



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Радиография в газодинамических исследованиях

Зимняя школа по физике высоких плотностей энергии

г. Снежинск, 25 – 27 февраля 2026 г.

Пензин Илья Владимирович

Рентгеновское излучение (тормозное)

Тормозное излучение — это электромагнитное излучение, которое возникает при торможении заряженной частицы (электрона) в электрическом поле другой заряженной частицы (например, атомного ядра).

Распределение тормозного излучения выражается формулой Клейна-Нисины:

$$I_{\theta} = I \frac{e^4}{r^2 \cdot m^2 \cdot c^4} \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \left[\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - \cos \theta)]^2} + \frac{\alpha^2 \cdot (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^4} \right] e^{-\alpha}$$

Где:

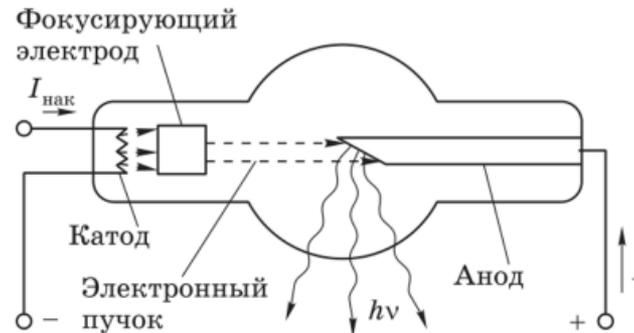
e – заряд электрона;

r – расстояние от рассеивающего электрона;

m – заряд электрона;

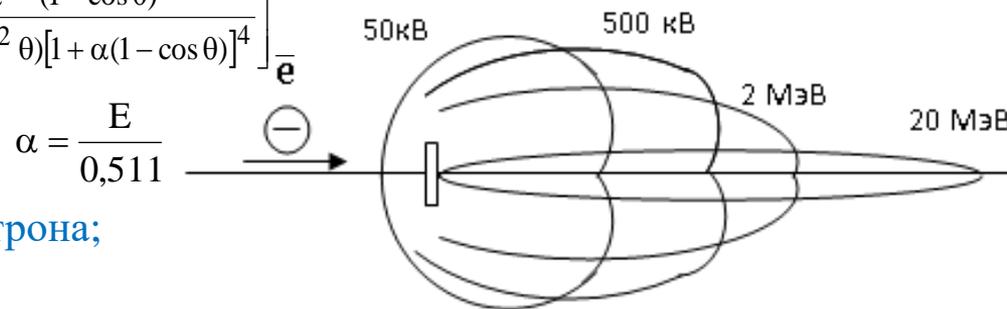
c – скорость света;

I – интенсивность падающего излучения.



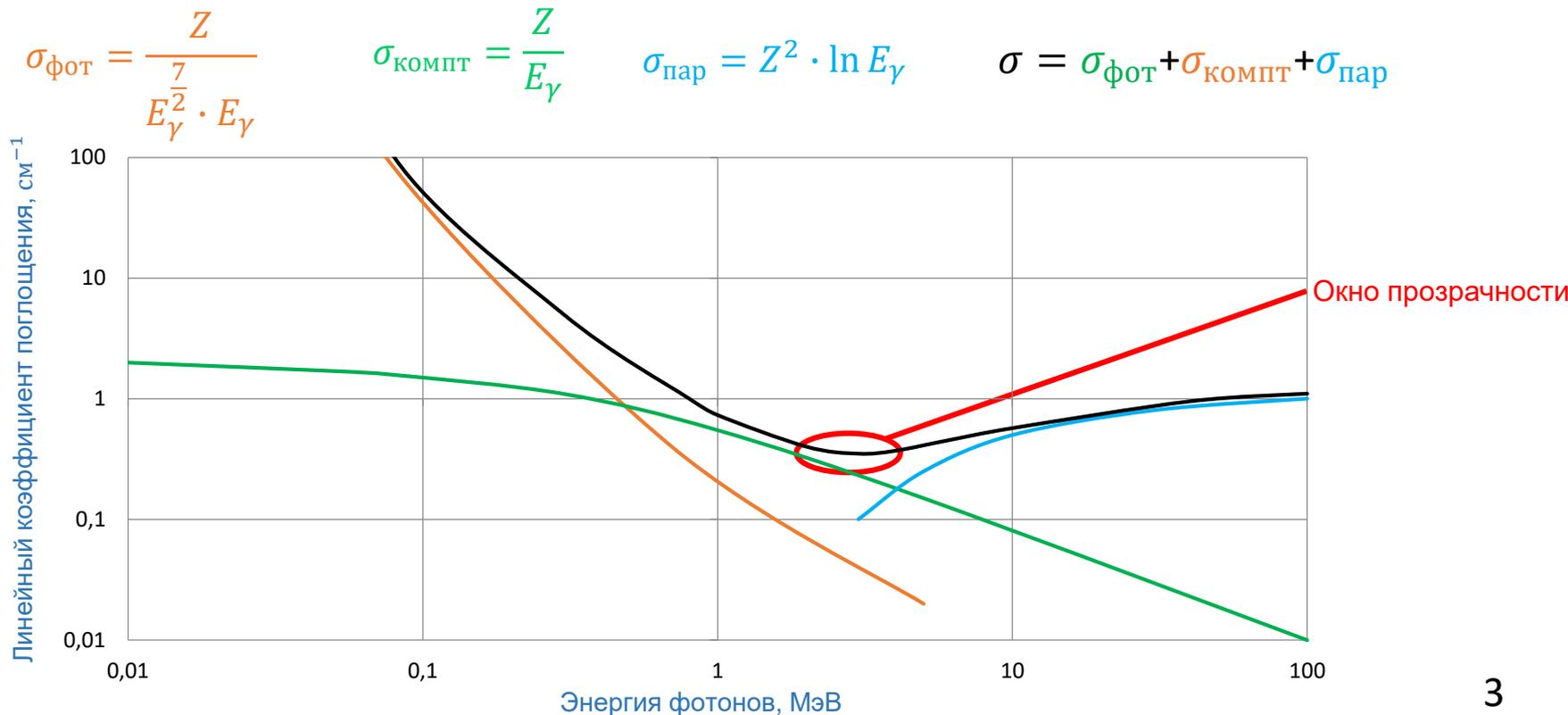
Рентгеновское излучение

Рентгеновская трубка

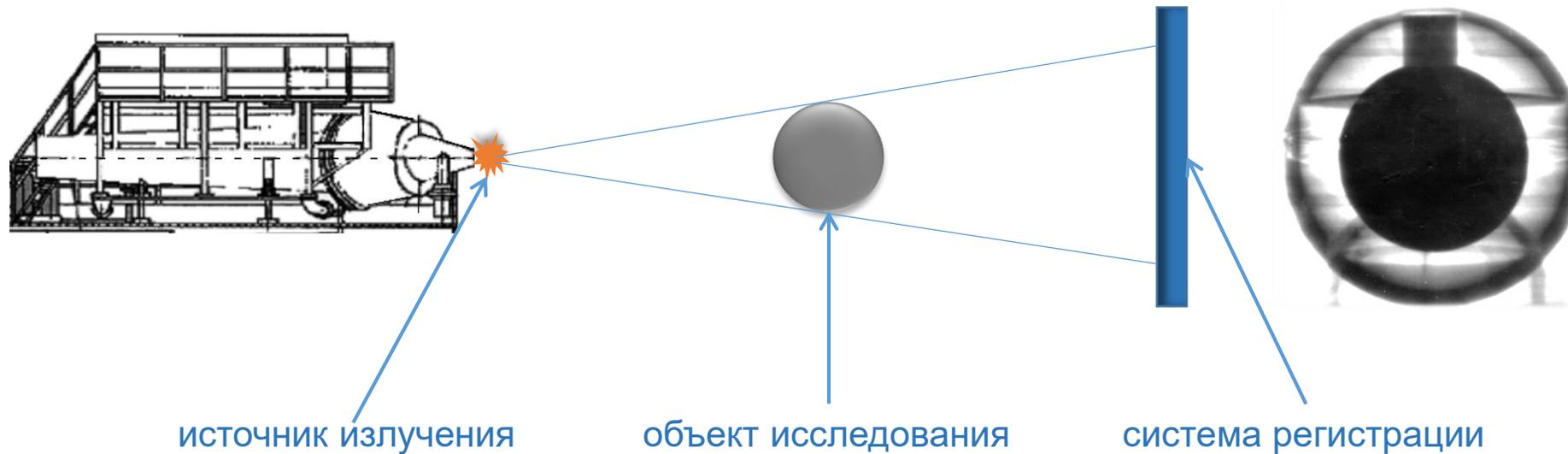


Направленность тормозного излучения

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом



Метод рентгенографии



Первые рентгенографические установки РФЯЦ-ВНИИТФ



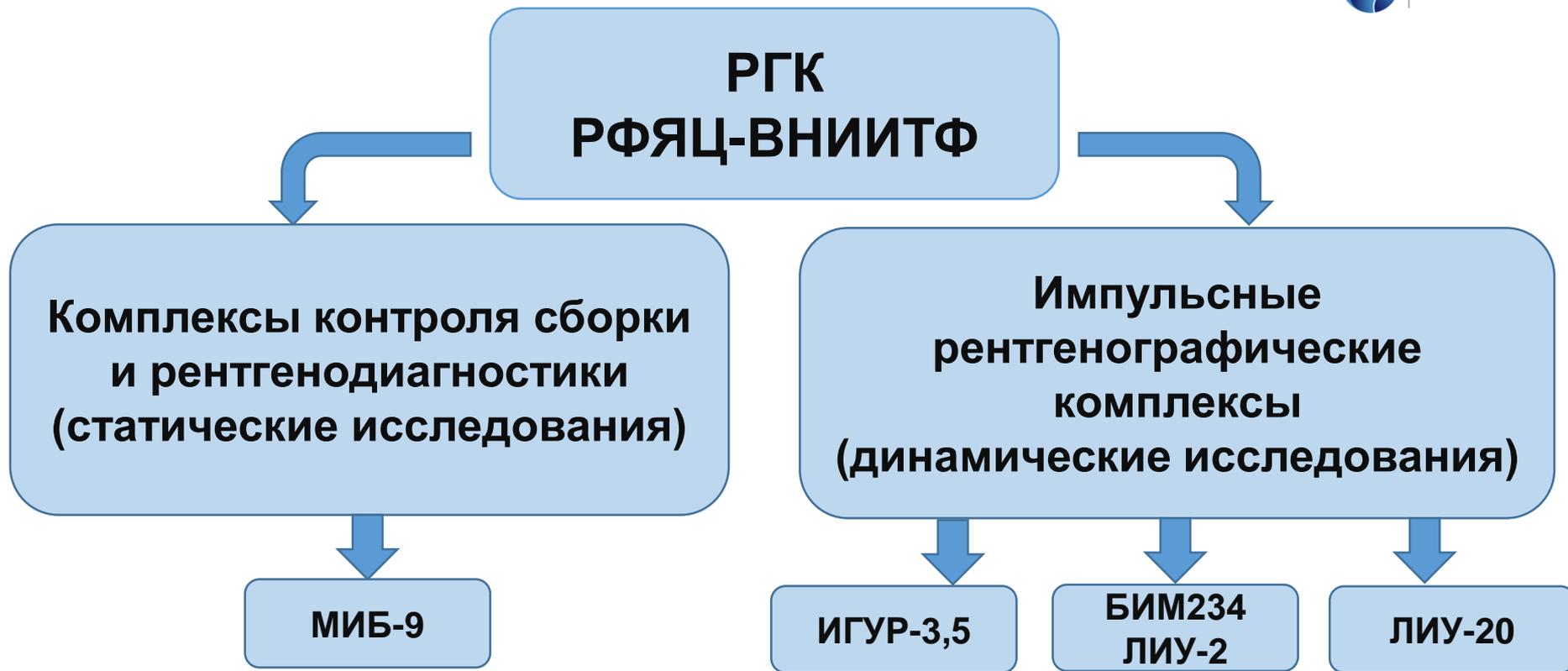
ГРИН
(80 мм Рb на 1 м)



БИМ 117
(110 мм Рb на 1 м)



БИМ234.500
(170 мм Рb на 1 м)



Комплексы контроля сборки

Тип источника	МИБ-7.5	МИБ-9
Энергия ускоренных электронов, МэВ	7,5	9
Мощность экспозиционной дозы (на расстоянии 1 м от мишени), Р/мин	7	30
Фокусное пятно бетатрона, мм	0,27x2,5	0,3x3



Плоско панельный
детектор



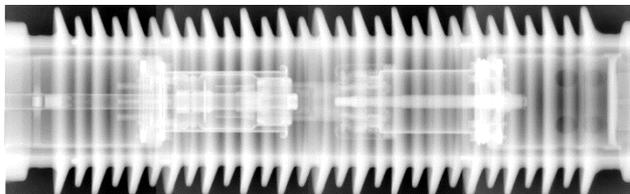
МИБ-9



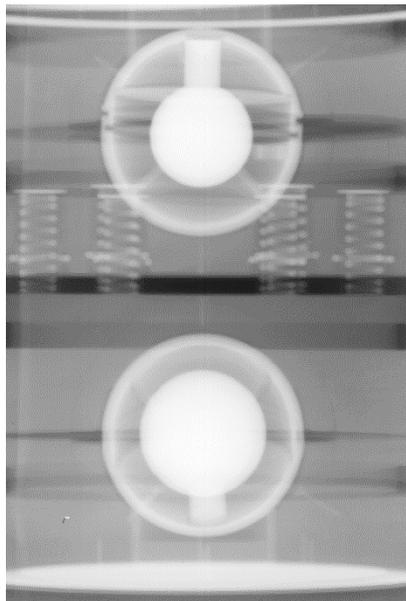
Сканер фотолуминесцентных
экранов

Исследование статических объектов

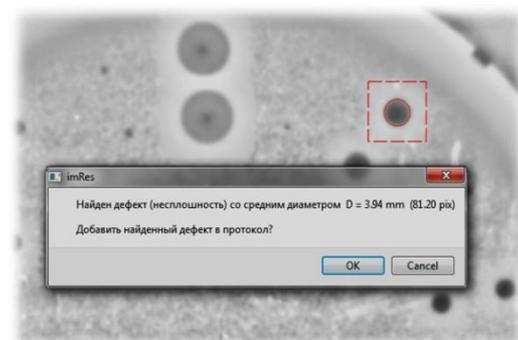
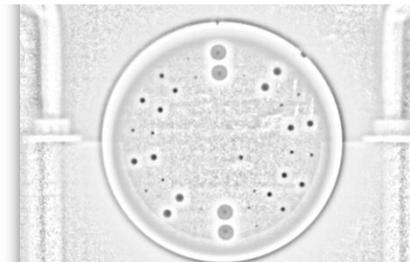
Контроль крупногабаритного
промышленного оборудования



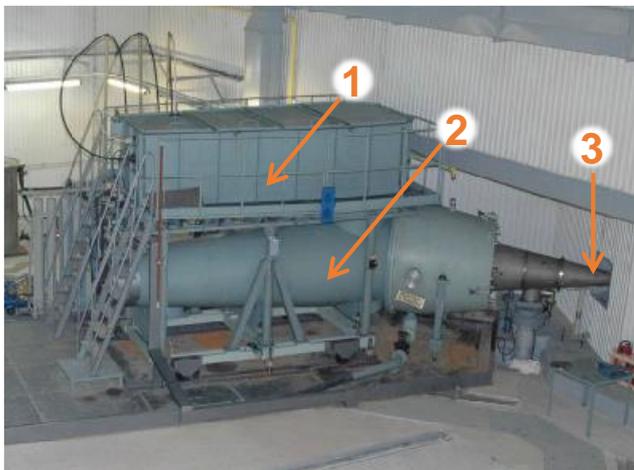
Контроль состояния
внутренних элементов
контейнеров



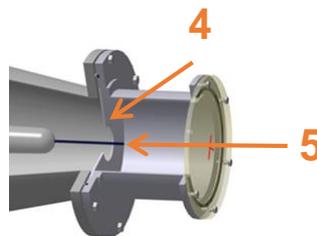
Определение дефектов в
высокоплотных материалах



Комплекс на базе сильноготочного ускорителя ИГУР-3,5



ИГУР-3,5

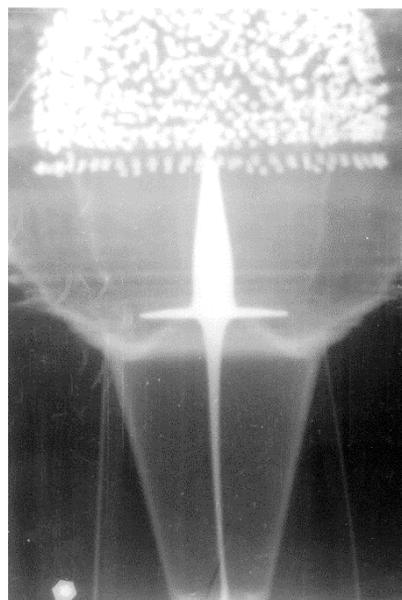
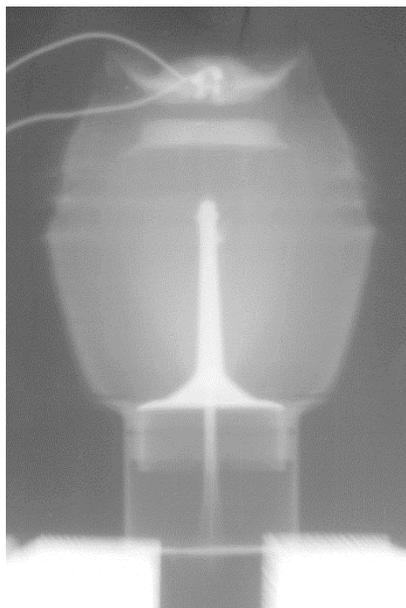


Род-пинч
диод

- 1 – генератор импульсных напряжений;
- 2 – система формирования импульсов;
- 3 – ускорительная трубка с род-пинч диодом;
- 4 – катод;
- 5 – анод

Параметр	Энергия электронов	Амплитуда тока пучка	Длительность импульса	Размер ФП	Просвечивающая способность
Величина	До 4 МэВ	До 45 кА	30-90 нс	> 1,5	80 мм Pb

Комплекс на базе сильноточного ускорителя ИГУР-3,5



Образование кумулятивных струй и высокоскоростных элементов

Комплекс г/д отработки на базе бетатронов БИМ234.3000 и ЛИУ-2



ЛИУ-2 (линейный индукционный ускоритель)

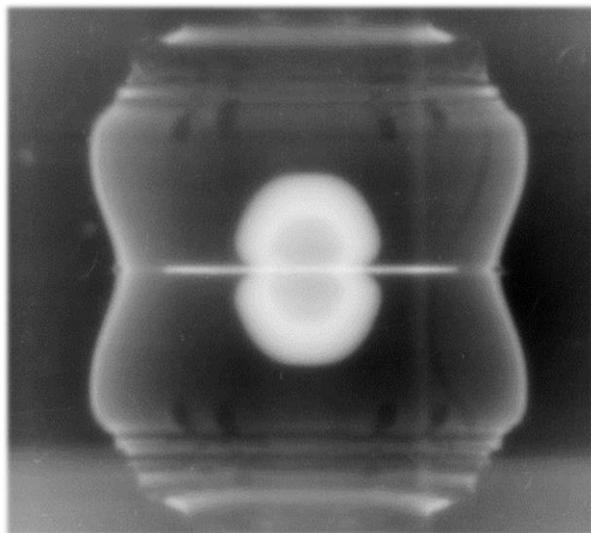


БИМ234.3000 (безжелезный бетатрон)

Параметр	Энергия электронов	Амплитуда тока пучка	Длительность импульса	Размер ФП	Просвечивающая способность
ЛИУ-2	2 МэВ	2 кА	200 нс	1,6 мм	40 мм Pb
БИМ234.3000	70 МэВ	0,2 кА	100 нс	2,5x6 мм	165 мм Pb

Комплекс г/д отработки на базе бетатронов БИМ234.3000 и ЛИУ-2

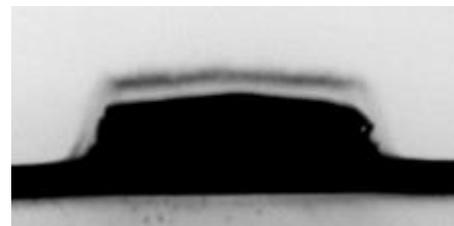
БИМ234.3000



ЛИУ-2



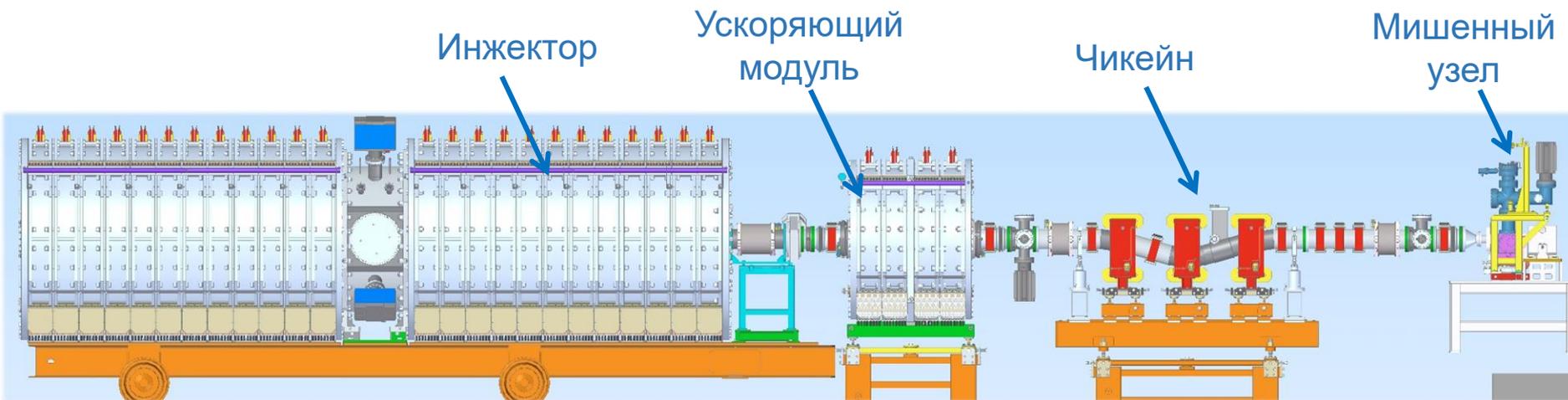
Исследования процессов распространения детонации



Исследования процессов пыления

На комплексе реализовано совмещение рентгенографической методики с методиками: МСД (методика симметрии-динамики), ЛГМ (лазерно-гетеродинная методика), ТИ (метод термоядерного источника), ММД (методика манганинового датчика), РИФ (радио интерферометрическая методика).

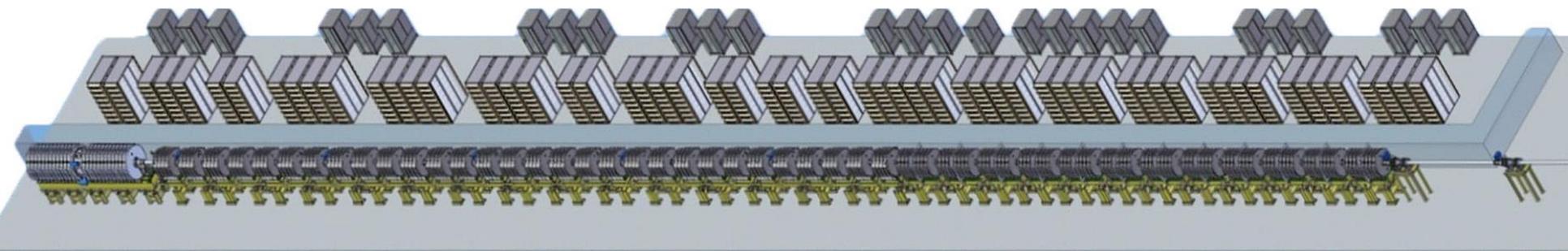
Модернизация ЛИУ-2 (ЛИУ-2М)



Параметр	Энергия электронов	Амплитуда тока пучка	Длительность импульса	Размер ФП	Просвечивающая способность
ЛИУ-2М	2,3 МэВ	2 кА	3*80 нс	1 мм	60 мм Pb

Комплекс на базе ЛИУ-20

Ускоритель ЛИУ-20



Параметр	Энергия электронов	Амплитуда тока пучка	Длительность импульса	Размер ФП	Просвечивающая способность
Величина	20 МэВ	2 кА	90 нс	> 1,1	280 мм Рb

Комплекс на базе ЛИУ-20

Ускоритель ЛИУ-20

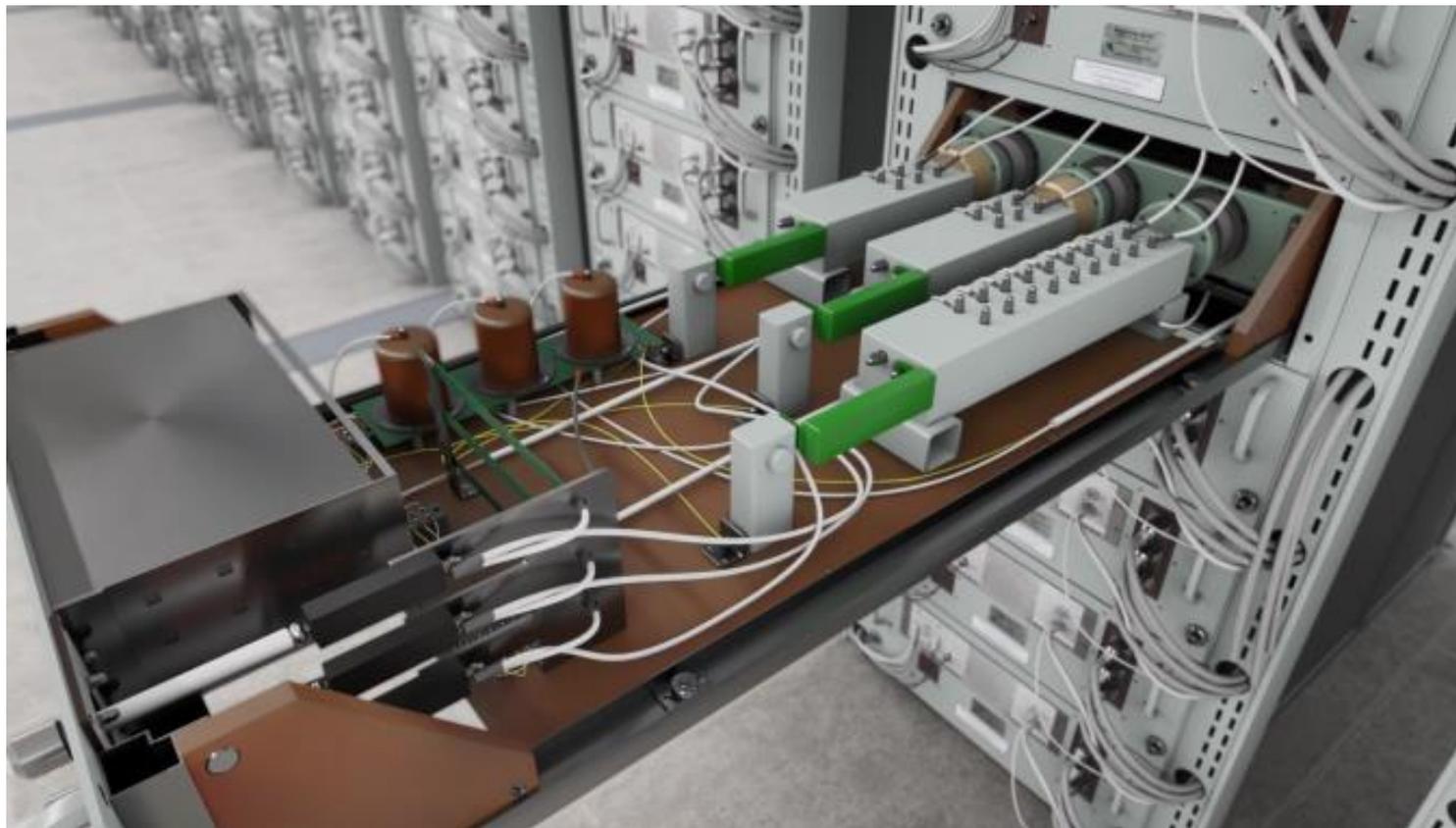


Комплекс на базе ЛИУ-20

Формирование ускоряющих напряжений

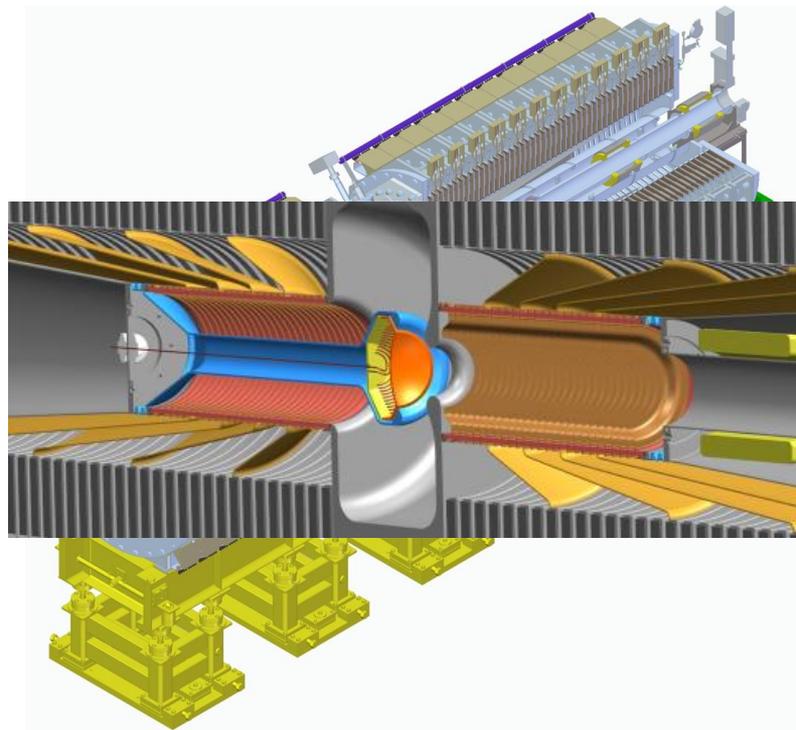


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

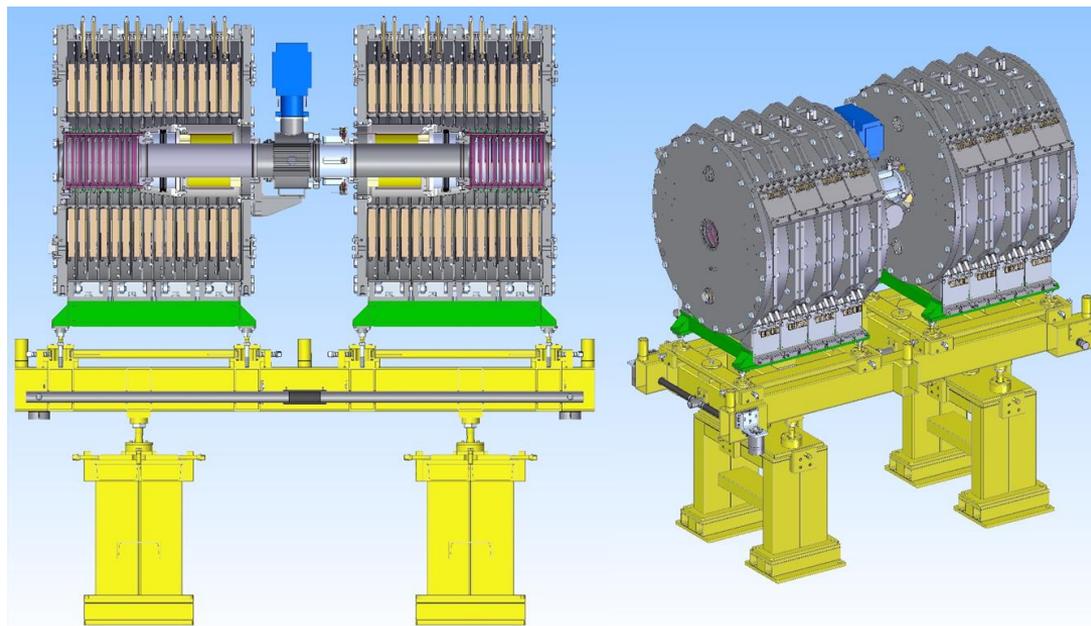


Комплекс на базе ЛИУ-20

Формирование и ускорение пучка электронов



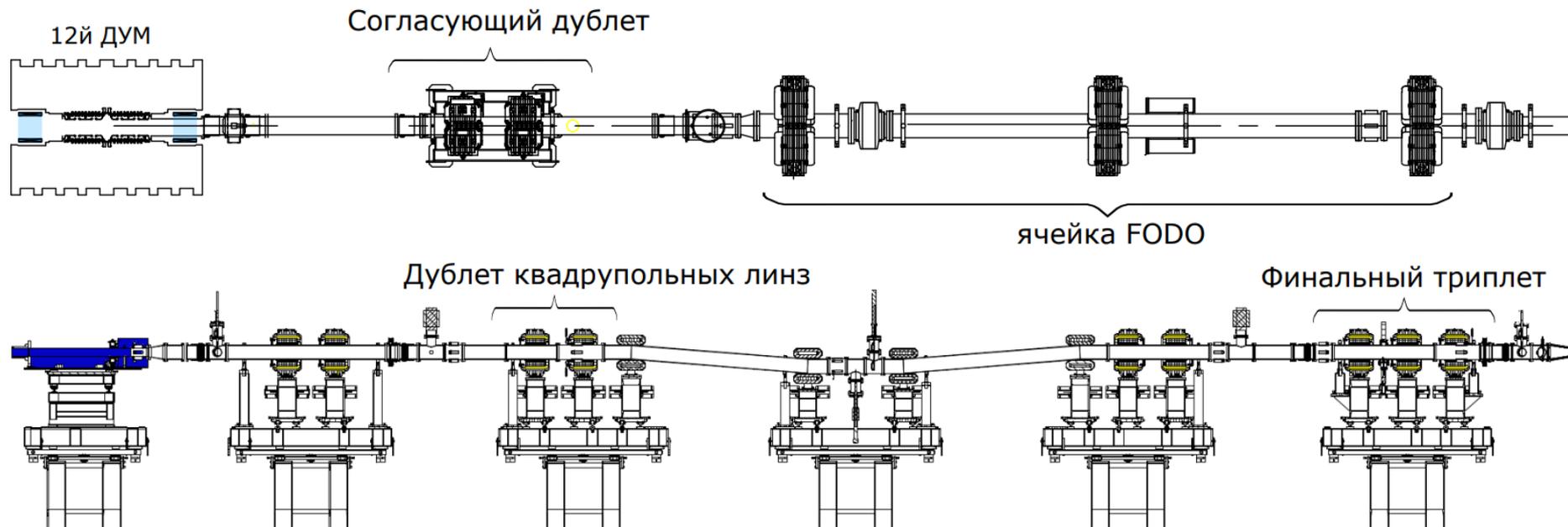
Инжектор



Ускоряющие модули

Комплекс на базе ЛИУ-20

Транспортировка электронного пучка

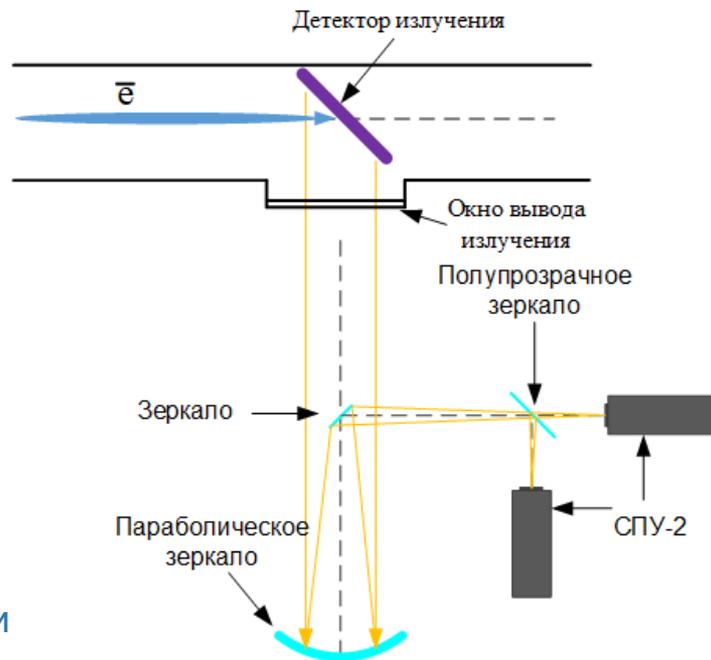


Комплекс на базе ЛИУ-20

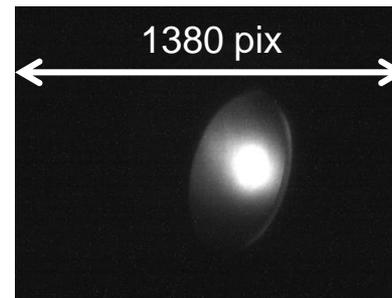
Диагностика параметров электронного пучка



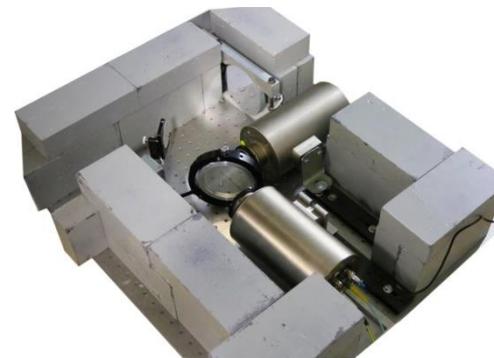
Пост диагностики



Регистратор поперечного профиля с использованием рефлектора системы Ньютона



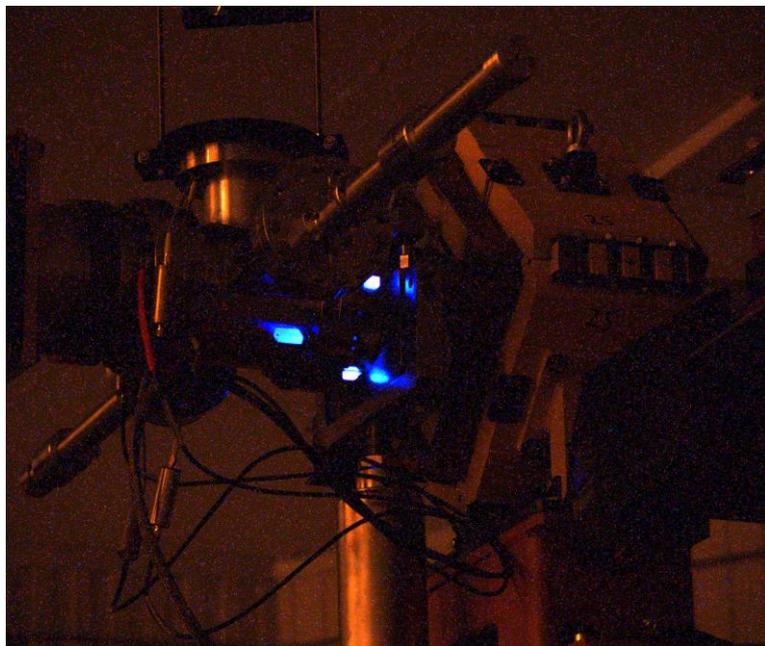
Пример поперечного профиля



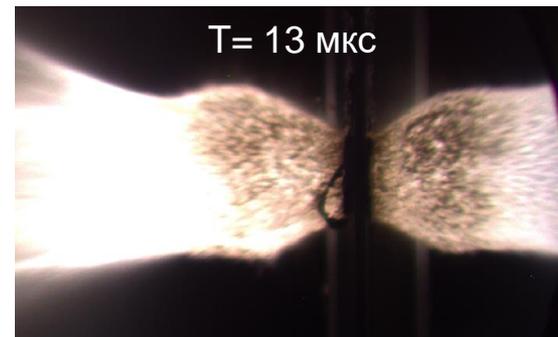
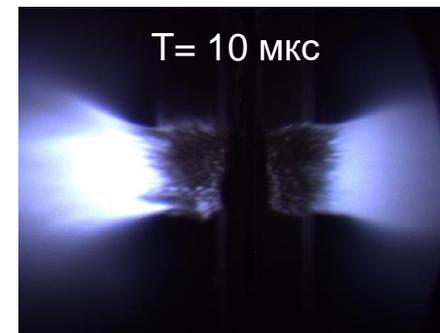
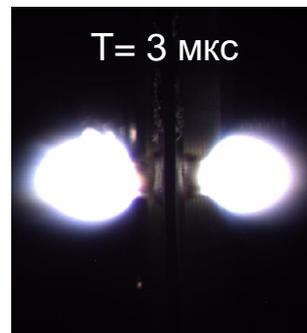
Фотография регистратора

Комплекс на базе ЛИУ-20

Различные исследовательские работы



Исследование потерь пучка при помощи
сцинтилляторов

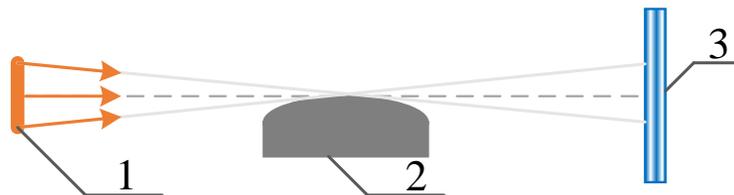


Исследование разлёта конверсионных
мишеней

Комплекс на базе ЛИУ-20

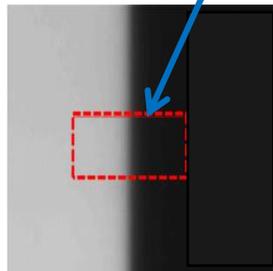
Диагностика параметров фокусного пятна

Классический способ измерения ФП

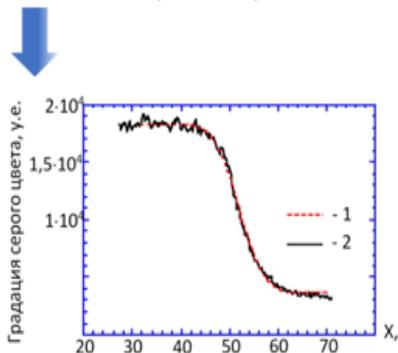


1 - источник, 2 - сегмент цилиндра,
3 - изображение на системе регистрации

Срез

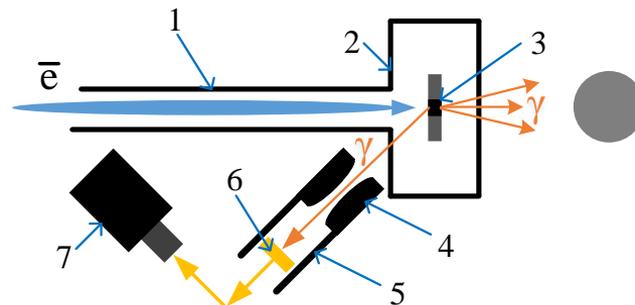


Теневое изображение

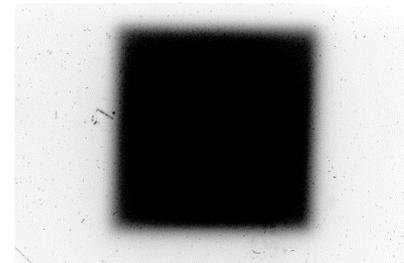


Фотометрический срез

СОДФП



1 – транспортный канал ЛИУ; 2 – мишенный узел; 3 – мишень;
4 – коллиматор; 5 – защитный экран; 6 – сцинтиллятор;
7 – камера



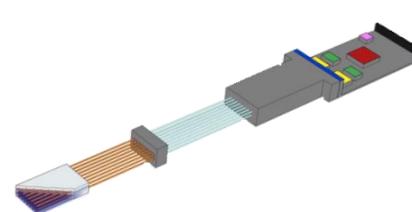
Зарегистрированное изображение

Комплекс на базе ЛИУ-20

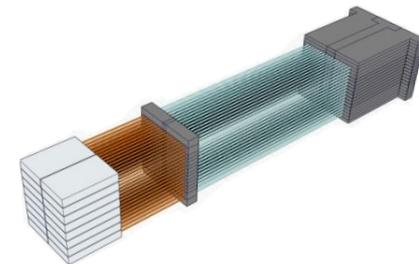
Детектирующая станция



Единичный канал регистрации



Сборка – 2 x 8
каналов



Модуль – 2 x 8
сборок

Основные технические характеристики ДС

Количество каналов регистрации	16384
Чувствительная область по объекту	100 x 100 мм
Сохраняемый временной интервал	80 мкс



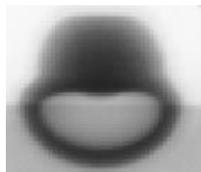
МСЭ – 8 x 8 модулей

Комплекс на базе ЛИУ-20

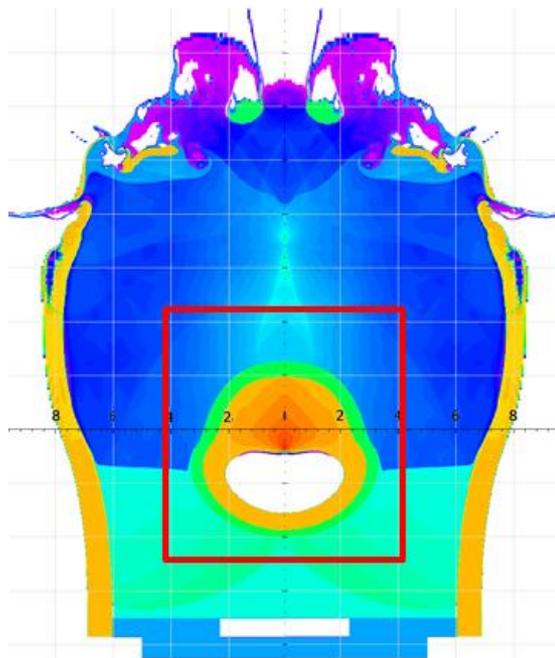
Сравнение моделирования и экспериментальных данных

Первый момент времени

Второй момент времени



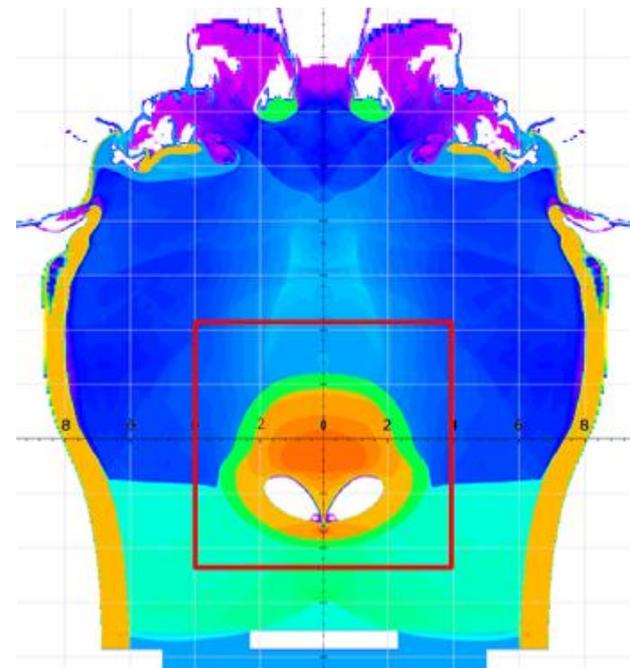
эксперимент



расчет

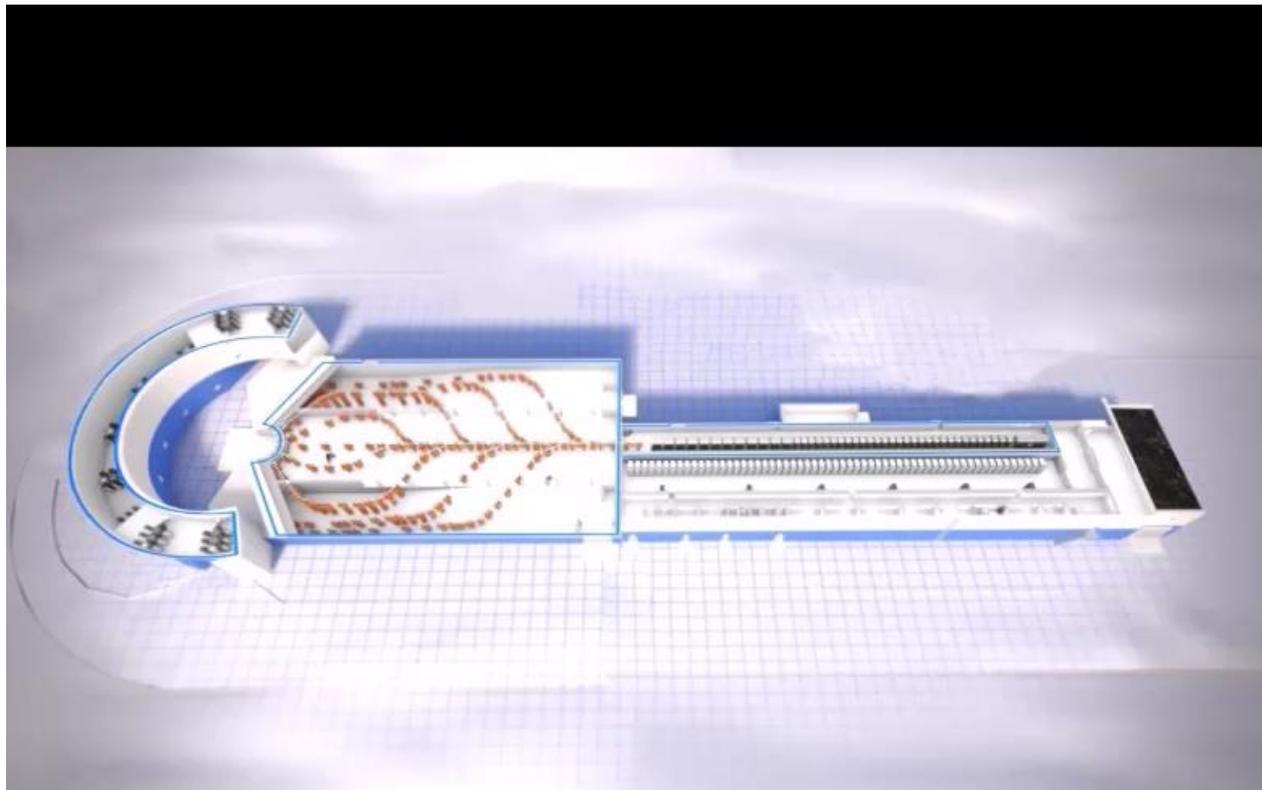


эксперимент



расчет

Будущее комплекса на базе ЛИУ-20



Спасибо за внимание

