



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

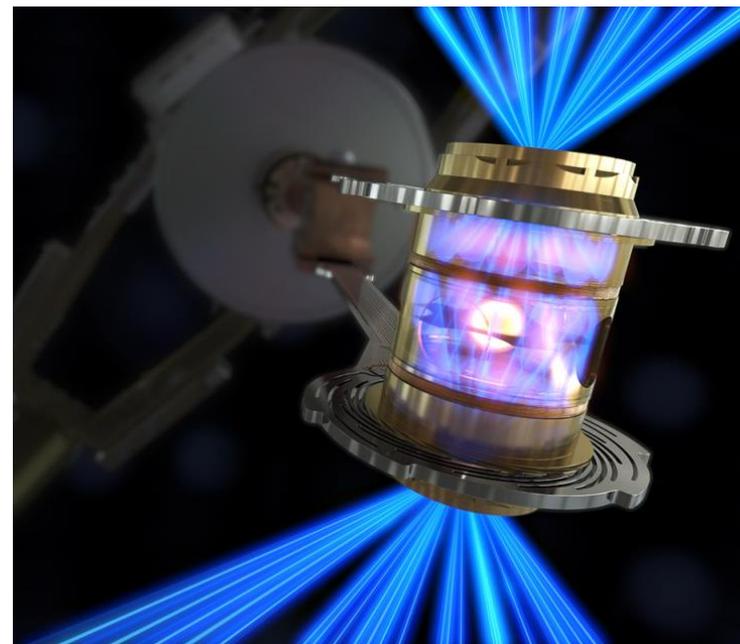
# Радиография как способ изучения быстропротекающих газодинамических процессов

Протас Р.В.

# Быстропротекающие газодинамические процессы



Взрыв



Мишень лазерной установки NIF

## Газодинамические задачи:

- вычисление объемов компактных масс и отслеживание процесса их сжатия
- определение границ полостей и динамики их движения
- исследование состояния пластины или оболочки, разгоняемой взрывом
- распределение плотности в компактной массе вещества.

# Радиография – метод импульсной рентгенографии

1895 год – открытие X-лучей В.К. Рентгеном

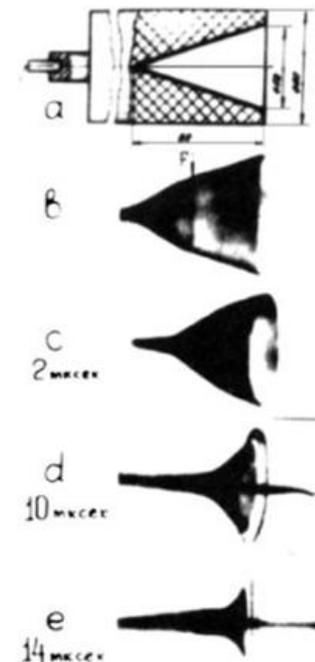
1938 год – К. Кингдом и Г. Танис разработали методы получения гамма-вспышек микросекундной длительности

1938 год – М. Штейнбек получил рентгеновский снимок пули в свободном полете

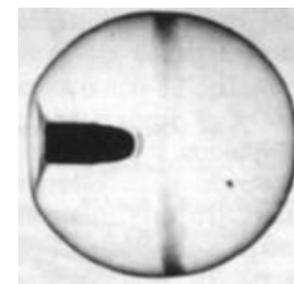
1940-е годы – рождение импульсной рентгенографии в СССР. В.А Цукерман создает импульсную рентгеновскую установку мегавольтного диапазона

1960-е годы – А.И. Павловский и Г.Д. Кулешов создают безжелезные импульсные бетатроны

С 1980-х по 2020-е годы – создание в США, Китае и России рентгенографических линейных индукционных ускорителей

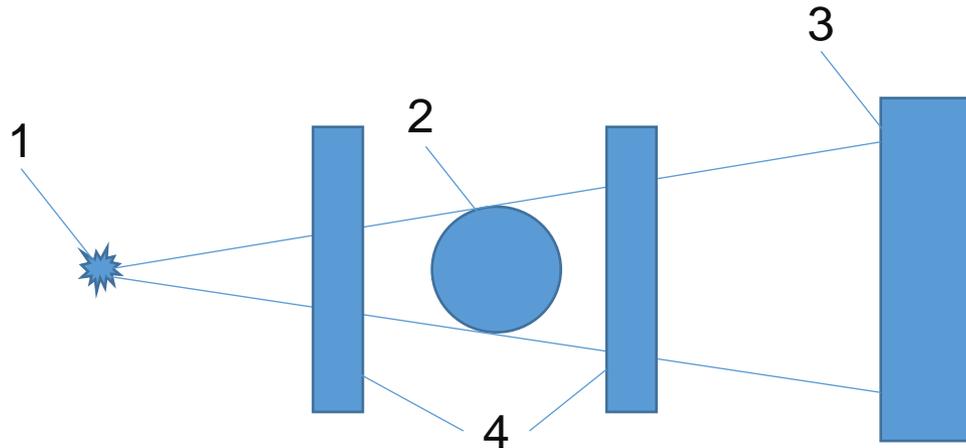


Рентгенограммы кумулятивного заряда



Рентгенограмма пули

## Схема рентгенографирования



1- источник излучения, 2 - объект исследования, 3- система регистрации,  
4 – система защиты

## Основные характеристики элементов метода импульсной рентгенографии

**Источник излучения:** длительность импульса излучения; фокусное пятно; просвечивающая способность; спектр излучения.

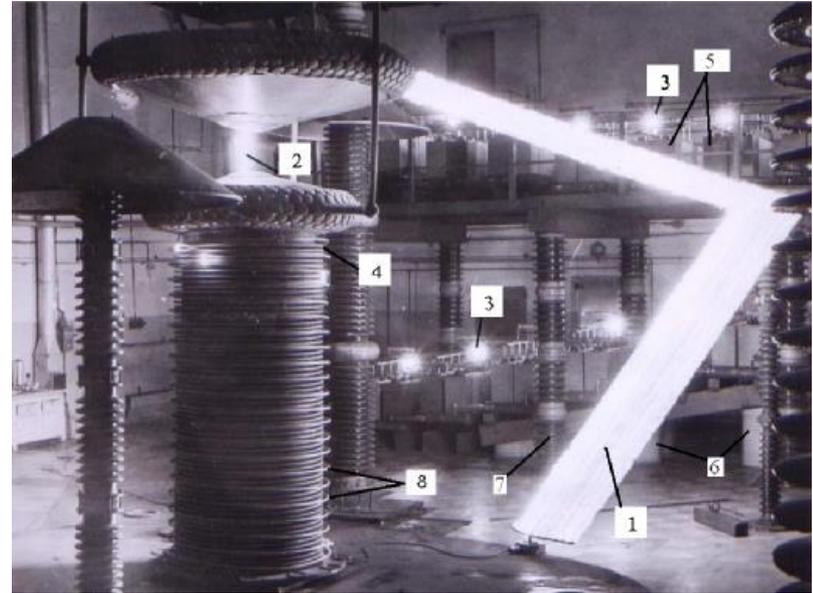
**Система регистрации:** размер пикселя (зерна); динамический диапазон; поле регистрации; количество регистрируемых изображений.

**Объект исследования:** скорость движения; массовая толщина.

# Рентгенографический комплекс РФЯЦ-ВНИИТФ до 2000-х годов



Установка ГРИН



Установка ЭМИР



Бетатрон БИМ-234-500

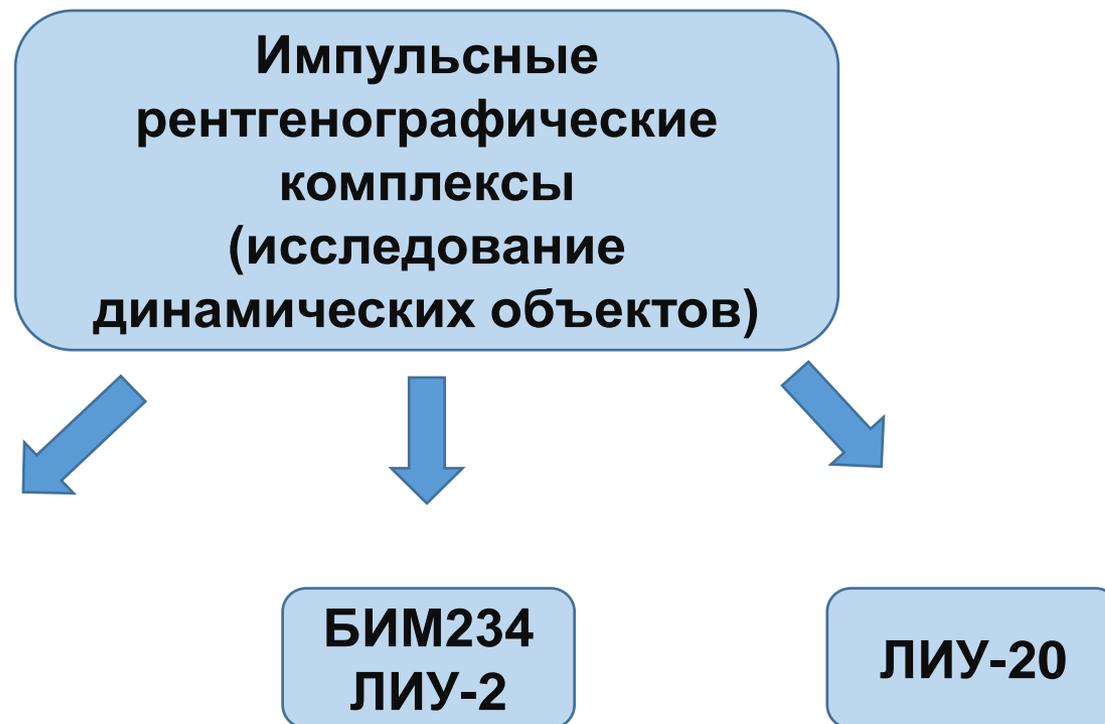
Козловский, В. Н. Информация в импульсной рентгенографии/ под редакцией Б. В. Литвинова. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2006.

Импульсные ускорители электронов с индуктивным накопителем энергии/ под ред. В. П. Ковалева. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2012.

# Рентгенографический комплекс РФЯЦ-ВНИИТФ



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



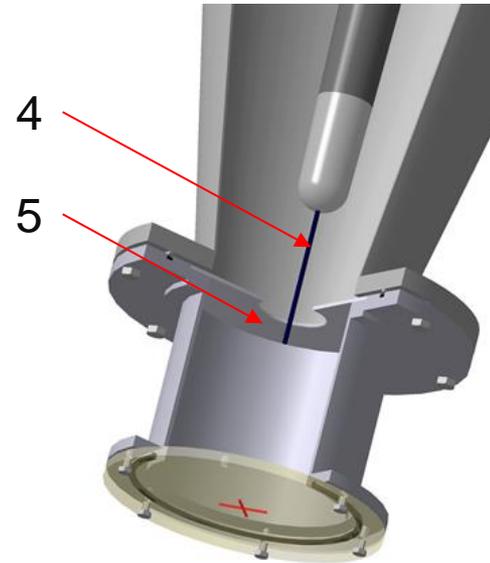
# Комплекс на базе высокоточного ускорителя ИГУР-3,5

## Фотография ускорителя ИГУР-3,5



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

## Схема род-пинч диода



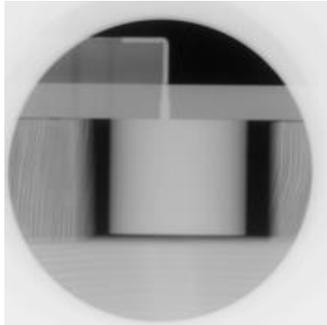
## Фотография анодной иглы после воздействия электронного пучка



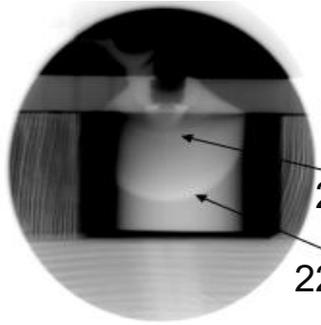
# Комплекс на базе сверхточного ускорителя ИГУР-3,5



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

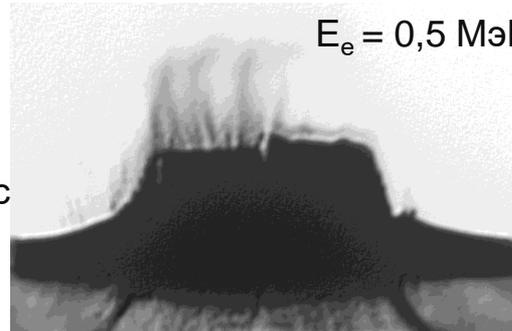


предварительный снимок

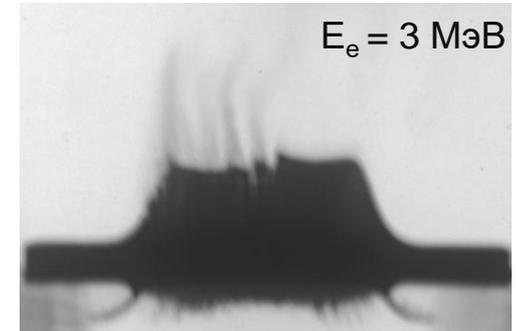


рабочий снимок

Исследование процессов развития детонации  
(двухимпульсный режим)

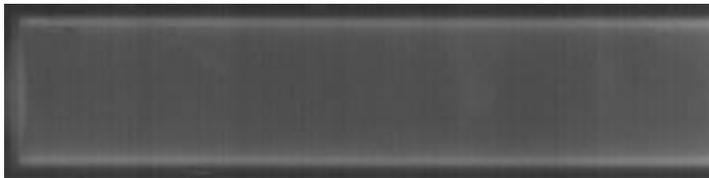


$E_e = 0,5 \text{ МэВ}$

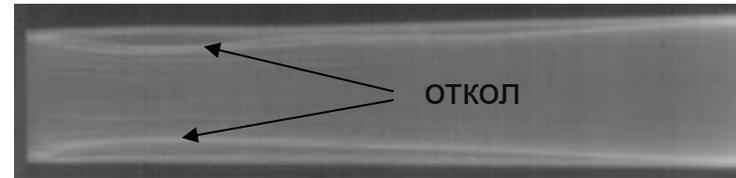


$E_e = 3 \text{ МэВ}$

Исследование «пыления» материалов при выходе ударной волны на свободную поверхность

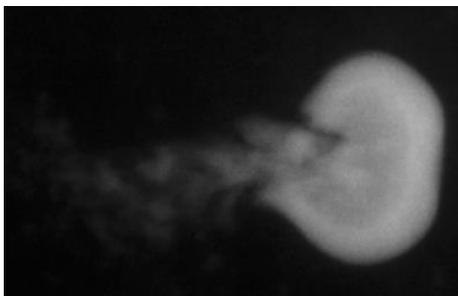


предварительный снимок



рабочий снимок

Исследование откольного явления в цилиндрической оболочке



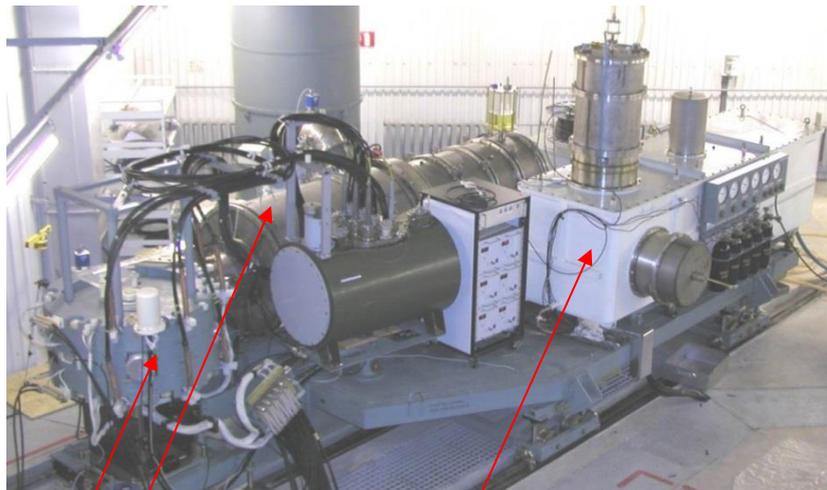
Регистрация процесса образования высокоскоростных поражающих элементов, кумулятивных струй

# Комплекс на базе бетатронов БИМ234.3000 и ЛИУ-2



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Фотография бетатрона БИМ234.3000



1 2 3

1 – бетатрон 2 – инжектор 3 – генератор импульсных напряжений

Фотография ЛИУ-2



1 2

1 – ускоритель 2 – система импульсного питания

## Схема расположения ускорителей

1 – безжелезные бетатроны  
БИМ234.3000  
2 – линейный индукционный  
ускоритель ЛИУ-2



Инструменты статической и импульсной рентгенографии:  
сборник научных трудов / под ред. О. А. Никитина и Р.В.  
Протаса. – Снежинск: изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2023. – 460 с.

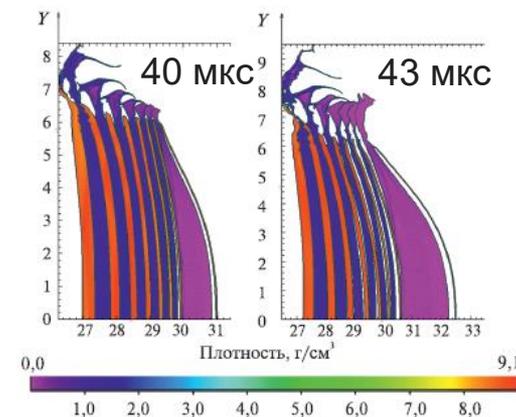
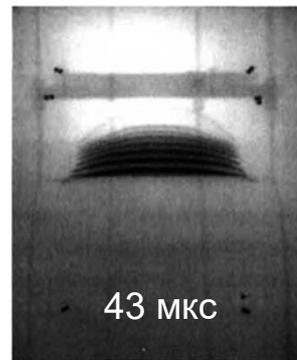
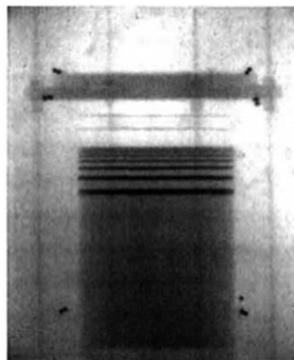
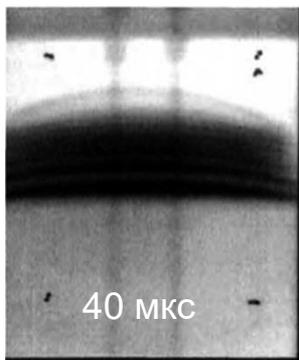
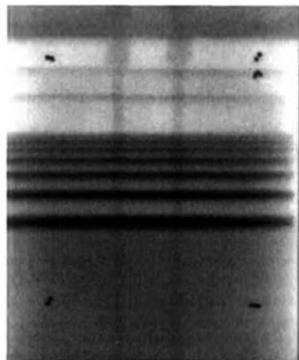
# Комплекс на базе бетатронов БИМ234.3000 и ЛИУ-2



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

левый ракурс

правый ракурс



предварительный снимок

рабочий снимок

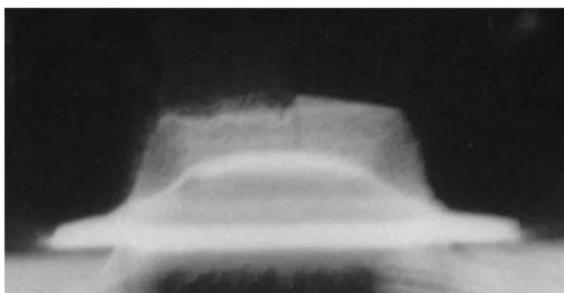
предварительный снимок

рабочий снимок

эксперимент

расчет

Исследование кумуляции энергии в плоских слоеных  
системах с помощью бетатронов



30 мкс  
ЛИУ



31 мкс  
БИМ

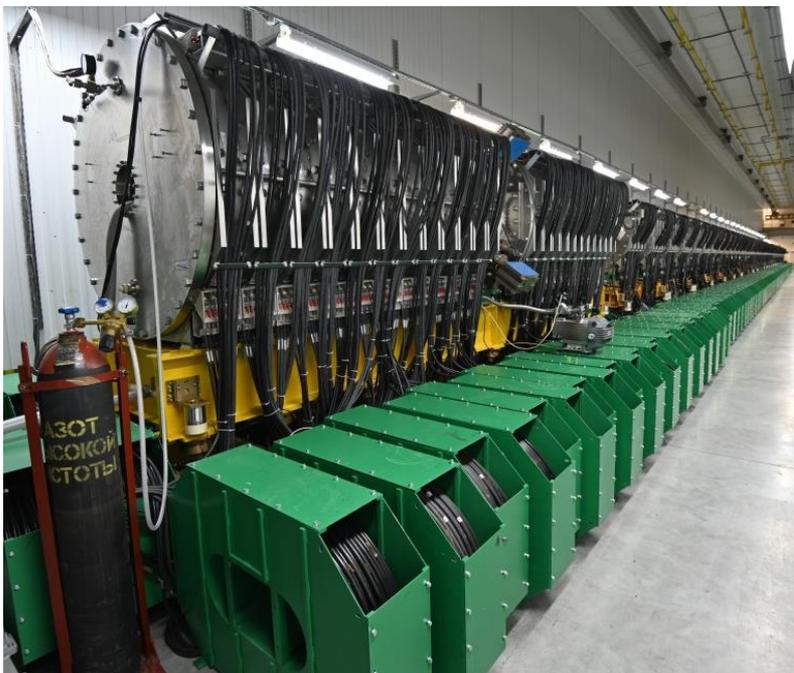


90 мкс  
БИМ

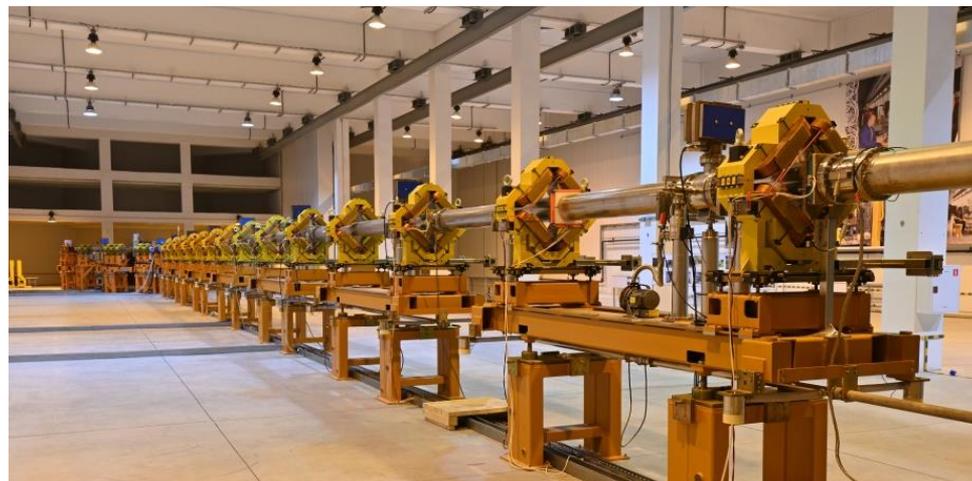
Типичные рентгенограммы при совместной работе  
ускорителей комплекса

# Комплекс на базе ЛИУ-20

## Фотографии ускорителя ЛИУ-20

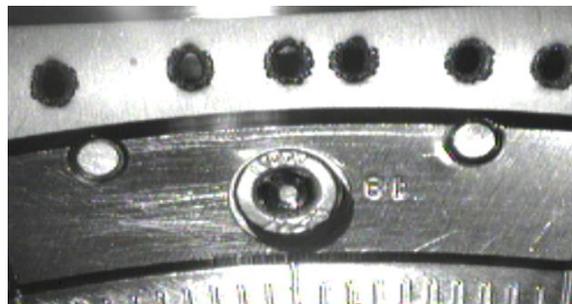


инжектор  
ускоряющие модули



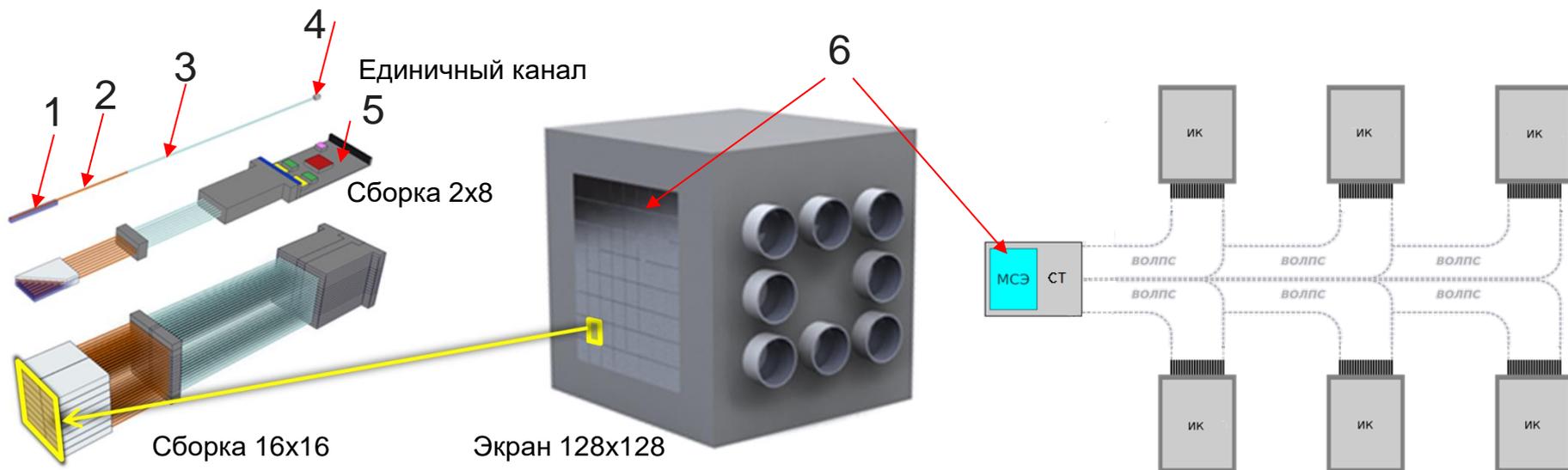
Система транспортировки  
электронного пучка

Фотография мишени после  
воздействия электронного пучка



# Комплекс на базе ЛИУ-20

## Общий вид системы регистрации (детектирующая станция)

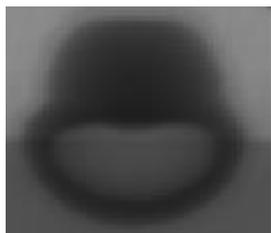


## Фотография системы регистрации

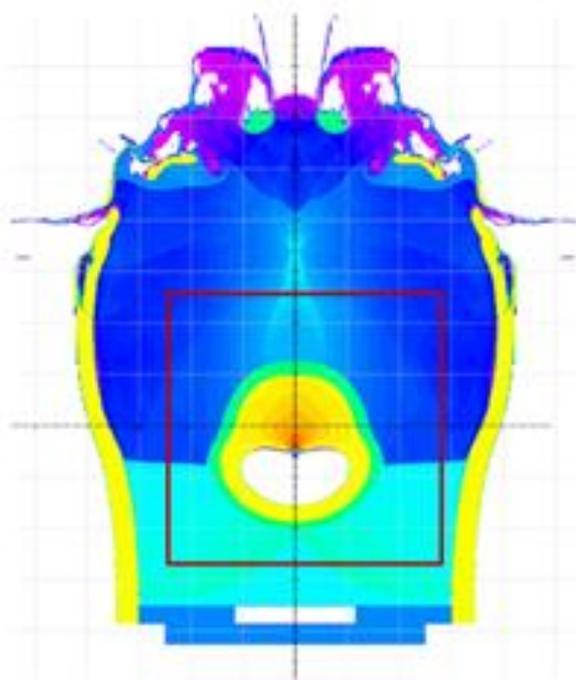


- 1 – сцинтилляционный кристалл
- 2 – спектросмещающее волокно
- 3 – оптоволокно
- 4 – фотодиод
- 5 – плата регистрации
- 6 – многоэлементный сцинтилляционный экран
- СТ – система термостабилизации
- ВОЛПС - волоконно-оптические линии
- ИК - измерительный комплекс

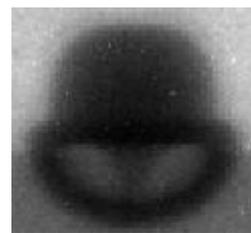
## Исследование струйных течений



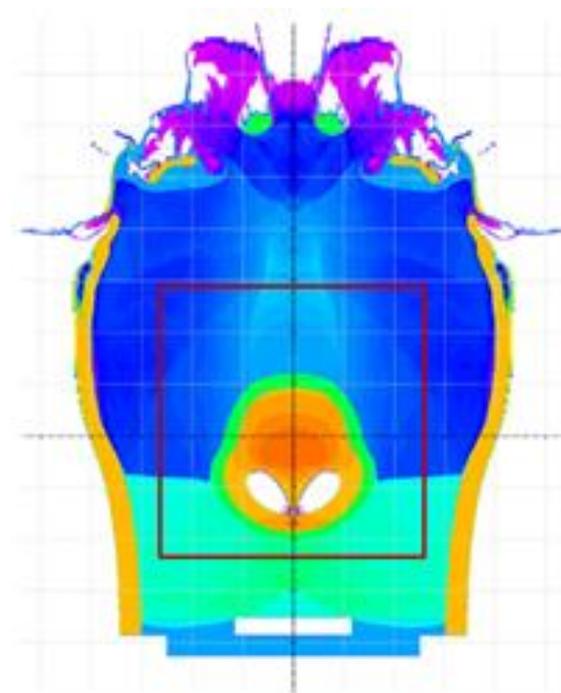
эксперимент



расчет



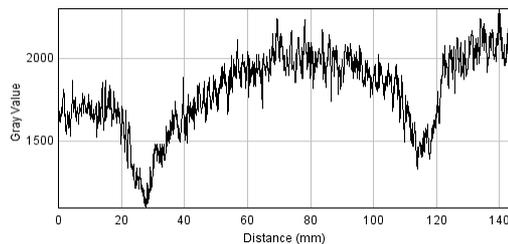
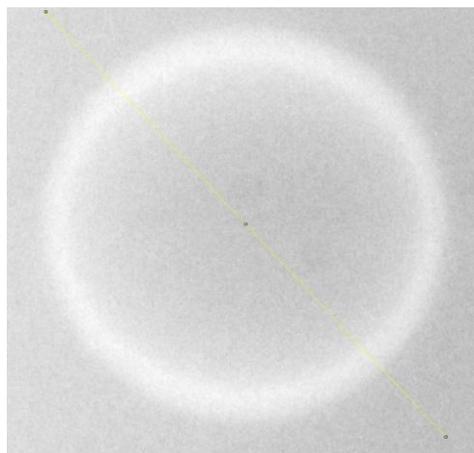
эксперимент



расчет

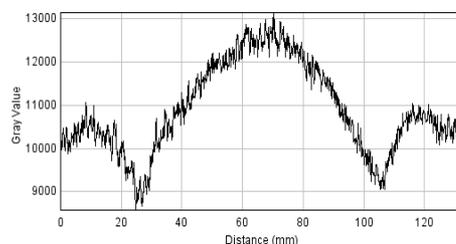
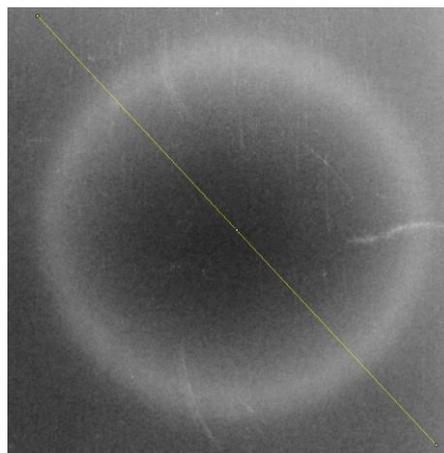
# Сравнение БИМ234.3000 и ЛИУ-20

## БИМ ФЭЗ



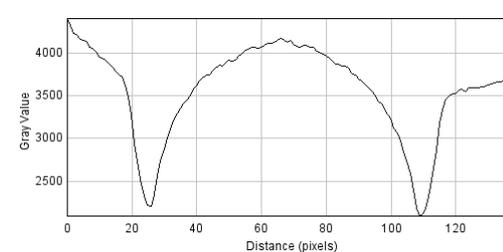
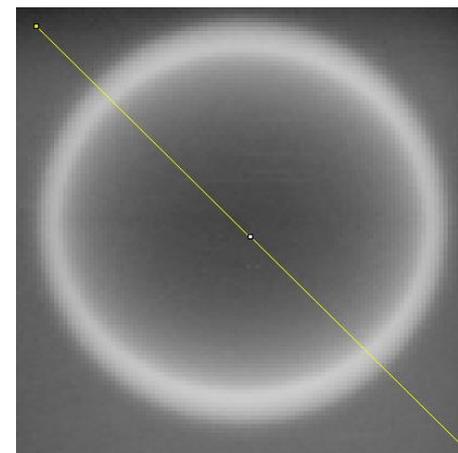
170 г/см<sup>2</sup>

## ЛИУ-20 ФЭЗ



250 г/см<sup>2</sup>

## ЛИУ-20 ДС



305 г/см<sup>2</sup>

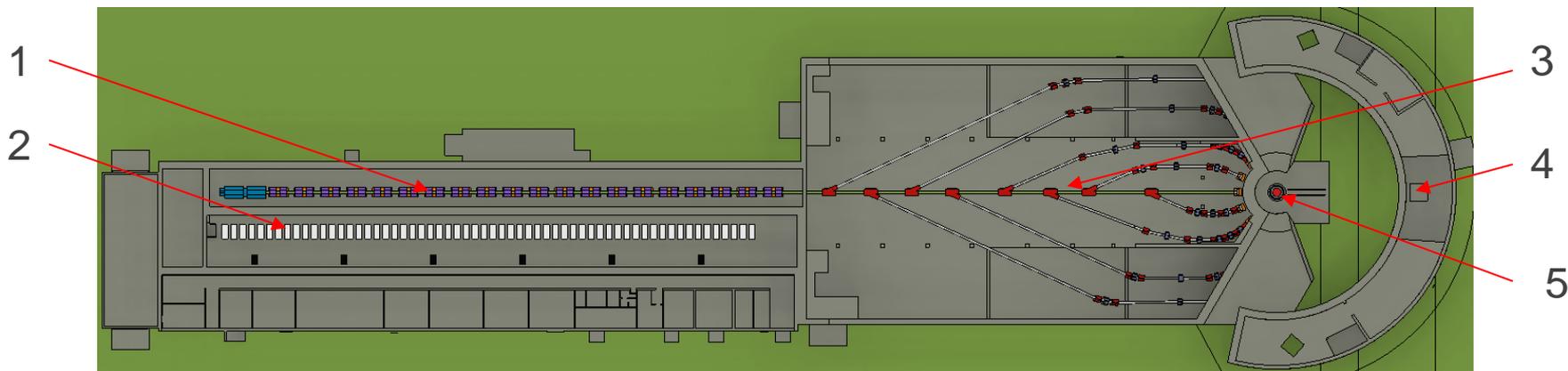
ФЭЗ – фотOLUMИнесцентный экран с запоминанием  
ДС – детектирующая станция

# Комплекс импульсной томографии

## Фотография каземата КИТ



## Общий вид КИТ



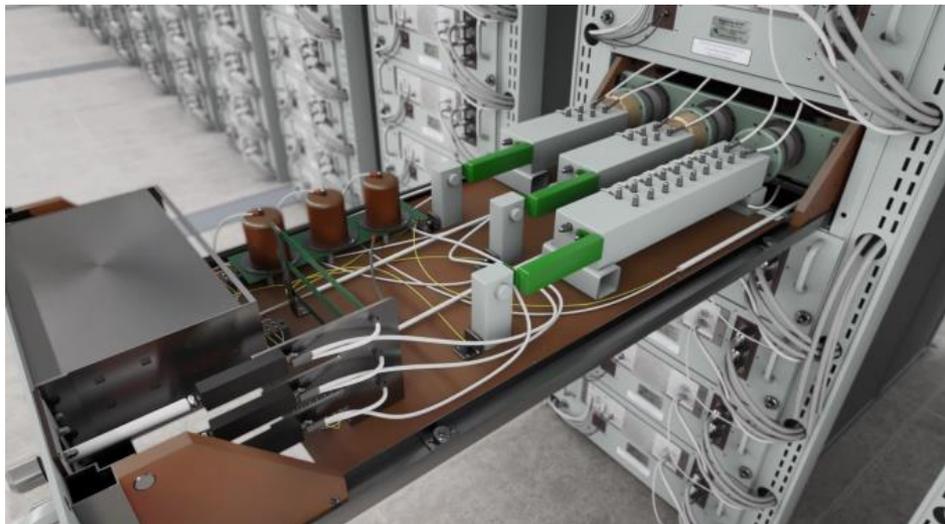
1 – ускоритель ЛИУ-20 2 – трехимпульсная система питания 3 – система разводки и транспортировки электронных пучков с мишенными узлами (девять ракурсов) 4 – система регистрации рентгеновских изображений (девять детектирующих станций) 5 – исследуемый объект

# Комплекс импульсной томографии

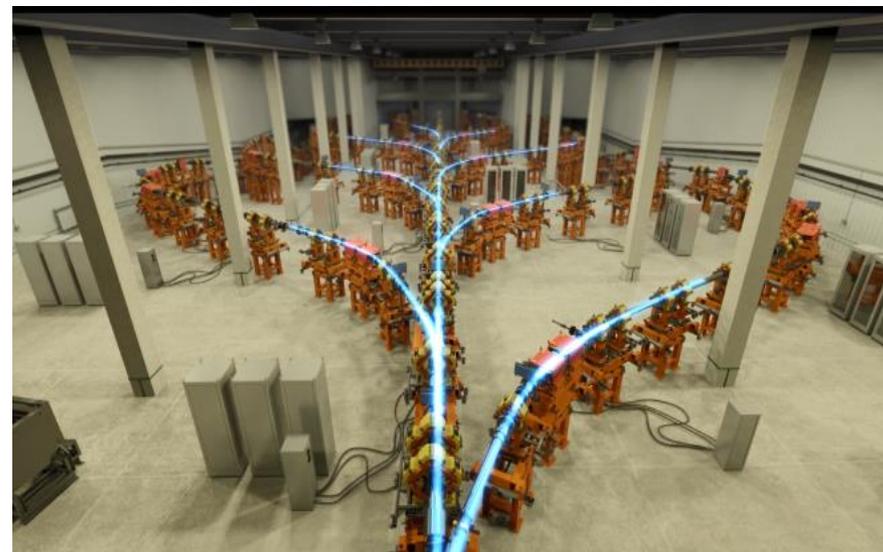


РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

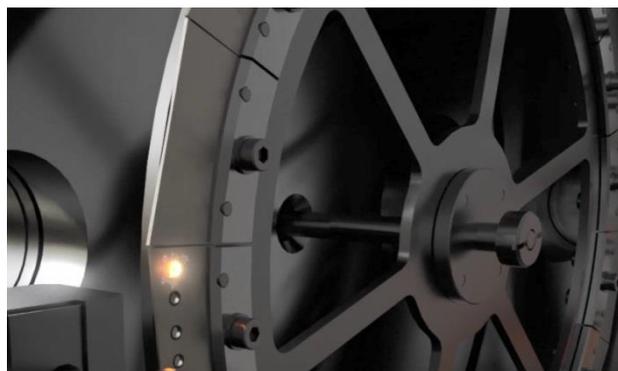
Общий вид трехимпульсного модулятора



Общий вид девятиракурсной системы разводки и транспортировки электронных пучков



Общий вид мишенного узла

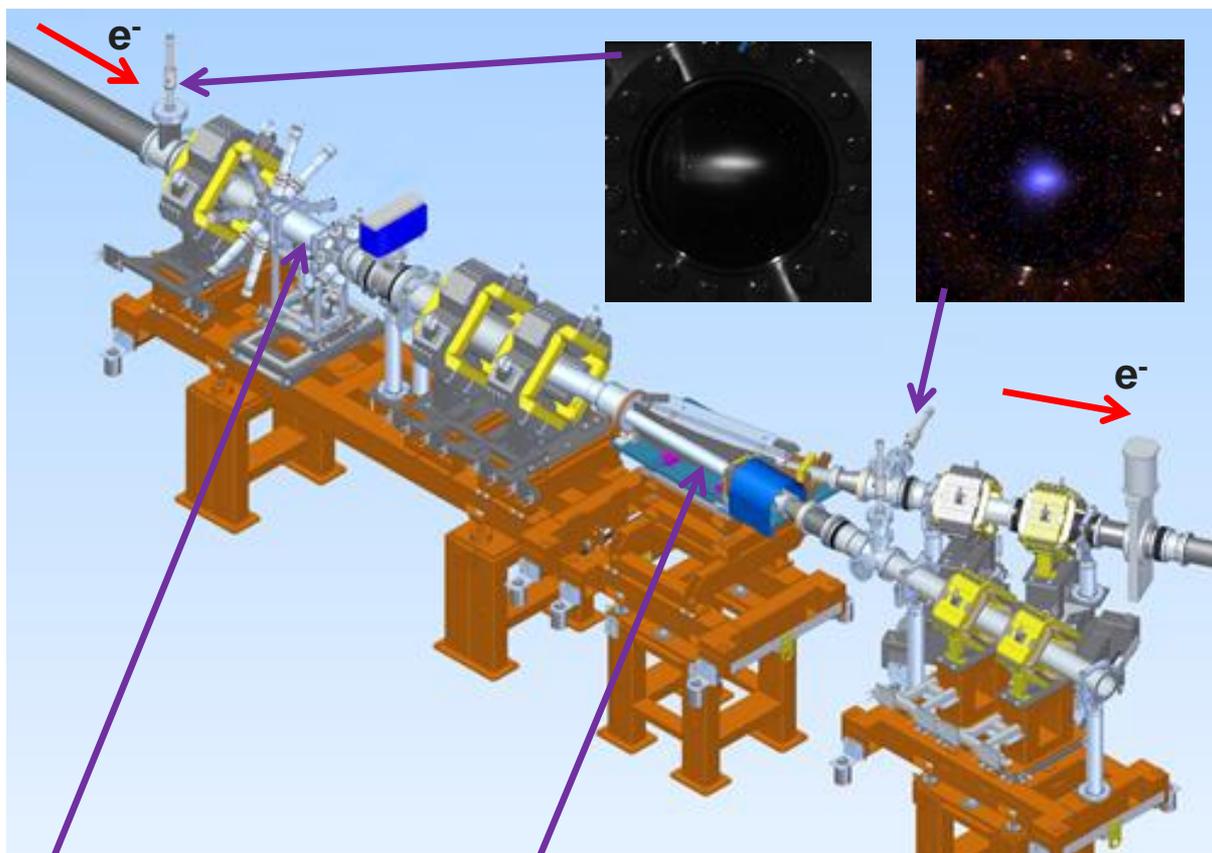


Комплекс импульсной томографии. –  
[http://www.vniitf.ru/data/files/video/2021/kit\\_final\\_8m.webm](http://www.vniitf.ru/data/files/video/2021/kit_final_8m.webm).

# Комплекс импульсной томографии

## Отработка ключевых узлов КИТ

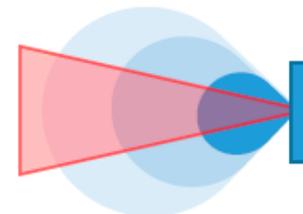
### Двухракурсная система разводки и транспортировки



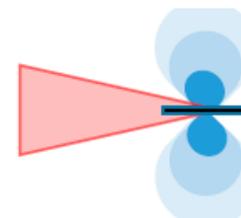
Ударный магнит

Септум магнит

### Мишень



плоская мишень



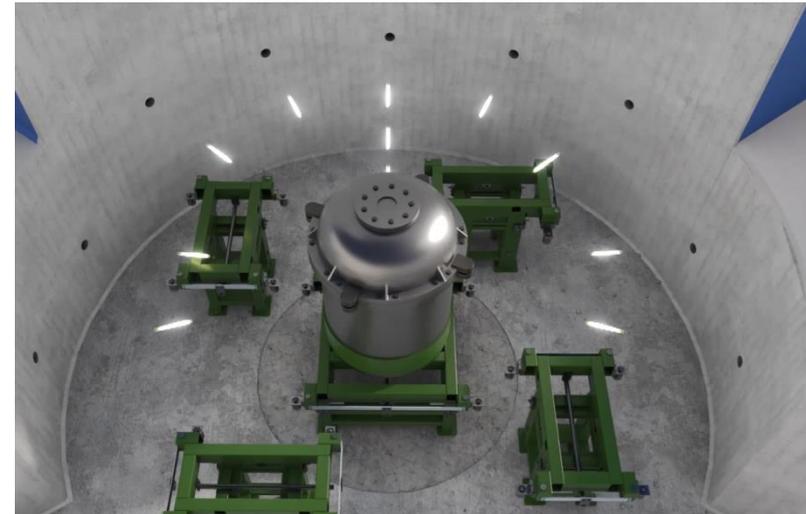
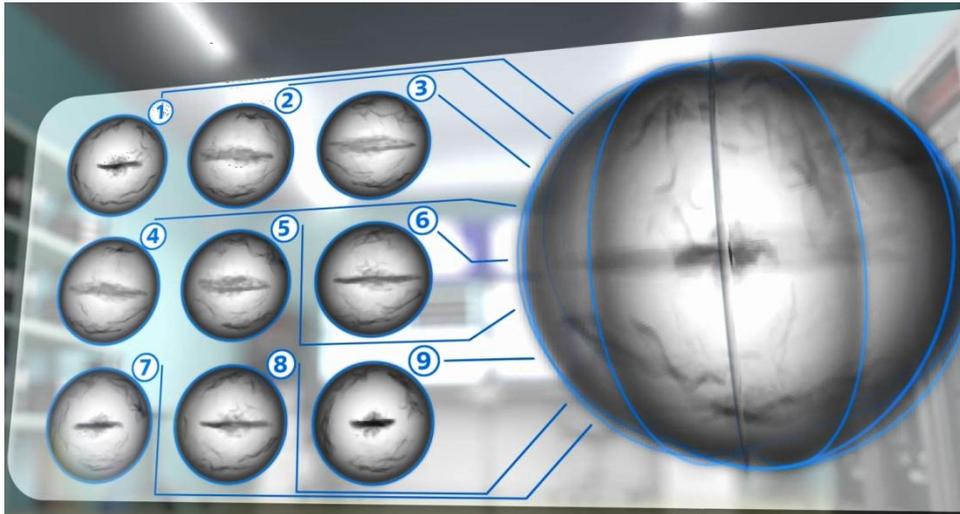
стержневая мишень

# Комплекс импульсной томографии



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

## Восстановление трехмерной картины исследуемого объекта



Центральный  
срез объекта



Реконструкция по  
девяти ракурсам



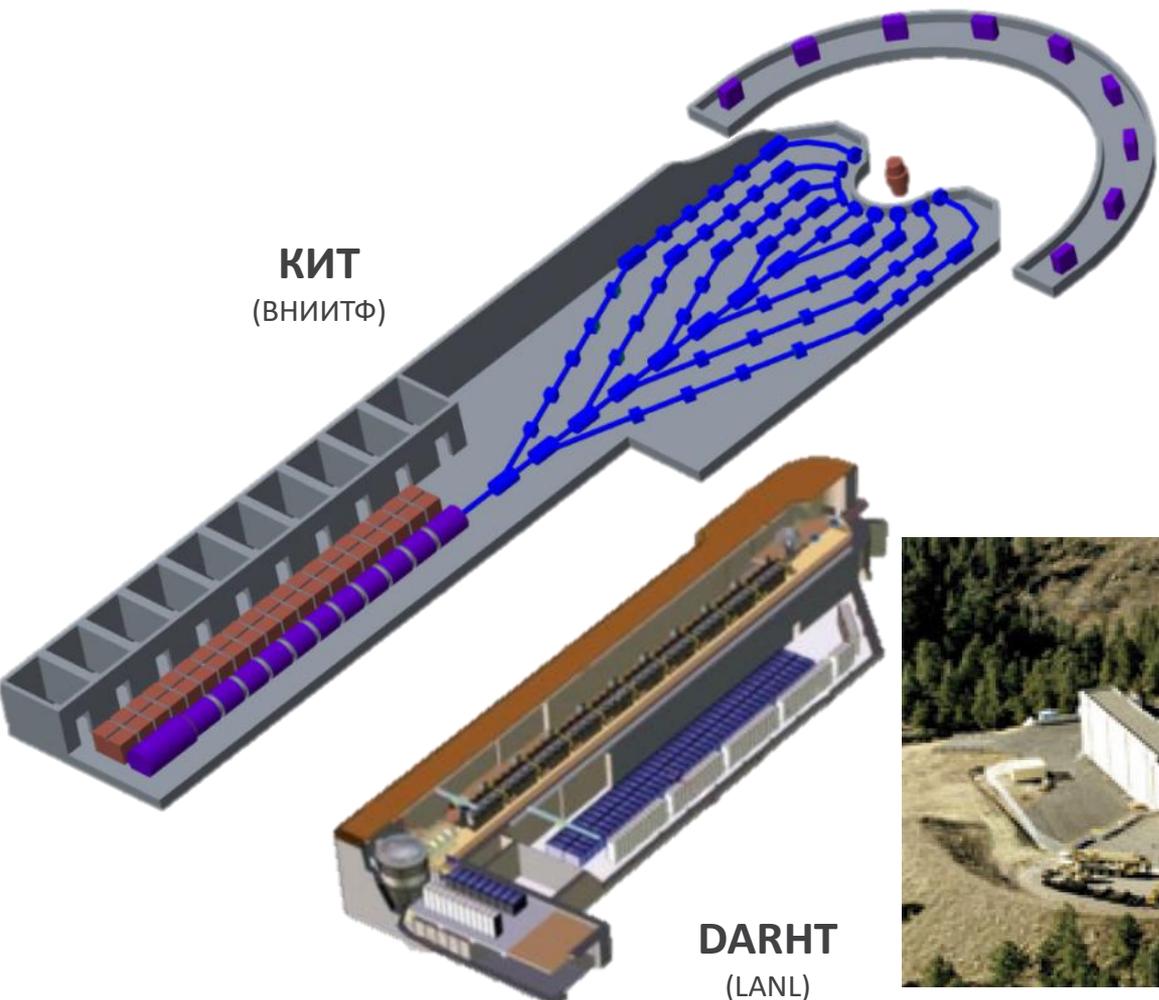
А. Б. Коновалов, В. В. Власов, А. Н. Киселев Разработка алгоритмов реконструкции изображений для малоракурсной компьютерной томографии в РФЯЦ — ВНИИТФ: история, современное состояние и перспективы/ Дефектоскопия. – 2022. – № 6. – С. 37–47.

# Сравнение КИТ с аналогичными зарубежными комплексами



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

**КИТ**  
(ВНИИТФ)



**DARHT**  
(LANL)

DARHT (США, LANL)	DRAGON (Китай, IFP)
17-20 МэВ	20 МэВ
~2 кА	~2,5 кА
25-65 нс	70 нс
2 ракурса	2 ракурса
1 импульс на первом ракурсе 4 импульса на втором ракурсе	1 импульс на первом ракурсе 3 импульса на втором ракурсе



**DARHT**

# Заключение

1. В РФЯЦ-ВНИИТФ использование рентгенографических методов в газодинамических исследованиях началось практически сразу после создания института (1955 г.).
2. В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ создан рентгенографический комплекс, оснащенный всеми типами ускорителей электронов, используемых в качестве рентгеновских источников излучения, и широким спектром цифровых систем регистрации рентгеновских изображений.
3. Для развития метода импульсной рентгенографии в РФЯЦ-ВНИИТФ создается не имеющий мировых аналогов комплекс импульсной томографии, который обеспечит исследование трехмерного течения быстропротекающих процессов в плотных объектах на три момента времени и в девяти ракурсах.

**Спасибо за внимание**

