сигнала «Энергия» при переключении энергии	100 мксек
1.2.11	Стабильность высокой энергии	0,5%
1.2.12	Стабильность низкой энергии	0,5%
1.2.13	Стабильность мощности дозы при высокой энергии	2%
1.2.14	Стабильность мощности дозы при низкой энергии	2%
1.2.15	Время выхода излучения на стабильный режим	< 1сек
1.2.16	Время прекращения излучения	< 10 мсек
1.2.17	Размер фокусного пятна	< 2 мм
1.2.18	Симметрия излучения в вертикальной плоскости при $7,5^\circ$	$\pm 5\%$
1.2.19	Вероятность пропуска импульсов	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
1.2.20	Вероятность пропуска двух последовательных импульсов	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
1.2.21	Ослабление мощности дозы локальной радиационной защитой излучателя во всех направлениях кроме рабочей зоны на расстоянии 1 м от корпуса излучателя относительно мощности дозы на оси на расстоянии 1 м вперед от тормозной мишени.	$2 \cdot 10^{-5}$ при 6 МэВ

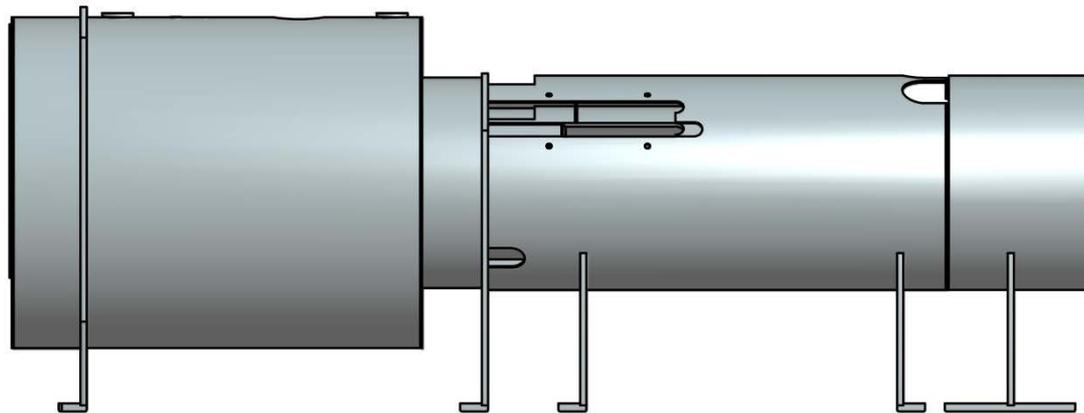
Ускоряющая структура для работы в режиме поимпульсного переключения энергии



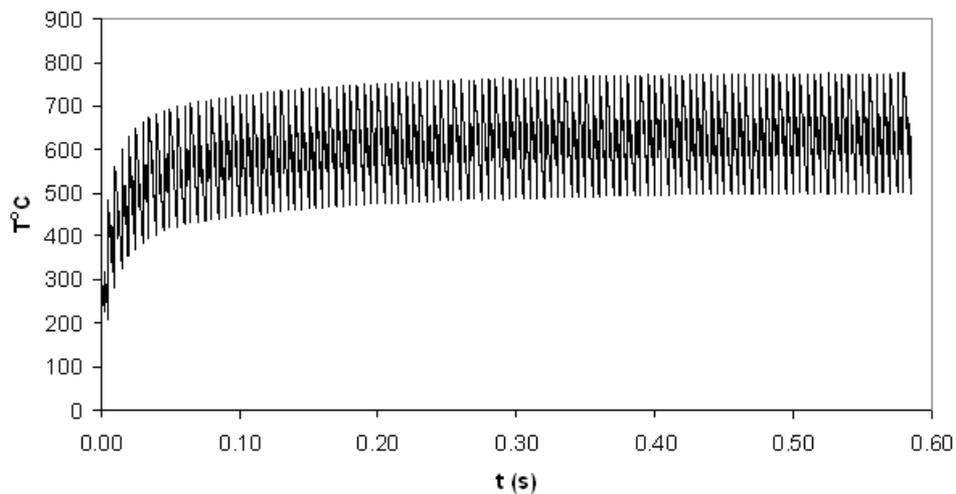
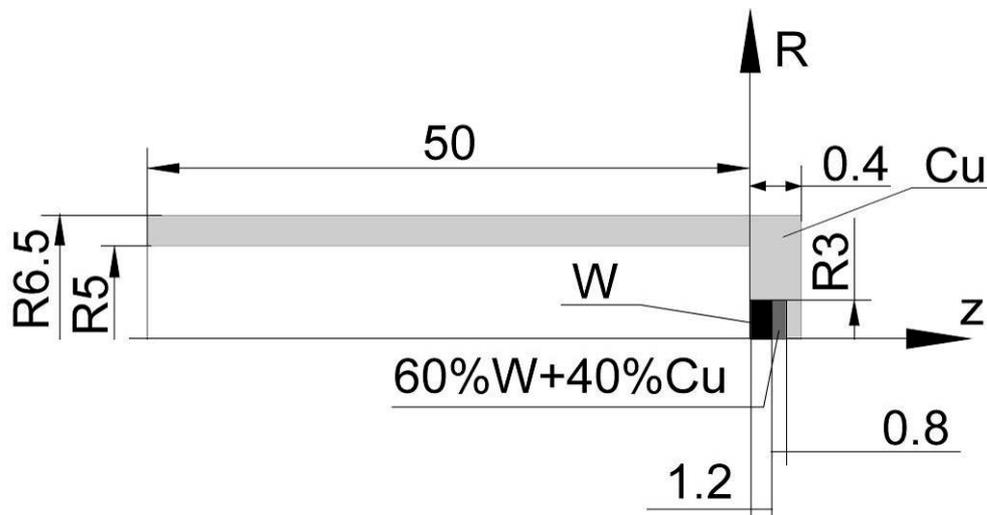
Оптимизация радиационной защиты



Радиационная защита (2×10^{-5})



Оптимизация тормозной мишени



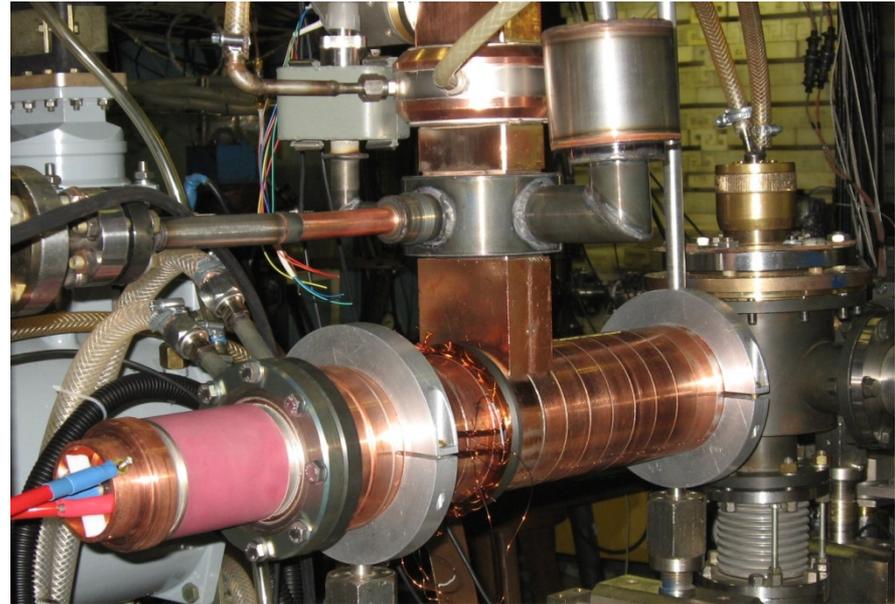
Колебания максимальной температуры тормозной мишени при 400 Гц, 2 Гр/мин при поимпульсном переключении энергии.

Ускоряющая структура

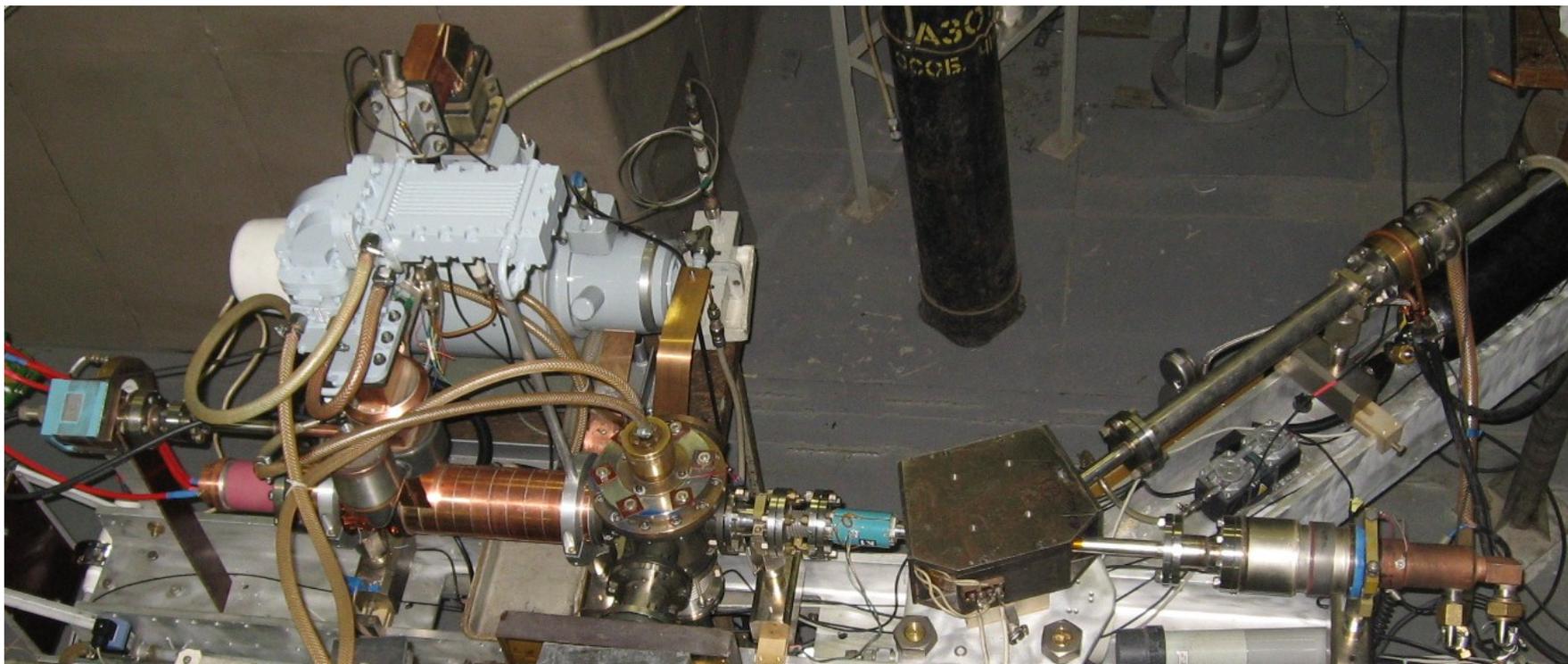
Изготовление



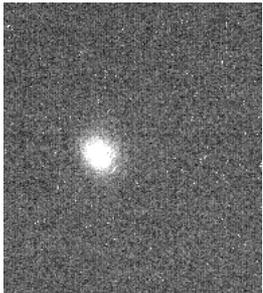
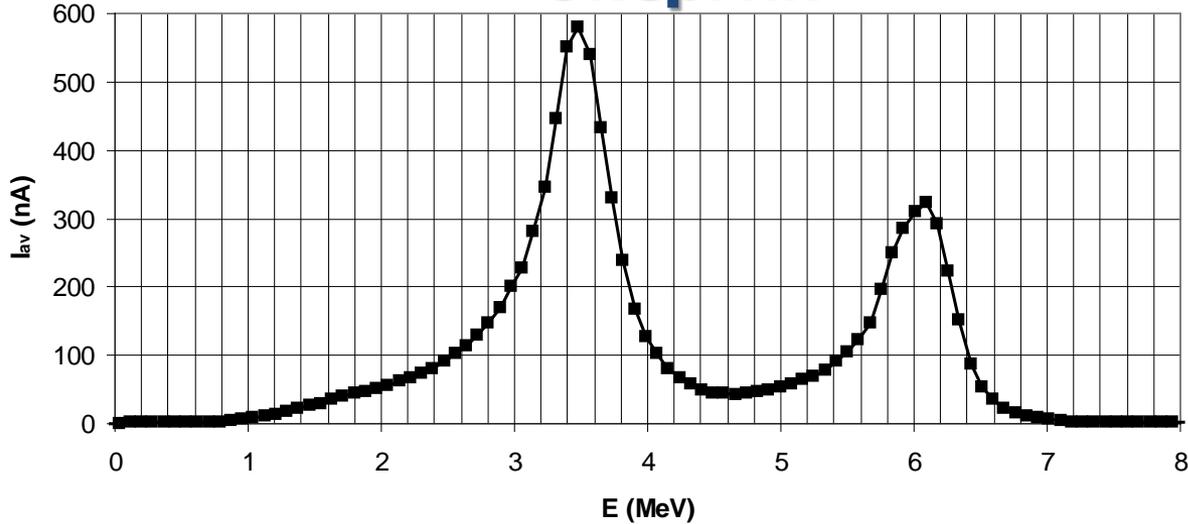
Испытания с пучком



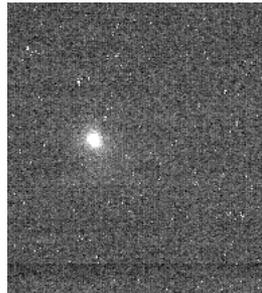
Стенд для измерения параметров пучка



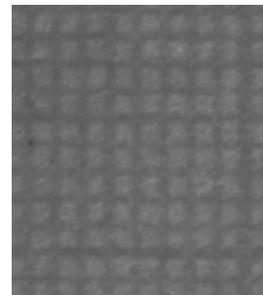
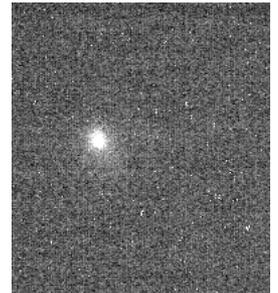
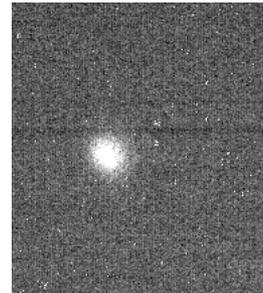
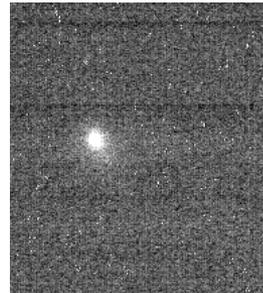
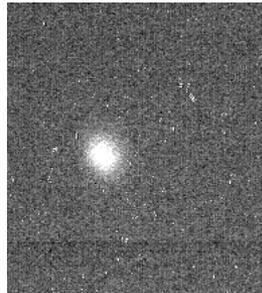
Энергетический спектр в режиме переключения энергии



Низкая



Высокая



Масштаб:
1 квадрат=
1×1 мм

**Поимпульсные изображения
пучка**

Ускоритель электронов для досмотровых комплексов. Вариант 1.

Излучатель



Твердотельный модулятор



Пульт управления

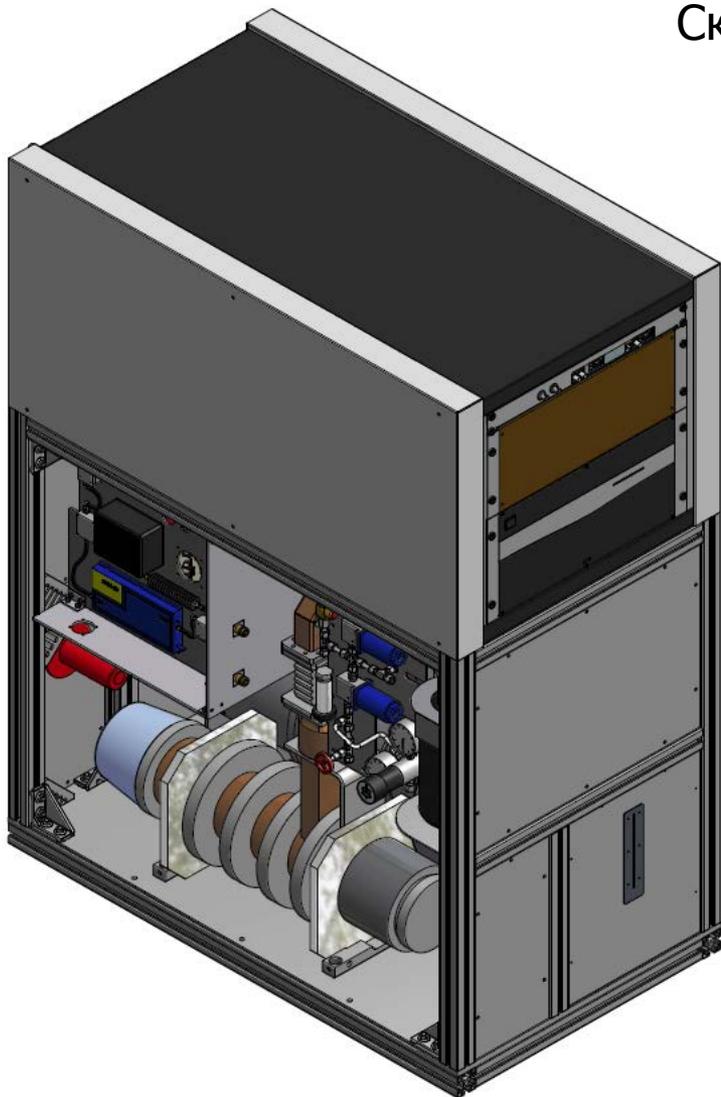


Ускоритель электронов для досмотровых комплексов. Вариант 2.

Скантроник Системс

Технические характеристики

Значение высокой энергии	6 МэВ ($\pm 5\%$)
Значение низкой энергии	3,5 МэВ ($\pm 5\%$)
Мощность дозы при высокой энергии	2,0 Гр/мин на 1 м ($\pm 10\%$)
Мощность дозы при низкой энергии	2,0 Гр/мин на 1 м ($\pm 10\%$)
Мощность дозы при переключении энергии	4,0 Гр/мин на 1 м ($\pm 10\%$)
Частота повторения при высокой энергии	200 Гц
Частота повторения при низкой энергии	200 Гц
Частота повторения при переключении энергии	2x200 Гц
Диапазон варьирования интервала между импульсами	200 - 495 мкс
Стабильность высокой энергии	0,5%
Стабильность низкой энергии	0,5%
Стабильность мощности дозы при высокой энергии	2%
Стабильность мощности дозы при низкой энергии	2%
Время выхода излучения на стабильный режим	< 1 с
Время прекращения излучения	< 10 мс
Размер фокусного пятна	< 2 мм
Вероятность пропуска импульсов	$\leq 5 \times 10^{-3}$
Вероятность пропуска двух последовательных импульсов	$\leq 1 \times 10^{-4}$
Утечка радиации	2×10^{-5} при 6 МэВ
Ширина коллимационной щели	3 мм
Угол раскрытия пучка в верхнем направлении	+33,5°
Угол раскрытия пучка в нижнем направлении	-18,7°
Размеры излучателя + модулятора	1090x640x1460 мм
Вес излучателя + модулятора	< 1500 кг
Размеры панели управления	300x400x180 мм
Вес панели управления	< 10 кг
Размеры чиллера	750x1700x1535 мм
Вес чиллера	250 кг
Электропитание	400 В / 3 фазы / 50 Гц
Потребляемая мощность излучателя и модулятора	13 кВт
Потребляемая мощность чиллера (при прогреве)	8 кВт



Ускоритель электронов для досмотровых комплексов. Вариант 2.

Скантроник Системс



Сравнение с новым (2011 г.) ускорителем SILAC компании Siemens



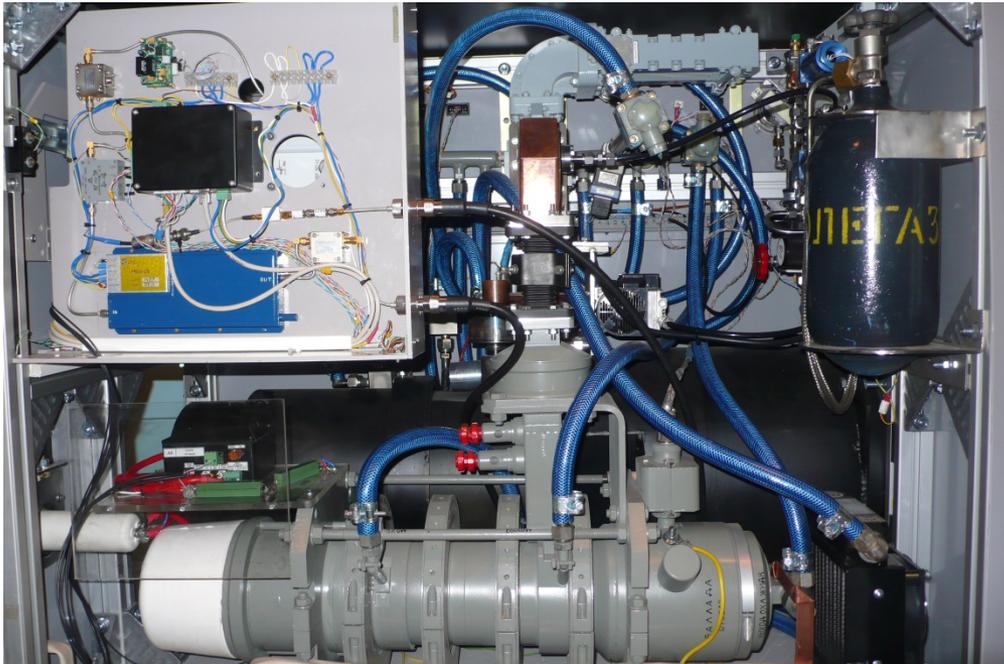
	Siemens	Scantronic
Н×W×L, см	196x101x193	146x64x109
Масса, кг	2600	1200
Утечка радиации	0.1%	0.001%
Макс. мощность дозы, 6 МэВ, ГР/мин	9	15
Макс. частота следования им-сов	300	400

Изображения даны в масштабе



Ускоритель электронов для досмотровых комплексов. Вариант 2.

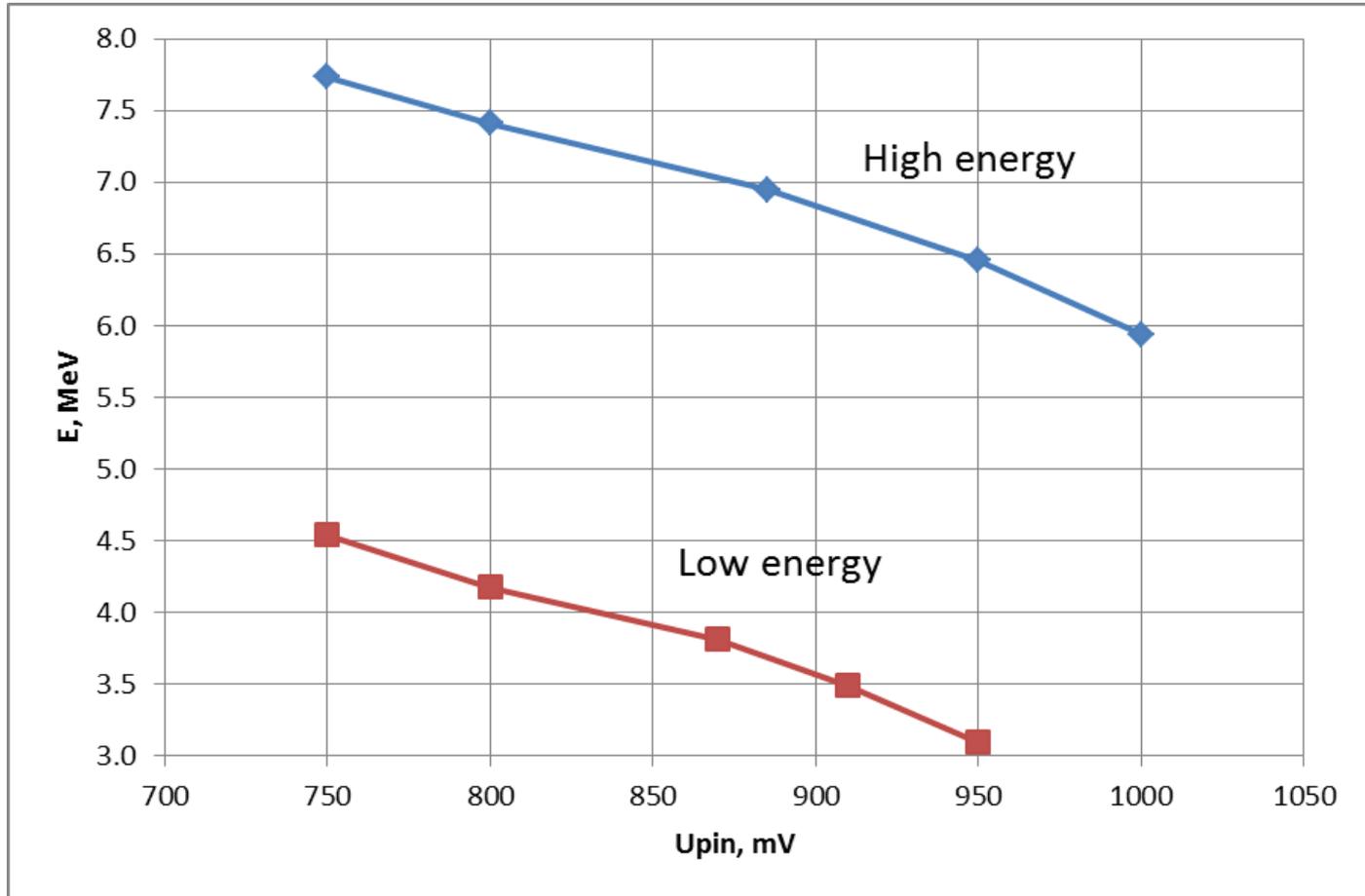
Система СВЧ питания



Система контроля и управления



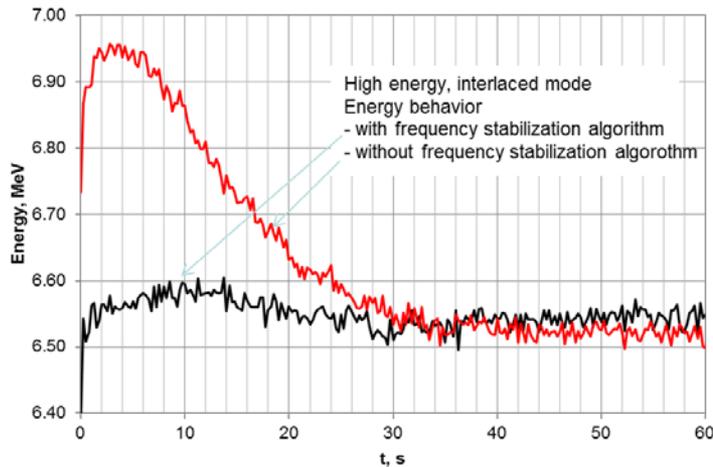
Регулирование энергии



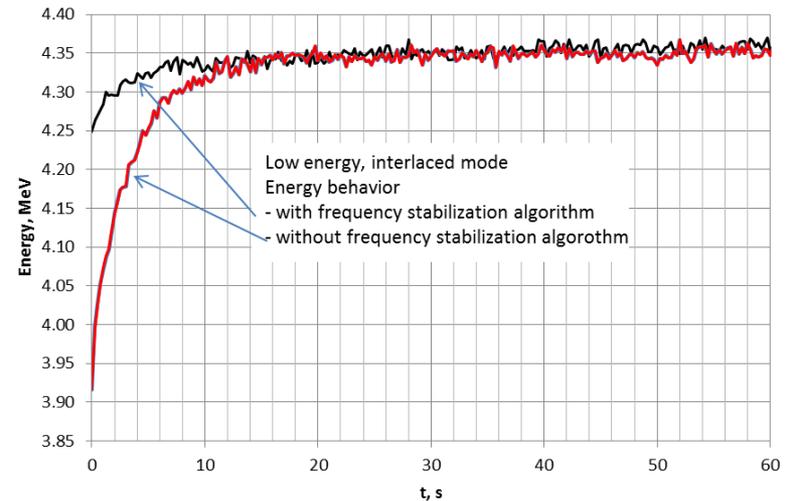
Компенсация дрейфа резонансной частоты ускоряющей структуры вследствие ее нагрева и деформаций

Режим переключения энергии

Высокая энергия



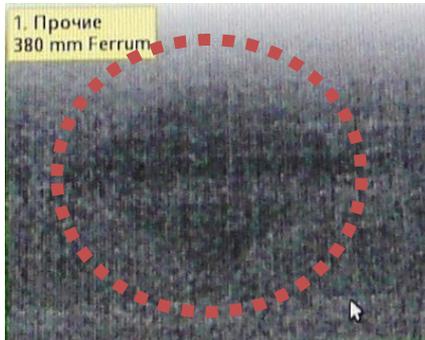
Низкая энергия



Высокая стабильность энергии – одно из главных преимуществ ускорителя – основа высокой разрешающей способности при распознавании материалов

Основные эксплуатационные показатели СТ-6035

(Скантроник Системс, С.А. Огородников)



Графит



Алюминий



Сталь



Свинец



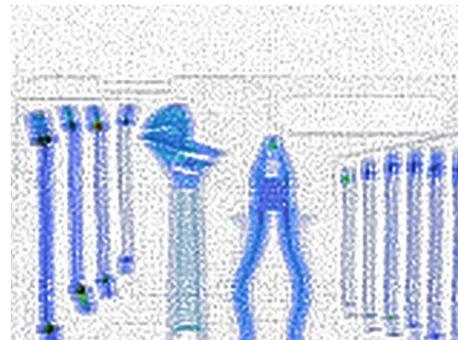
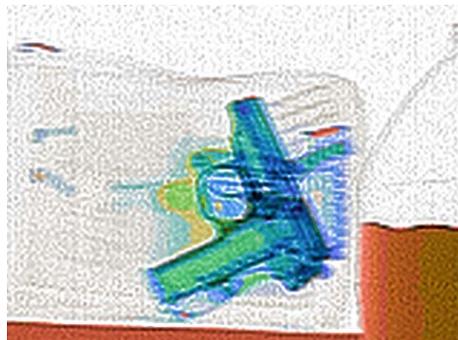
Органика $1 < Z < 10$



Легкие металлы/минералы
 $10 < Z < 20$
Металлы - $20 < Z < 50$



Тяжелые металлы $Z > 50$



Испытания технологического оборудования, проведенные с участием Государственного Заказчика подтвердили основные эксплуатационные показатели ИДК СТ-6035:

- высокая пропускная способность (до 25 автомашин в час.);
- высокое качество изображения сканируемых предметов;
- проникающая способность по стали 380мм;
- чувствительность по проволоке 0.8мм;
- достоверное распознавание материалов, включая тяжелые металлы (золото, свинец, платина);
- определение эффективного атомного номера материалов с высокой точностью, а также определение массы как самого объекта, так и его составных частей по рентгеновскому изображению.

Ускоритель электронов для радиографии

Совместно с Владыкинским механическим заводом



Максимальная энергия электронов	8 МэВ
Диапазон регулирования энергии	3-8 МэВ
Макс. мощность дозы на 1 м при 8 МэВ	10 Гр/мин
Диапазон регулирования мощности дозы при 8 МэВ	1-10 Гр/мин
Размер эффективного фокусного пятна	<2 мм
Размер и форма поля облучения на расстоянии 2 м от мишени, 75% мощности дозы на периферии:	Круг диаметром не менее 500 мм



Пульт управления

Испытания ускорителя



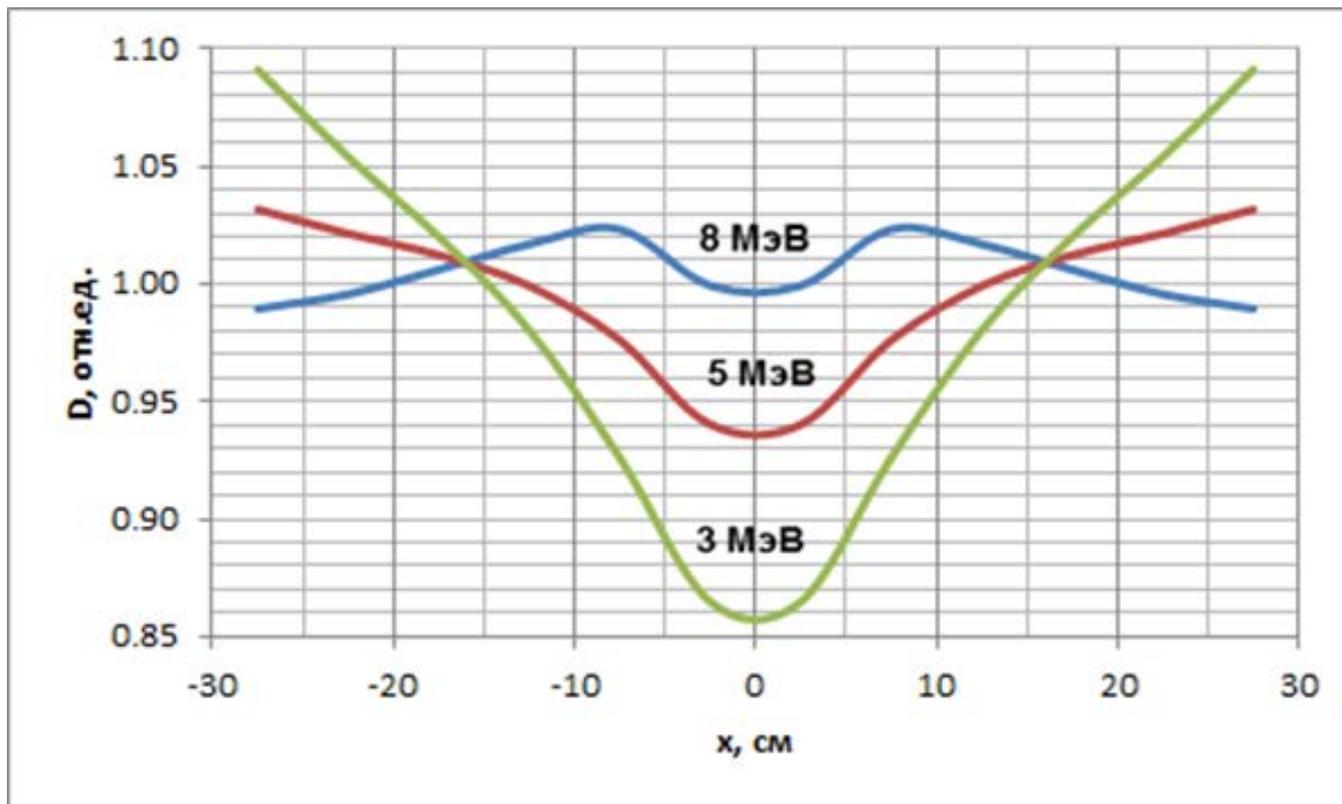
Толщина стали 340 мм



Относительная разрешающая способность 0,5%, т.е. за стальным листом толщиной 340 мм видна установленная перед ним проволока диаметром 1,7 мм.

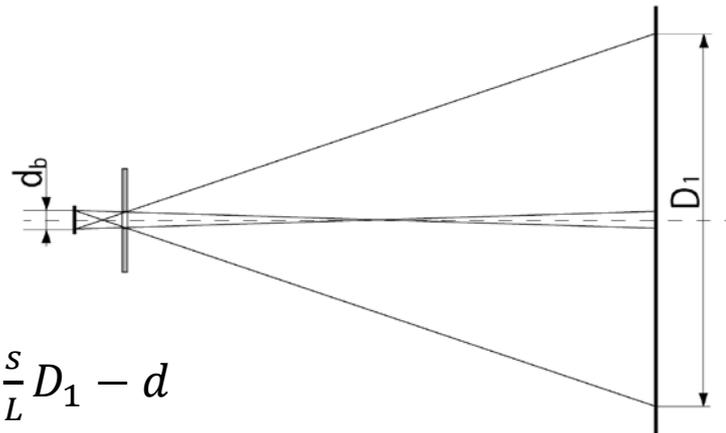
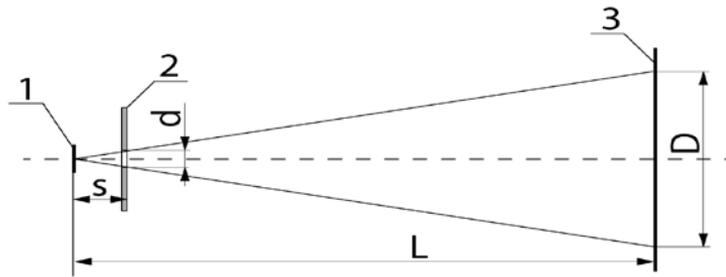
Разрешающая способность, помимо прочих факторов, определяется размерами и стабильностью положения пучка на тормозной мишени.

Угловое распределение излучения



Поперечное распределения мощности дозы тормозного излучения в горизонтальной плоскости на расстоянии 2 м от тормозной мишени с установленным разравнивающим фильтром.

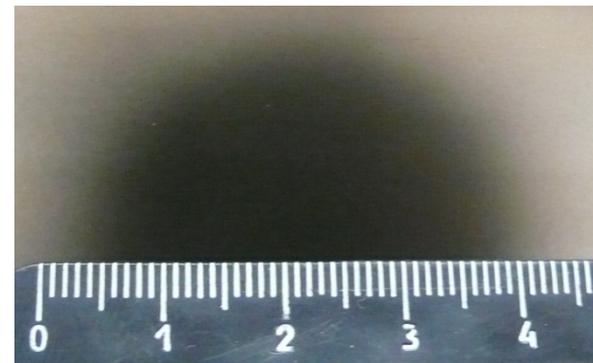
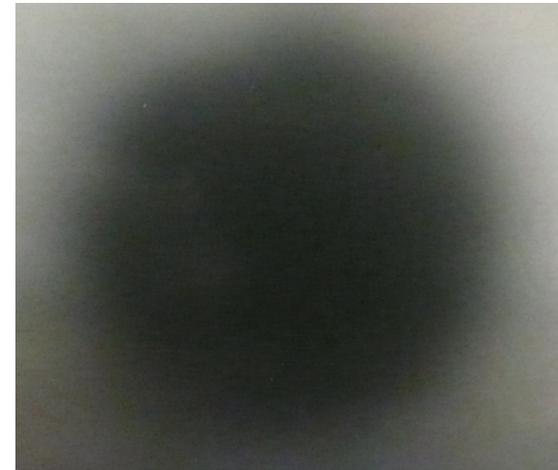
Измерение размеров электронного пучка на тормозной мишени методом камеры обскуры



$$d_b = \frac{s}{L} D_1 - d$$

$$L = 3 \text{ м}, s = 0,18 \text{ м}, d = 2 \text{ мм}$$

$$D_1 \approx 38 \text{ мм} \Rightarrow d_b \approx 0,28 \text{ мм}$$



Фотография пучка тормозного излучения с установленной диафрагмой на расстоянии 3 м от тормозной мишени. Верхняя граница тормозного спектра 8 МэВ

Работа ускорителя в Петрозаводске



Камера для дефектоскопии



Подготовка к снимку

За 1 год ускоритель в режиме накала отработал около 6000 часов, в режиме излучения 850 часов, получено более 10 тыс. снимков



Ускоритель на подвеске

Сравнение ускорителей для радиографии

№	Характеристика	УЭЛР-10-2Д ВМЗ-МГУ	УЭЛ-10-Д НИИЭФА
1	Максимальная энергия	10 МэВ	10 МэВ
2	Возможность изменения энергии	5 ÷ 10 МэВ	нет
3	Максимальная мощность дозы	40 Гр/мин при 10 МэВ	30 Гр/мин
4	Возможность регулирования мощности дозы	4 ÷ 40 Гр/мин	Не известно
5	Размеры пучка на тормозной мишени	< 1 мм	< 2 мм
6	Наличие локальной радиационной защиты	Да, с ослаблением более 10^4	Нет
7	Габариты ДхШхВ, включая высоковольтное питание и модулятор	1200х640х1460 мм	2040х880х920 мм
8	Масса	1025 кг	900 кг
9	Необходимость обслуживания вакуумной системы	Нет, отпаянная система	Да, прилагается форвакуумный пост
10	Тип модулятора	Твердотельный	На тиратроне
11	Удаленный контроль работы и диагностика через Интернет	Да	Нет

В качестве основных преимуществ нашего ускорителя следует отметить:

- возможность регулирования энергии и мощности дозы, что расширяет номенклатуру контролируемых изделий;
- наличие локальной радиационной защиты, что существенно улучшает радиационные условия в камере, снижая паразитную засветку рентгеновской пленки, и вне камеры, снижая общий радиационный фон;
- отпаянная конструкция, исключая необходимость обслуживания вакуумной системы потребителем, для которого требуется, специалист, а также последующая тренировка ускоряющей структуры и пушки;
- твердотельный модулятор, не имеющий элементов высоковольтной системы с ограниченным ресурсом, таких как, например, тиратрон;
- удаленный контроль работы и диагностика через Интернет, обеспечивает возможность оперативного реагирования на изменения в параметрах работы ускорителя, проводя упреждающее профилактическое обслуживание, а также позволяет руководству предприятия получать информацию онлайн о каждом включении излучения и режимах получения снимков.

Итоги 3-го этапа

Полностью освоено трехмерное проектирование, при разработке ускорителей установлено тесное сотрудничество с конструкторами и технологами предприятий электровакуумной промышленности.

Парк ускорителей, находящихся в НИИЯФ МГУ, пополнился ускорителями на 10 МэВ и 55 МэВ.

Разработана новая система контроля и управления ускорителей, основанная на специализированных контроллерах и новым программным обеспечением верхнего уровня.

Получен опыт разработки серийных образцов ускорителей, с выпуском КД, ТУ, РЭ, с проведением приемо-сдаточных работ и сертификации изделий.

Получен опыт технического обслуживания ускорителя у заказчика.

Защищено четыре кандидатских диссертации, выполнено большое число дипломных работ, получено четыре патента.

Этапы разработки электронных ускорителей в НИИЯФ МГУ

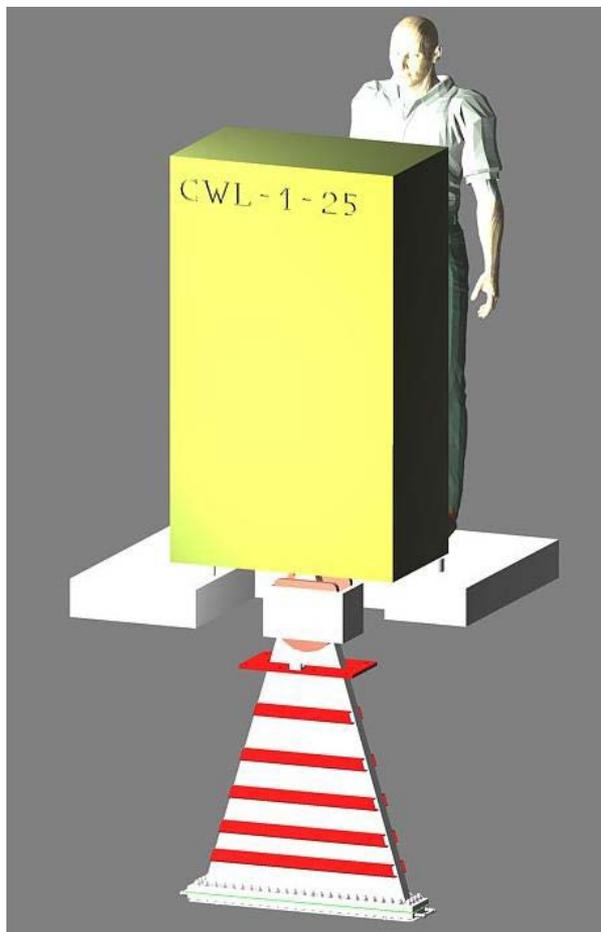
1983-1992 гг. – проект разрезного микротрона непрерывного действия

1993-2002 гг. – разработка компактных ускорителей электронов непрерывного действия прикладного назначения, разработка импульсных разрезных микротронов в сотрудничестве с учеными США, Германии

2003-2012 гг. – прототипы и предсерийные образцы импульсных разрезных микротронов и линейных ускорителей для систем безопасности, дефектоскопии в сотрудничестве с Российскими организациями

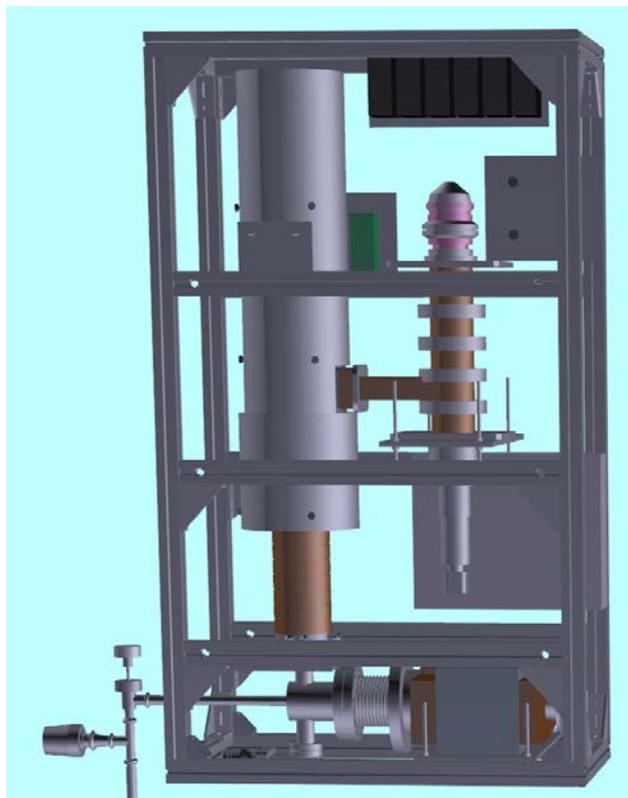
2013 - гг. – продолжение разработок новых ускорителей, участие в производстве ускорителей прикладного назначения

Компактный линейный ускоритель электронов непрерывного действия 1 МэВ/25 кВт



Энергия пучка	1.0 МэВ
Ток пучка	0 - 25 мА
Максимальная мощность	25 kW
Напряжение питания клистрона и пушки	15 kV
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность клистрона	50 кВт
Потребляемая мощность	~75 kW
КПД	~33%

Компактный линейный ускоритель электронов непрерывного действия 1 МэВ/25 кВт

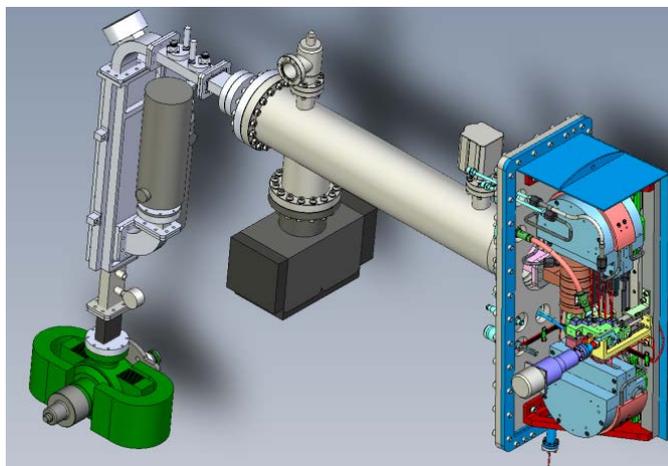
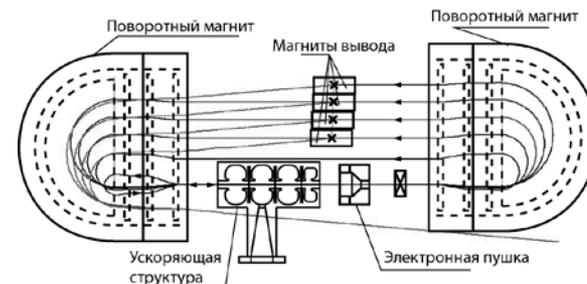


Сборка ускорителя завершена, начаты пуско-наладочные работы

Разрезной микротрон для интраоперационной лучевой терапии

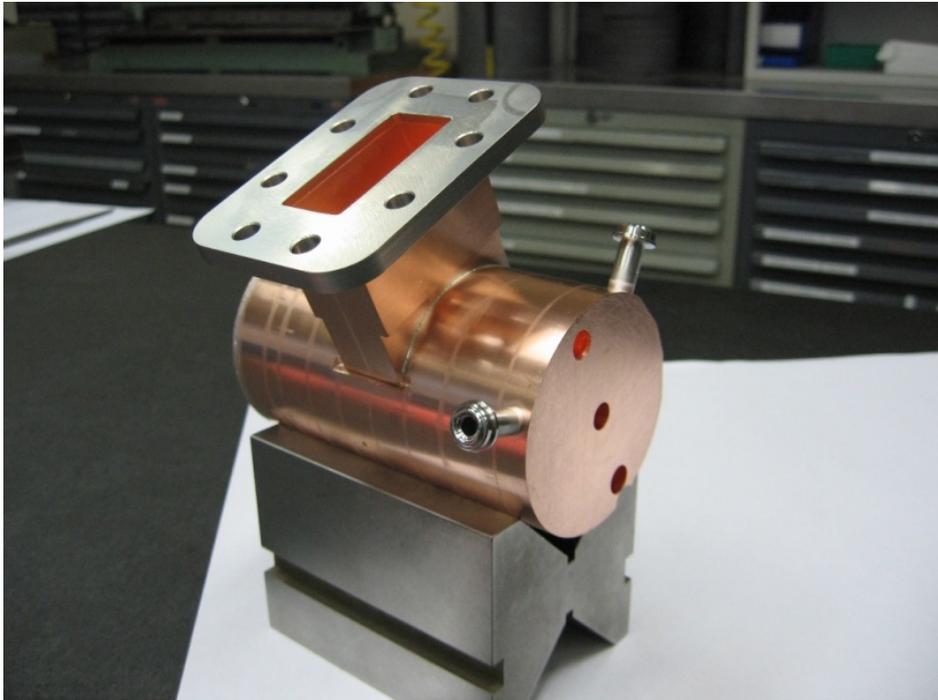
(совместно с политехническим университетом Каталонии)

- Основные характеристики:
 - ✓ Энергии пучка: 6, 8, 10, 12 МэВ
 - ✓ Ток пучка: ~ 10 нА – 10 мкА
 - ✓ Рабочая длина волны: 5 см
 - ✓ СВЧ мощность: ~ 800 кВт
 - ✓ Мощность дозы: 10-30 Гр/мин
 - ✓ Ускоряющее устройство:
Размеры: 50 x 20 x 11 см

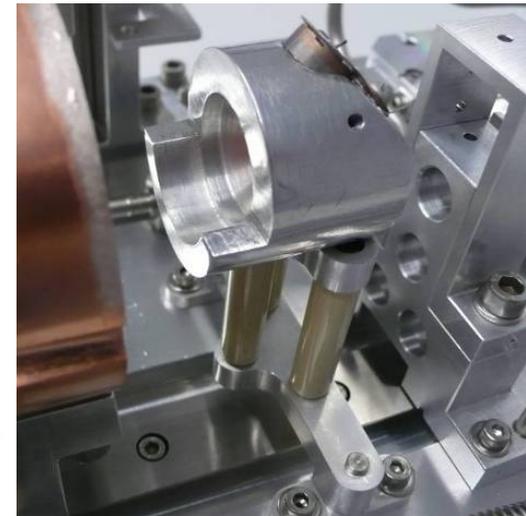
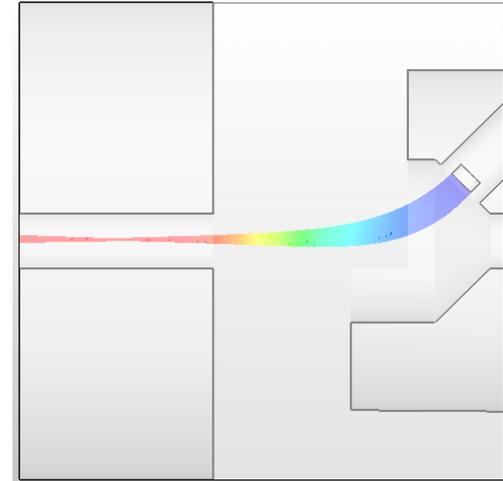


Разрезной микротрон для интраоперационной лучевой терапии

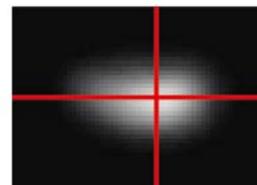
(совместно с политехническим
университетом Каталонии)



Ускоряющая структура



Электронная пушка



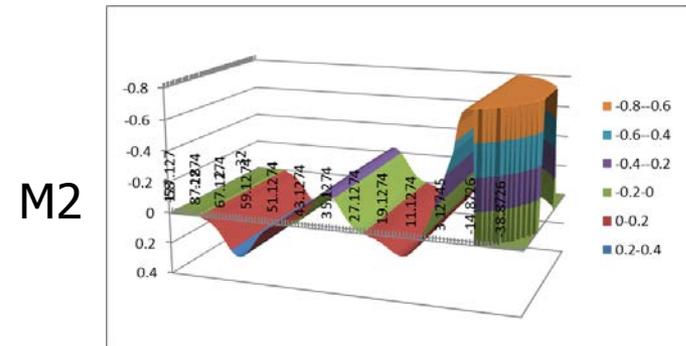
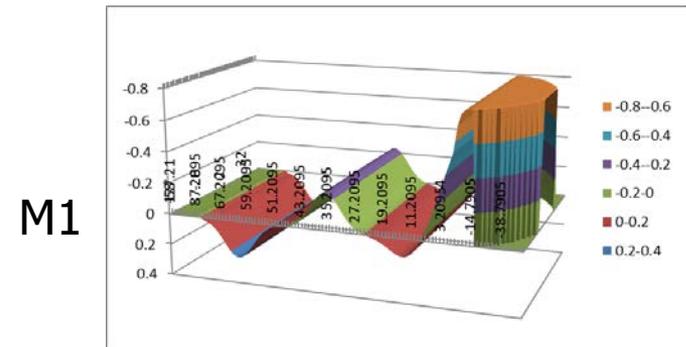
1 mm

Разрезной микротрон для интраоперационной лучевой терапии

(совместно с политехническим университетом Каталонии)



Поворотные магниты на основе
редкоземельного магнитного
материала

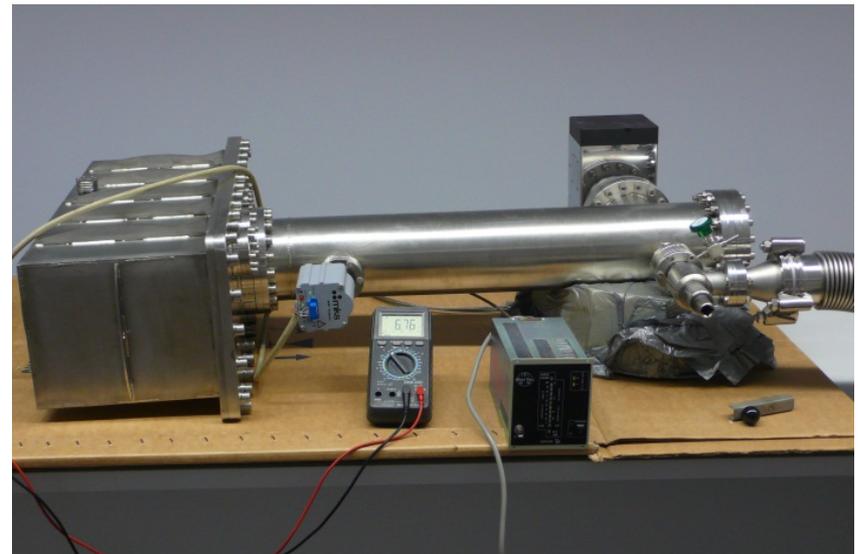
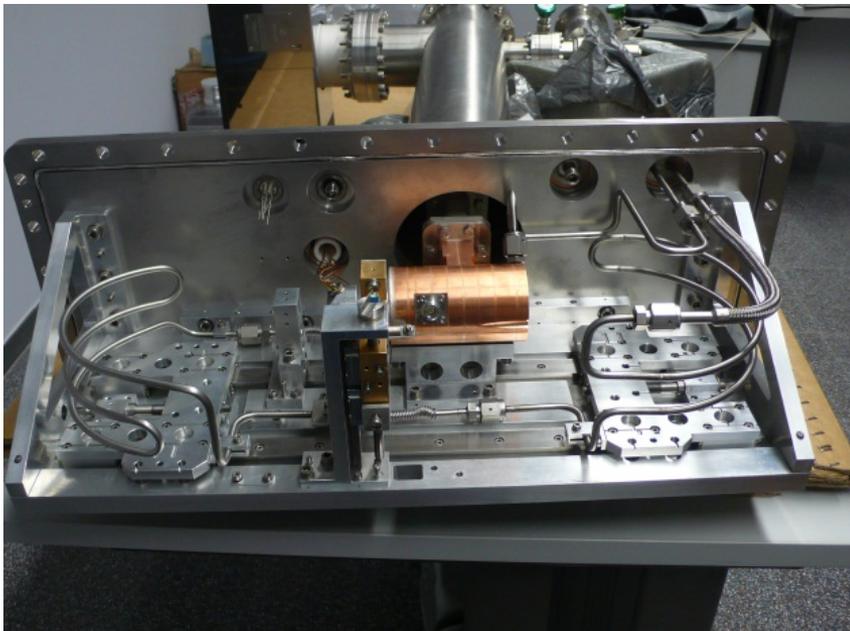


Распределения поля после
настройки магнитов

Разрезной микротрон для интраоперационной лучевой терапии

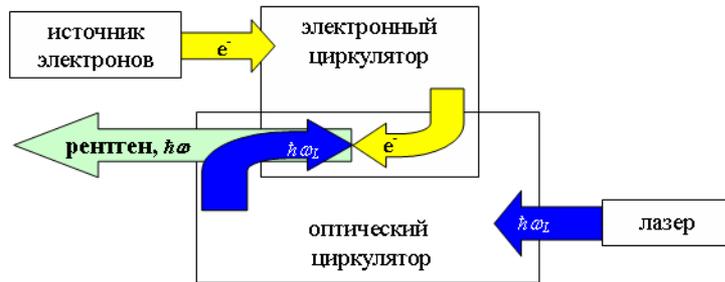
(совместно с политехническим университетом Каталонии)

Сборка и вакуумные испытания



Проект лазерно-электронного генератора рентгеновского излучения

Совместно с ФИАН



$$E_\gamma = 4\gamma^2 E_{ph}$$

$$E_{ph} = 1.16 \text{ eV}$$

$$E_\gamma = 10 - 45 \text{ keV}$$

$$E_e = \gamma m_0 c^2 = 25 - 50 \text{ MeV}$$

$$B_{av} > 10^{12} \text{ c}^{-1} \text{ mm}^{-2} \text{ mrad}^{-2} (0.1\% \text{ BW})^{-1}$$

