

Разработка ускорителей электронов в МГУ

В.И. Шведун
НИИЯФ МГУ

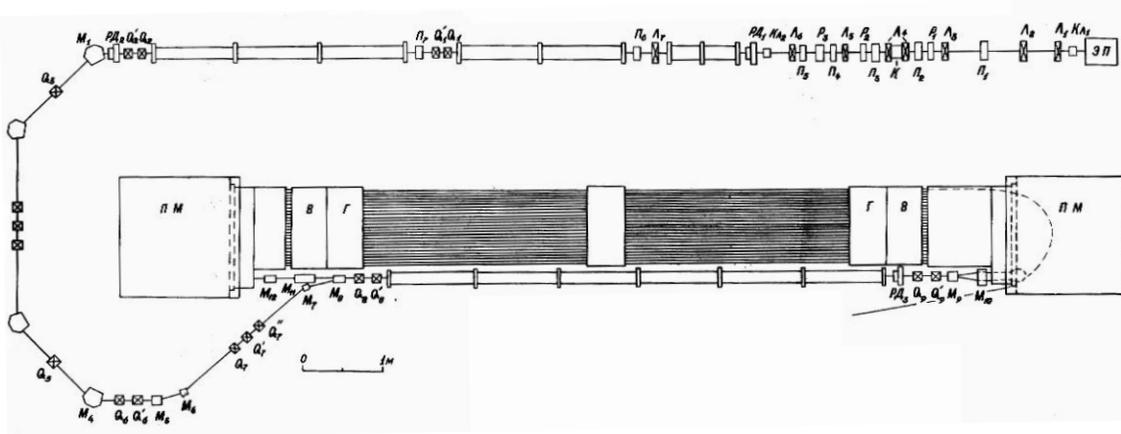
17 февраля 2025 г.

Сессия-конференция, посвященная 70-летию со дня рождения академика РАН
Валерия Анатольевича Рубакова

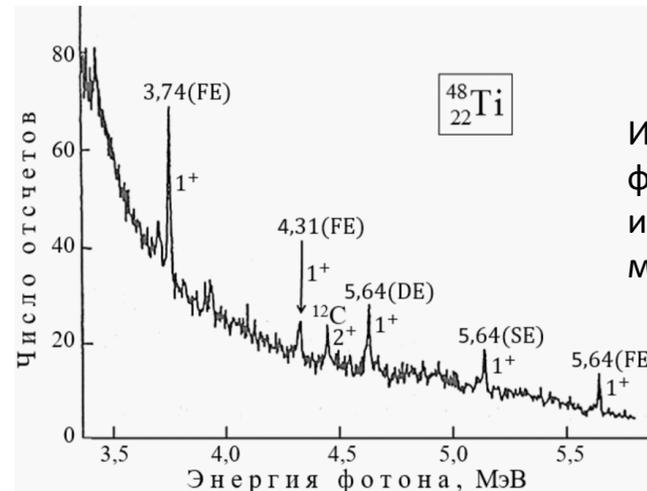
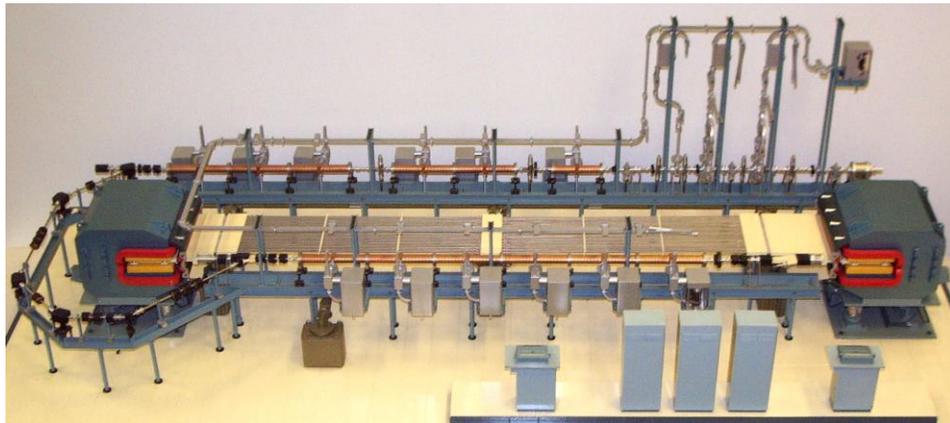
Разрезные микротроны

Проект разрезного микротрона непрерывного действия – начало работ по ускорителям электронов в НИИЯФ МГУ. 1985-1992 гг.

Получение квазинепрерывных прецизионных пучков электронов с энергией десятки-сотни-тысячи МэВ с током до 100 мкА для ядерно-физических исследований - одна из важных задач ускорительной физики и техники 70-х – 90-х гг. прошлого века.



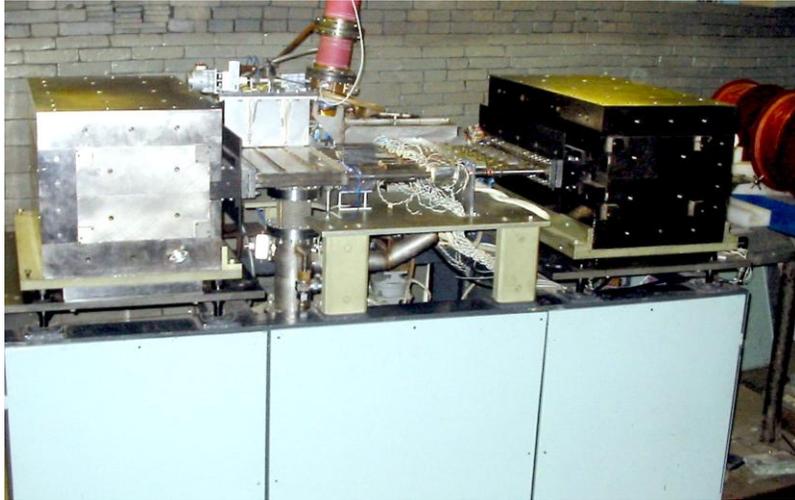
Энергия инжекции	6 МэВ
Прирост энергии	6 МэВ
Число орбит	27
Максимальная энергия	175 МэВ
Средний ток пучка	100 мкА
Рабочая частота	2450 МГц
Поле магнитов	1.027 Т
Мощность клистронов	22 кВт
Число клистронов	12+1



Исследование ядерной резонансной флуоресценции на пучке тормозного излучения инжектора разрезного микротрона непрерывного действия

Импульсный разрезной микротрон на редкоземельных постоянных магнитах на энергию 70 МэВ

Сотрудничество с World Physics Technologies (США) при участии ФИАН, ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, СГУ. 2004 г.

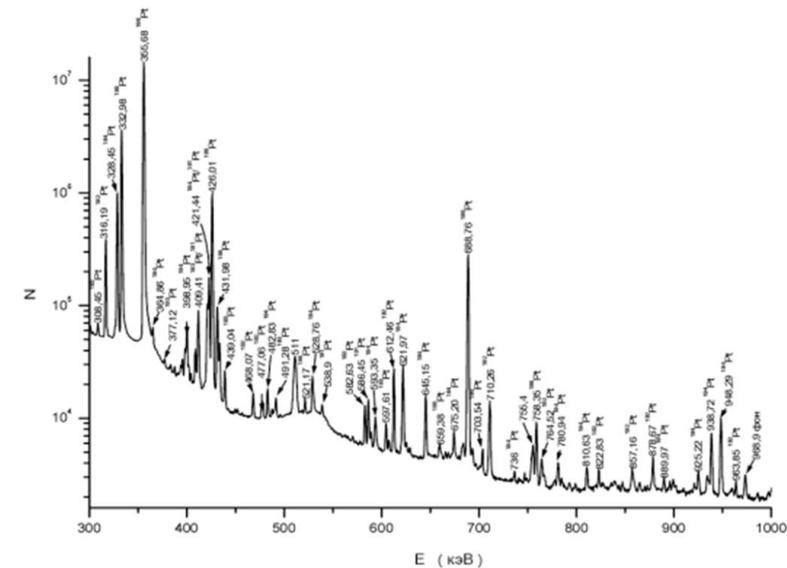


- Большие поворотные магниты с уровнем поля ~ 1 Т на основе редкоземельных магнитов (РЗМ)
- Прямоугольная ускоряющая структура с высокочастотной квадрупольной фокусировкой
- Устройство регулирования длины первой орбиты
- Компактные квадрупольные триплеты на основе РЗМ
- Автоколебательная система СВЧ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

A 70 Mev racetrack microtron

V.I. Shvedunov¹, A.N. Ermakov¹, I.V. Gribov¹, E.A. Knapp¹,
G.A. Novikov¹, N.I. Pakhomov¹, I.V. Shvedunov¹, V.S. Skachkov²,
N.P. Sobenin³, W.P. Trower*, V.R. Yajlijan¹

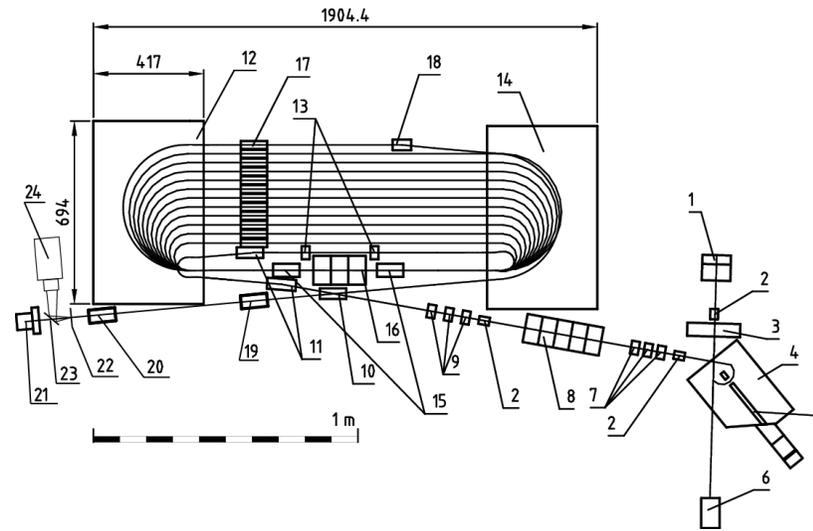
Энергия инжекции	48 кэВ
Прирост энергии/оборот	4.8 МэВ
Число орбит	14
Энергия на выходе	14.8 - 68.3 МэВ
Ток пучка	40 - 5 мА
Кратность	1λ/орбиту
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Уровень поля	0.963 Т
Размеры	2.2x1.8x0.9 м ³



Спектр гамма-квантов в диапазоне энергий 300-1000кэВ из мишени ¹⁹⁷Au, облученной тормозным излучением с верхней границей 67,7 МэВ. Измерения Ge детектором

Импульсный разрезной микротрон с большой яркостью пучка на энергию 35 МэВ

Сотрудничество с World Physics Technologies (США)
при участии ФИАН, ИТЭФ, МИФИ, СГУ. 2004 г.

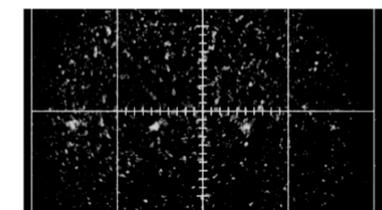
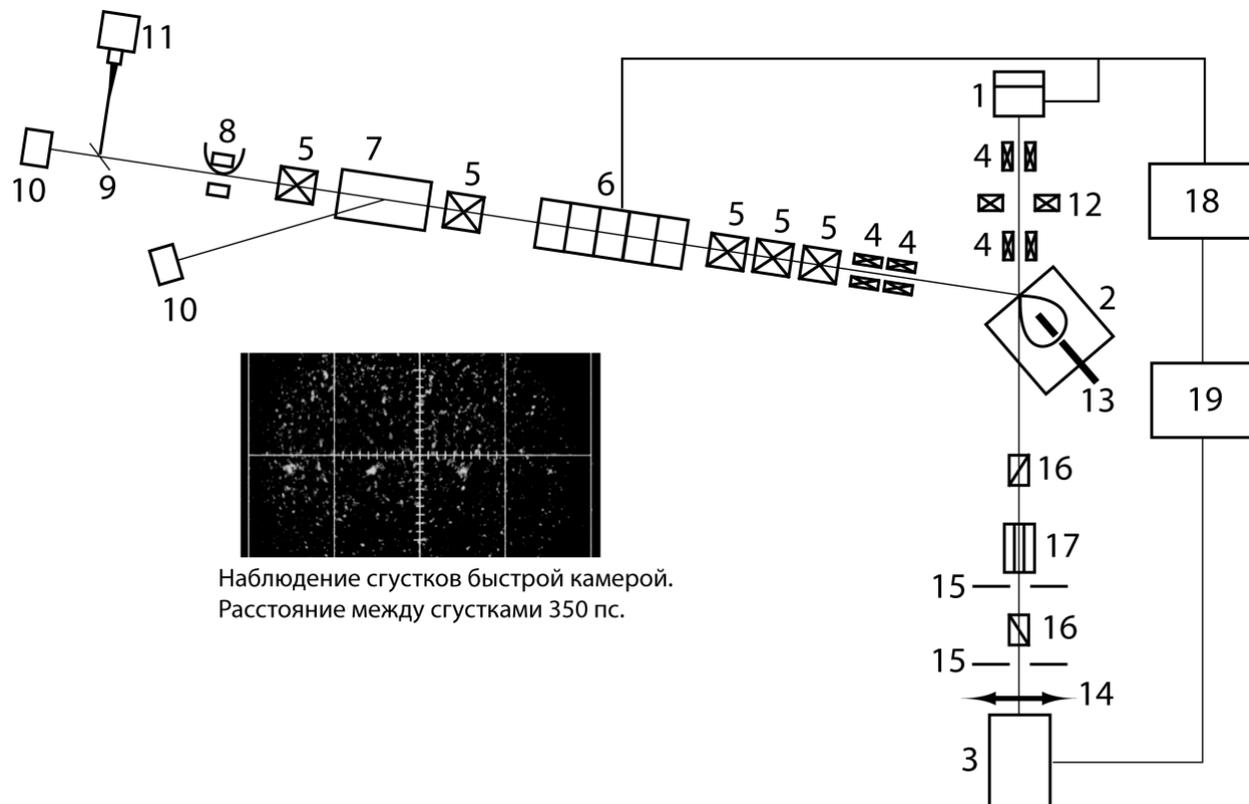


(1)-СВЧ пушка, (2)-корректоры пучка системы инжекции, (3)-соленоидальная линза, (4)-альфа-магнит, (5)-коллиматор, (6)-лазерная система, (7), (9)-квадрупольные триплеты, (8)-ускоряющая структура инжектора, (10)-дипольный магнит вывода инжектируемого пучка, (11)-дипольные магниты системы инжекции, (12), (14)— поворотные магниты, (13)-квадрупольный дублет, (15)-квадрупольные синглеты разрезного микротрона, (16)-ускоряющая структура разрезного микротрона, (17)-корректоры пучка разрезного микротрона, (18)-магнит вывода пучка, (19), (20)-квадрупольные синглеты тракта вывода пучка, (21)-цилиндр Фарадея, (22)-люминесцентный экран, (23)-зеркало, (24)-телевизионная камера.

- инжекция высокоэнергетичных сгустков от СВЧ пушки и линейного ускорителя;
- поворотные магниты на основе редкоземельного магнитного материала;
- вакуумная камера с подавлением когерентного синхротронного излучения.

Энергия инжекции	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

Система формирования сгустков с энергией 5 МэВ и зарядом 150 пК – инжектор разрезного микротрона



Наблюдение сгустков быстрой камерой.
Расстояние между сгустками 350 пс.

СВЧ пушка (1); группирующий магнит (2) с перемещаемым щелевым коллиматором (13); лазерная система, включающая лазер (3), длиннофокусную линзу (14), диафрагмы (15), поляризаторы (16) и электрооптический модулятор (17); бустерный линейный ускоритель (6); магнитооптическая система – корректоры пучка (4), квадрупольные линзы (5) и соленоидальная линза (12); система СВЧ питания (18) и синхронизации (19); цилиндр Фарадея (10).

A racetrack microtron with high brightness beams

V.I. Shvedunov¹, R.A. Barday¹, D.A. Frolov¹, V.P. Gorbachev²,
I.V. Gribov¹, E.A. Knapp, G.A. Novikov¹, N.I. Pakhomov¹, I.V. Shvedunov¹,
V.S. Skachkov³, N.P. Sobenin⁴, W.P. Trower*, S.A. Tyurin¹, A.A. Vetrov¹,
V.R. Yailijan¹, D.A. Zayarny⁵

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 531 (2004) 346–366

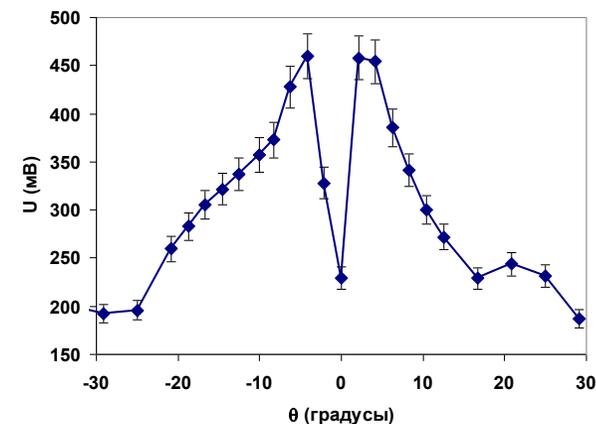
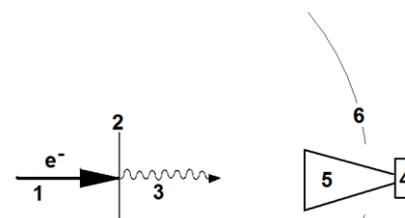
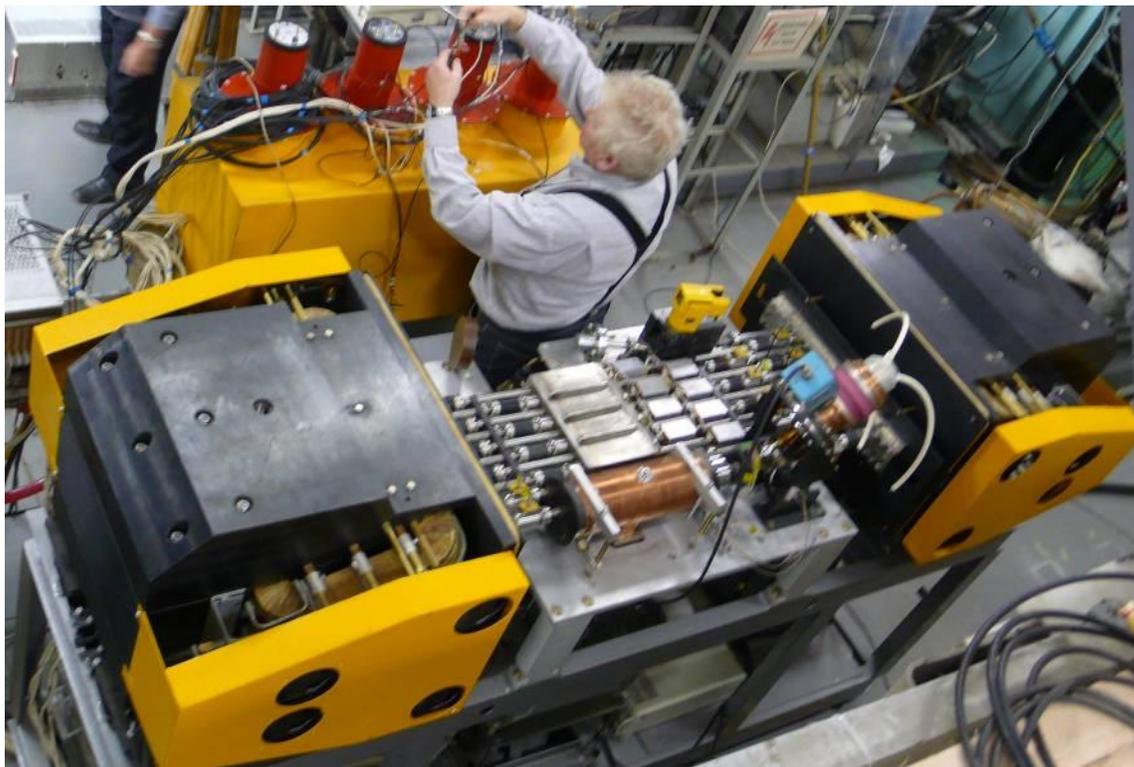


Схема экспериментальной установки и угловое распределение когерентного переходного излучения при энергии 5 МэВ

Импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ

Сотрудничество с ФИАН и Valley Forge Composite Technologies (США). 2011 г.



A Multipurpose Pulse Race-Track Microtron with an Energy of 55 MeV

A. N. Ermakov^a, B. S. Ishkhanov^a, A. N. Kamanin^a, N. I. Pakhomov^a, V. V. Khankin^{a, *},
V. I. Shvedunov^a, N. V. Shvedunov^a, E. E. Zhuravlev^b, A. I. Karev^b, and N. P. Sobenin^c

Instruments and Experimental Techniques, 2018, Vol. 61, No. 2, pp. 173–191.

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

Ядерная физика.

Детектирование взрывчатых веществ.

Наработка ПЭТ изотопов.

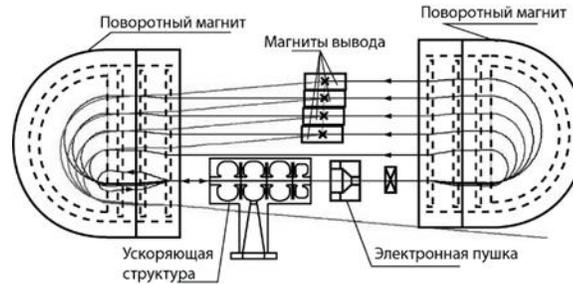
Активационный анализ.

Проект импульсного разрезного микротрона для интраоперационной лучевой терапии

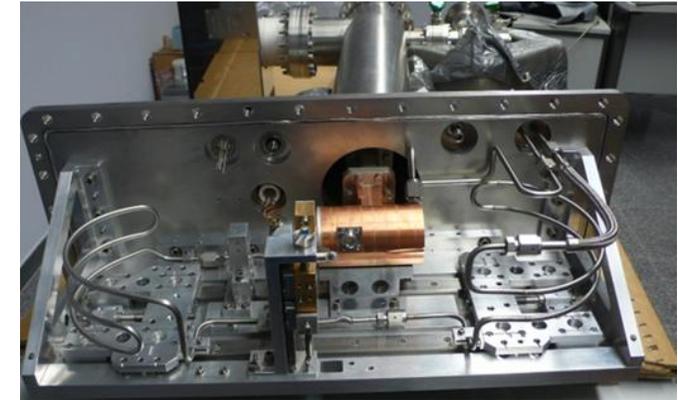
Сотрудничество с Политехническим университетом Каталонии. 2005 – 2012.

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

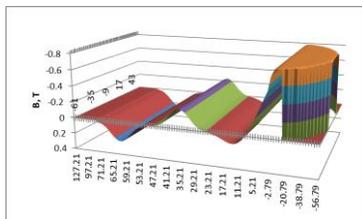
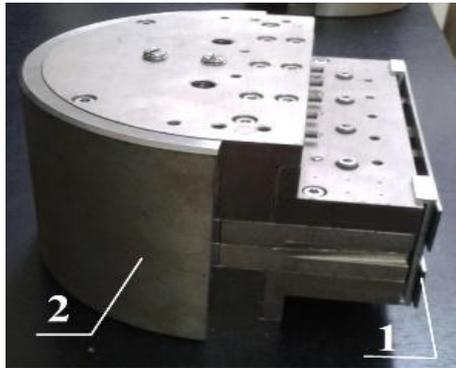
Схема разрезного микротрона



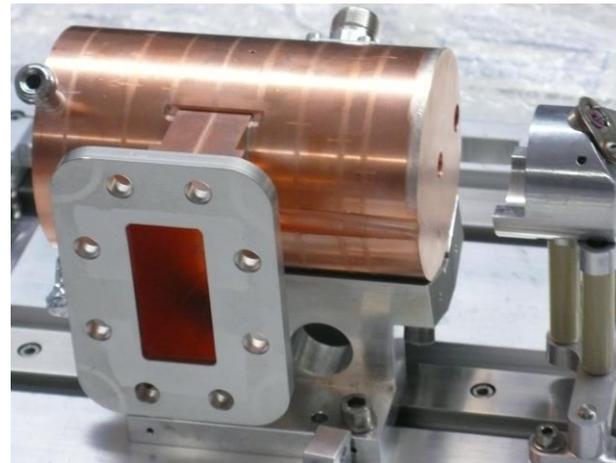
Сборка разрезного микротрона



Изготовление и настройка магнитов



Ускоряющая структура



Электронная пушка



Разрезной микротрон как источник высокоэнергичного электронного пучка с большой средней мощностью

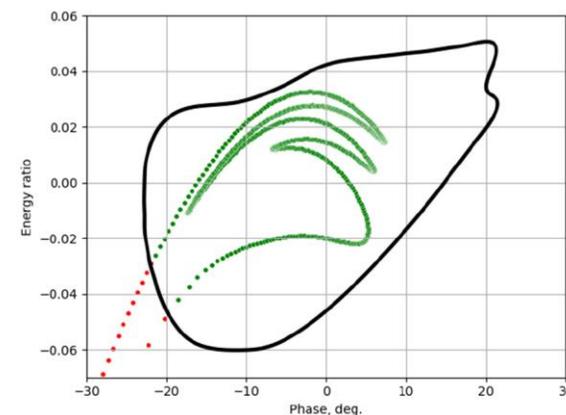
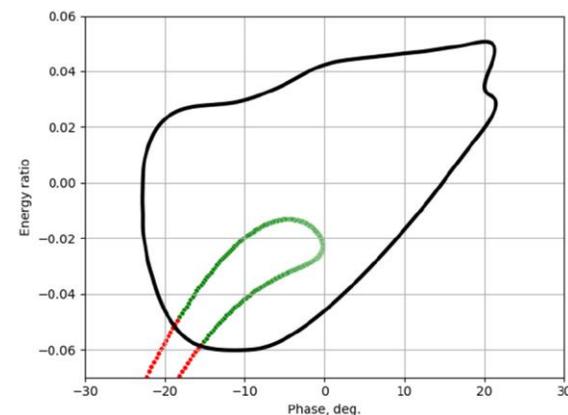
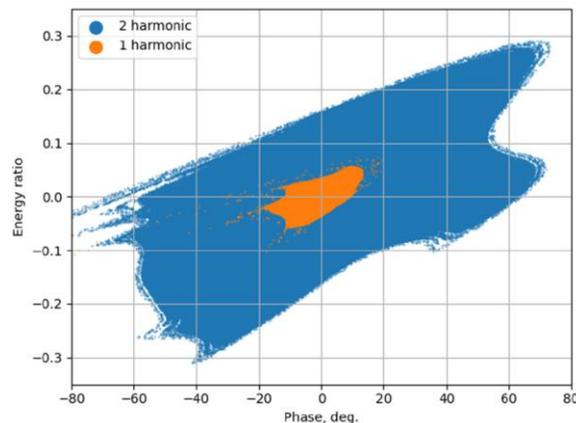
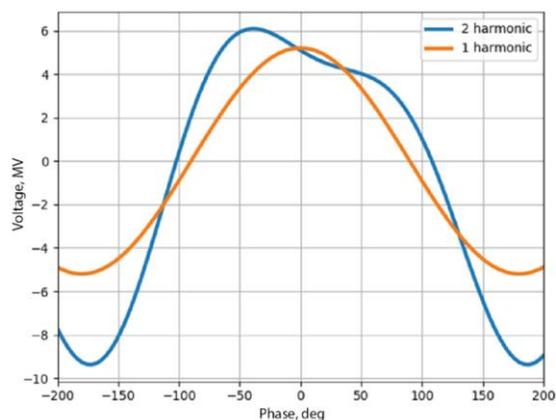
Один из основных недостатков импульсного разрезного микротрона с инжекцией пучка от электронной пушки — большие потери тока по орбитам

Racetrack Microtron—Pushing the Limits

Maxim Borisov ^{1,2,*}, Andrey Ermakov ^{2,3}, Vadim Khankin ^{2,3}, Yuri Kubyshin ⁴  and Vasiliy Shvedunov ^{2,3,5} 

Symmetry 2021, 13, 2244. <https://doi.org/10.3390/sym13122244>

Увеличение области устойчивых фазовых колебаний за счет добавления второй гармоники ускоряющего поля и увеличение коэффициента захвата за счет оптимизации начальной части ускоряющей структуры.

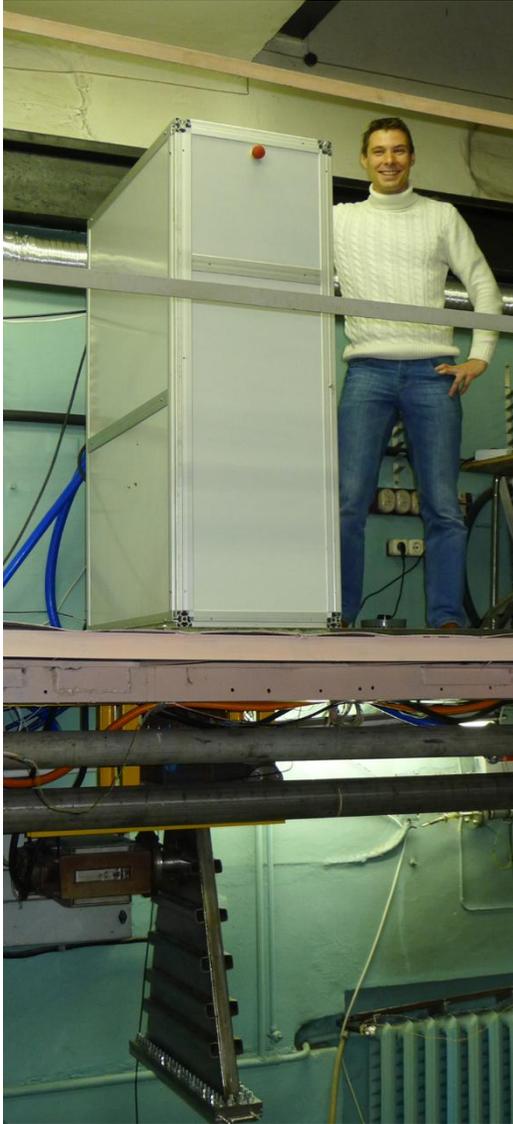


Зависимость ускоряющего поля от времени и продольный аксептанс.
Увеличение аксептанса в 20 раз.

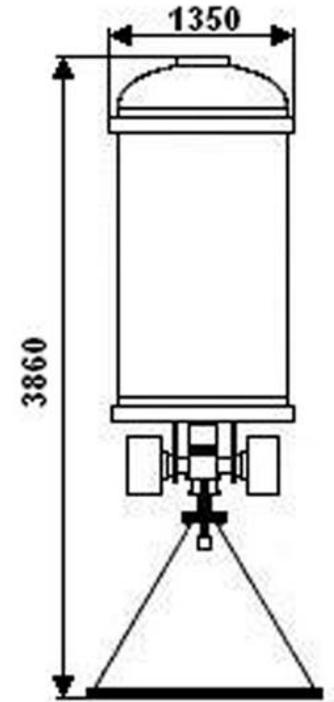
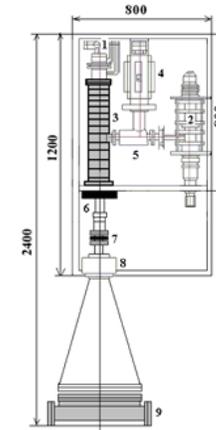
Эффект оптимизации начальной части ускоряющей структуры.
Увеличение коэффициента захвата в три раза.

Линейные ускорители электронов

Ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ. 2012 г.



Сравнение с ускорителем прямого действия

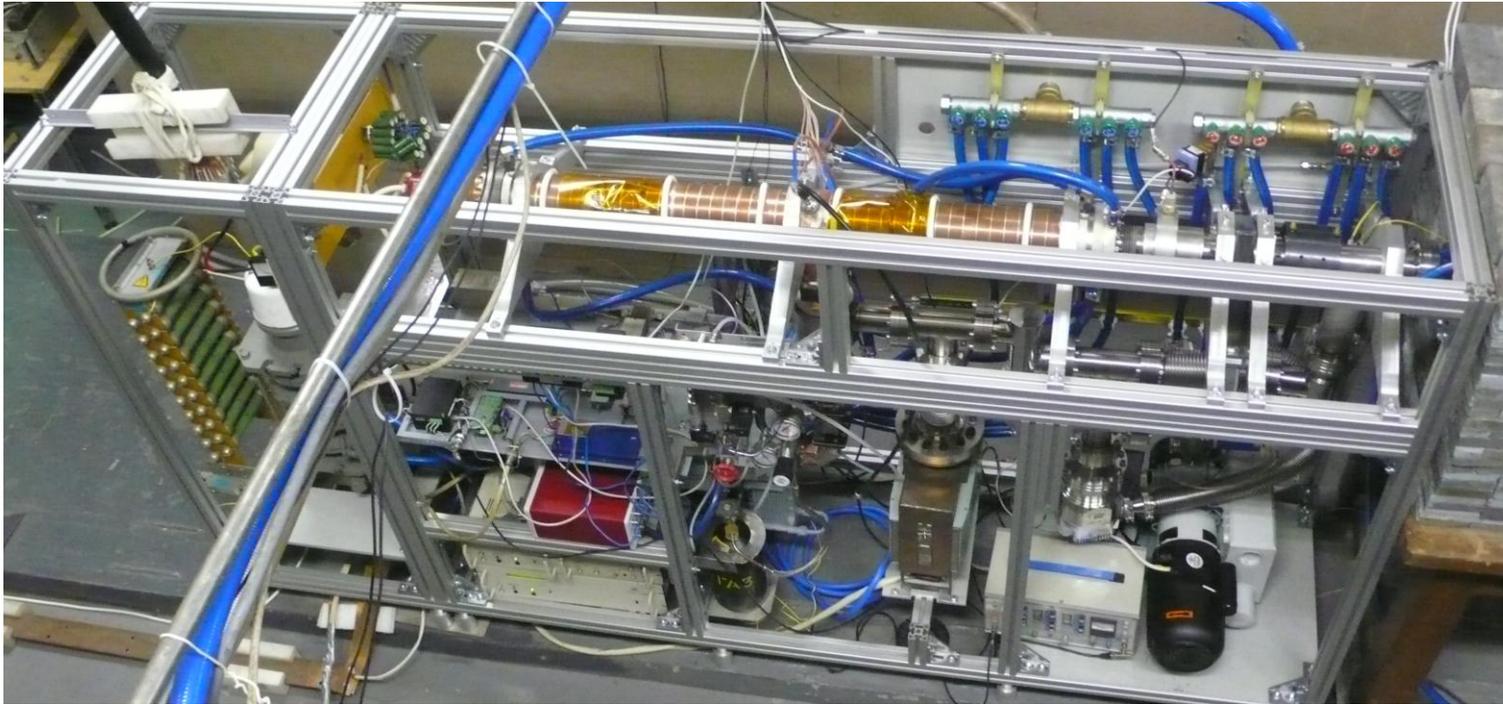


Энергия пучка	1 МэВ
Средний ток пучка, max	25 мА
Средняя мощность пучка, max	25 кВт
Рабочая частота	2450 МГц
Средняя мощность клистрона	50 кВт
КПД от розетки	30%
Ширина развертки	80 см
Размеры ускорителя	470 x 784 x 1375 мм ¹⁾

¹⁾Без развертки и источника питания

Импульсный линейный ускоритель

Сотрудничество с ФГУП «НПП «Торий» по теме «Поток-1». 2011 г.



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%

Лаборатория электронных ускорителей МГУ
Создана в 2013 г. по ФЗ 217 – совместное
предприятие МГУ и Скантроник Системс (Ростех)

Ускорители для инспекционно-досмотровых комплексов различного типа, радиологии, радиационных технологий в промышленности, медицины.

Полное число ускорителей поставленных с 2013 г., а также изготавливаемых в настоящее время по заключенным контрактам около 100.

Работа ускорителей для радиографии на предприятиях Росатома



Потребители. Росатом: «Петрозаводскмаш», «ЗиО» Подольск, «Атоммаш» Волгодонск. Другие: «Полесье» Волгодонск, «Ижора-Картэкс» СПб., «Арион» Нижний Новгород, «Алтай» Бийск.

Три варианта: 3...6 МэВ/10 Гр/мин; 3...8 МэВ/10 Гр/мин;
5...10 МэВ/40 Гр/мин. Размер фокусного пятна на мишени 1 мм.



Электронные ускорители с поимпульсным переключением энергии для инспекционно-досмотровых комплексов



Стационарный



Мобильный



Железнодорожный

КИУ-168



КИУ-271



Энергия

3.5/6 МэВ или 6/9 МэВ

Стабильность энергии

0.3%

Мощность дозы, до

10 Гр/мин

Частота следования имп., до

2 kHz

Клистроны и ускоряющие системы для 10 - см и 5 см – диапазонов

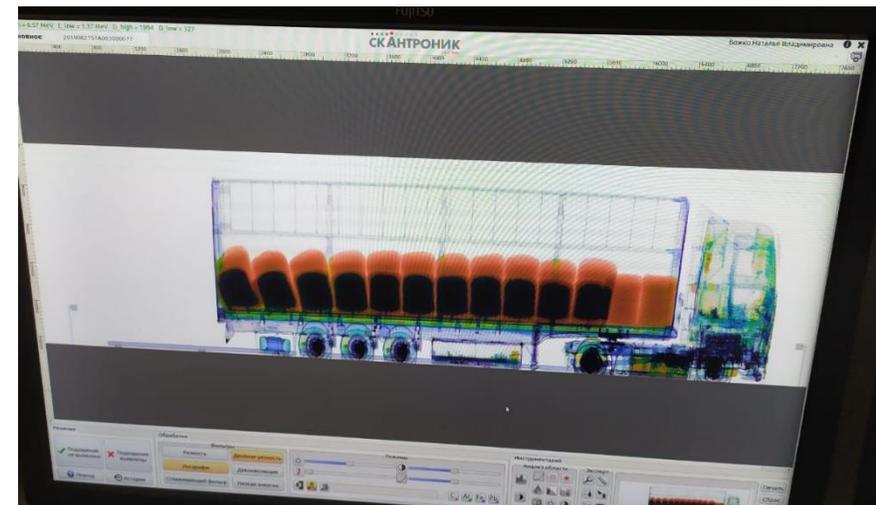
Стационарный ИДК СТ-6035 «Скантроник Системс»



Система сканирования



Ускоритель



Изображение объекта

http://www.scantronicsystems.com/st6035_ru/

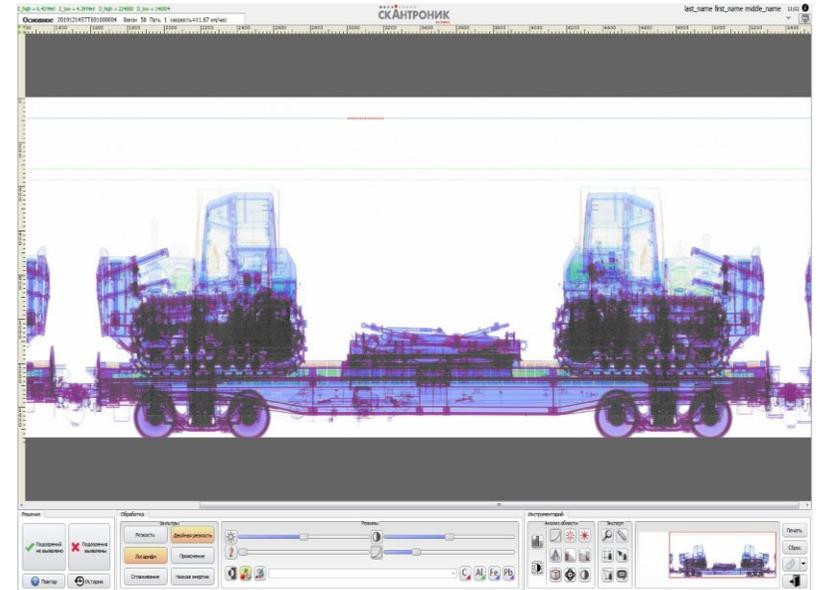
Железнодорожный ИДК СТ-2630Т «Скантроник Системс»



Двухпутевой ж-д ИДК



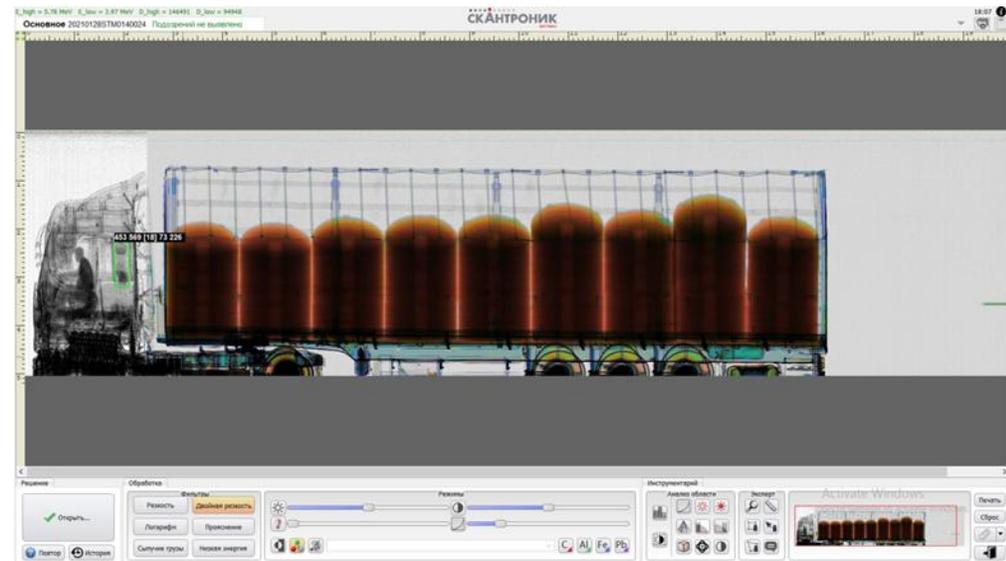
Ускоритель



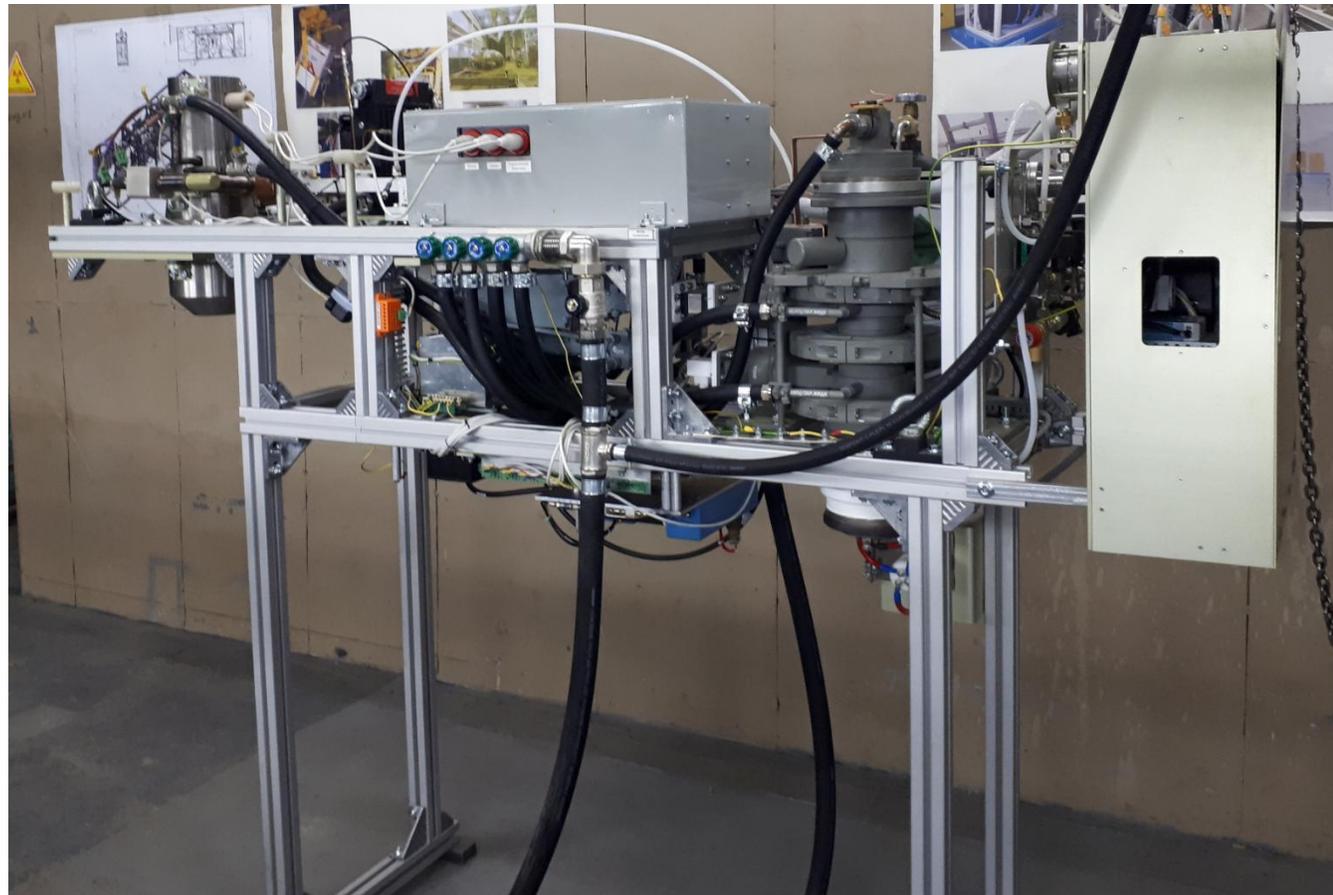
Изображения

http://www.scantronicsystems.com/st2630t_ru/

Мобильные ИДК СТ-2630М «Скантроник Системс»



Ускоритель для комплекса лучевой терапии КЛТ6 «Оникс»

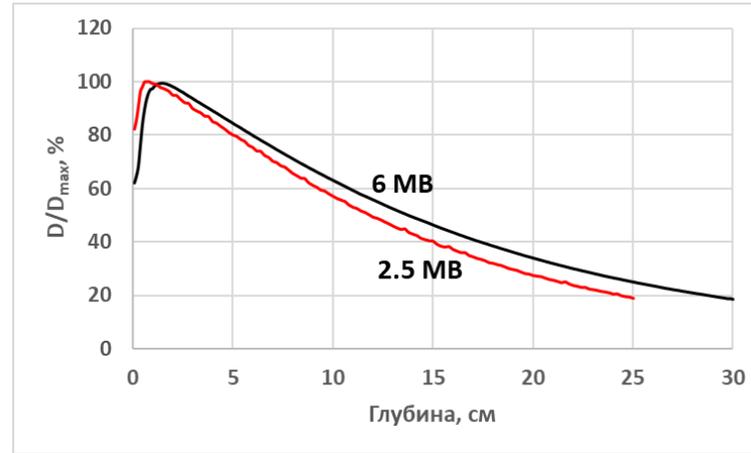


Испытательный стенд

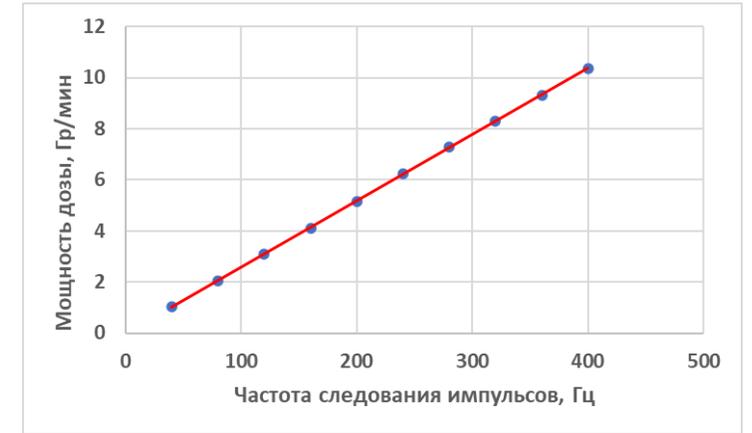
Результаты испытаний ускорителя для комплекса лучевой терапии



Ускоряющая система С-диапазона



Процентные глубинные дозы для энергий 2.5 МэВ и 6 МэВ

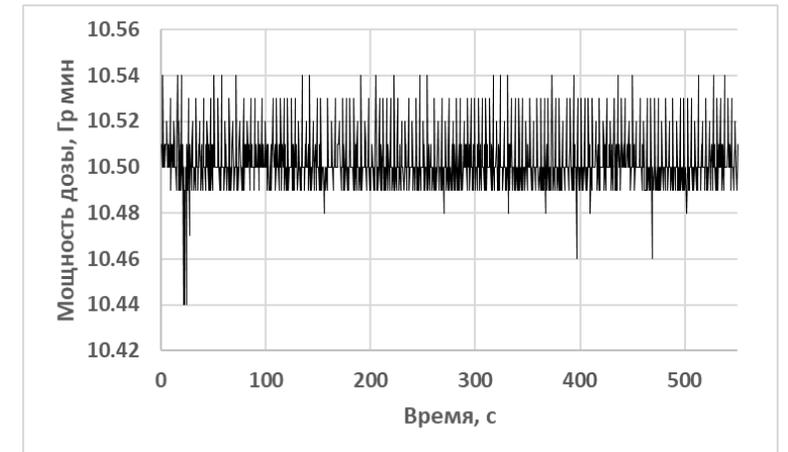


Зависимость мощности дозы от частоты следования импульсов

Измеренное значение $TPR_{20,10}$ составляет 0.629 для 6 МэВ при проектном значении $TPR_{20,10} = 0.634 \pm 0.01$

Максимальная мощность дозы превышает проектное значение 10 Гр/мин.

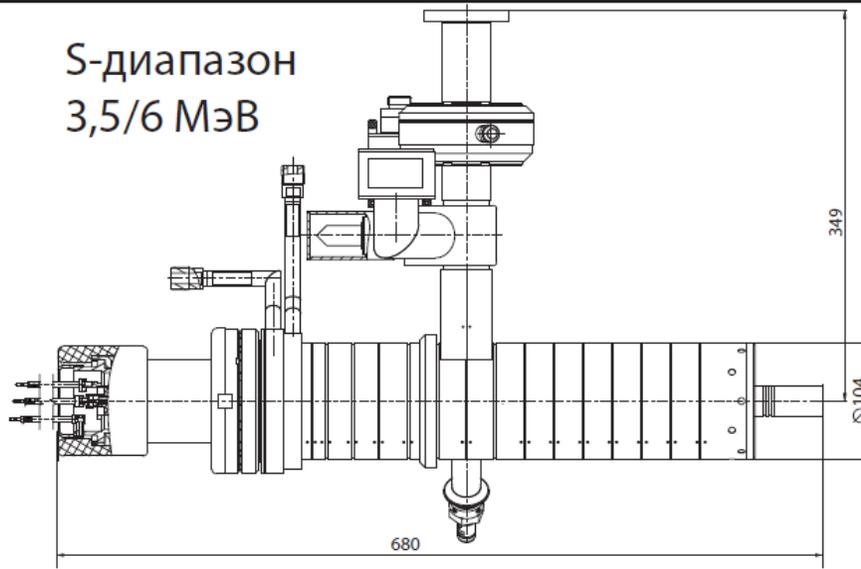
Долговременная стабильность мощности дозы на уровне 0.1%



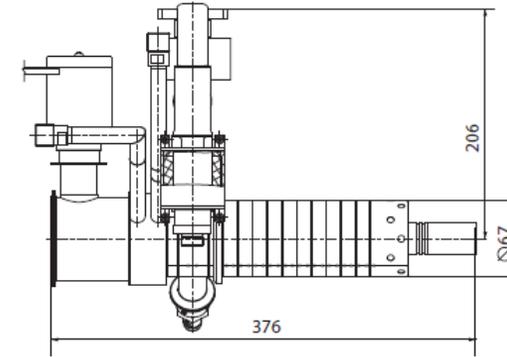
Зависимость мощности дозы от времени при максимальной частоте следования импульсов

Варианты ускоряющих систем

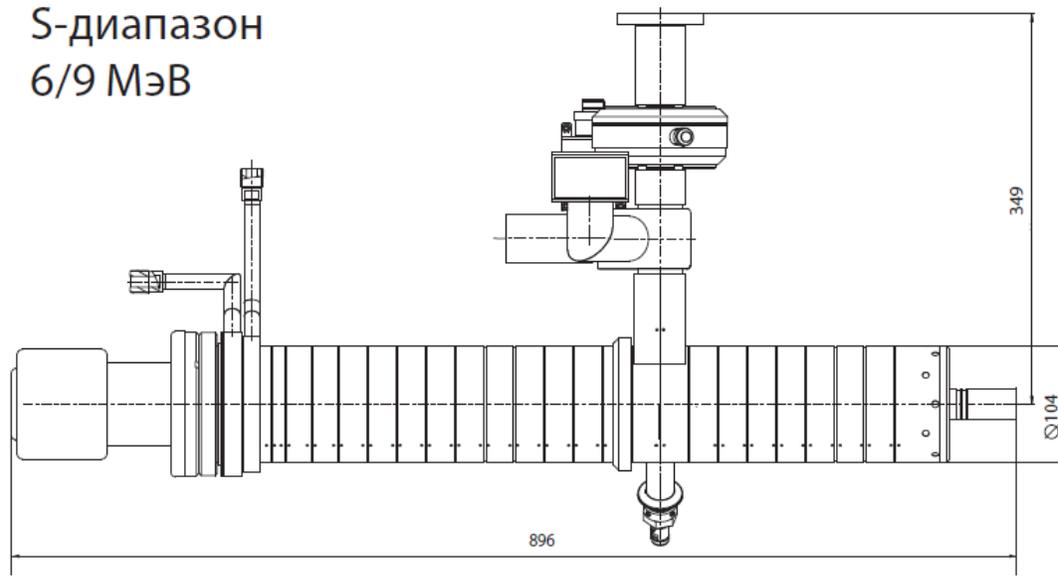
S-диапазон
3,5/6 МэВ



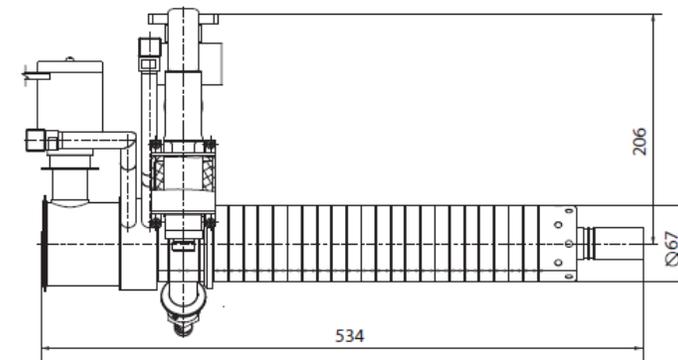
S-диапазон
3,5/6 МэВ



S-диапазон
6/9 МэВ



S-диапазон
6/9 МэВ



Импульсный линейный ускоритель на энергию 10 МэВ



Ускоряющая система



Клистрон и модулятор

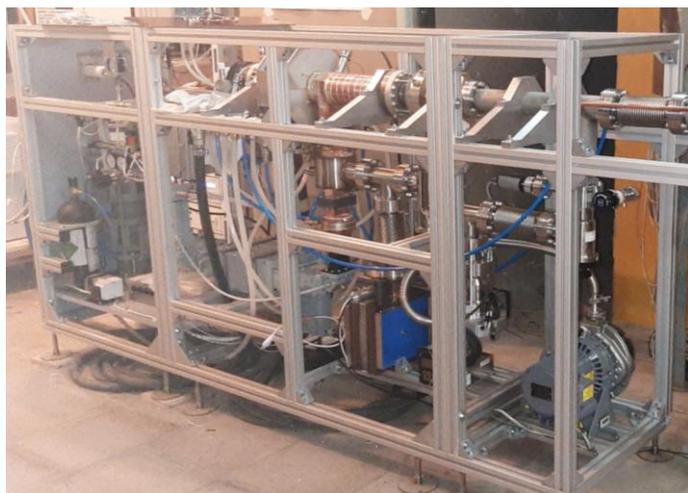
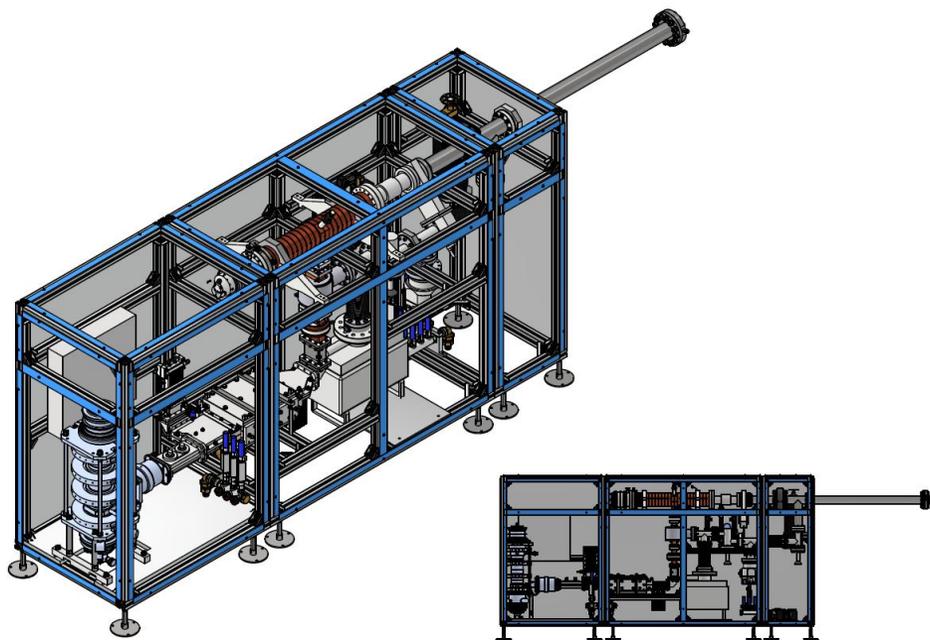


Система контроля и источники питания

Главной особенностью ускорителя является возможность варьирования параметра выходного пучка в широких пределах в зависимости от обрабатываемого продукта, что обеспечивает высокую эффективность использования мощности пучка, возможность работы с низкими и высокими дозами, сообщаемыми продукту. Параметры работы ускорителя устанавливаются автоматически в соответствии со спецификацией продукта.

Энергия пучка	5 - 10 МэВ
Импульсный ток	430 мА
Длительность импульса	4 – 12 мкс
Частота следования имп.	50 – 400 Гц
Средняя мощность пучка	1 - 15 кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Длина структуры	1.24 м
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	25 кВт
КПД от розетки	20%
Ширина сканирования	40 - 80 см
Частота сканирования	1 – 30 Гц

Технологические ускорители различного назначения



ПАО «Электровыпрямитель», Саранск

Номинальная энергия максимума спектра ускоренного пучка	6 МэВ
Энергетический разброс электронов на выходе из ускорителя, не более,	10%
Номинальный импульсный ток ускоренного пучка электронов	400 мА
Номинальный средний ток пучка электронов на выходном окне	500 мкА
Максимальная частота следования импульсов	200 Гц
Минимальная скважность	800
Диапазон регулировки среднего тока электронов	50–500 мкА.
Стабильность установленного среднего тока пучка	± 5%.

ТПУ, Томск

Номинальная энергия максимума спектра ускоренного пучка	4 МэВ
Энергетический разброс электронов на выходе из ускорителя, не более,	10%
Номинальный импульсный ток ускоренного пучка электронов	400 мА
Номинальный средний ток пучка электронов на выходном окне	1 мА
Максимальная частота следования импульсов	400 Гц
Диапазон регулировки среднего тока электронов	10–1000 мкА.
Стабильность установленного среднего тока пучка	± 5%.

ОИВТ РАН, Москва

Высокая энергия ускоренного пучка	6 МэВ
Низкая энергия ускоренного пучка	3 МэВ
Энергетический разброс на половине максимума спектра, не более,	10%
Импульсный ток ускоренного пучка электронов при высокой энергии	700 мА
Импульсный ток ускоренного пучка электронов при низкой энергии	700 мкА
Длительность СВЧ импульса на входе в ускоряющую структуру	7 мкс
Максимальная частота следования импульсов	400 Гц
Максимальная средняя мощность пучка на мишени	4 кВт
Время непрерывной работы с излучением	1...10 с
Перерыв между включениями излучения	15 мин

Новые проекты ускорителей НИИЯФ МГУ

Разработка линейного ускорителя электронов НИИЯФ МГУ для исследования фотоядерных реакций и наработки медицинских изотопов

Номинальная энергия электронов в пучке

35 МэВ.

Диапазон регулировки энергии электронов в пучке

10-35 МэВ

Энергетический разброс электронов на выходе из ускорителя

не более 10%.

Номинальный импульсный ток ускоренного пучка электронов

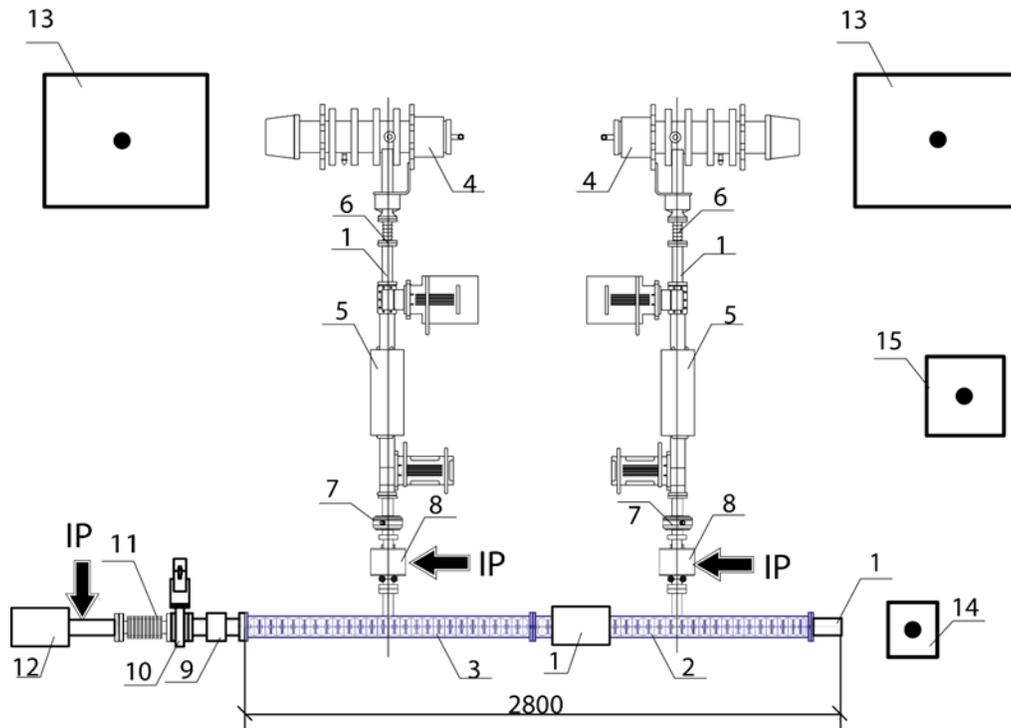
100 мА.

Номинальный средний ток пучка электронов на мишенном устройстве

100 мкА.

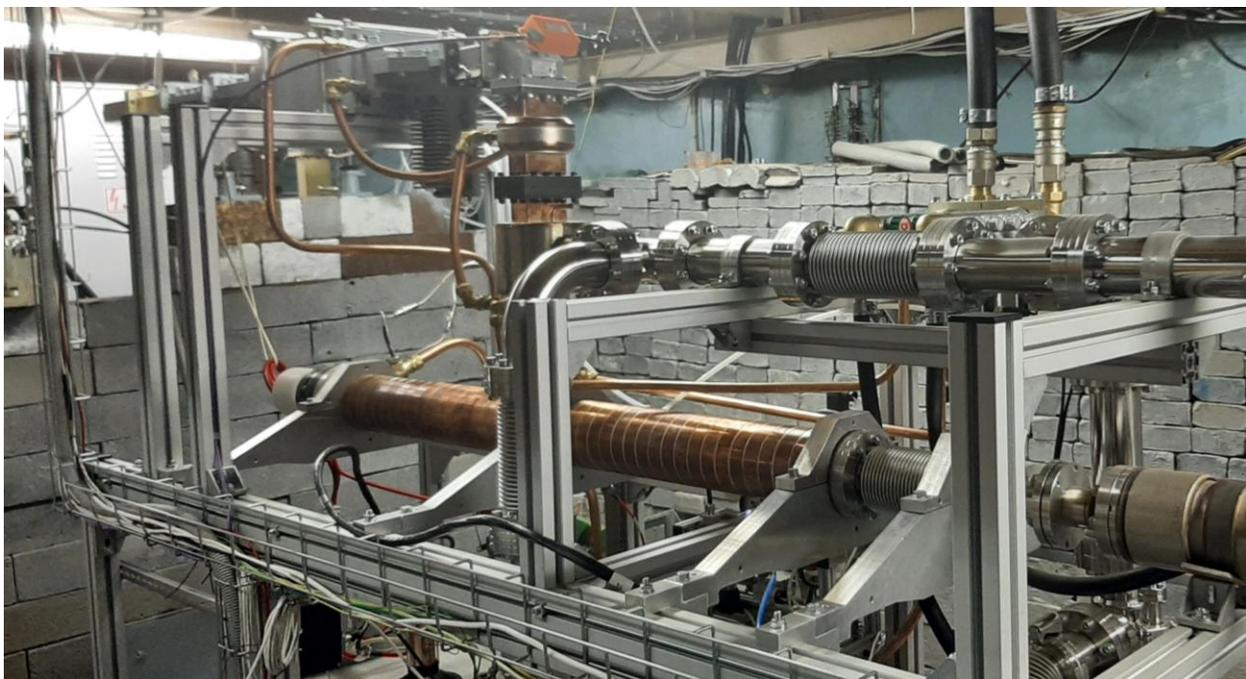
Диапазон регулировки среднего тока электронов

30–100 мкА.



1 – электронная пушка с термокатодом, 2 – секция нерегулярной ускоряющей структуры, 3 – секция регулярной ускоряющей структуры, 4 – клистрон, 5 – ферритовый вентиль, 6 – гибкий волновод, 7 – вакуумное СВЧ окно, 8 – узел откачки, 9 – датчик тока пучка, 10 – вакуумный затвор, 11 – сильфон, 12 – тормозная мишень, 13 – высоковольтный модулятор клистрона, 14 – высоковольтный модулятор пушки, 15 – система контроля и управления.

Пуско-наладка линейного ускорителя электронов для исследования фотоядерных реакций и наработки медицинских изотопов



Первая секция ускоряющей структуры



Клистроны



Модуляторы

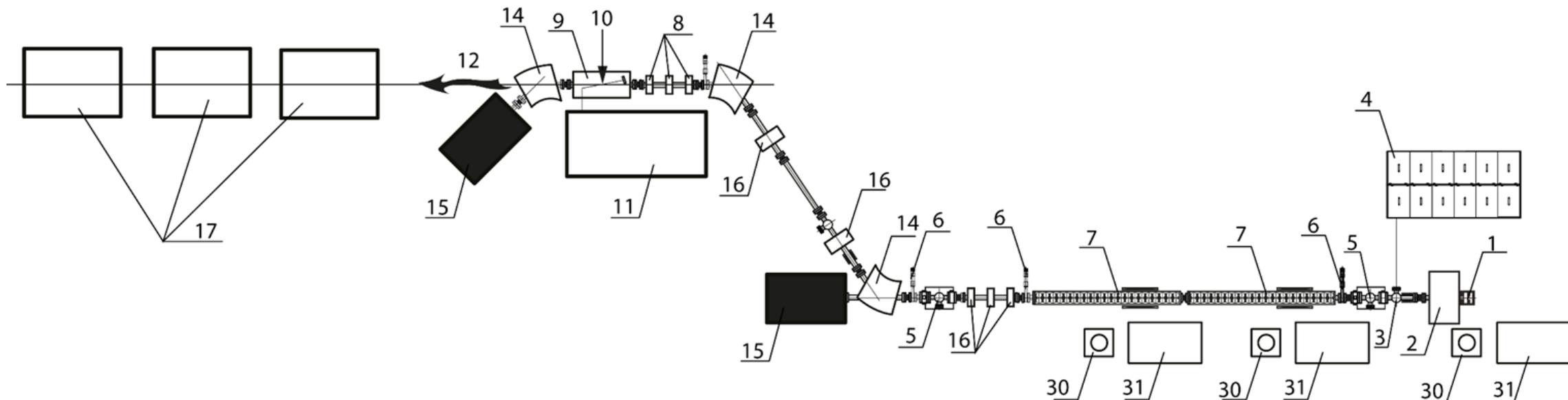


Стенд комптоновского источника НИИЯФ МГУ

Выходные параметры рентгеновского излучения комптоновского источника

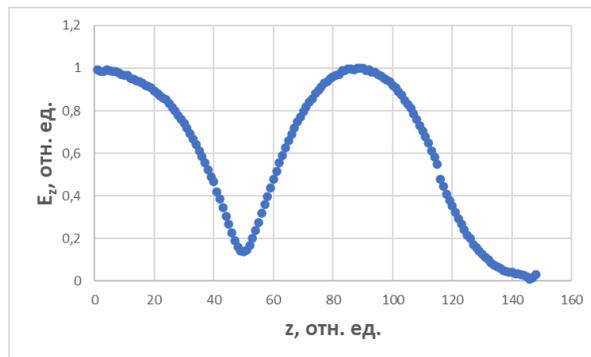
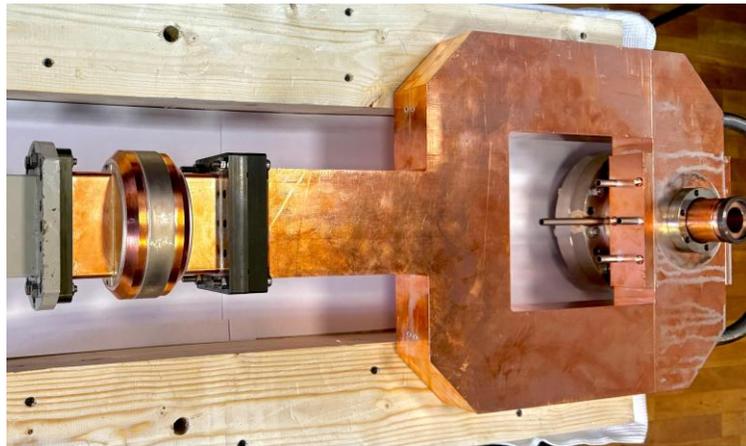
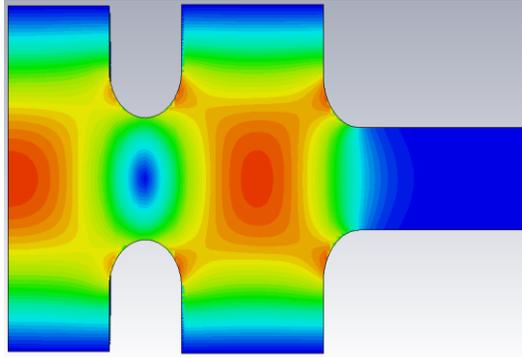
Параметр	Значение для 50 МэВ
Число рентгеновских фотонов в импульсе	$1,64 \cdot 10^7$
Средний рентгеновский поток, фот/с	$1,64 \cdot 10^{10}$
Пиковая спектральная яркость, $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}0,1\%$	$3,8 \cdot 10^{18}$
Средняя спектральная яркость, $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}0,1\%$	$3,8 \cdot 10^{10}$
Минимальная спектральная ширина без монохроматора	350 эВ
Минимальная угловая ширина без коллимации	1,8 мрад

Максимальная энергия ускоренного пучка	50 ± 2 МэВ
Диапазон регулирования энергии	35 – 50 МэВ
Разброс по энергии	$0,25 \pm 0,1\%$
Нормализованный эмиттанс	$1 \pm 0,5$ мм мрад
Среднеквадратичный радиус пучка в точке взаимодействия	30 ± 10 мкм
Заряд сгустка	100_{-0}^{+100} пКл
Длительность сгустка	10 ± 4 пс
Максимальная частота следования сгустков	1000 Гц



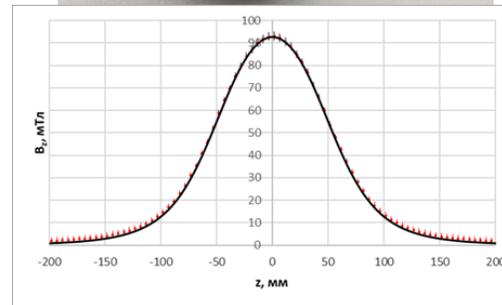
1 – СВЧ пушка с фотокатодом, 2 – соленоид, 3 – окно ввода лазерного излучения, 4 – лазер фотокатода, 5 – станция диагностики пучка, 6 – вакуумный затвор, 7 – ускоряющая структура, 8 – триплет квадрупольных линз, 9 – камера взаимодействия, 10 – точка взаимодействия, 11 – основной лазер, 12, 13 – рентгеновское излучение, 14 – поворотный магнит, 15 – поглотитель пучка, 16 – квадрупольная линза, 17 – рабочая станции, 30 - импульсный клистрон, 31 – модулятор

СВЧ пушка



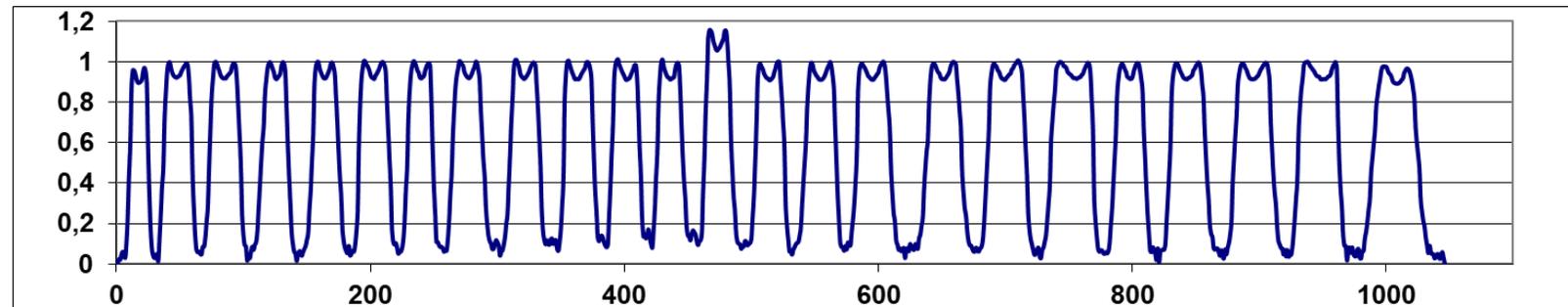
Измеренное распределение поля

Соленоид



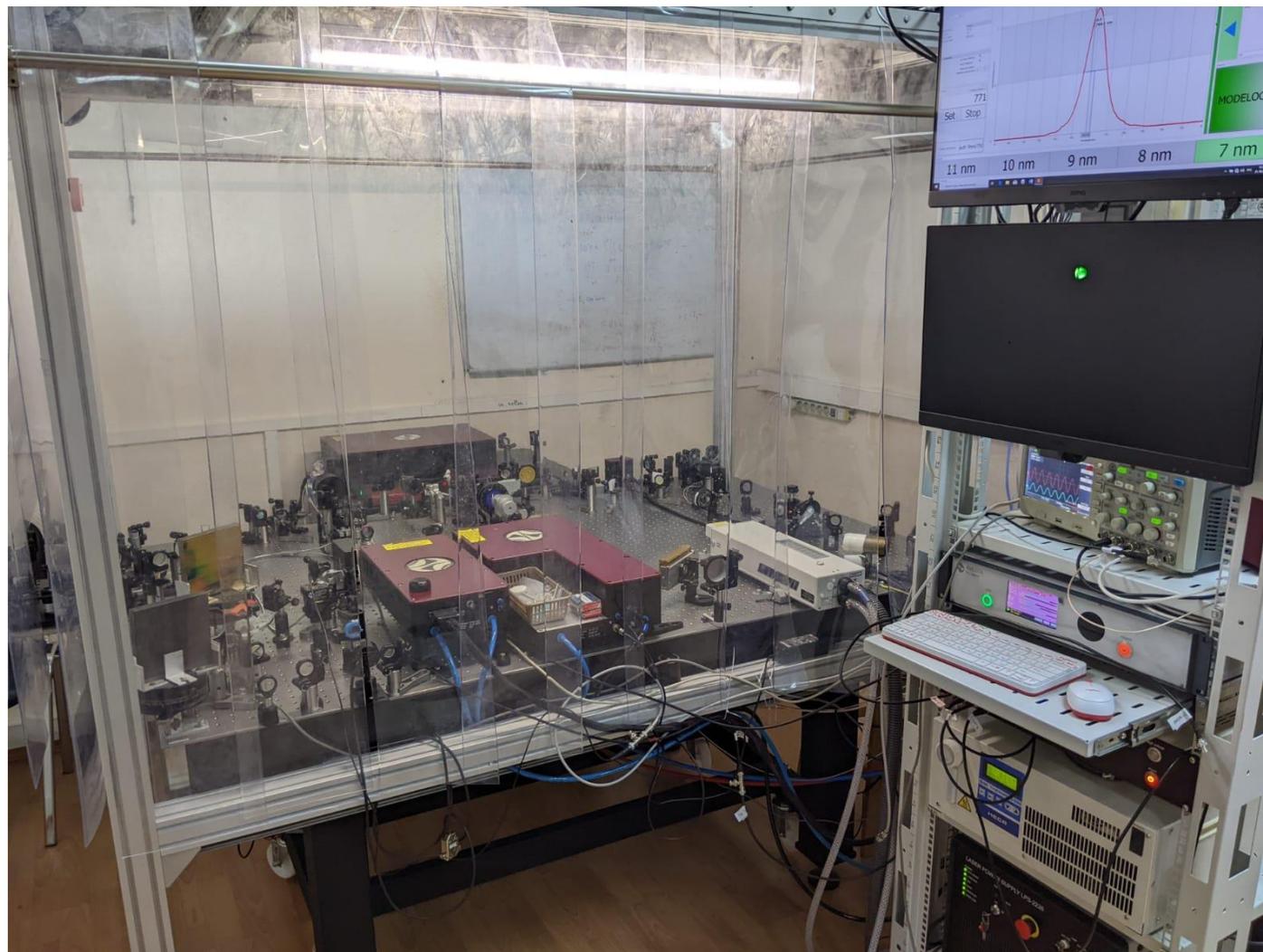
Распределение поля: расчет и измерения

Ускоряющая структура



Измеренное распределение поля

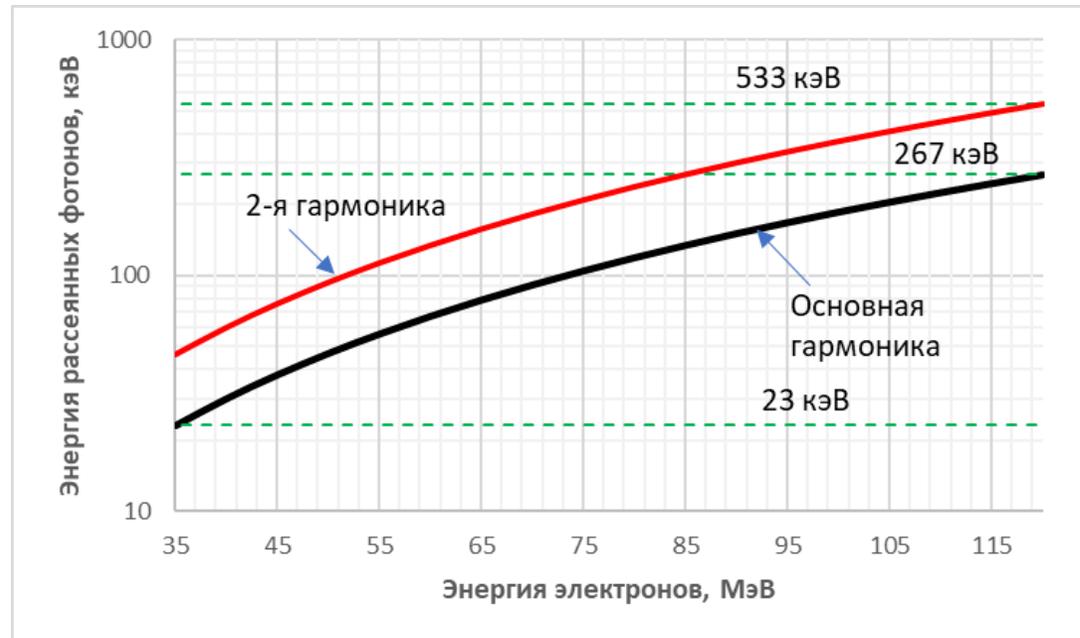
Лазерная система фотокатода (Физический факультет МГУ, проф. А.Б. Савельев)



Источник комптоновского излучения НЦФМ

Основные положения «малого» ИКИ НЦФМ

1. Принцип перекрытия по энергии с «большим» ИКИ.
2. Энергия электронов на выходе линейного ускорителя регулируется в диапазоне 35...120 МэВ. Лазерная система работает в режиме отдельных импульсов на основной гармонике (1,2 эВ). Диапазон энергий рентгеновских фотонов 23...267 кэВ.
3. Кольцо работает в диапазоне энергий 35...120 МэВ. Оптический резонатор работает на второй гармонике (2,4 эВ). Диапазон энергий рентгеновских фотонов 46...533 кэВ.



Облик ускорительного комплекса ИКИ с максимальной энергией 120 МэВ

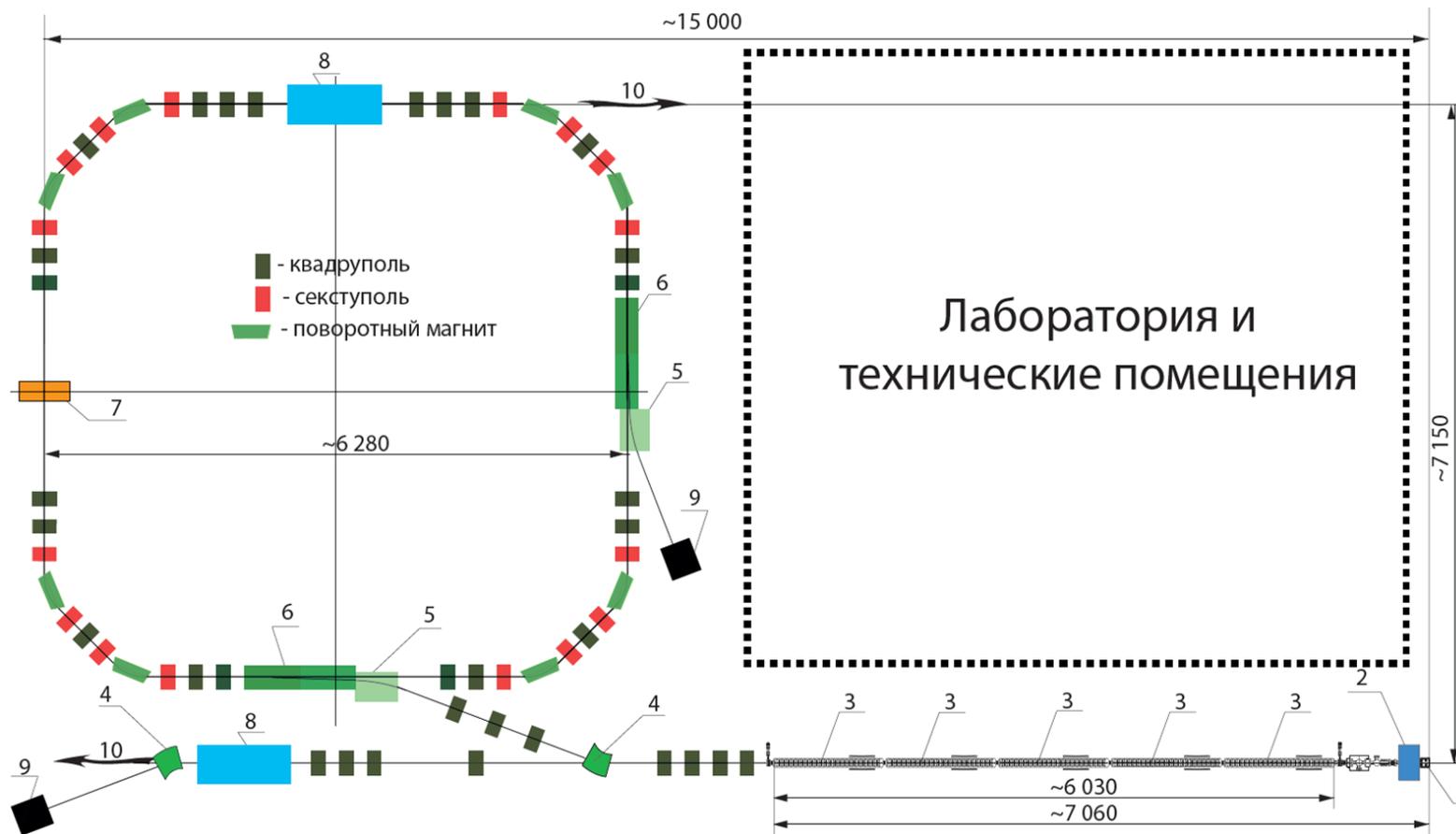


Схема ускорительного комплекса ИКИ на энергию 120 МэВ. 1 – СВЧ пушка, 2 – соленоид, 3 – секция ускоряющей структуры, 4 – поворотный магнит, 5 – септум-магнит, 6- кикер, 7 – ВЧ резонатор, 8 – камера взаимодействия, 9 – поглотитель пучка, 10 – рентгеновское излучение.

Линейный ускоритель на энергию 35 – 120 МэВ

Параметр	Значение
Диапазон энергий	35 ... 120 МэВ
Заряд сгустка	100 пКл
Нормализованный эмиттанс	0,4-0,6 мм мрад
Среднеквадратичный разброс по энергии	0,1 %
Частота следования сгустков	до 400 Гц

Для энергии лазерного импульса 100 мДж полное число фотонов на одно взаимодействие $N_\gamma \approx 4,3 \times 10^6$, в интервал по энергии 0,5%: $N_{\gamma 0,5\%} \approx 1,6 \times 10^4$ фотонов. При частоте повторения 400 Гц $dN_{\gamma 0,5\%}/dt \approx 6,4 \times 10^6$ фотонов/с Средняя мощность лазера 40 Вт.



Спасибо за внимание!