



# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ

**Научный руководитель:**

д. ф.-м. н., гнс ОНФ ОНИ  
Серебров Анатолий Павлович

**Ответственный за установку:**

к. ф.-м. н., снс ОНФ ОНИ  
Лямкин Виталий Александрович

**Коллектив исполнителей:**

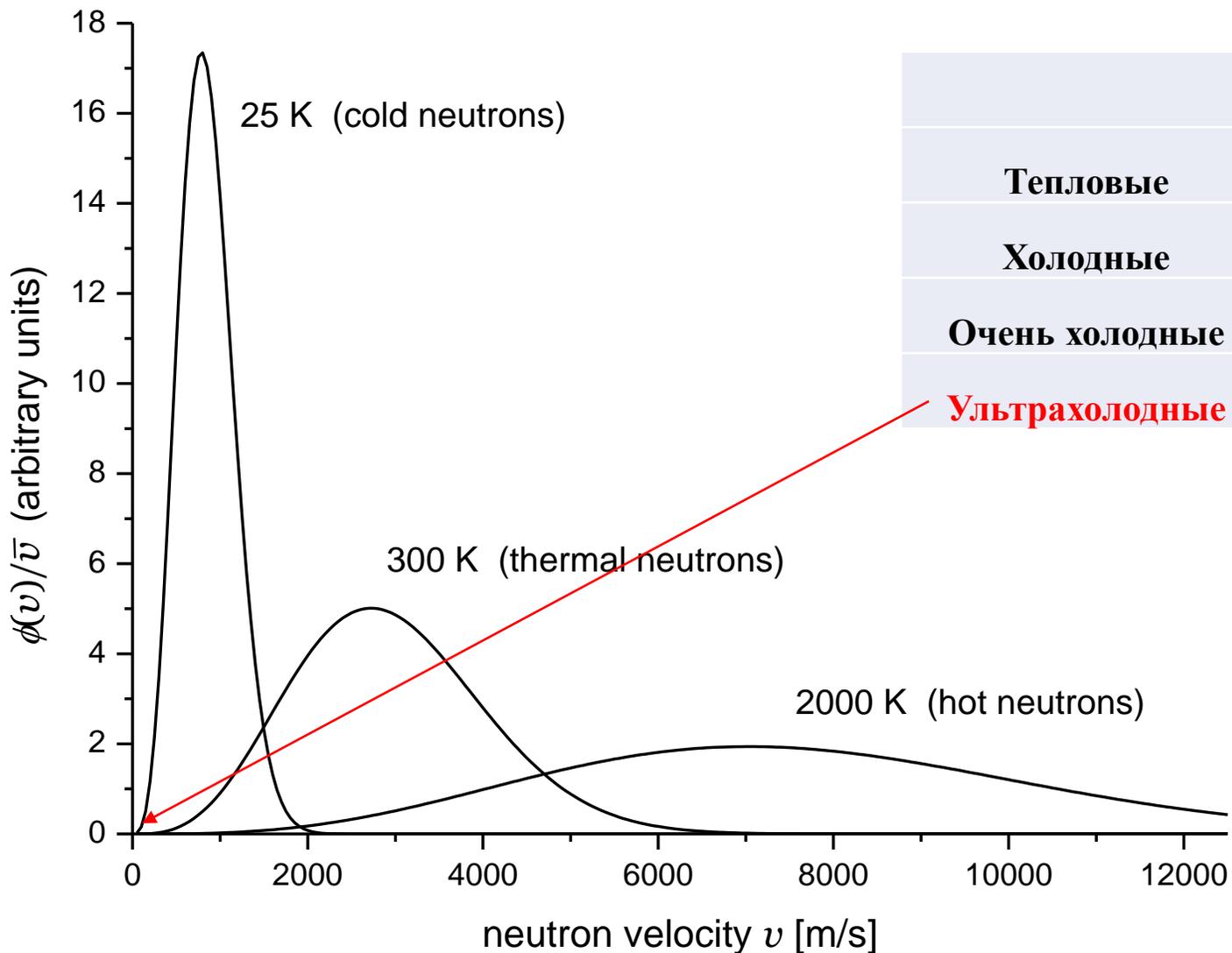
Фомин А.К., Прудников Д.В., Коптюхов А.О., Бородинов Г.О.,  
Хазов П.А., Иванов С.Н., Краснощёкова И.А., Крившич А.Г.



*Российская Академия Наук*



# УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

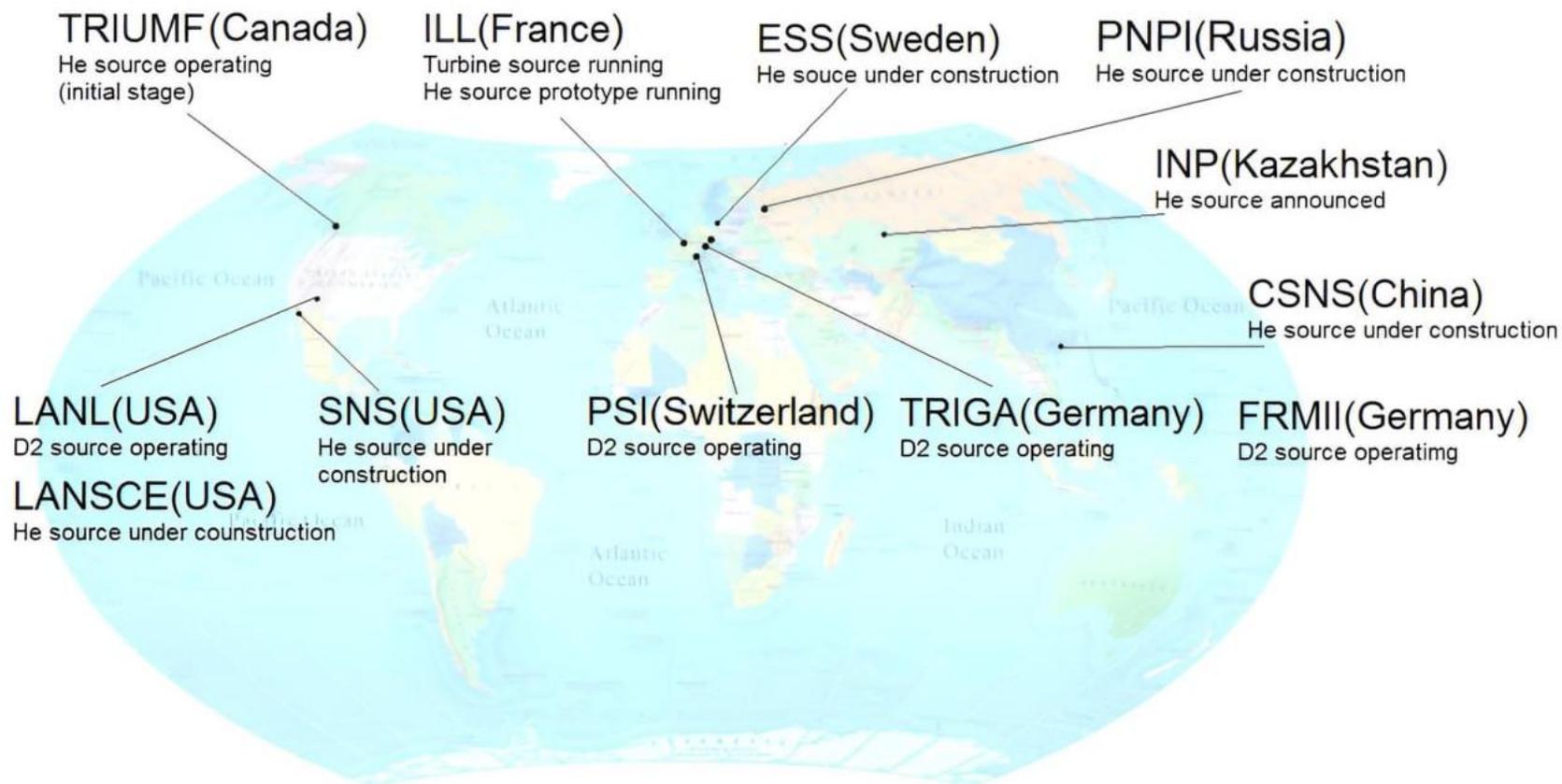


	Энергия, эВ	Энергия, К	Скорость, м/с
<b>Тепловые</b>	$5 \cdot 10^{-3} \div 0,5$	$6000 \div 50$	$9,8 \cdot 10^2 \div 9,8 \cdot 10^3$
<b>Холодные</b>	$10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-3}$	$50 \div 1$	$1,4 \cdot 10^2 \div 9,8 \cdot 10^2$
<b>Очень холодные</b>	$10^{-7} \div 10^{-4}$	$1 \div 10^{-3}$	$4,4 \div 140$
<b>Ультрахолодные</b>	<b><math>\sim 10^{-7}</math></b>	<b><math>10^{-3}</math></b>	<b><math>\sim 4,4</math></b>

Ультрахолодные нейтроны обладают свойством отражаться от любого вещества под любым углом падения, поэтому их можно удерживать в материальных ловушках в течение десятков и сотен секунд.

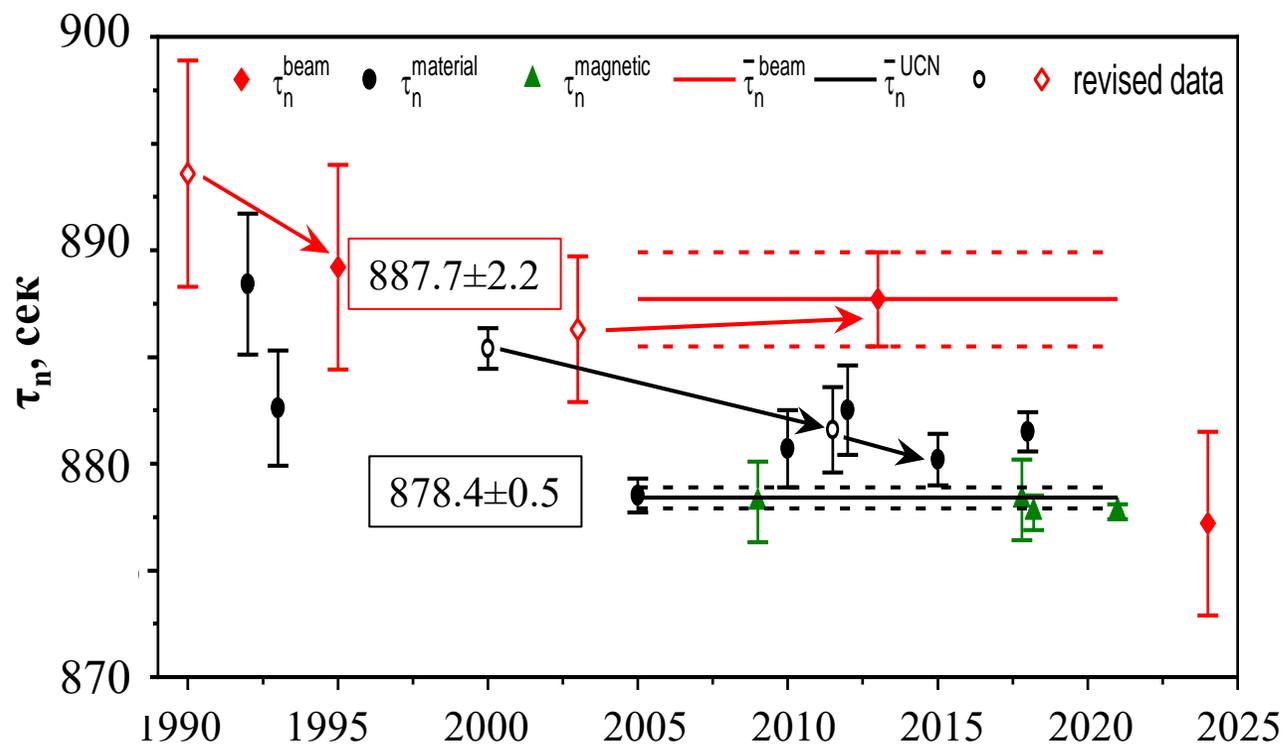
# АКТУАЛЬНОСТЬ

- В течение последних 20 лет нет прогресса в увеличении плотности ультрахолодных нейтронов
- Освоены прямые и достаточно эффективные методы с использованием жидкого и **твердого дейтерия**
- Для дальнейшего прогресса предлагается **использование сверхтекучего гелия** для получения УХН
- За последние 3 года, к 9-ти научным центров, в которых велись работы по созданию источников ультрахолодных нейтронов добавилось еще три: ИЯФ в Казахстане, ESS в Швеции и CSNS в Китае.

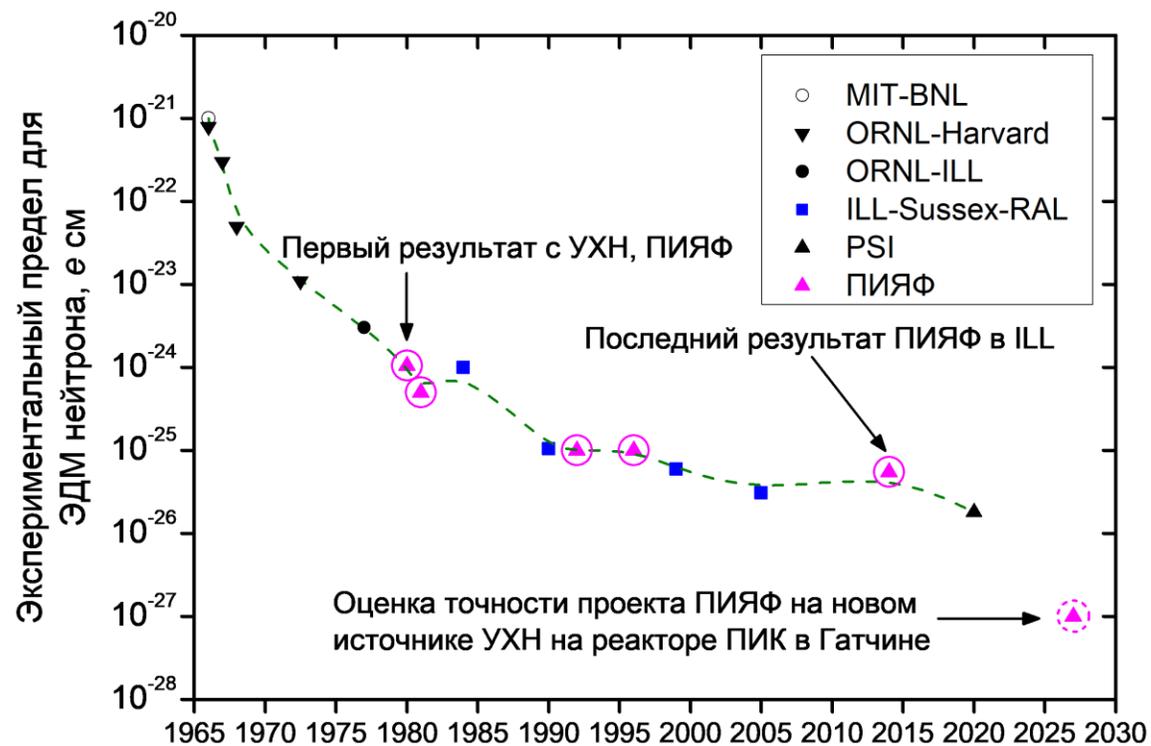


# АКТУАЛЬНОСТЬ

Наиболее точные эксперименты по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона и прецизионному измерению времени жизни свободного нейтрона были выполнены именно с использованием ультрахолодных нейтронов, и точность проведенных измерений уже ограничена статистикой нейтронов (возможностями существующих источников УХН)

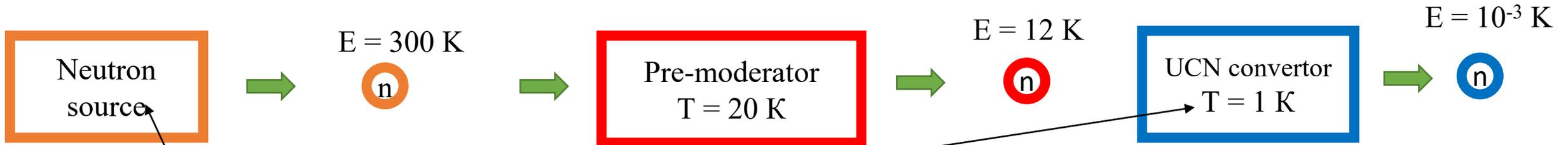


Прогресс в увеличении точности измерения  $\tau_n$



Прогресс в понижении верхнего предела на ЭДМ нейтрона

# ПРОИЗВОДСТВО УХН



$$\rho_{\text{UCN}} = P\tau$$

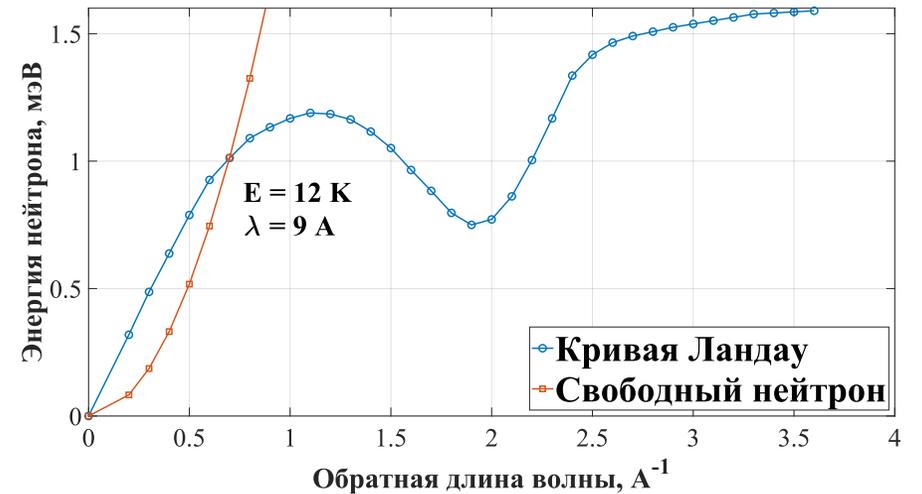
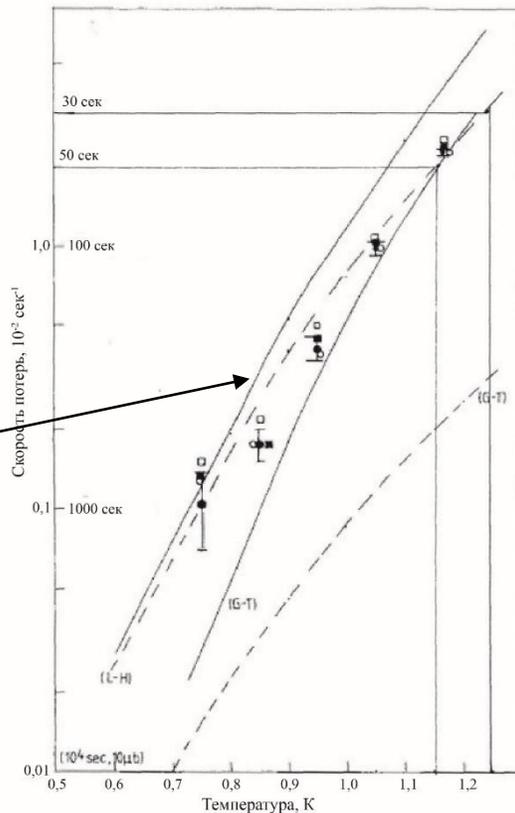
$$\tau^{-1} = \tau_{\beta}^{-1} + \tau_{\text{capture}}^{-1} + \tau_{\text{wall losses}}^{-1} + \tau_{\text{upscattering}}^{-1}$$

$$\tau_{\text{decay}} = \text{const}$$

$$\tau_{\text{capture}} \rightarrow \text{He}^3/\text{He}^4$$

$$\tau_{\text{wall losses}} \rightarrow \text{покрытие} \rightarrow 42 \text{ с}$$

$$\tau_{\text{upscattering}} \rightarrow T_{\text{He}}$$

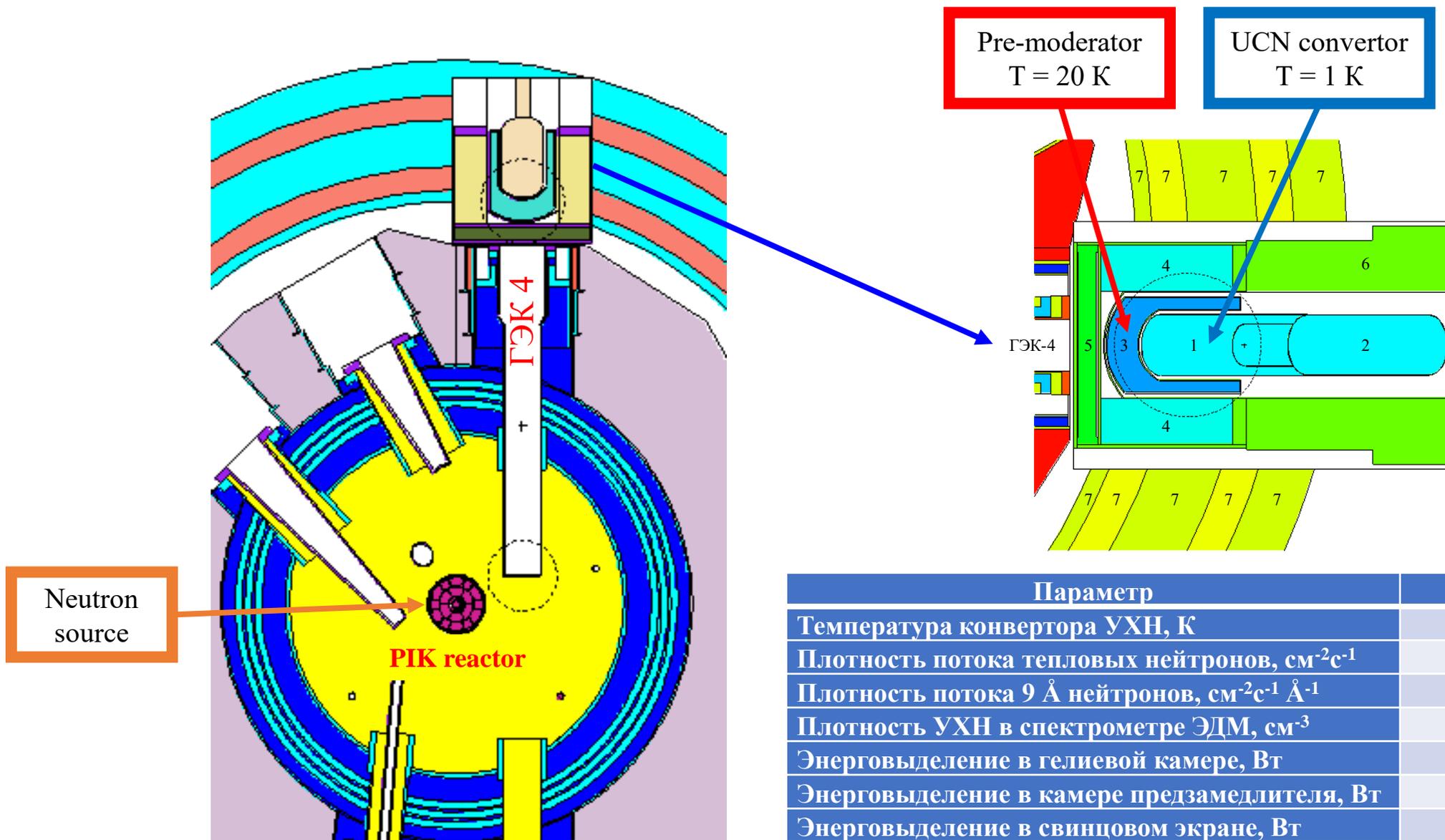


$$E_{\text{нач}} = 12 \text{ K} \rightarrow E_{\text{УХН}} \approx 10^{-3} \text{ K}$$

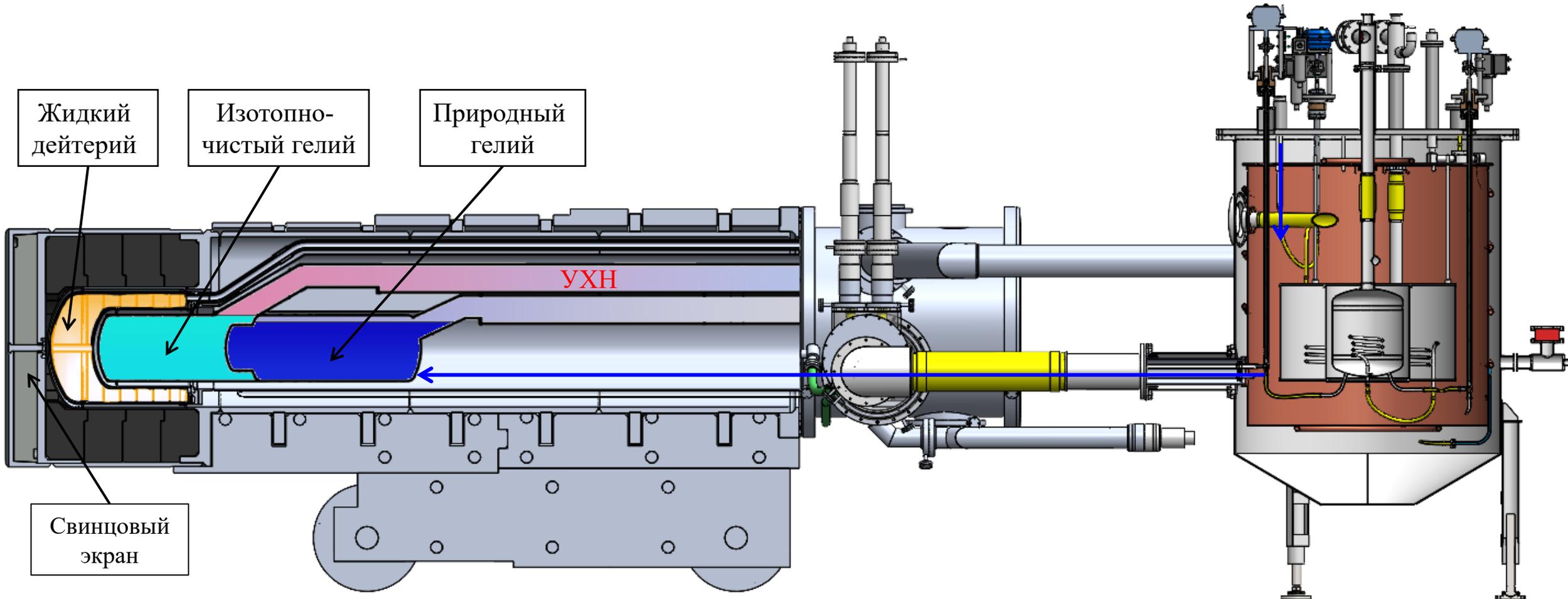
$$\lambda = 9 \text{ Å}$$

\* ЖЭТФ, 1946, 16, 394; J. Phys. USSR, 1945, 9, 461.

# ОЦЕНОЧНЫЕ РАСЧЁТЫ ИСТОЧНИКА УХН ДЛЯ РК ПИК



# НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЧАСТЬ ИСТОЧНИКА УХН



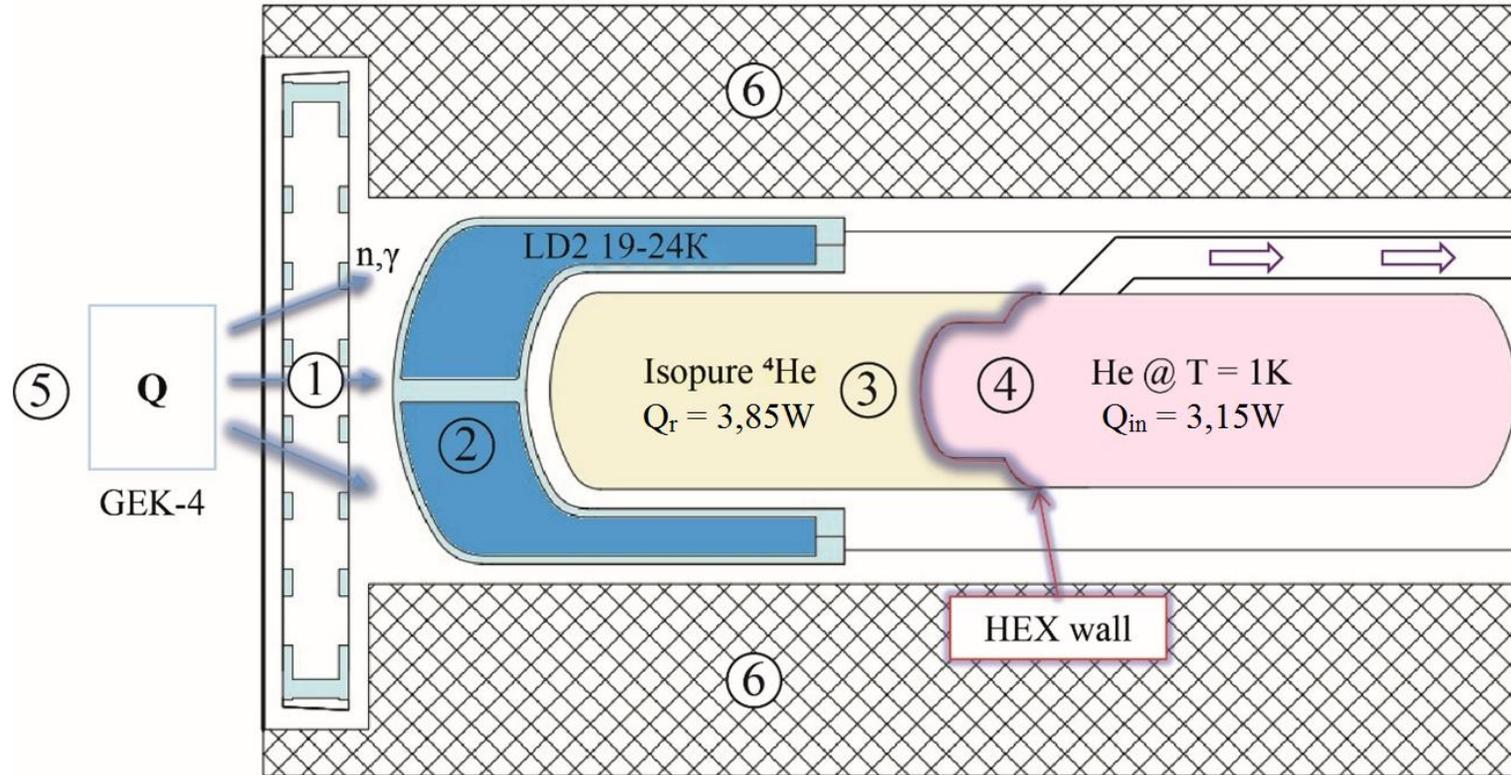
- ❑ Свинцовый экран
  - Масса: 1000 кг
  - Температура: 300 К
  - Теплоприток: 200 Вт

- ❑ Жидкий дейтерий
  - Объем: 60 л
  - Температура: 19-24 К
  - Теплоприток: 20 Вт

- ❑ Изотопно чистый гелий
  - Объем: 40 л
  - Температура ~1.0-1.3 К
  - Теплоприток: 3.8 Вт

- ❑ Природный гелий
  - Объем: 50 л
  - Температура ~1.0 К
  - Теплоприток: 6.2 Вт

# ОТВОД ТЕПЛА ОТ КАМЕРЫ КОНВЕРТОРА



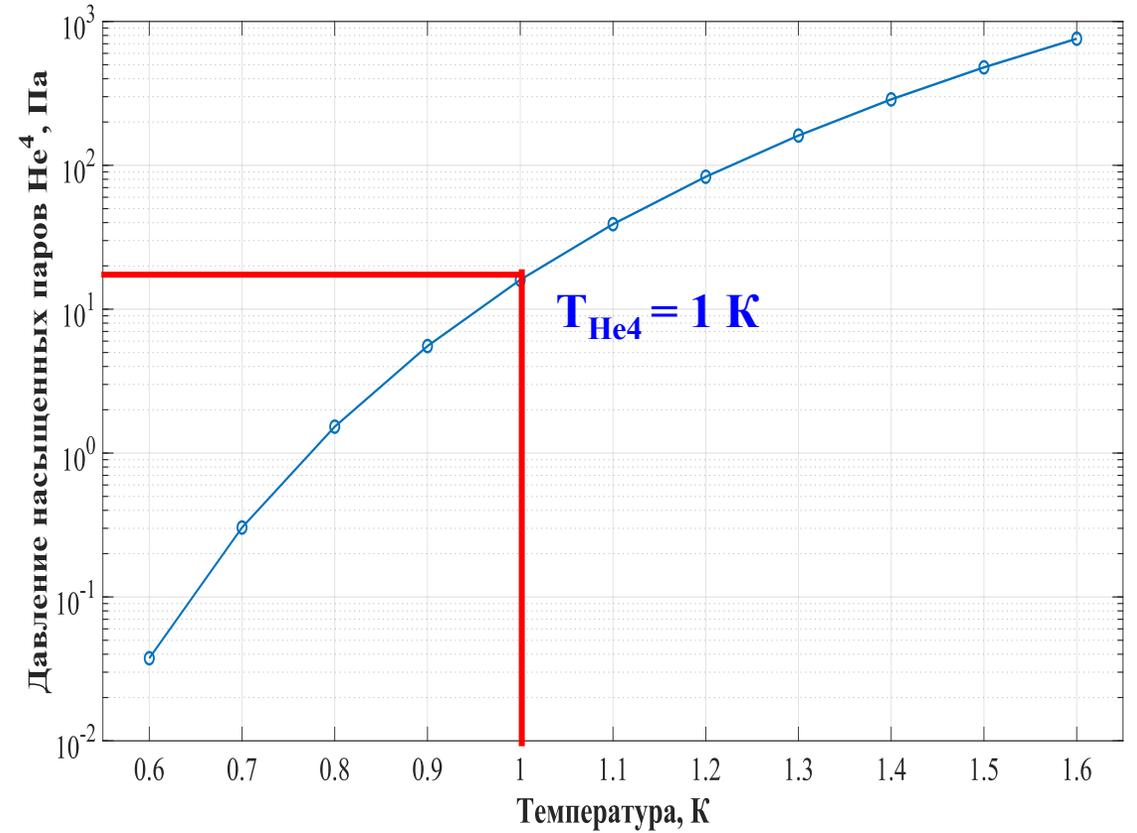
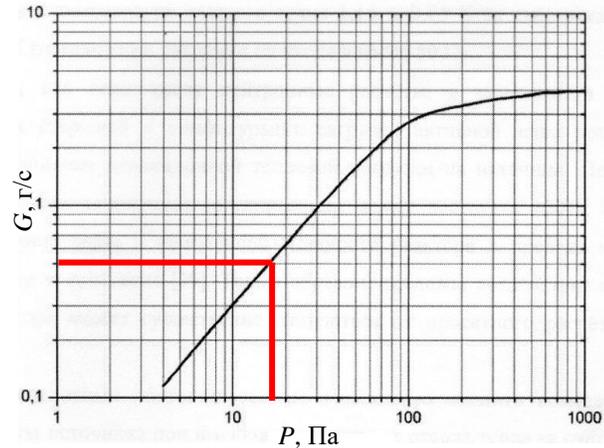
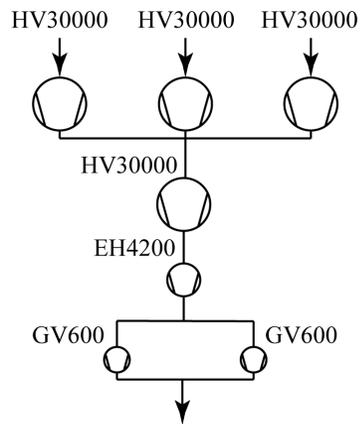
$$T_{UCNS} = T_{He4} + \underbrace{\Delta T_{He4-steel} + \Delta T_{Ni-HeII}}_{\text{Проводимость Капицы}} + \underbrace{\Delta T_{\lambda}}_{\text{Теплопроводность стенки т/о}} + \Delta T_{\kappa} \leftarrow \text{Температурный градиент в HeII}$$

↑ Мощность откачки паров гелия      ↑ Температурный градиент в HeII

$T_{UCNS}$  – температура конвертора УХН, К;  $T_{He4}$  – температура гелия в HEX, К;  $\Delta T_{He4-Fe}$ ,  $\Delta T_{Ni-HeII}$  – скачки Капицы на He-steel и He-Ni, К;  $\Delta T_{\lambda}$  – разница температуры за счёт теплопроводности стенки HEX, К;  $\Delta T_{\kappa}$  – неравномерность температуры в He-II, К.

# ОТВОД ТЕПЛА ОТ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ

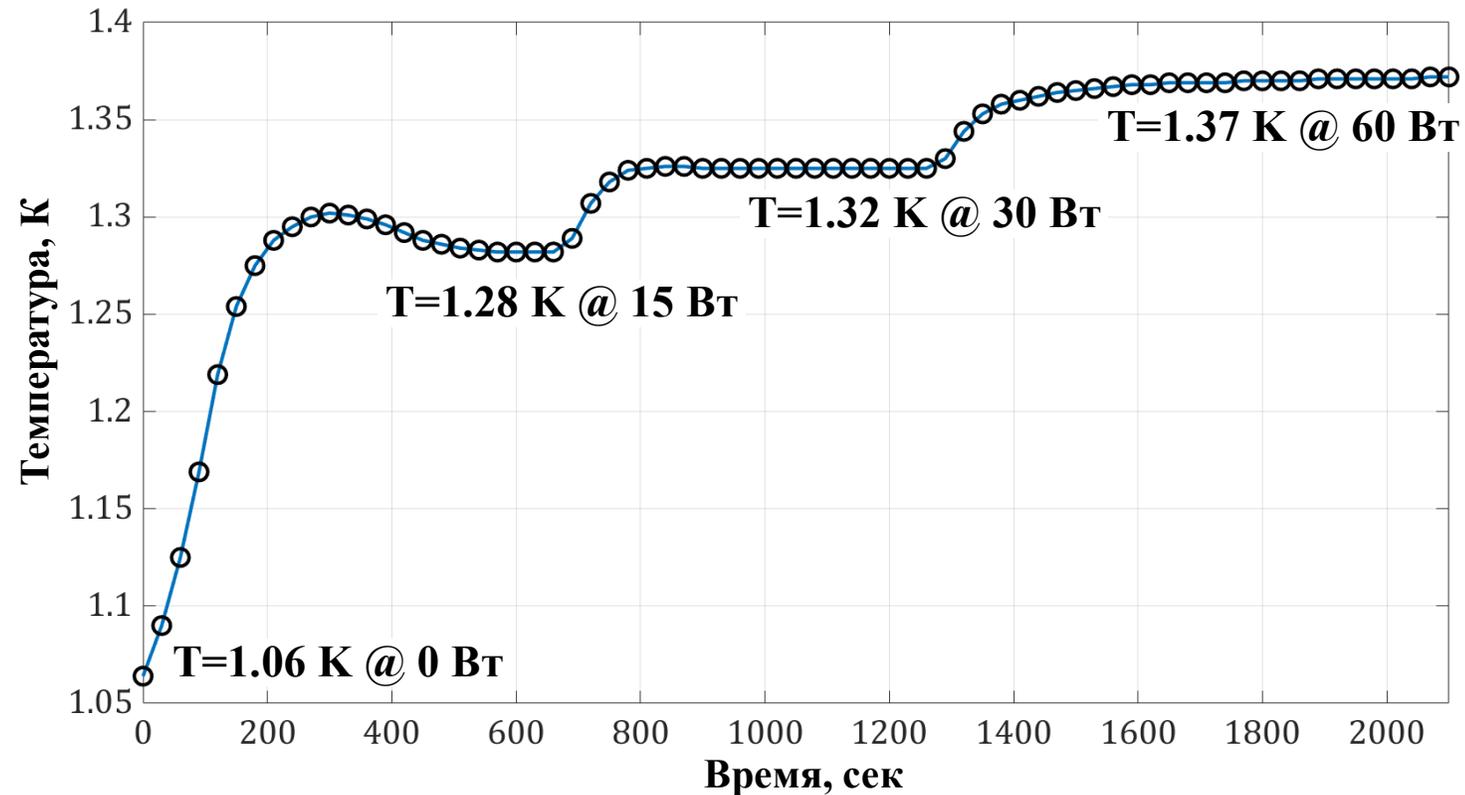
$$T_{\text{ИУХН}} = T_{\text{He4}} + \Delta T_{\text{He4-Fe}} + \Delta T_{\text{Ni-HeII}} + \Delta T_{\lambda} + \Delta T_{\kappa}$$



$P = 20 \text{ Па} @ G = 0,52 \text{ г/с}$   
 $T = 1 \text{ К} @ P = 20 \text{ Па}$

# ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ПАРОВ ГЕЛИЯ

## ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

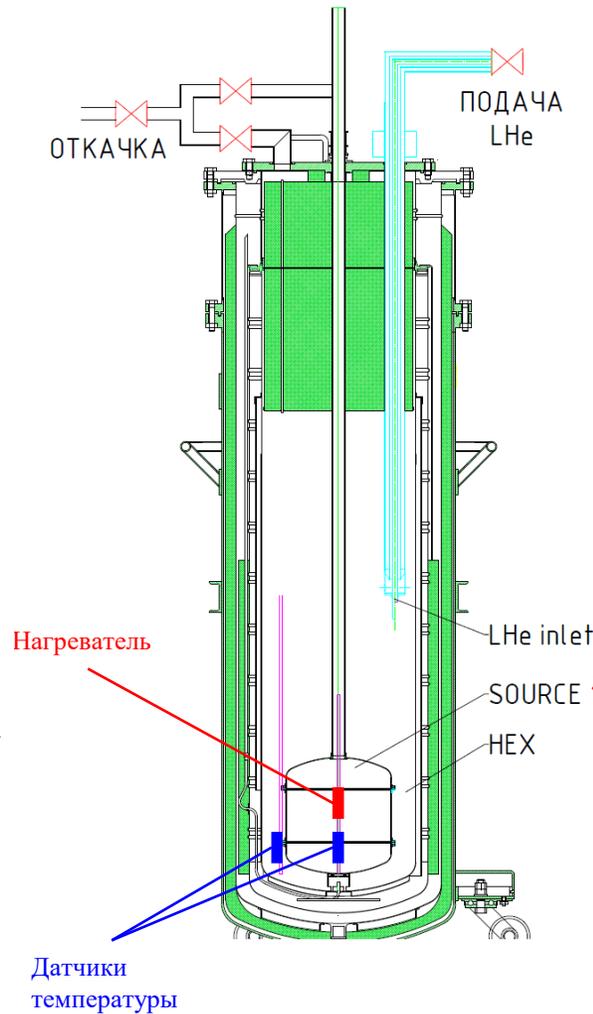
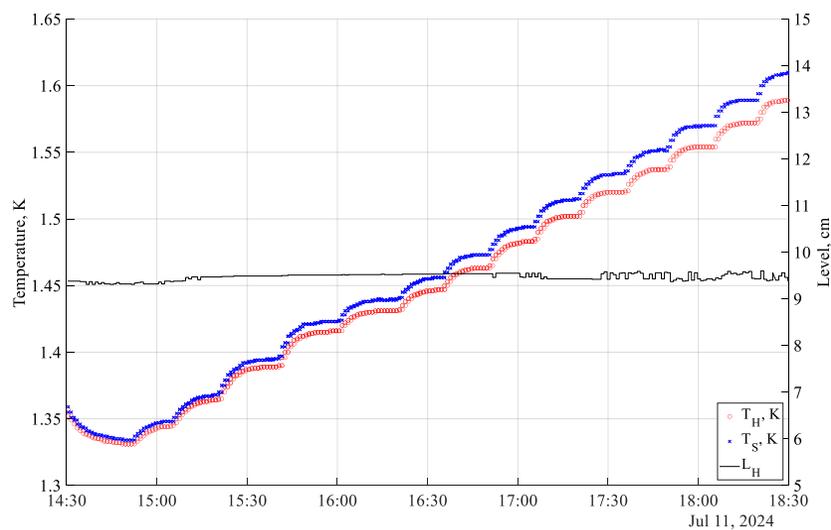
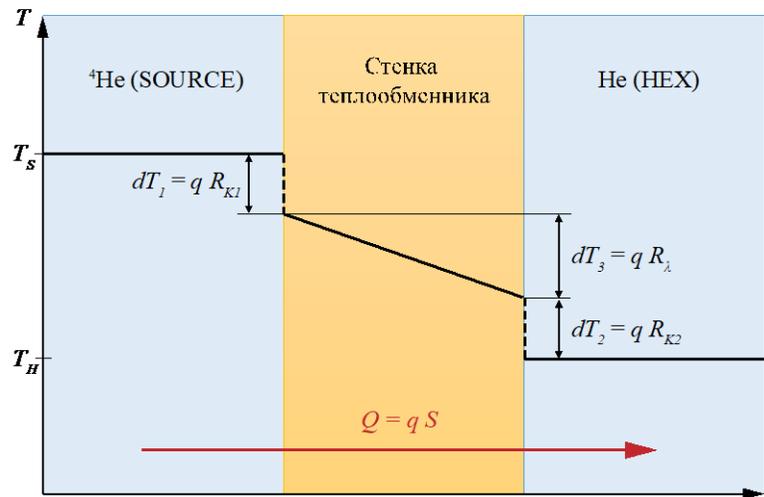


- В 2017 году была экспериментально обоснована возможность удержания гелия в состоянии сверхтекучести при тепловых нагрузках вплоть до 60 Вт



# ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СКАЧКА КАПИЦЫ

$$T_{\text{ИУХН}} = T_{\text{He4}} + \Delta T_{\text{He4-Fe}} + \Delta T_{\text{Ni-HeII}} + \Delta T_{\lambda} + \Delta T_{\text{к}}$$



Медная камера



Медная камера с Ni



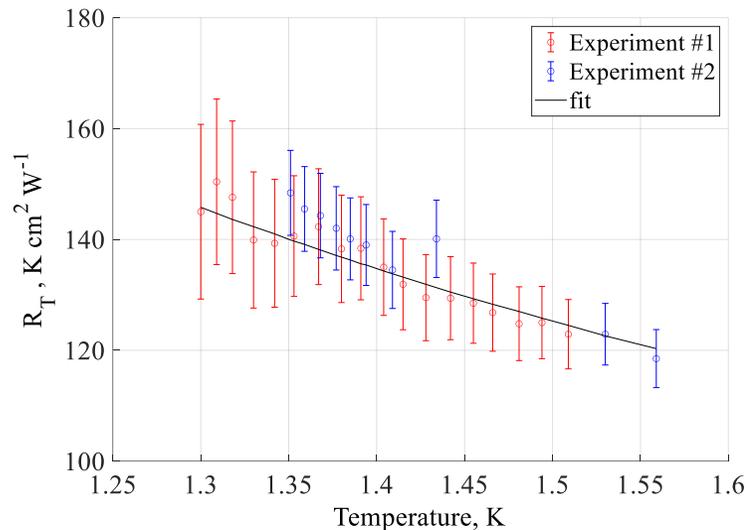
Стальная камера



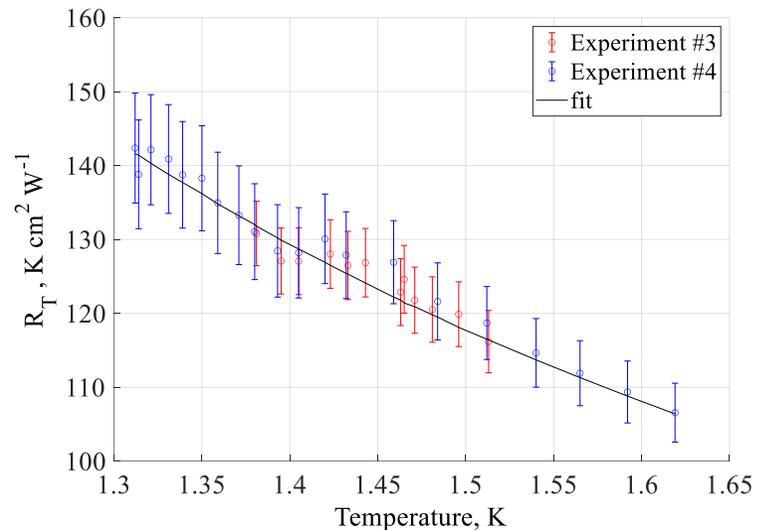
Стальная камера с Ni

# РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СКАЧКА КАПИЦЫ

## Без напыления



## С Ni напылением



$$h_{k,steel} = \frac{1}{R_{k,steel}} = \frac{2}{\frac{S\Delta T}{Q_p} - \frac{\delta}{\lambda}}$$

$$h_{k,Ni} = \frac{1}{R_{k,steel}} = \frac{1}{\frac{S\Delta T}{Q_p} - \frac{\delta}{\lambda} - \frac{1}{h_{k,steel}}}$$

- $h_{k,steel} \sim 220 * T^{1.2} [W/m^2K]$
- $h_{k,Ni} \sim 140 * T^{1.98} [W/m^2K]$
- $h_{k,Cu} \sim 1140 * T^{2.8} [W/m^2K]$
- $h_{k,Ni} \sim 300 * T^{1.98} [W/m^2K]$

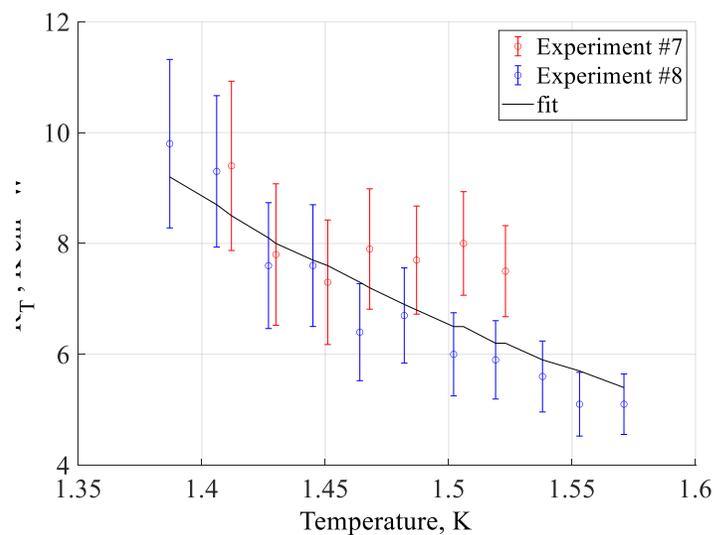
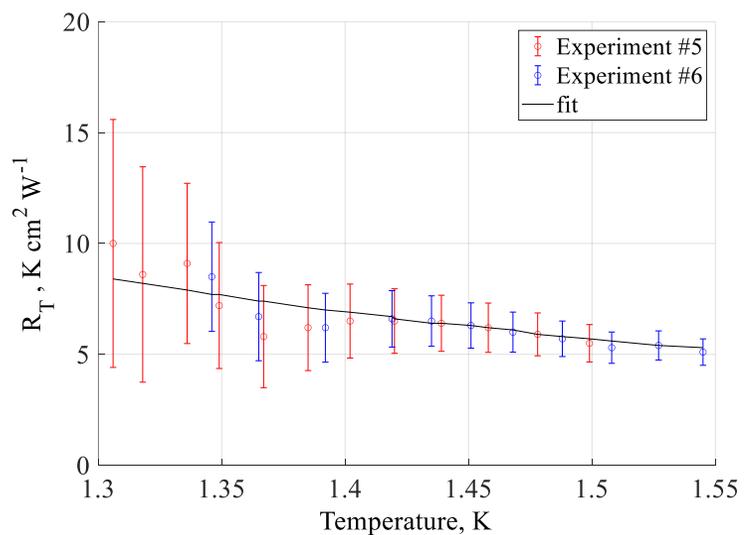
$$T_{He4} = 1 \text{ K}, Q = 3.8 \text{ W}$$

$$\Delta T_{Ni-He4} = 90 \text{ mK} \quad \Delta T_{Cu-He4} = 17 \text{ mK}$$

$$\Delta T_{steel-He4} = 175 \text{ mK} \quad \Delta T_{Cu-He4} = 0,4 \text{ mK}$$

$$\Delta T_{\lambda} = 66 \text{ mK} \quad \Delta T_{\lambda} = 57 \text{ mK}$$

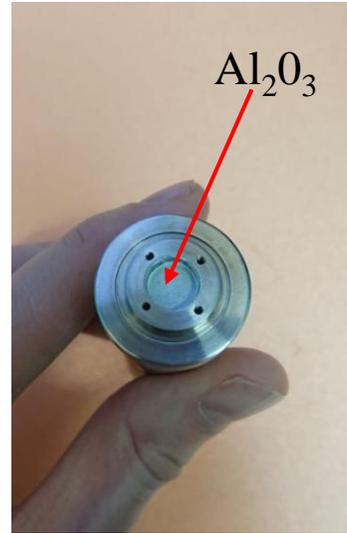
$$T_{He-II} = 1.33 \text{ K} \quad T_{He-II} = 1.07 \text{ K}$$



Steel vessel  
experiment

Copper vessel  
experiment

# ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-ЧИСТОГО ГЕЛИЯ



$$\tau^{-1} = \tau^{-1}_{\beta} + \tau^{-1}_{\text{upscattering}} + \tau^{-1}_{\text{capture}} + \tau^{-1}_{\text{wall losses}}$$

$$\tau_{\text{capture}} = 28 \text{ мс} @ \frac{m_{\text{He}3}}{m_{\text{He}4}} = 1,4 \cdot 10^{-6}$$

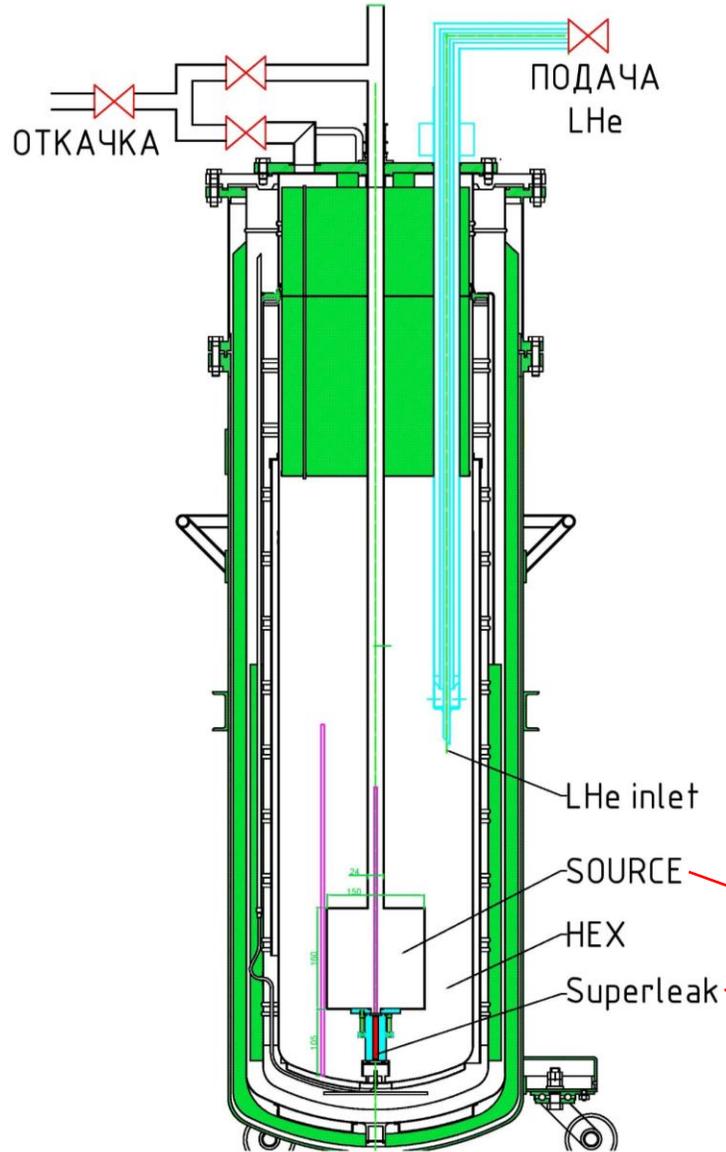
$$\tau_{\text{capture}} = 42,3 \text{ с} @ \frac{m_{\text{He}3}}{m_{\text{He}4}} = 10^{-8}$$

$$\tau_{\text{capture}} = 3900 \text{ с} @ \frac{m_{\text{He}3}}{m_{\text{He}4}} = 10^{-11}$$

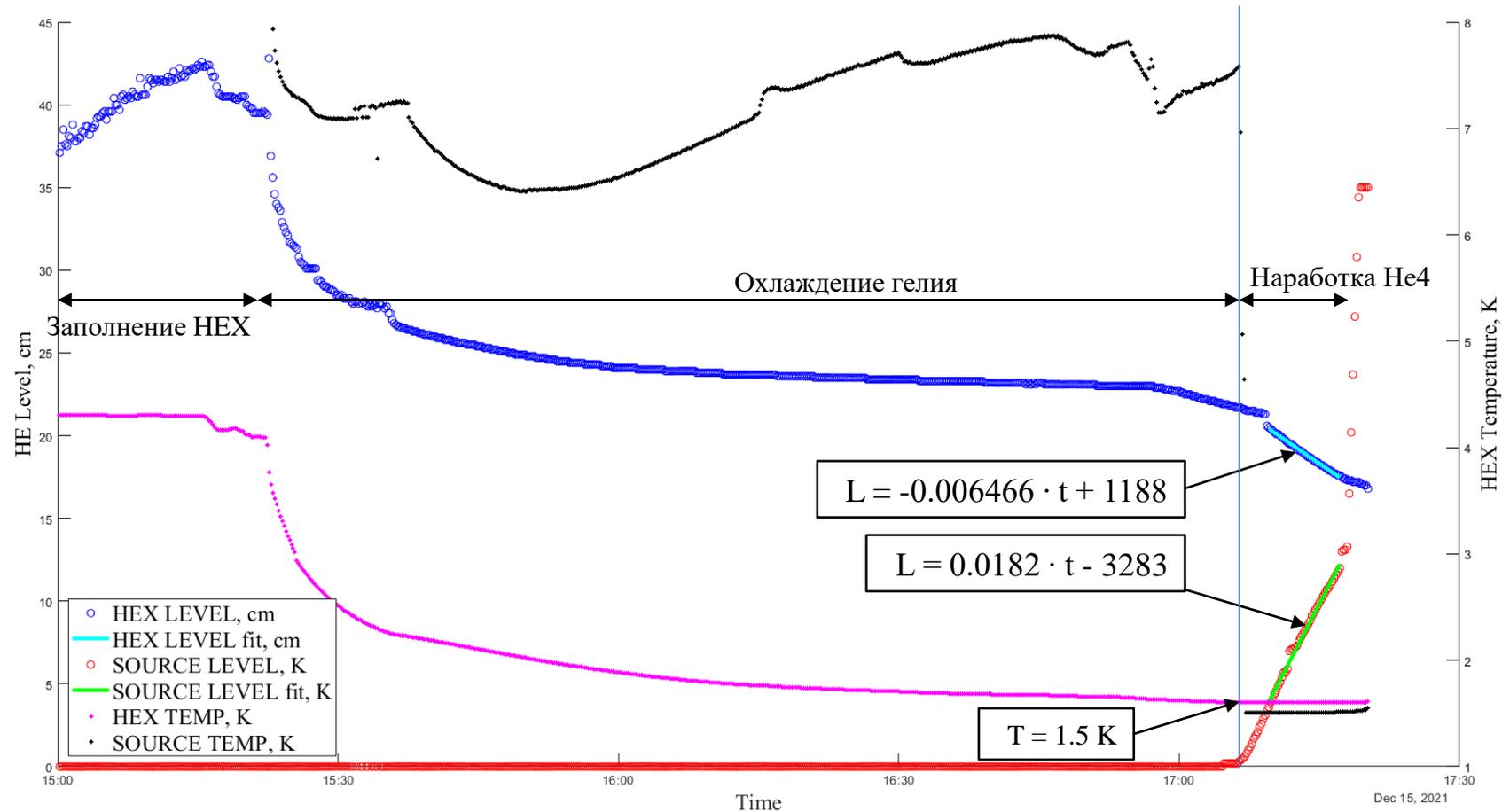
$$\sigma_a(\text{He}^3) = 5300 \text{ barn}$$

$$\sigma_a(\text{He}^4) = 0 \text{ barn}$$

# ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-ЧИСТОГО ГЕЛИЯ



# ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПНО-ЧИСТОГО ГЕЛИЯ

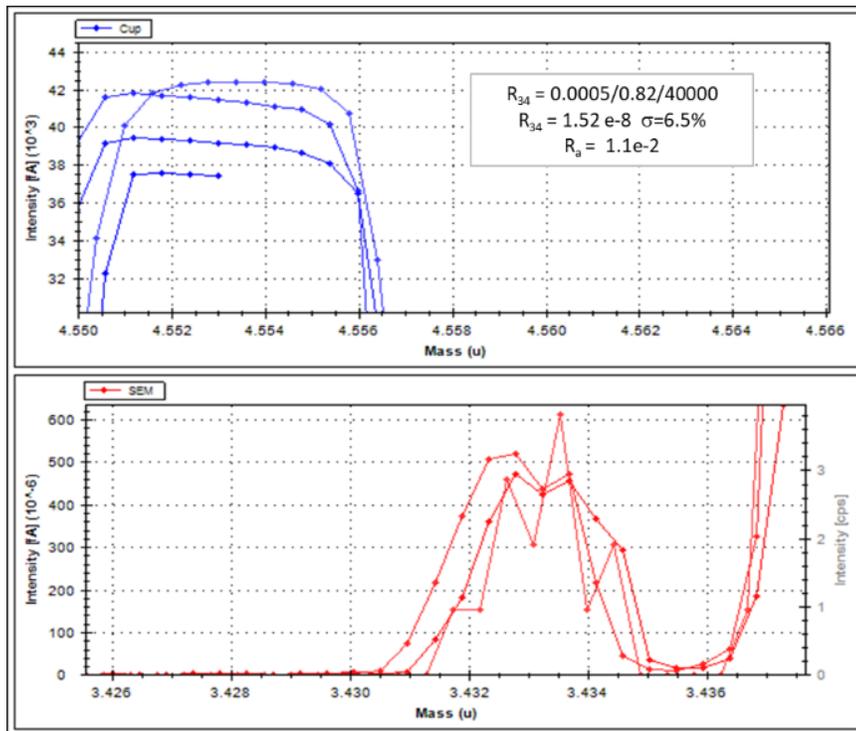


- Приток гелия в SOURCE – 0.0182 см/с – 0.003215 л/с – 0.5037 г/с
- Расход гелия из HEX – 0.006466 см/с – 0.003427 л/с – 0.4725 г/с

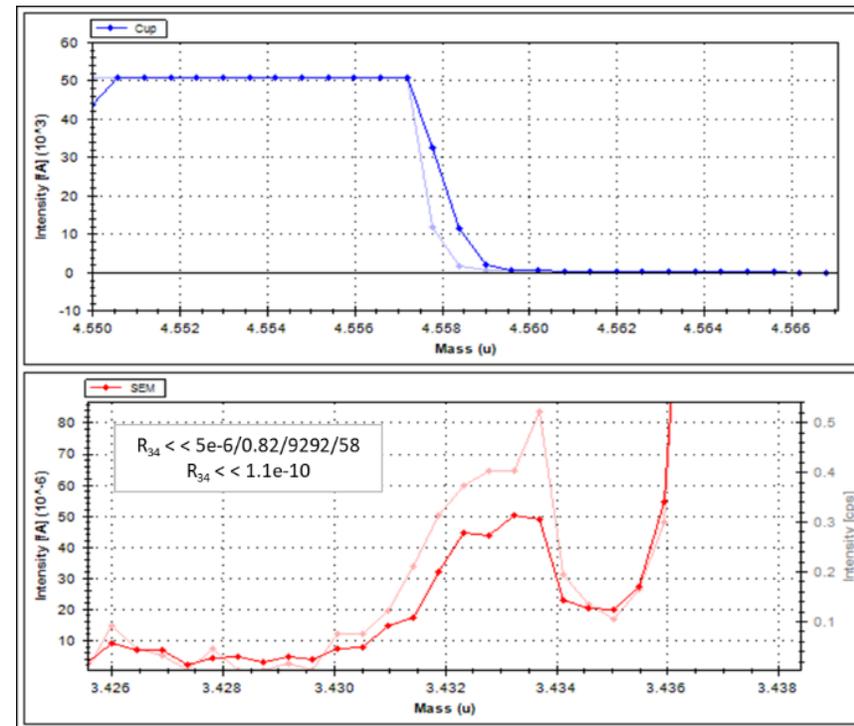
При диаметре фильтра в 8 мм, критический поток сверхтекучего гелия через фильтр составил 1 г/см<sup>2</sup>·с.

# АНАЛИЗ ИЗОТОПНО-ЧИСТОГО ГЕЛИЯ

Анализ изотопно-чистого гелия (ИЧГ) был произведён в ФГБУ «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» на масс спектрометре HELIX SFT Static Vacuum Mass Spectrometer (Thermo Scientific, USA).



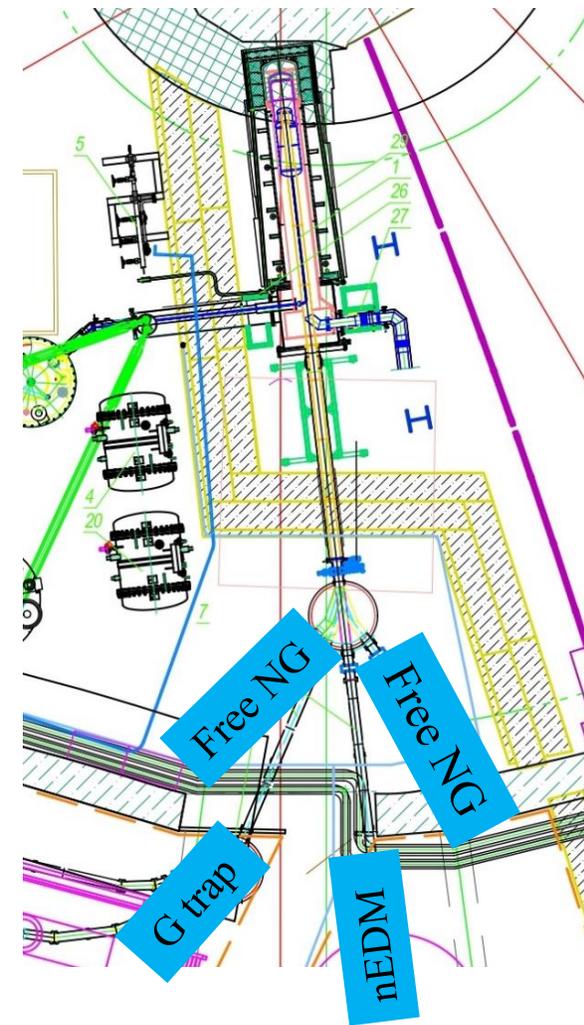
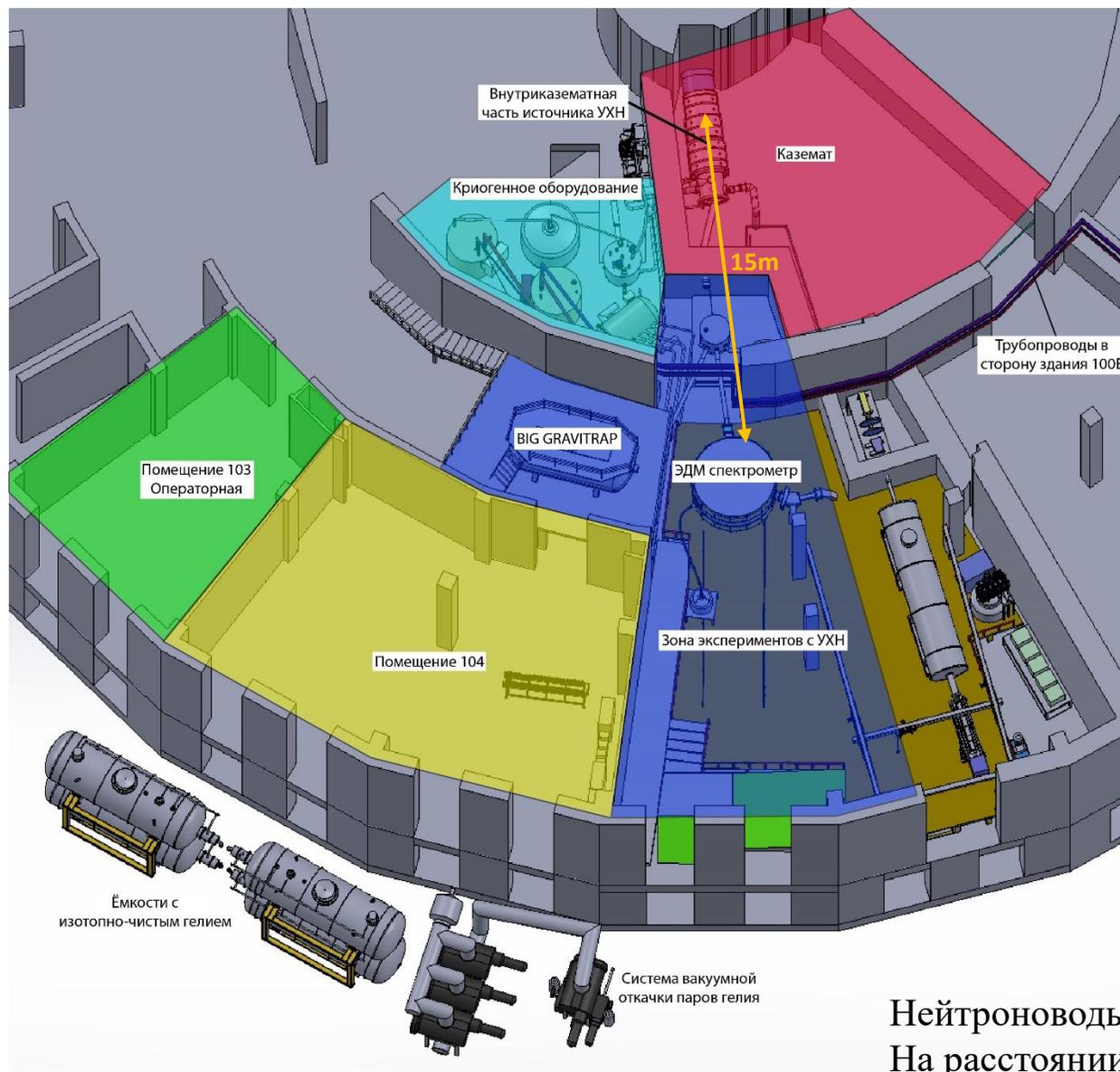
коммерческий гелий



изотопно-чистый гелий

- Для КГ получено изотопное отношение  $R_{34} = 1.52 \cdot 10^{-8}$
- Для ИЧГ получено изотопное отношение  $R_{34} = 2 \cdot 10^{-11}$ , что даёт  $\tau_a = 1718$  s, существенно выше времени жизни свободного нейтрона

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИСТОЧНИКА УХН



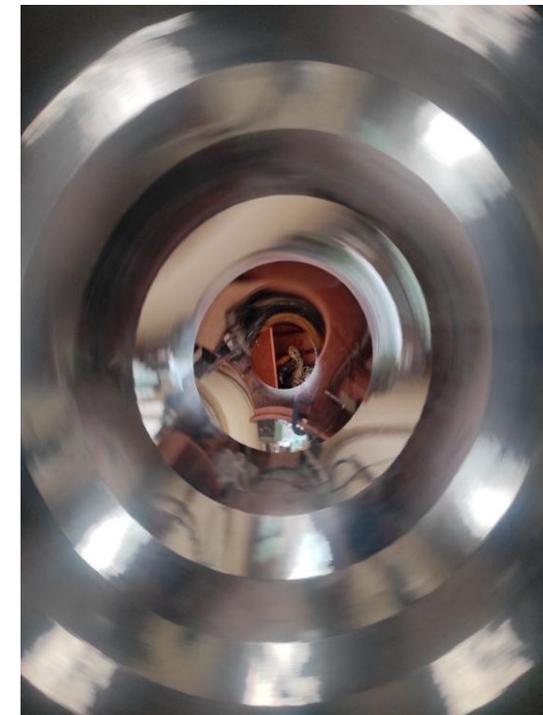
Нейтронотоды имеют коэффициент пропускания УХН  $0,95-0,98 \text{ м}^{-1}$ .  
На расстоянии 15 метров только 45–75% УХН доходят до пользователей.

# СИСТЕМА НЕЙТРОНОВОДНАЯ

1. Закупка труб
2. Проточка – получение нужной геометрии
3. Шлифовка до  $Ra = 1,6$
4. Полировка до  $Ra = 0,1$
5. Финишная полировка до  $Ra = 0,025$

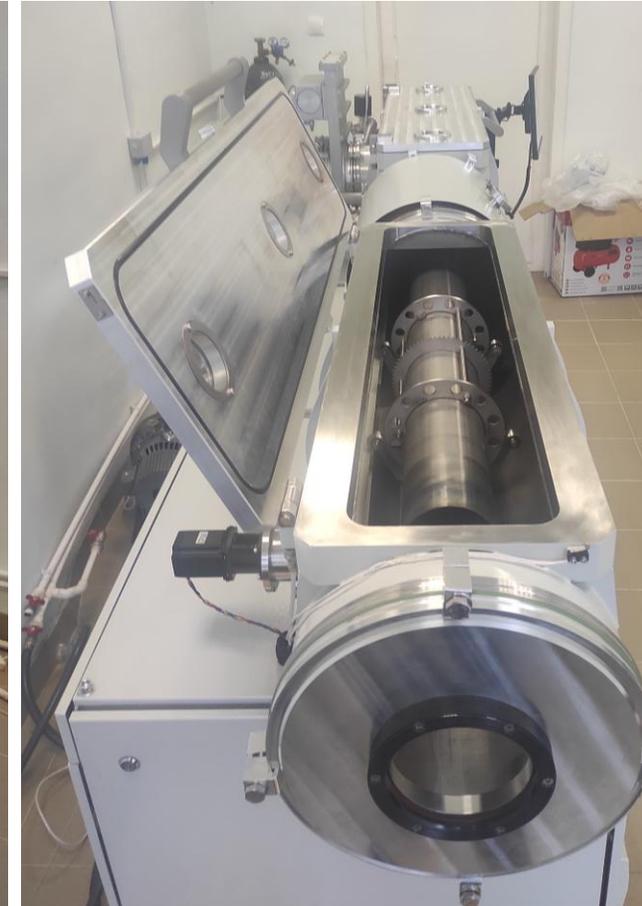
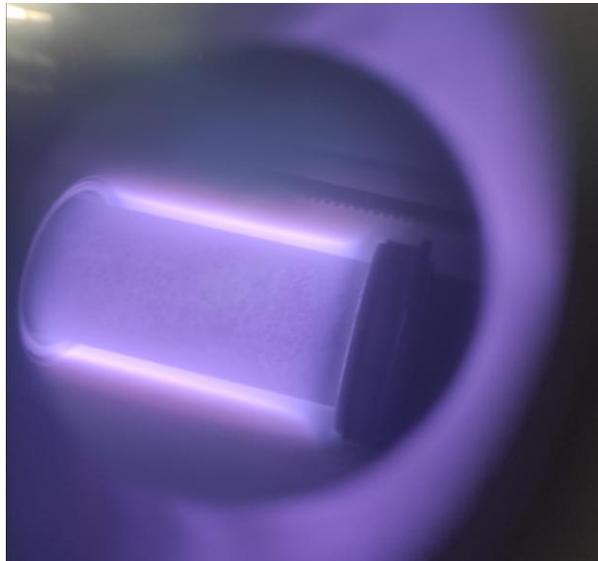
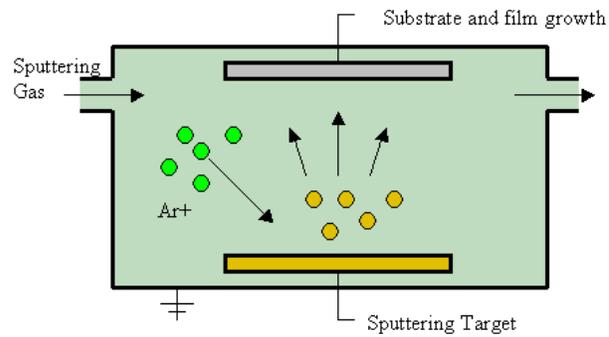


Установка для финишной полировки



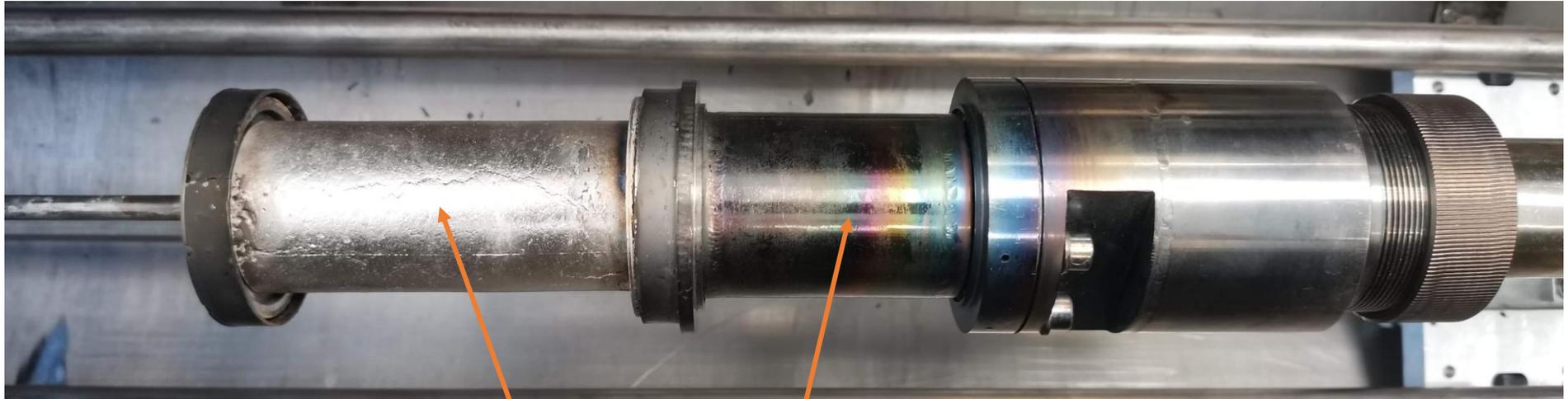
Исходное итоговое состояние поверхности нейтронОВОДА

# СИСТЕМА НЕЙТРОНОВОДНАЯ

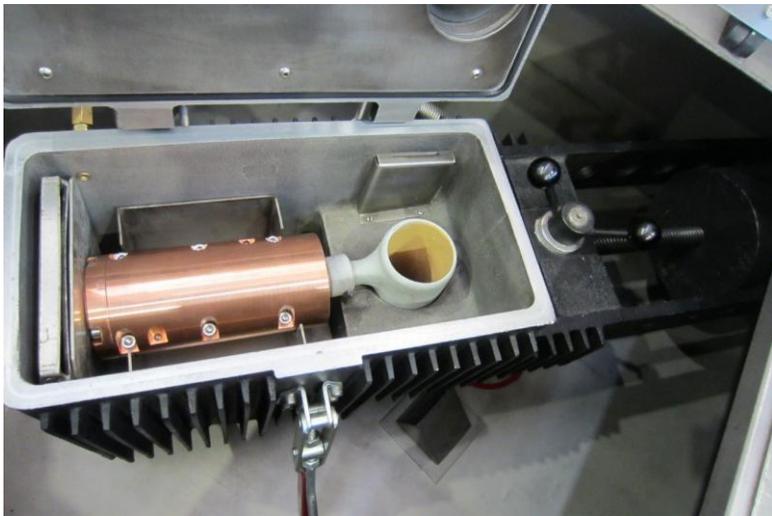


**Напыление внутренней поверхности нейтроноводов УХН  $^{58}\text{Ni}$**

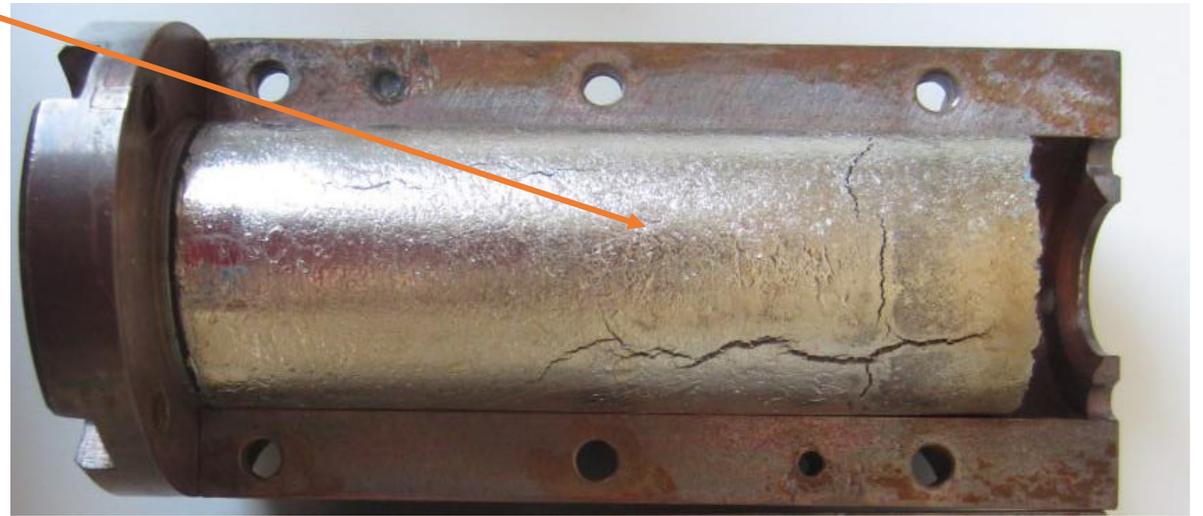
# СИСТЕМА НЕЙТРОНОВОДНАЯ



Магнетрон с никелевой мишенью и ионный источник для предварительной очистки поверхности



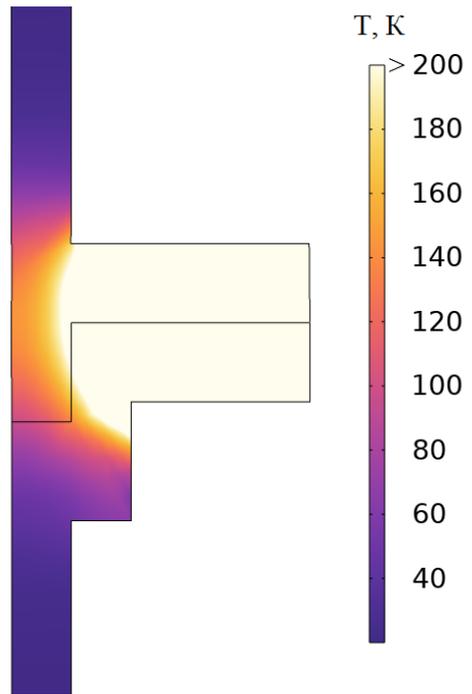
Индукционная плавильная установка с микропроцессорным управлением Lifumat-M-2000-7.7-V



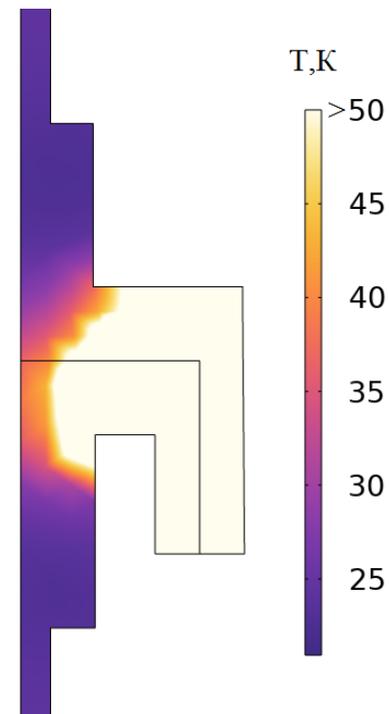
Отлитая мишень из  $^{58}\text{Ni}$

# ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ КАМЕРЫ КОНВЕРТОРА ИУХН

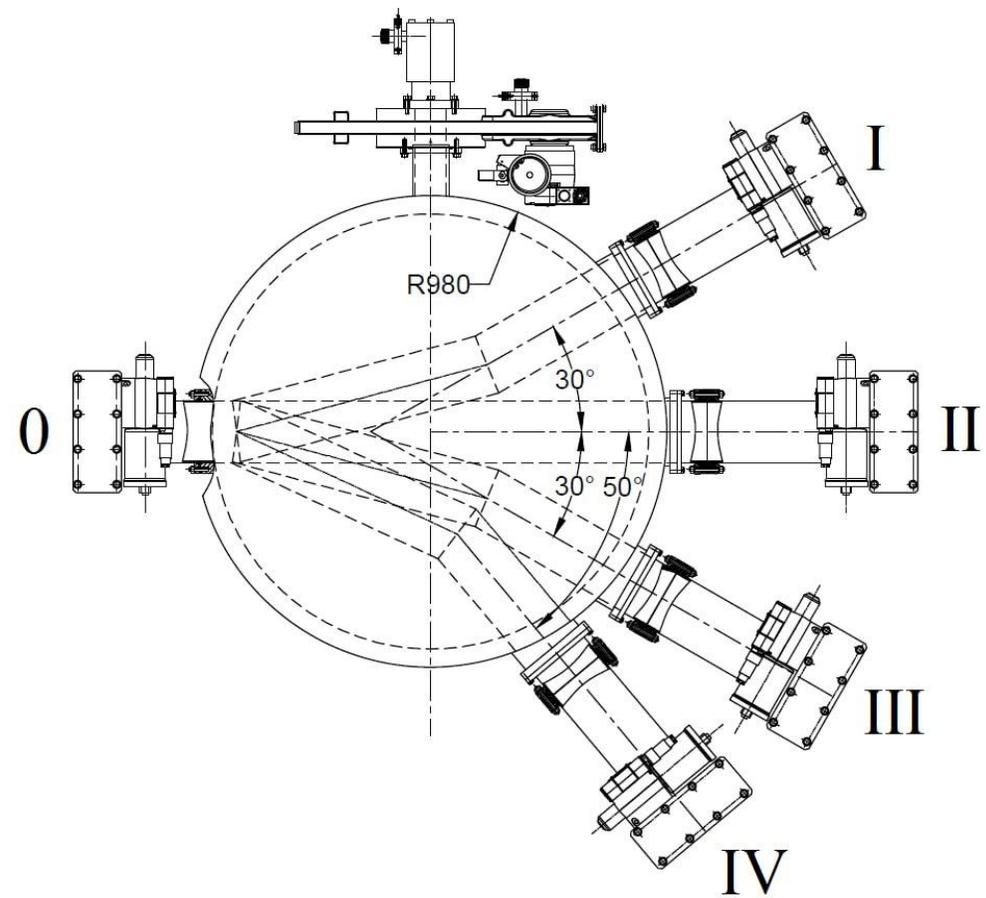
Для нейтроноводов



Для камеры конвертора



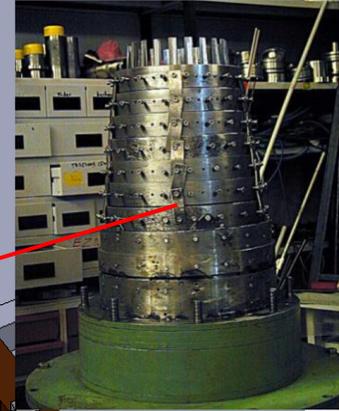
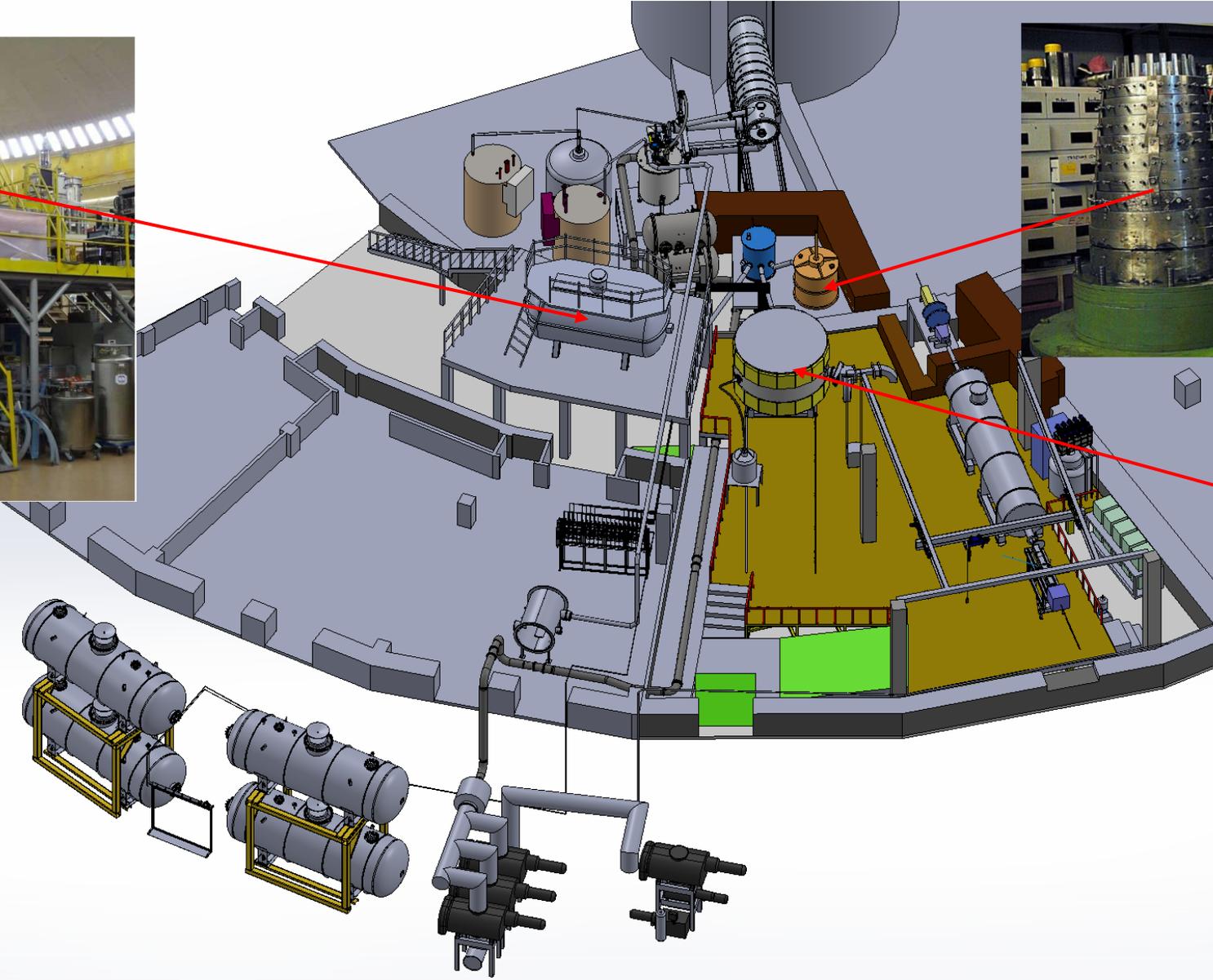
# ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ УХН



# НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА С УХН НА РЕАКТОРЕ ПИК



GRAVITRAP

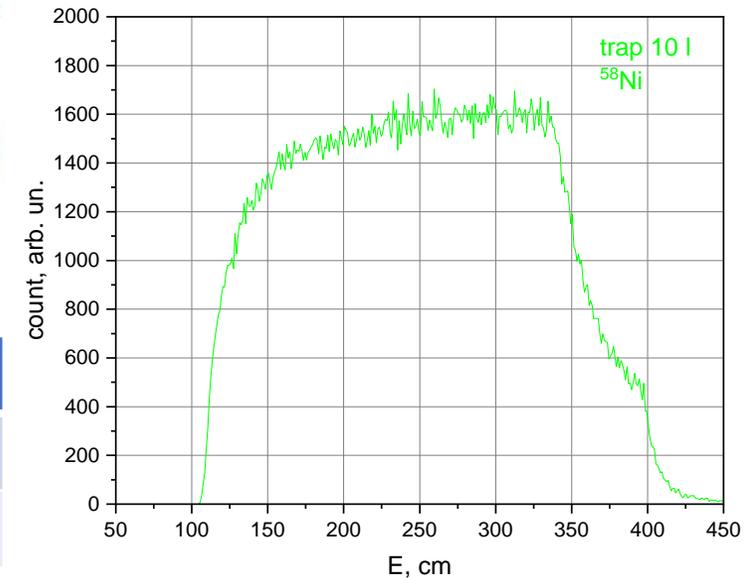
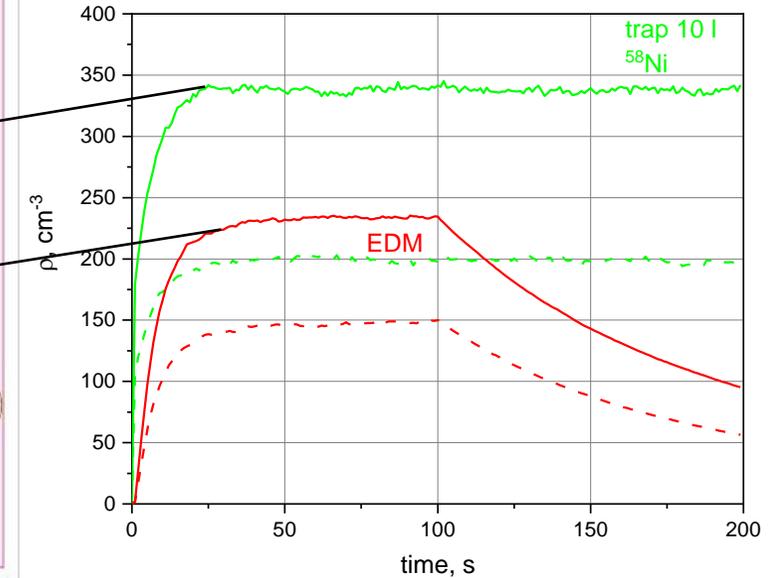
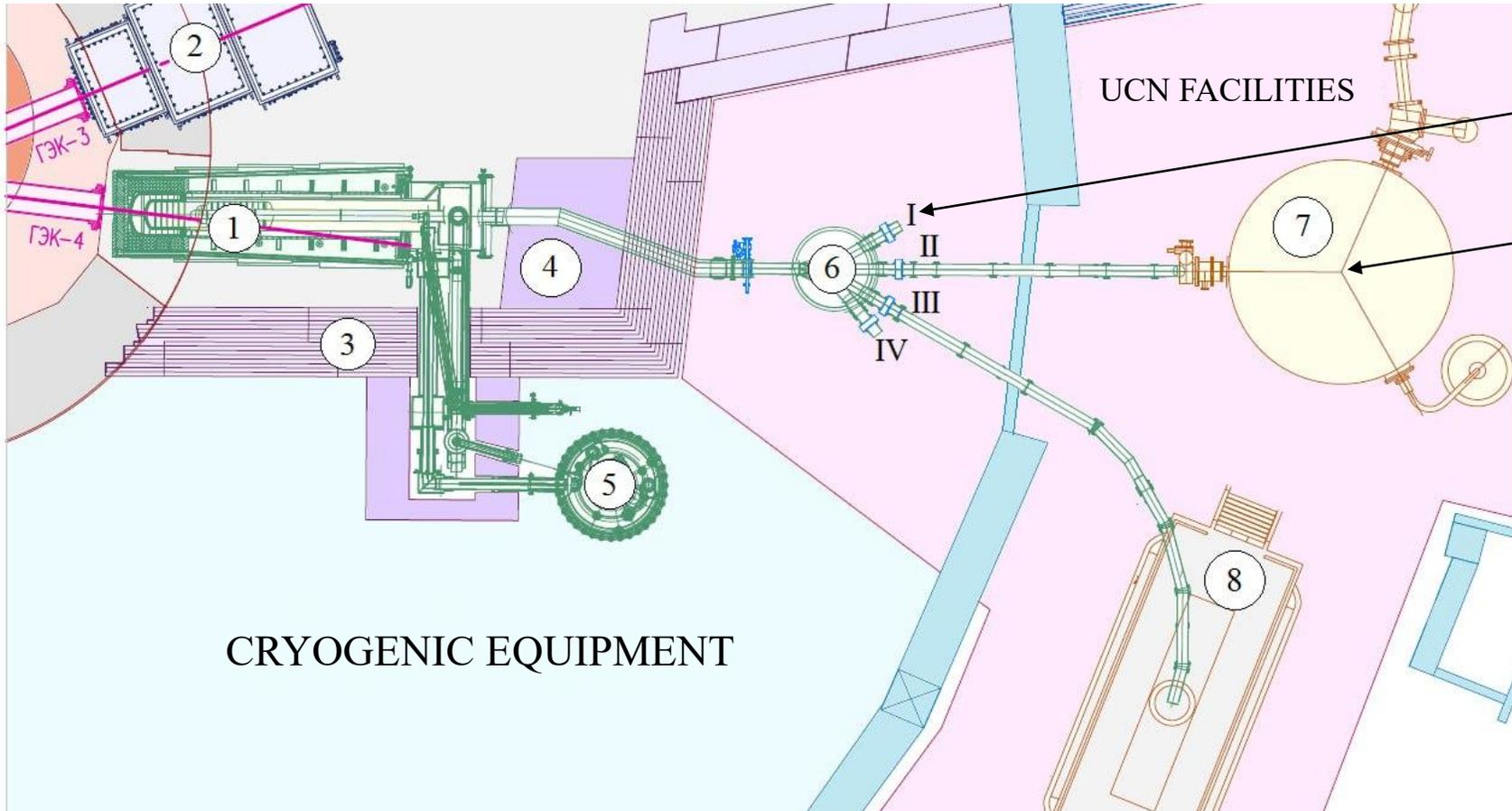


Magnetic Trap of UCN



nEDM

# РАСЧЕТ СПЕКТРОВ И ПЛОТНОСТИ УХН



HEX	$T_{\text{He4}}$	$\rho @ \text{He4}$	$\rho @ \text{beamport}$	$\rho @ \text{nEDM}$
Сталь	1.33	950	235	150
Медь	1.07	3400	340	200

# ВЫВОДЫ

В результате, был разработан и реализован весь объем технологий, позволяющих изготавливать высокопоточные источники УХН на основе сверхтекучего гелия в пределах Российской Федерации без использования зарубежных технологий:

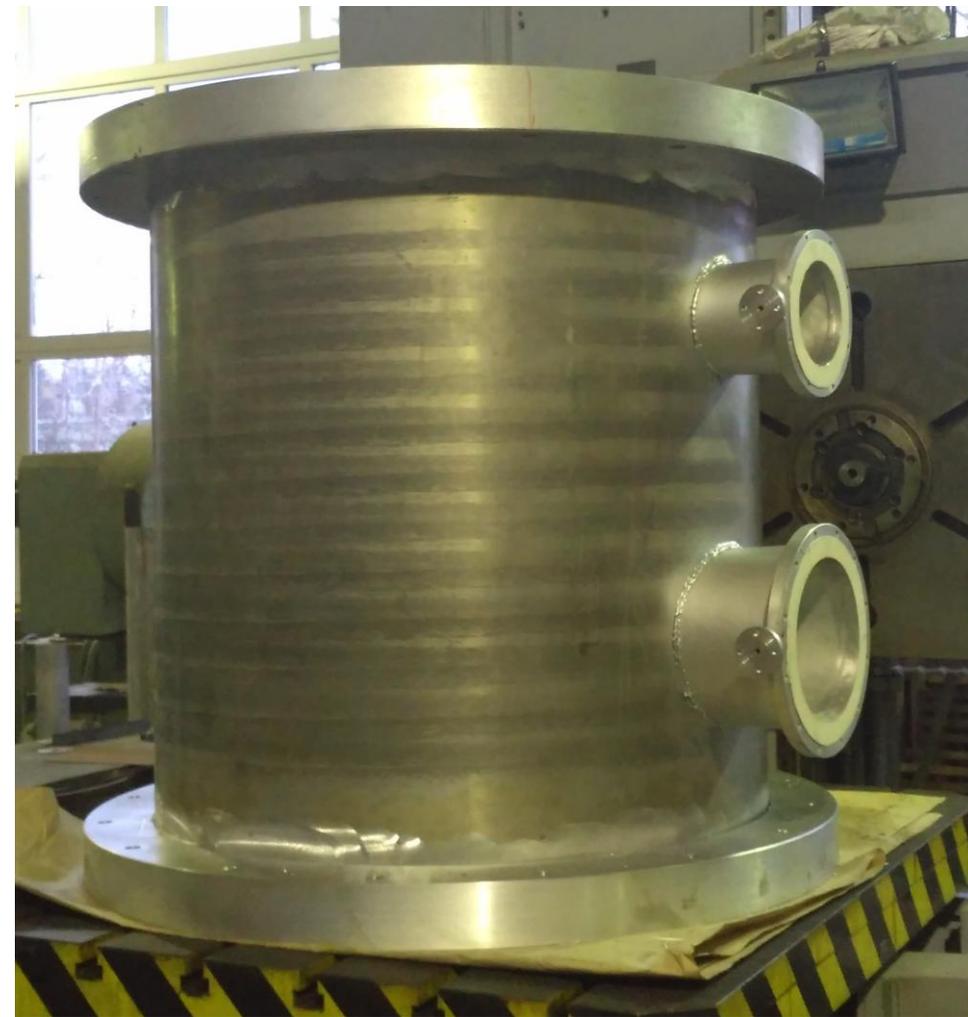
1. Спроектирован источник УХН на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК;
2. Решена задача получения и поддержания гелия в сверхтекучем состоянии в условиях больших теплопритоков;
3. Проведена работа по определению площади поверхности теплообмена с учётом имеющегося скачка Капицы;
4. Разработана и реализована технология изготовления нейтронной системы УХН с высокой граничной скоростью отражения нейтронов;
5. Разработана и внедрена технология промышленной изотопной очистки гелия от изотопа гелий-3 до уровня  $10^{-10}$ ;
6. Проведена работа по моделированию первых экспериментов с УХН на реакторе ПИК: ЭДМ спектрометр и установка по измерению времени жизни нейтрона в гравитационной ловушке.

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА УХН



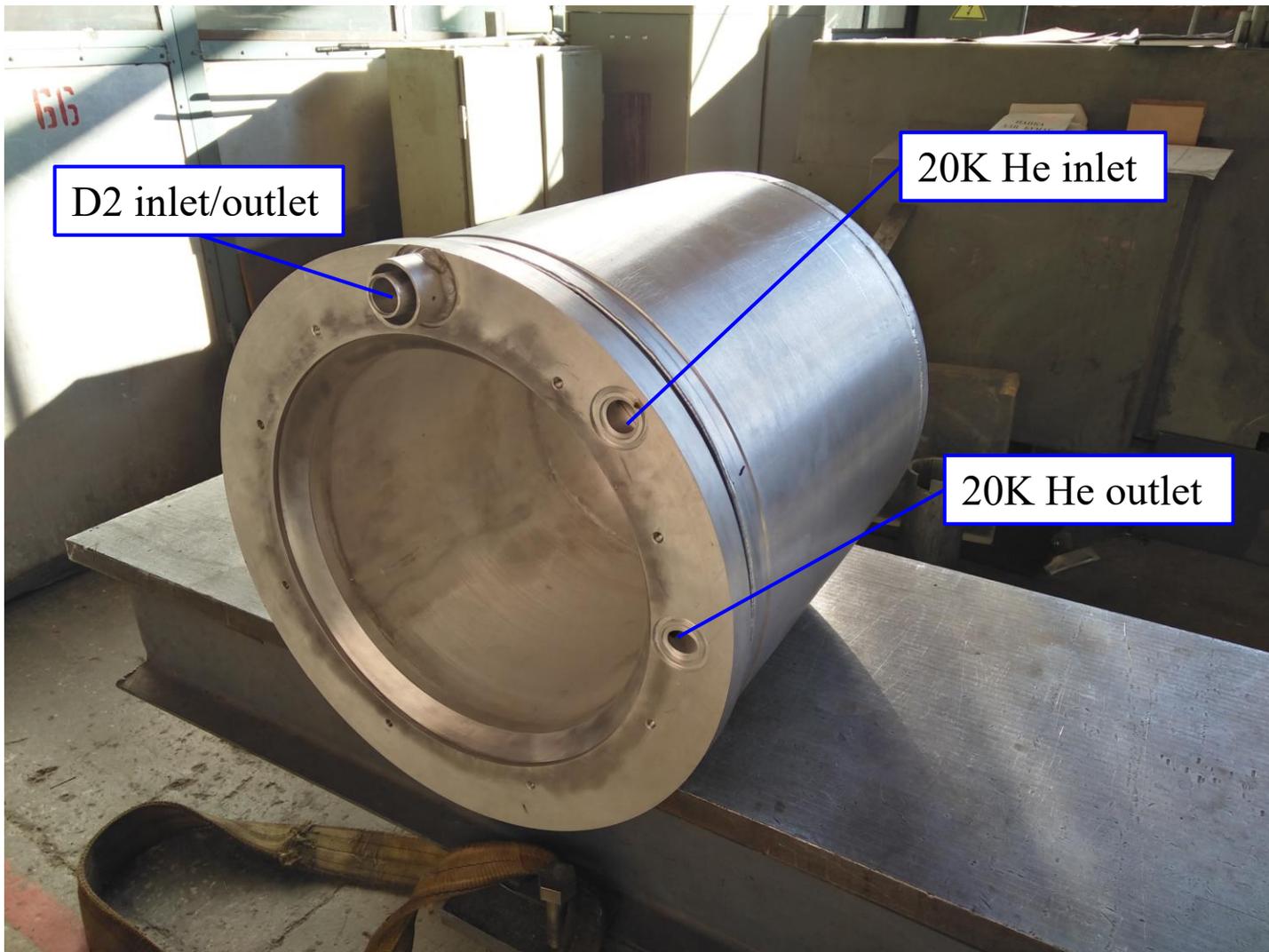
- Установка нейтронной термализации «Источник УХН»
  - Более 2000 чертежей
  - 15 тонн алюминия
  - 3 тонны стали
  - 3300 метров трубопроводов
  - 460 единиц оборудования
  - Более 40 поставщиков
  - 1000 м<sup>3</sup> гелия
  - 100 м<sup>3</sup> дейтерия

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНУТРИКАЗЕМАТНОЙ ЧАСТИ



**Внутриказематная часть (вакуумный модуль + стыковочная катушка)**

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНУТРИКАЗЕМАТНОЙ ЧАСТИ



Дейтериевый модуль

# СБОРКА ГЕЛИЕВОГО МОДУЛЯ ИСТОЧНИКА УХН

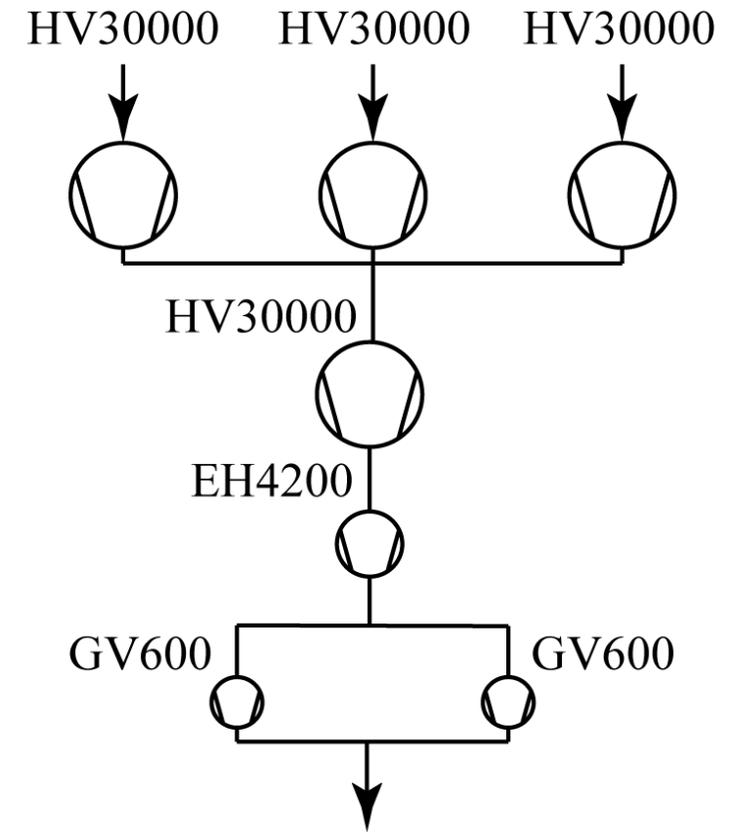


Напыление  $\text{Ni}^{58}$



Контрольная сборка

# СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧИКИ ПАРОВ ГЕЛИЯ



# КРИОГЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ



Гелиевый рефрижератор  
3000Вт @ 20К

Гелиевый криостат  
 $T = 1\text{К}$

Гелиевый ожижитель  
72 л/ч

# СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ГЕЛИЯ



Ресивер  
рефрижераторный

Ресивер  
дейтериевый



Ресивер  
ожижительный

Гелиевые  
реципиенты

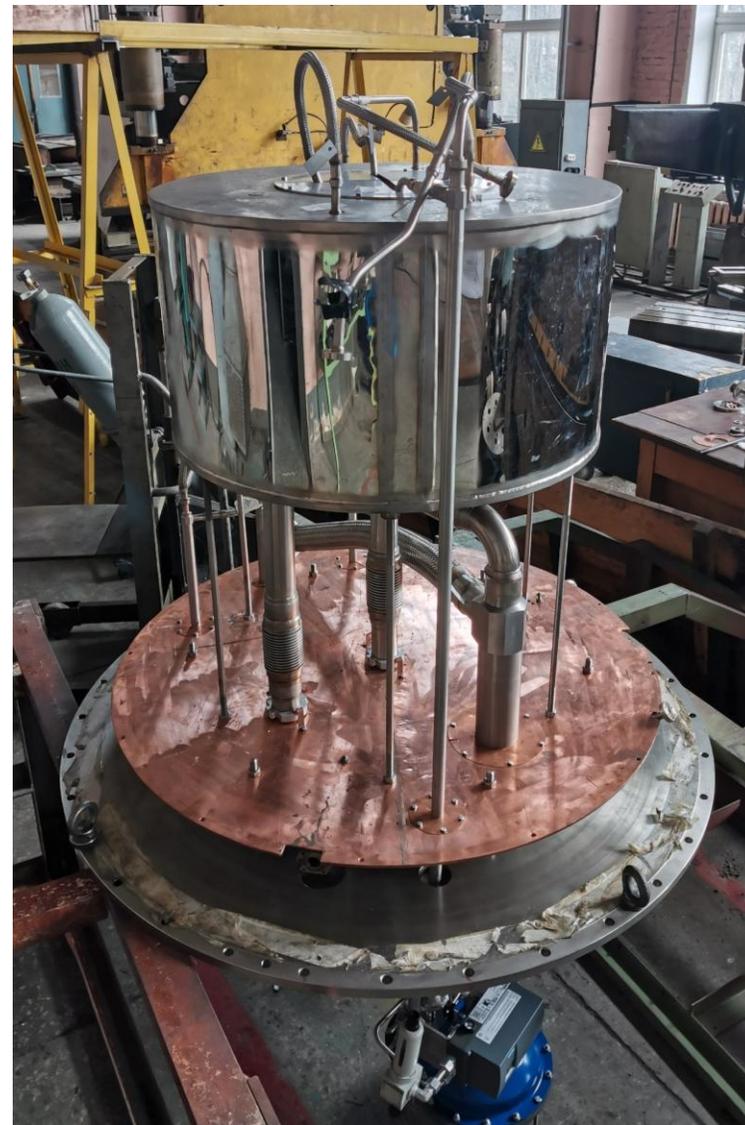
# СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ИЗОТОПНО-ЧИСТОГО ГЕЛИЯ



# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЕЛИЕВОГО КРИОСТАТА



# СБОРКА ГЕЛИЕВОГО КРИОСТАТА



# ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИСТОЧНИКА УХН

Программа криогенных испытаний источника разделена на 4 этапа:

1. Запуск гелиевого рефрижератора TFC-50 и получение рабочих температур 20К на тепловых экранах
2. Запуск гелиевого ожижителя L-280 и получение жидкого гелия
3. Заполнение ванн криостата жидким гелием
4. Испытания по конденсации и поддержанию сверхтекучего гелия в камере ИУХН.

Мы здесь →

# СБОРКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИСТОЧНИКА УХН



# УСТАНОВКА КАМЕРЫ КОНВЕРТОРА ВНУТЬ ИСТОЧНИКА УХН



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИСТОЧНИКА УХН

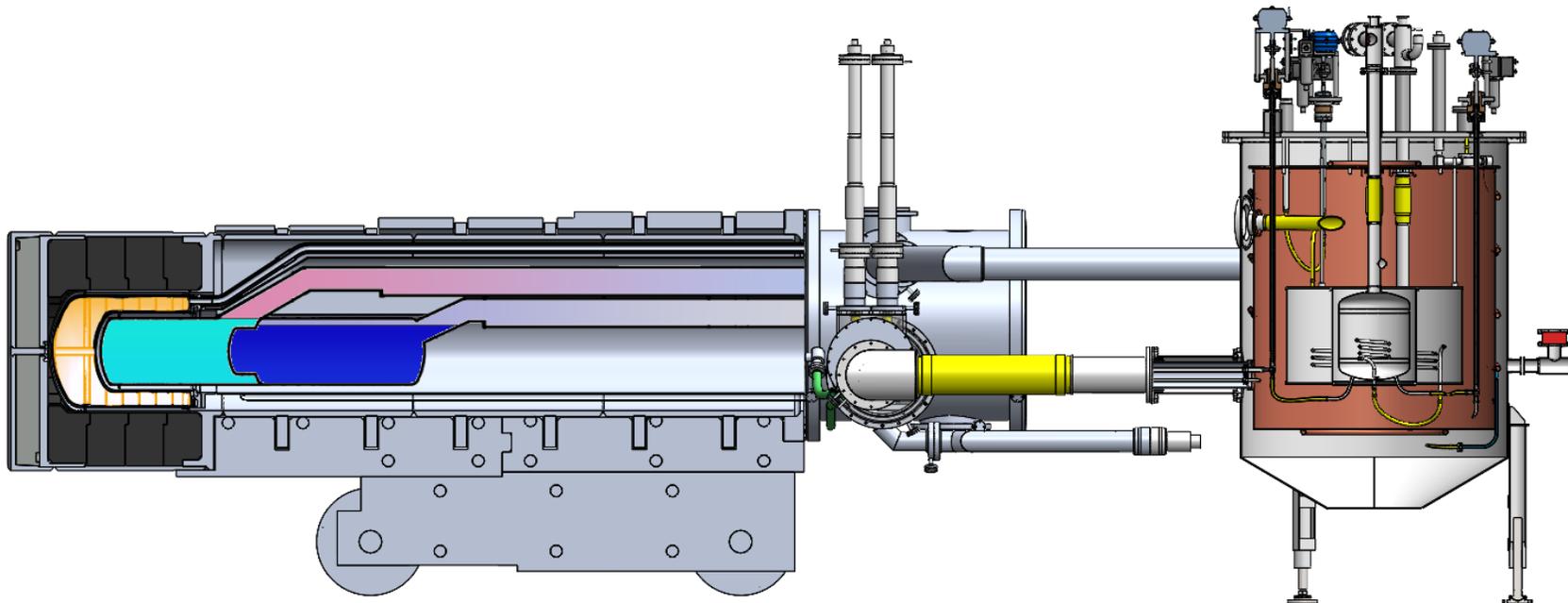


# ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИСТОЧНИКА УХН

Программа криогенных испытаний источника разделена на 4 этапа:

1. Запуск гелиевого рефрижератора TFC-50 и получение рабочих температур 20К на тепловых экранах
2. Запуск гелиевого ожижителя L-280 и получение жидкого гелия
3. Заполнение ванн криостата жидким гелием
4. Испытания по конденсации и поддержанию сверхтекучего гелия в камере ИУХН.

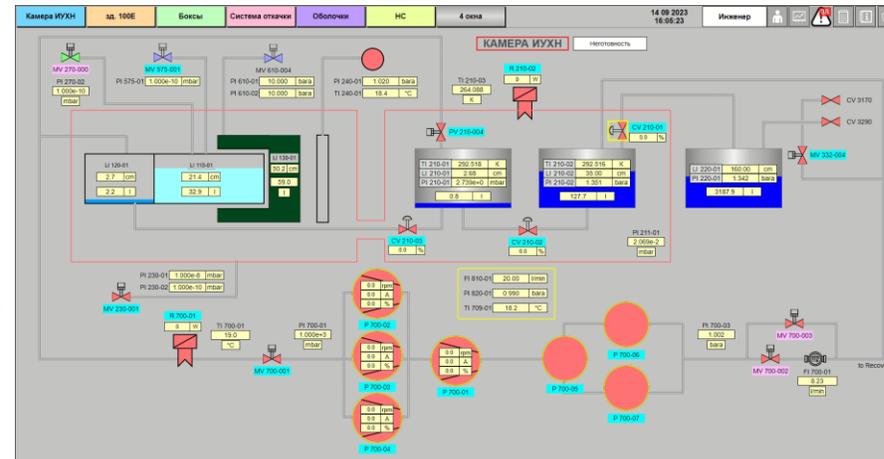
Мы здесь →



# СИСТЕМА ЗАЩИТЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ (ОТРАБОТКА АЛГОРИТМОВ – АВТОМАТИЗАЦИЯ)

Система Защиты Управления и Контроля это:

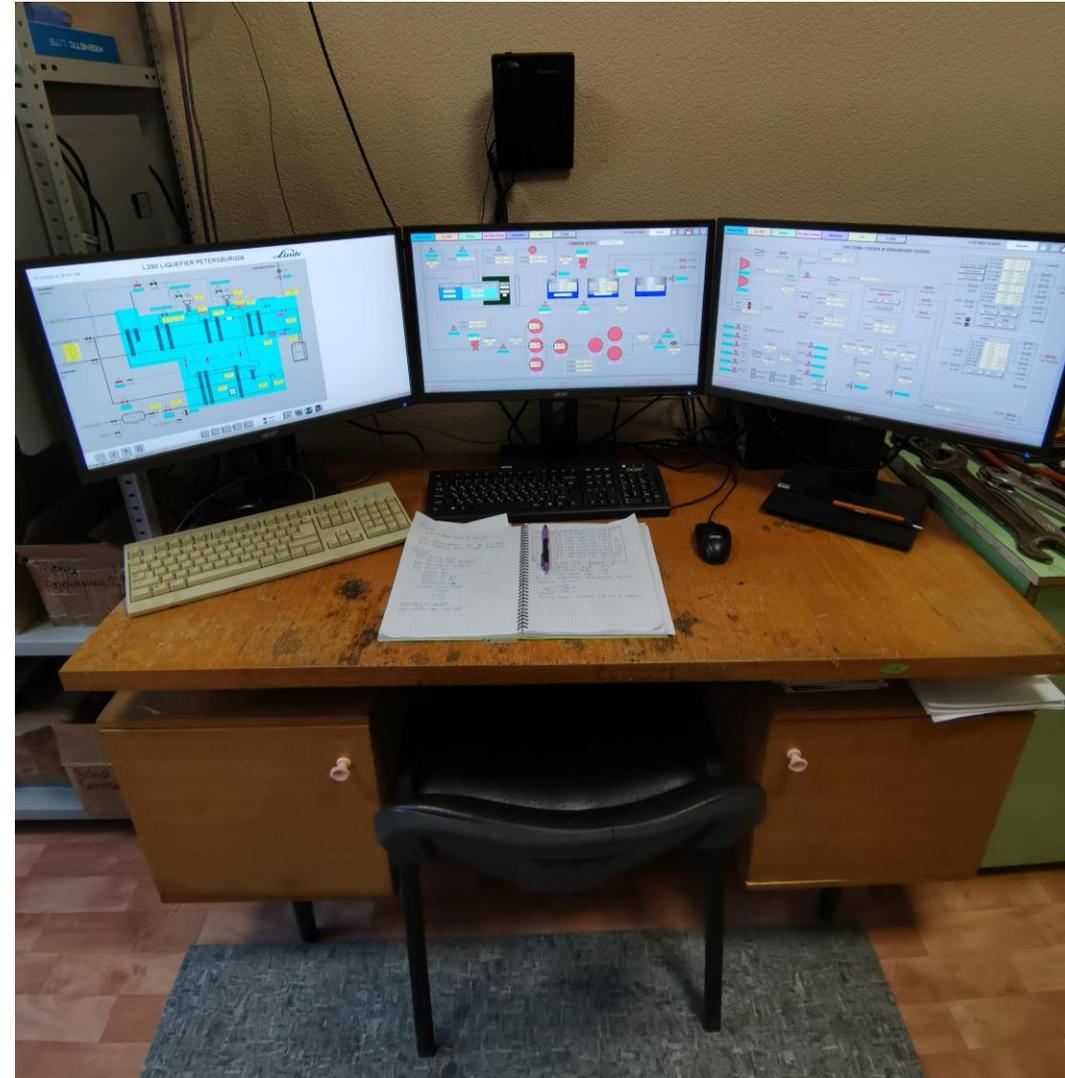
- PLC на базе SIEMENS S-1500
- 200 входящих сигналов
- 120 исходящих сигналов
- 5,5 км проводов
- 13 кроссовых шкафов + 2 шкафа с ПЛК
- 2 места оператора
  - Оператор источника УХН
  - Оператор нейтроноводной системы
- **20 страниц встроенных алгоритмов**



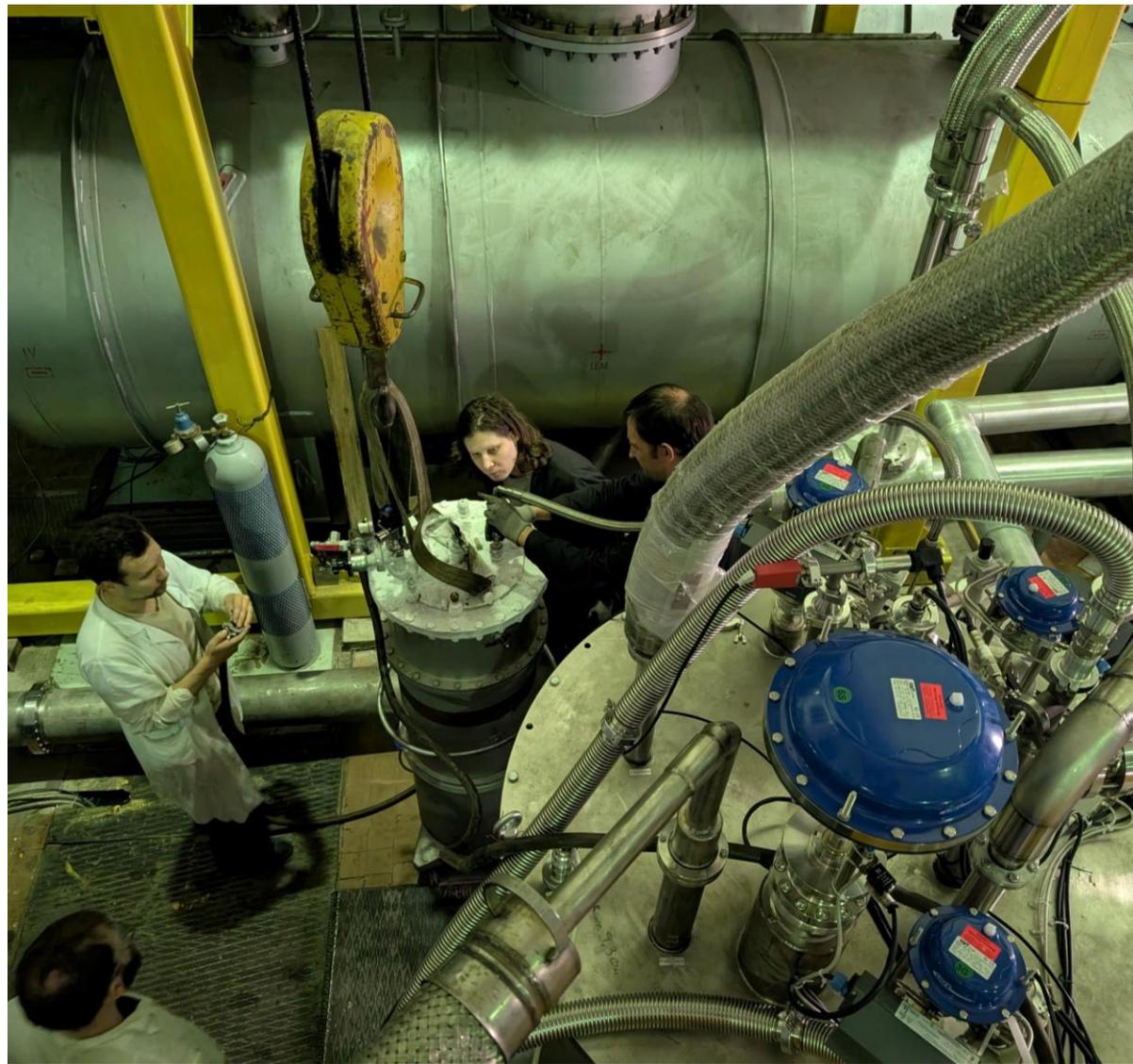
Главный экран с параметрами криостата



Шкаф с центральным наладчиком



# ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИСТОЧНИКА УХН



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

