



Предложение экспериментов на канале – прототипе источника УХН реактора ИБР-2

Курылев Владимир Андреевич

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Михаил Васильевич Авдеев

Научные консультанты: к.ф.-м.н. Герман Вячеславович Кулин

Ультрахолодные нейтроны (УХН)



Ф.Л. Шапиро, В.И.Лушиков, А.В.Стрелков,
Ю.Н. Покотиловский

УХН: нейтроны, энергия которых настолько мала, что они отражаются под любым углом падения и могут храниться в замкнутых сосудах

	Е (эВ)	Т (К)	λ(Å)
УХН	<10 ⁻⁷	≈ (<) mK	>800
ОХН	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁴	10 ⁻² - 10	800 - 30
холодные	(0.1-10)×10 ⁻³	10-120	30-3
тепловые	(10-100) ×10 ⁻³	120-1000	4-1
резонансные	>1		< 0.1

- Исследование фундаментальных свойств нейтрона
- Нейтронные квантово-оптические эксперименты

Письма в ИЭТФ

Т. 9

1969

Вып. 1

1969

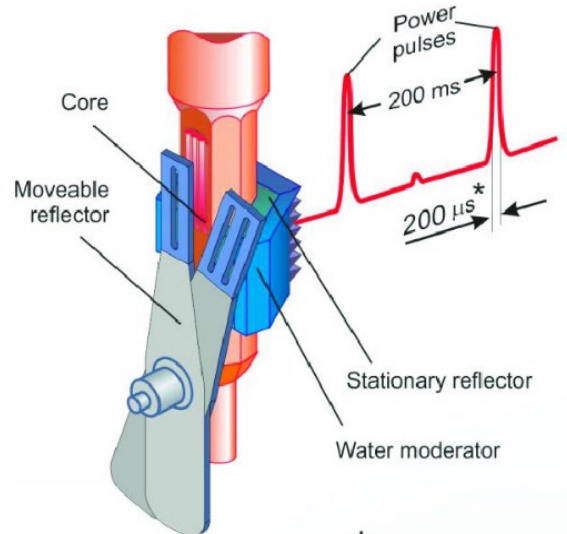
НАБЛЮДЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков,
Ф.Л.Шапиро

Источник УХН с импульсным накоплением

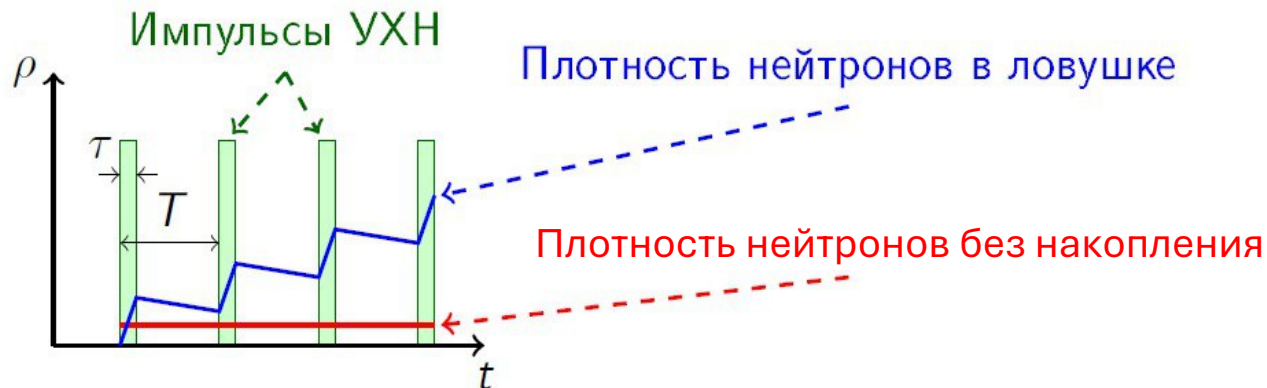
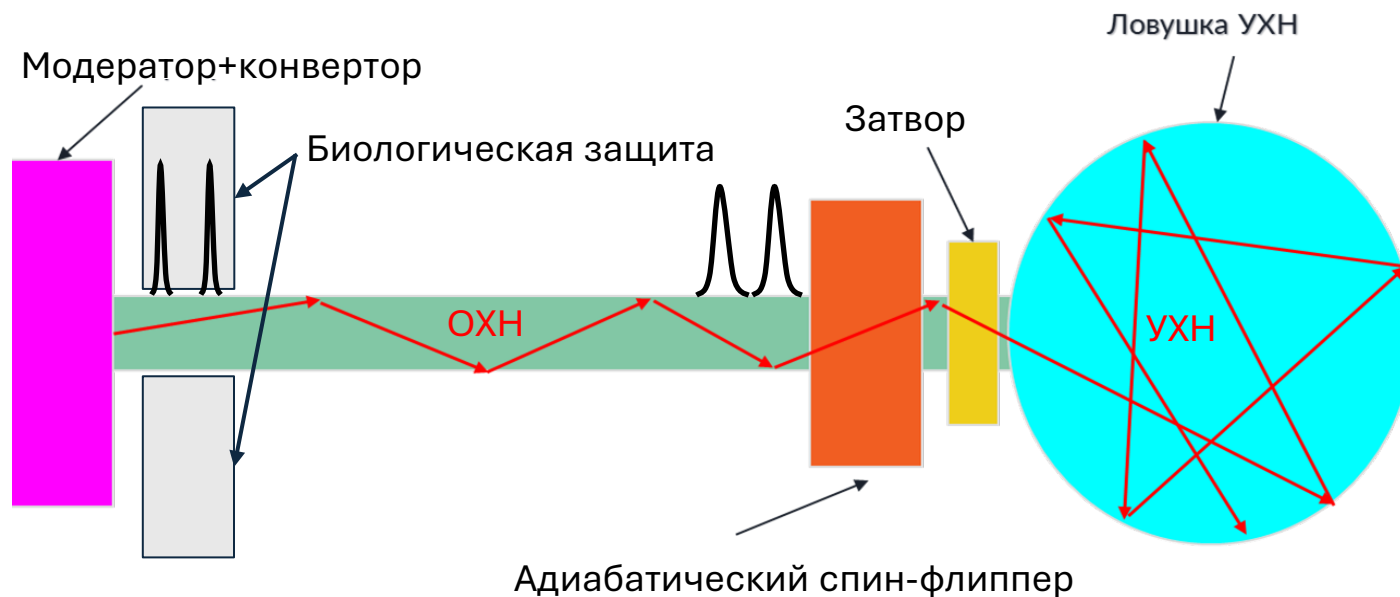
2

Импульсный реактор ИБР-2



* at mean power 2 MW

- Частота импульса **5 Гц** (Период **0.2 с**)
- Длительность импульса **350-500 μс**
- Средняя плотность потока тепловых нейтронов $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- Импульсная плотность потока тепловых нейтронов $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$



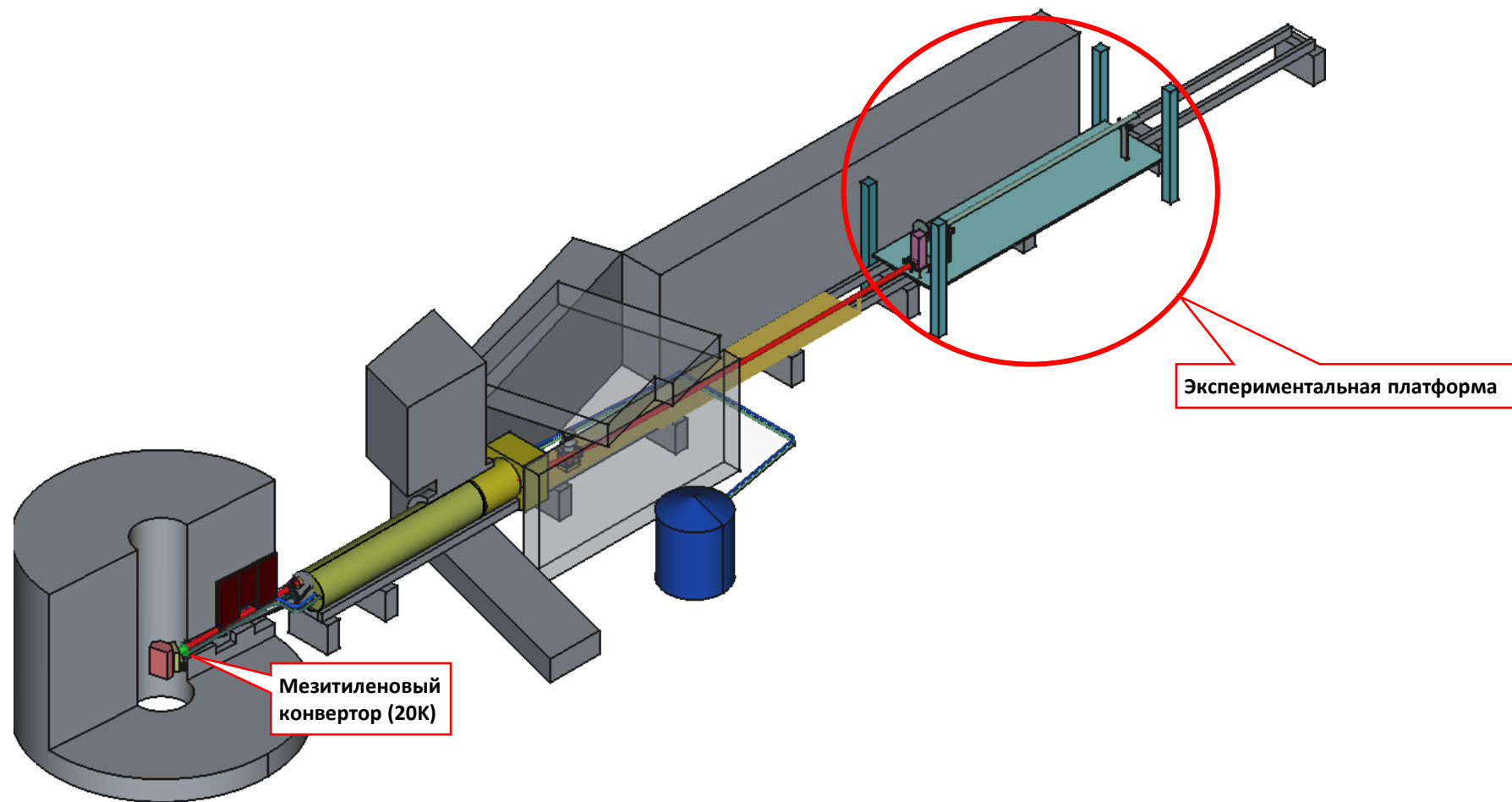
A.I. Frank, G.V. Kulin, M.A. Zakharov, S.V. Mironov, V.A. Kurylev, A.A. Popov, K.S. Osipenko
Phys. Part. Nuclei **56**, 1222–1239 (2025).

Цели работы:

- Разработка подхода к эксперименту по проверке нейтроноводов для будущего источника УХН
- Разработка флиппера-прототипа для проверки технических решений будущего флиппера-замедлителя

Задачи работы:

- Предложить метод экспериментальной проверки нейтроноводов
- Проверить чувствительность метода к искомому уширению временного импульса, оценить время набора статистики
- Сформировать предварительный дизайн флиппера-прототипа: соленоид, ВЧ резонатор
- Предложить вариант эксперимента демонстрирующего изменение энергии нейтронов в результате нестационарного переворота спина нейтрона в поле спин-флиппера



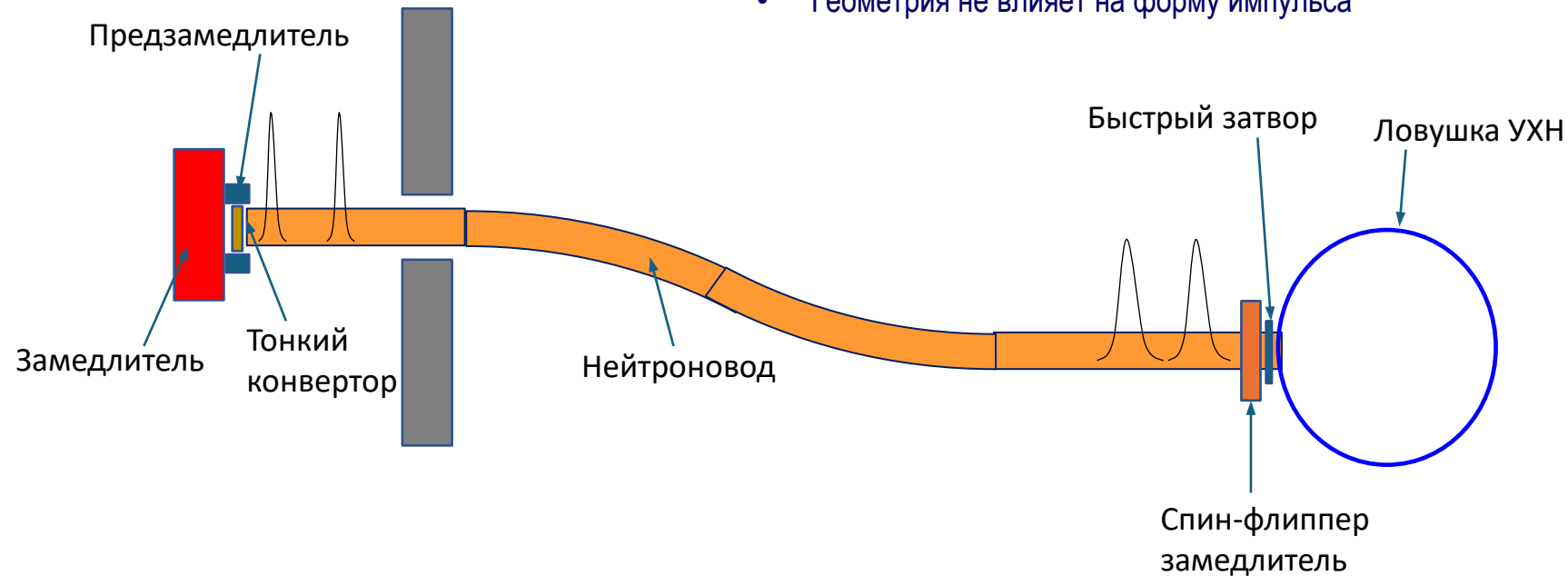
Принят проект в рамках которого планируется создание источника ОХН как источника прототипа

Длина: ~15 m

Два изогнутых участка с радиусом кривизны 20 m

S-образный нейтроновод:

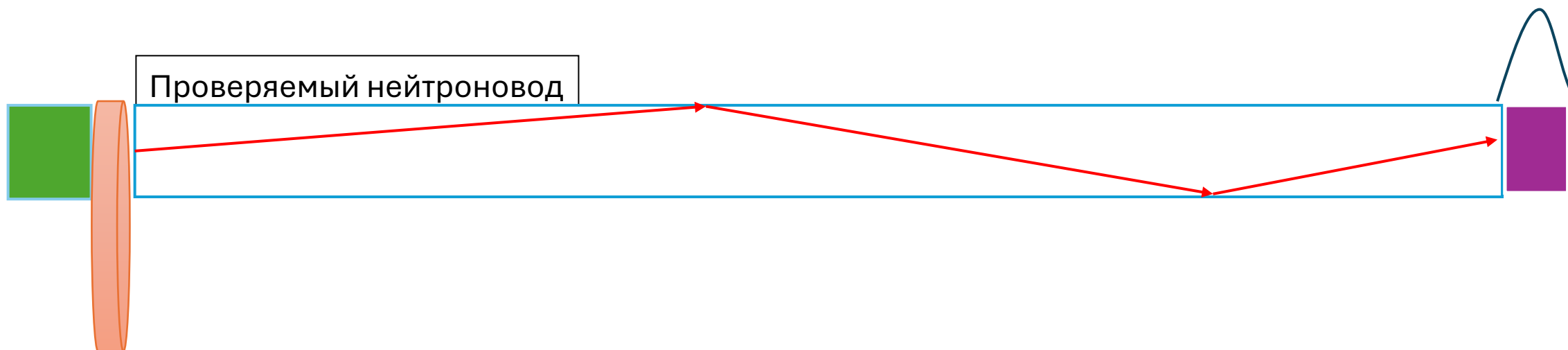
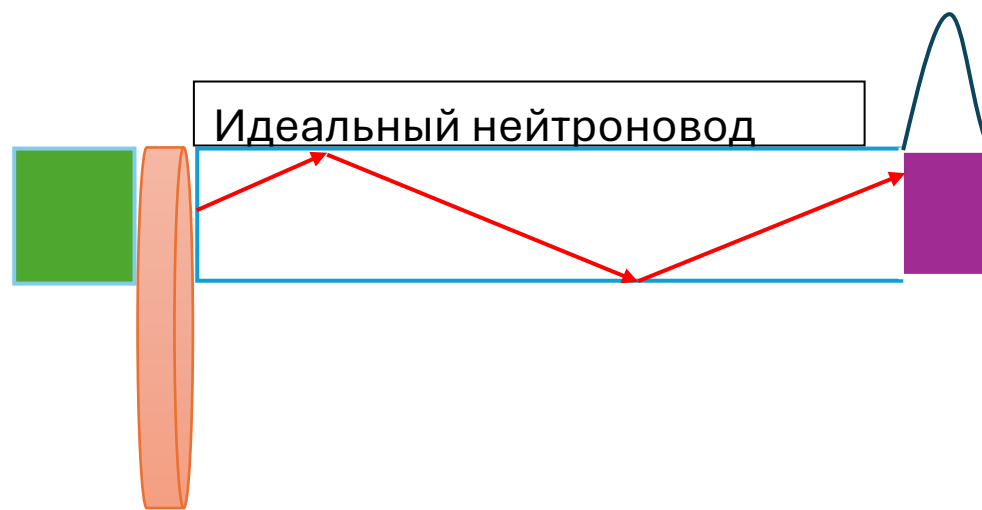
- Значительно снижает фон нейтронов со скоростями более 200 m/s
- Геометрия не влияет на форму импульса



Допустимый уровень дефектов формы (волнистостей) должен приводить к дисперсии времен пролета монохроматических нейтронов не больше 2-3 мс.

Эксперимент по аттестации нейтроноводов

6



Стадия I:

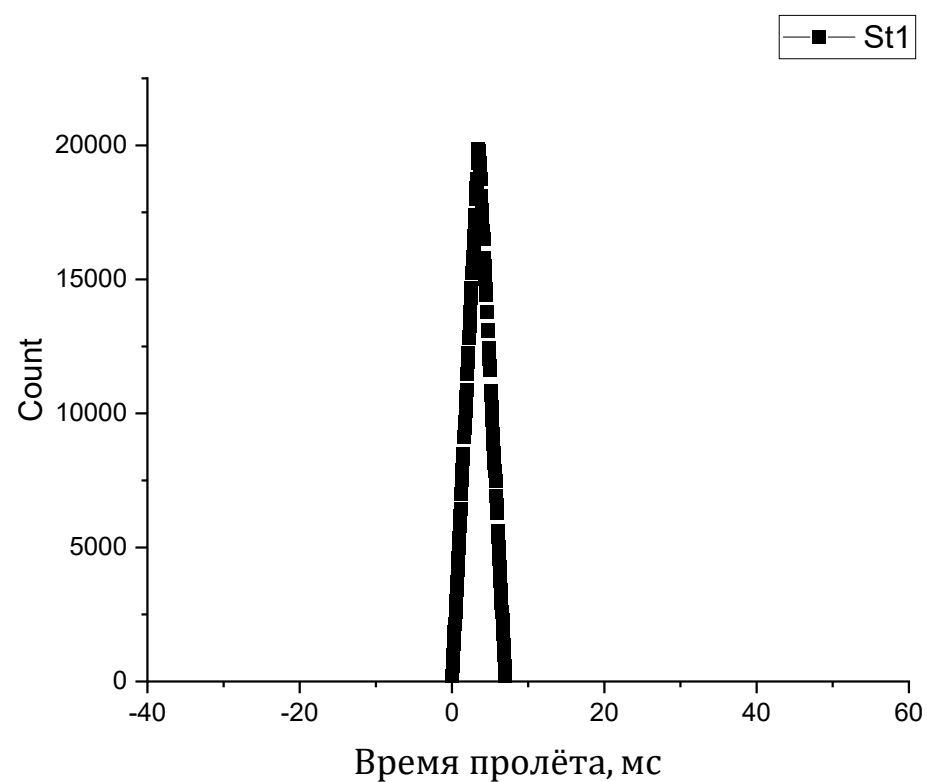
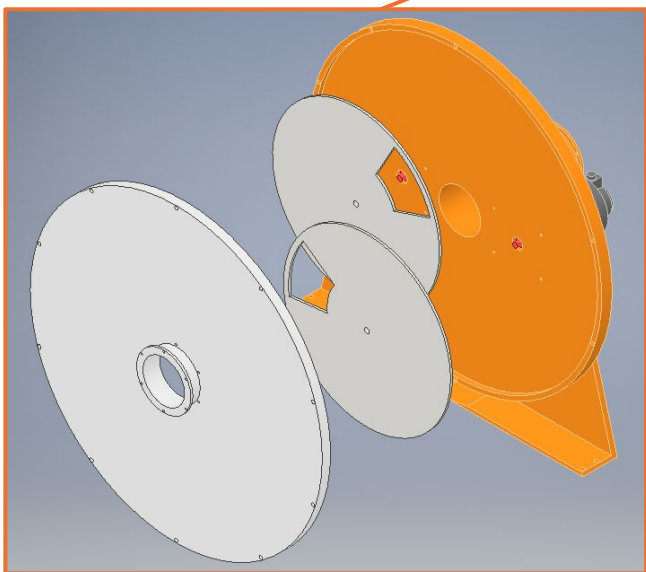
Монохроматор



Детектор

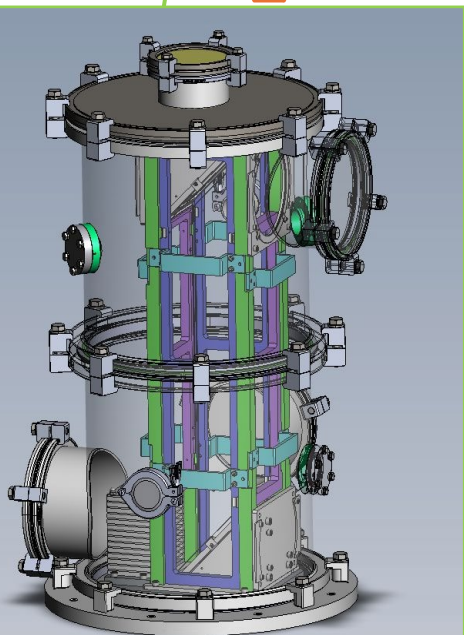
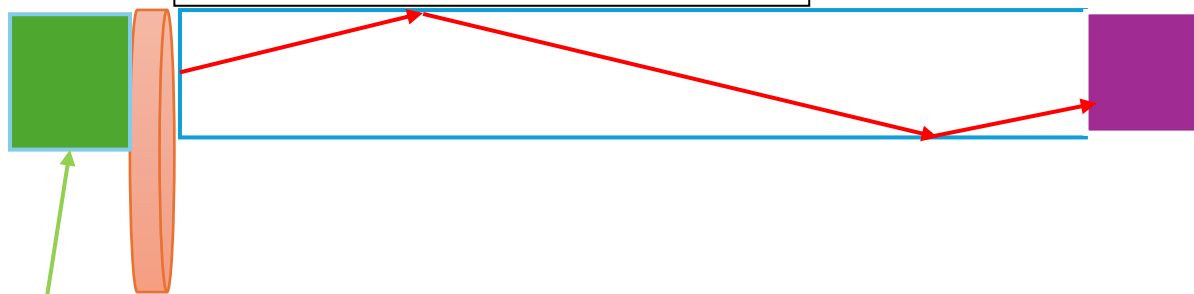


Чоппер

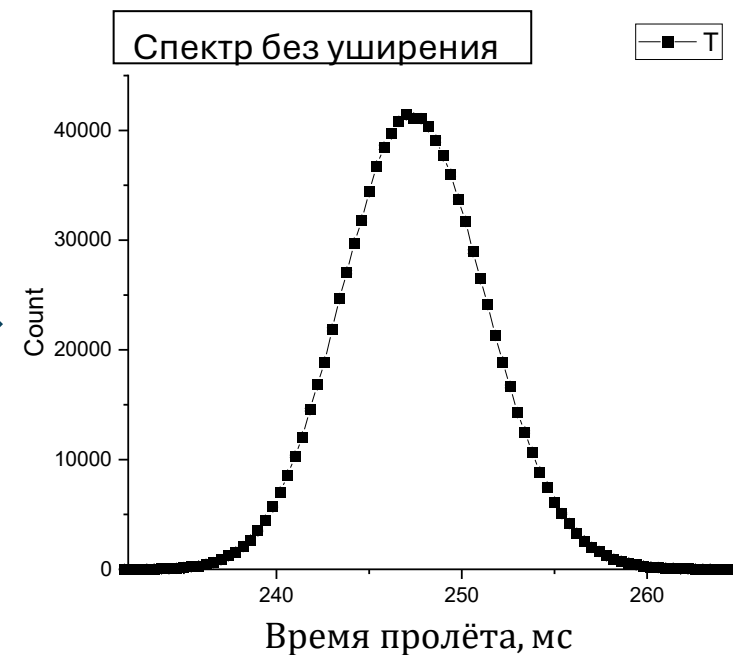
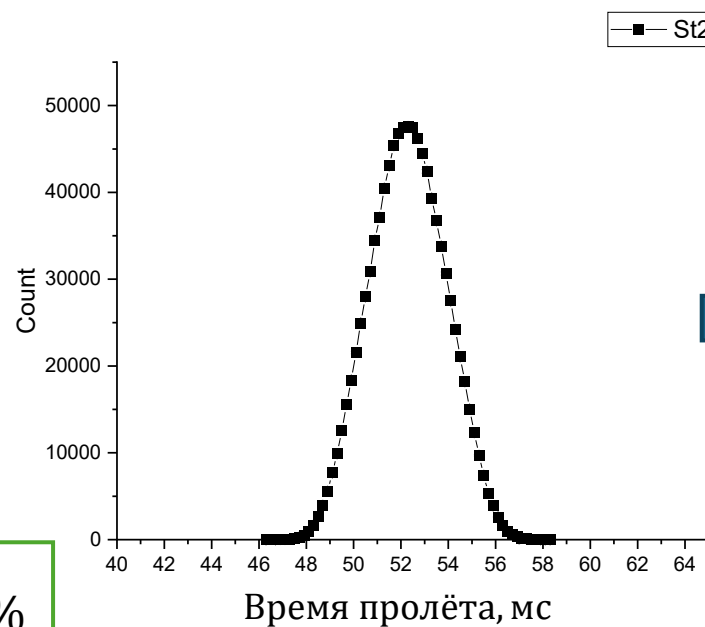


Стадия II:

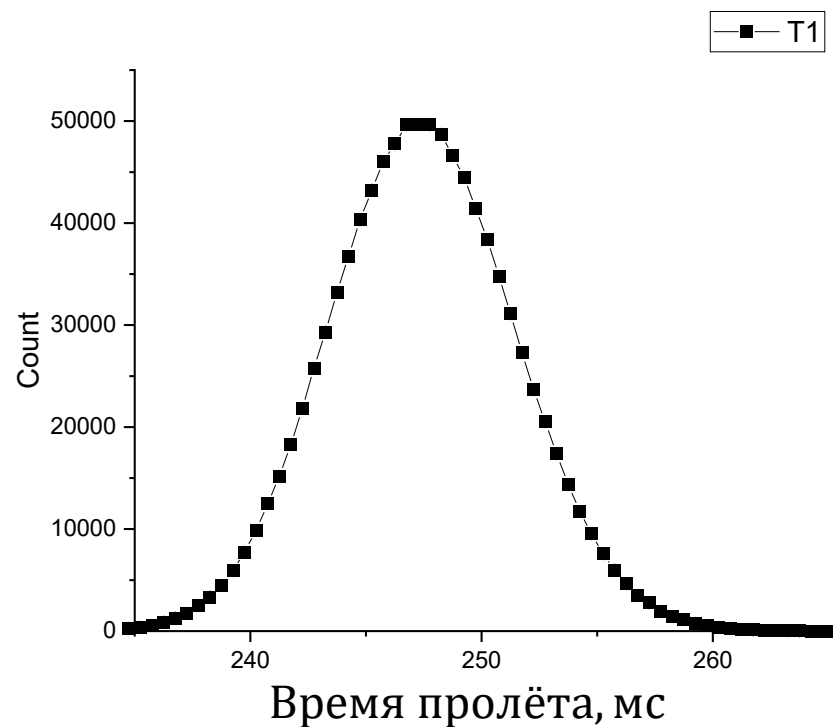
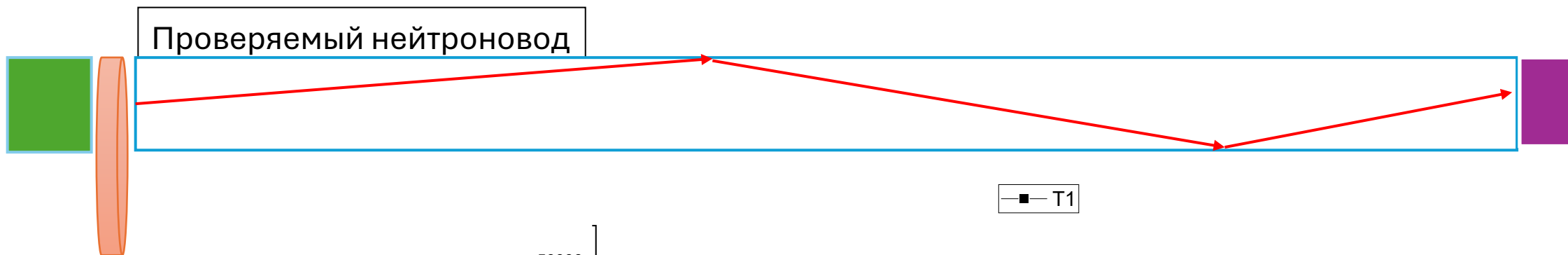
Зеркальный нейтроновод



$$\frac{\Delta v}{v} = 2\%$$

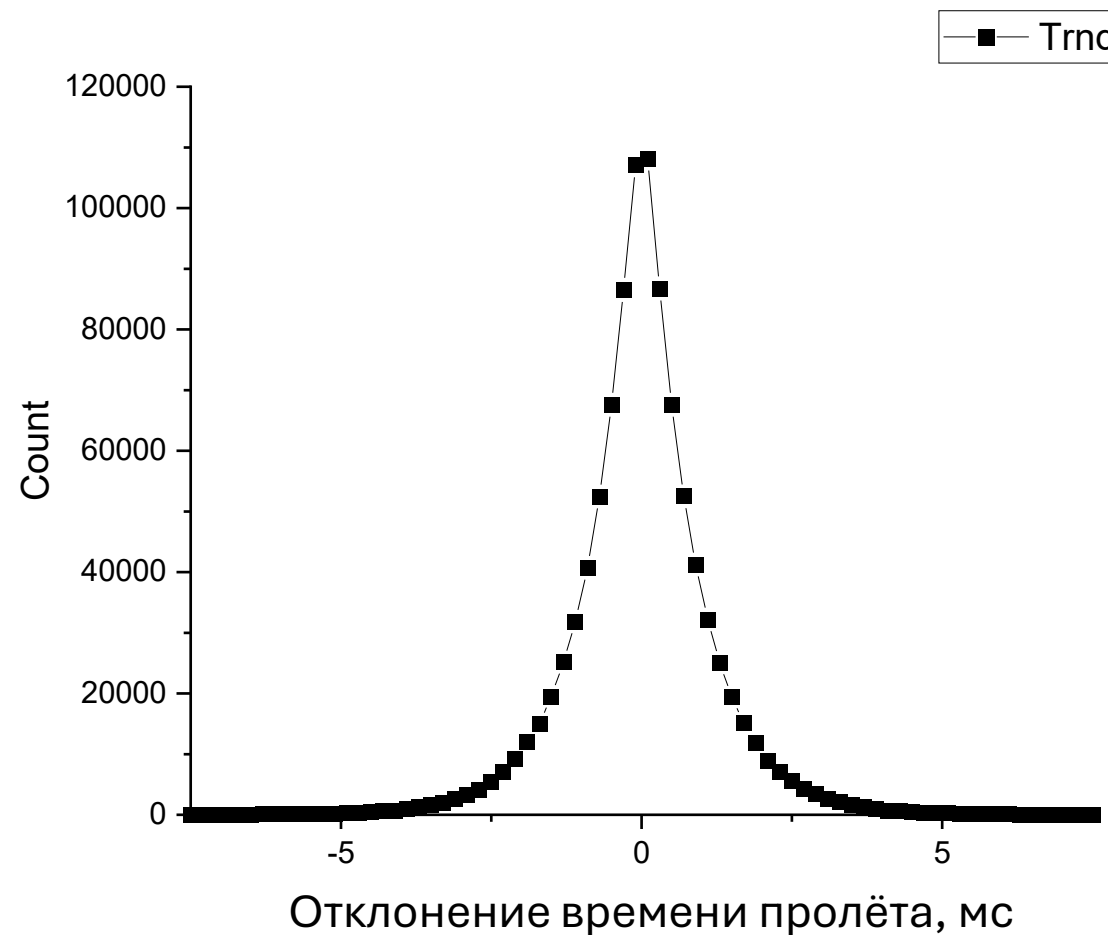
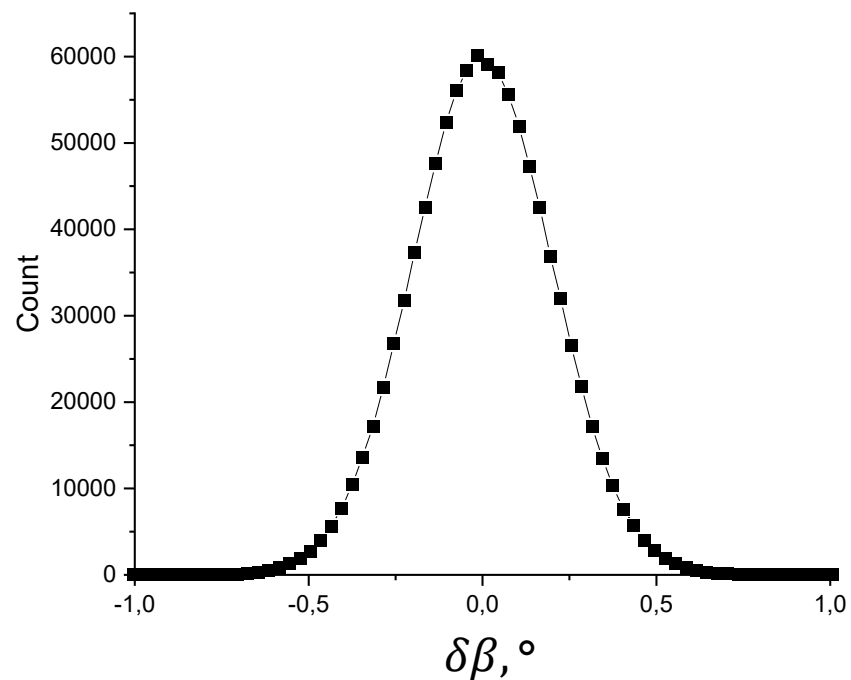
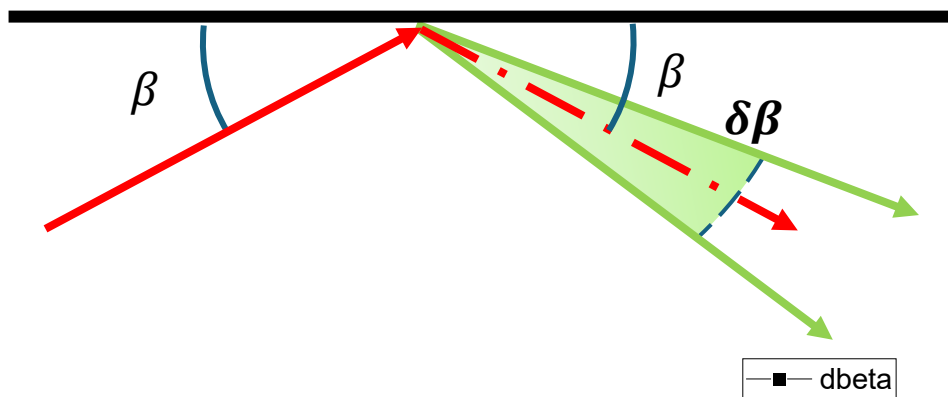


Стадия III:

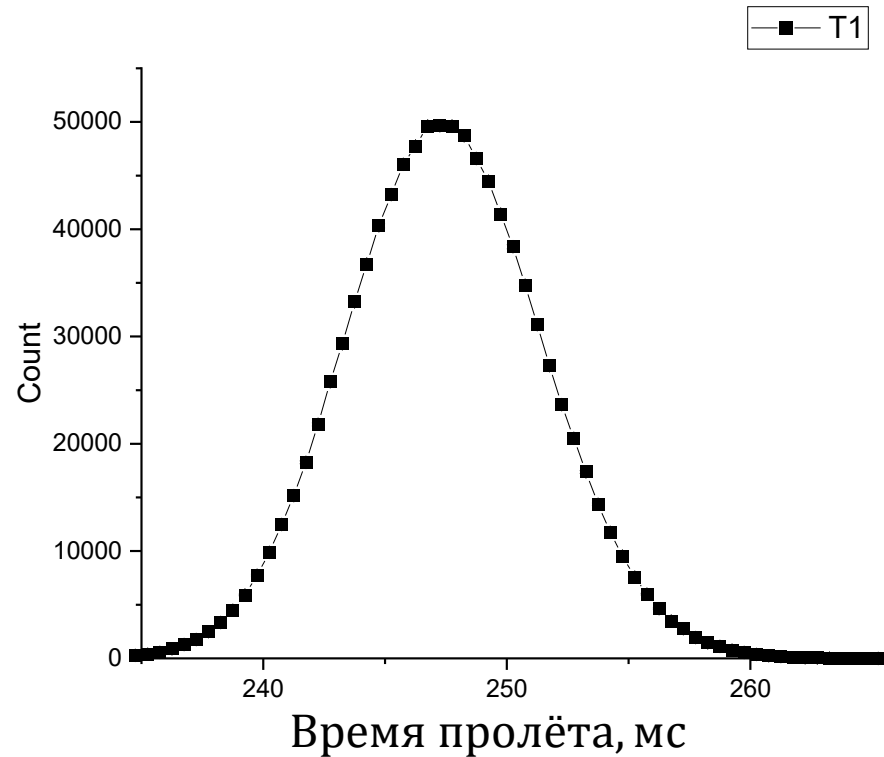


Модель уширения

10



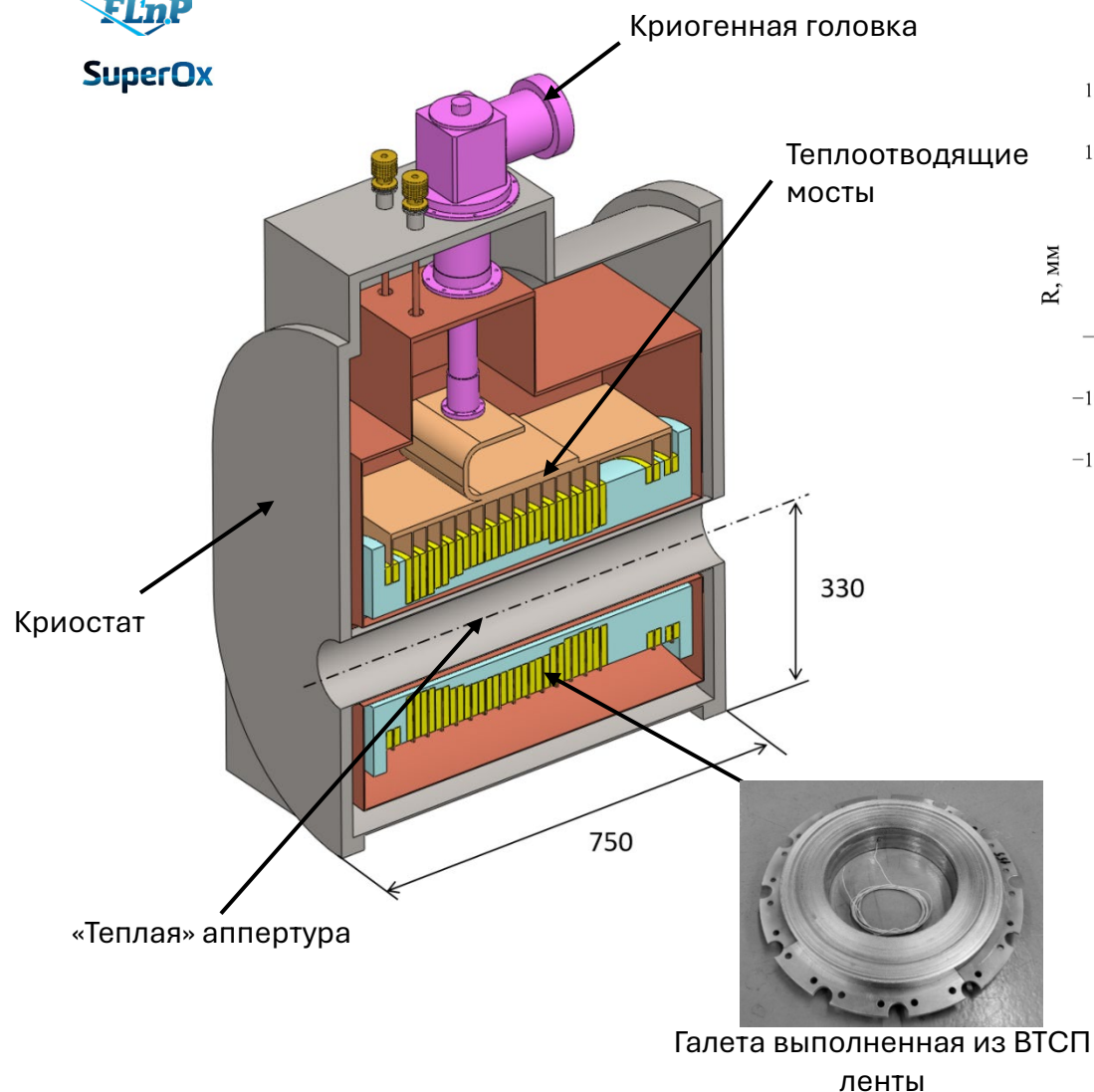
$$STD_{RND} = 1.13 \text{ мс}$$



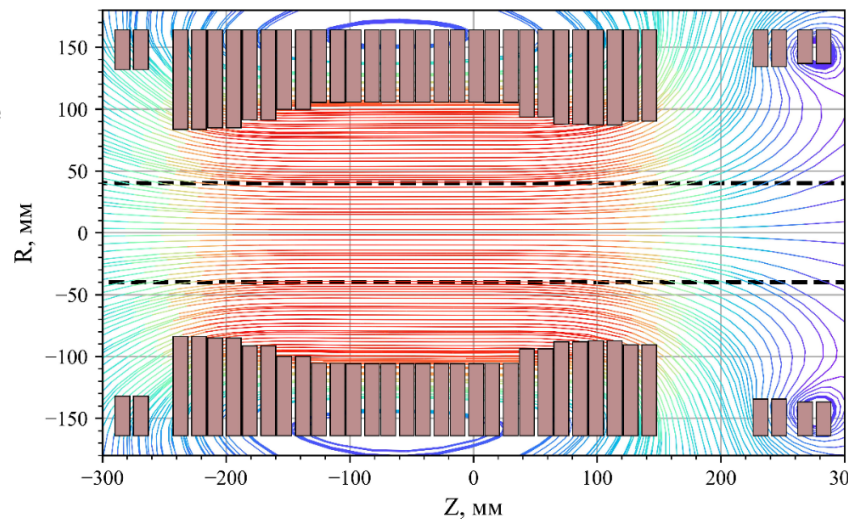
Без уширения (STD_T , ms)	С уширением (STD_{T_1} , ms)	Уширение (ΔSTD , ms)
3.849 ± 0.004	4.013 ± 0.004	1.136 ± 0.006

Время одного набора статистики при предполагаемом среднем потоке после чоппера $\sim 20 \frac{\text{H}}{\text{с}}$ составит:
 $t \sim 15$ часов

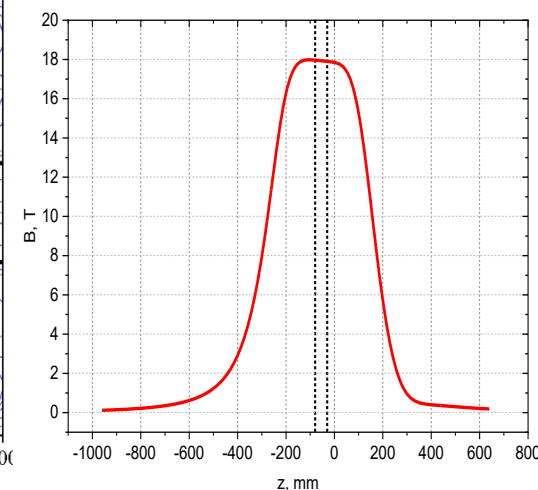
FLnP
SuperOx



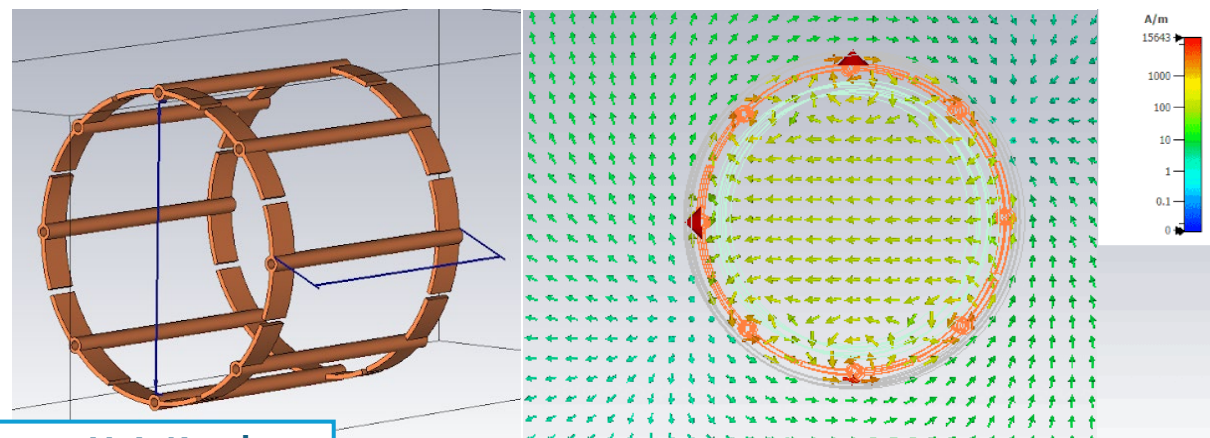
Стационарный градиентный магнит



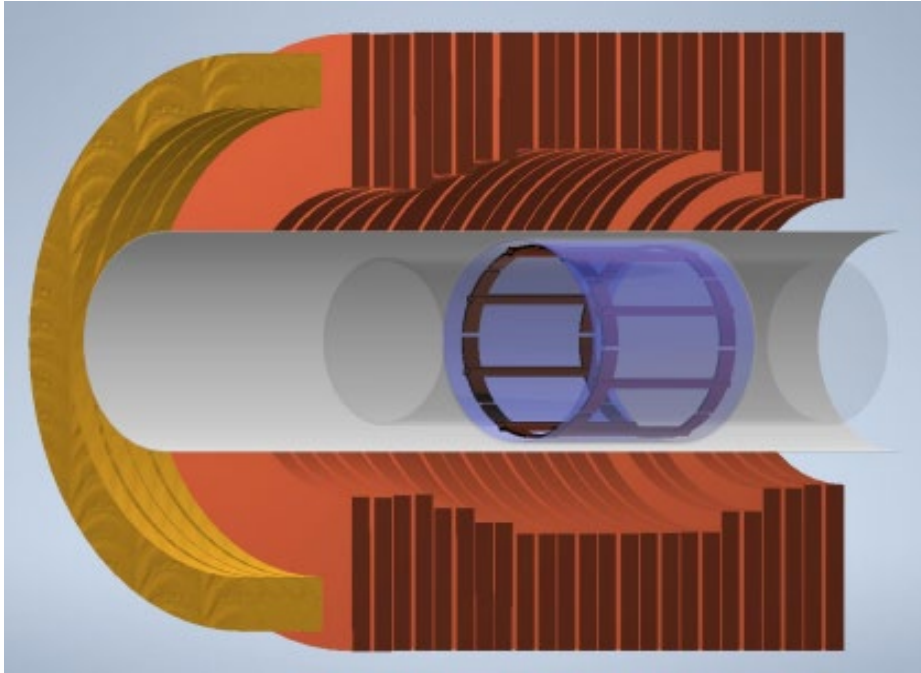
Профиль поля магнита по оси Z



Резонатор типа «Птичья клетка»



Спин-флиппер

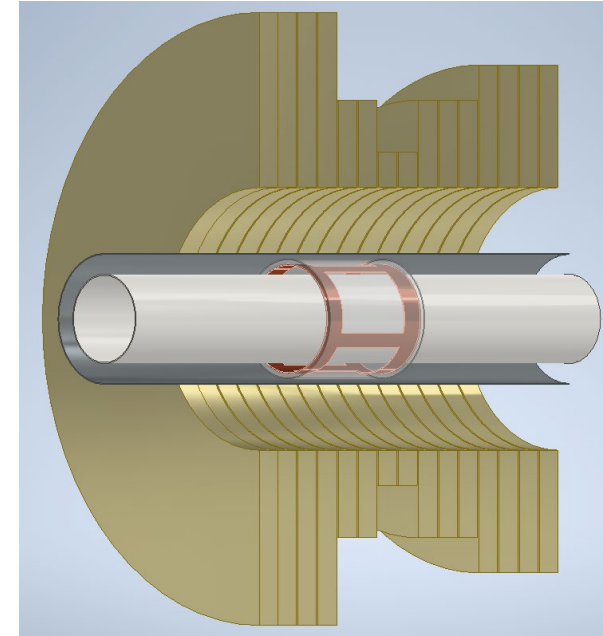


$$B_0 = 20 \text{ T}$$

$$f = 520 \text{ MHz}$$

$$\Delta E = 2400 \text{ neV}$$

Прототип



$$B_0 = 2,5 \text{ T}$$

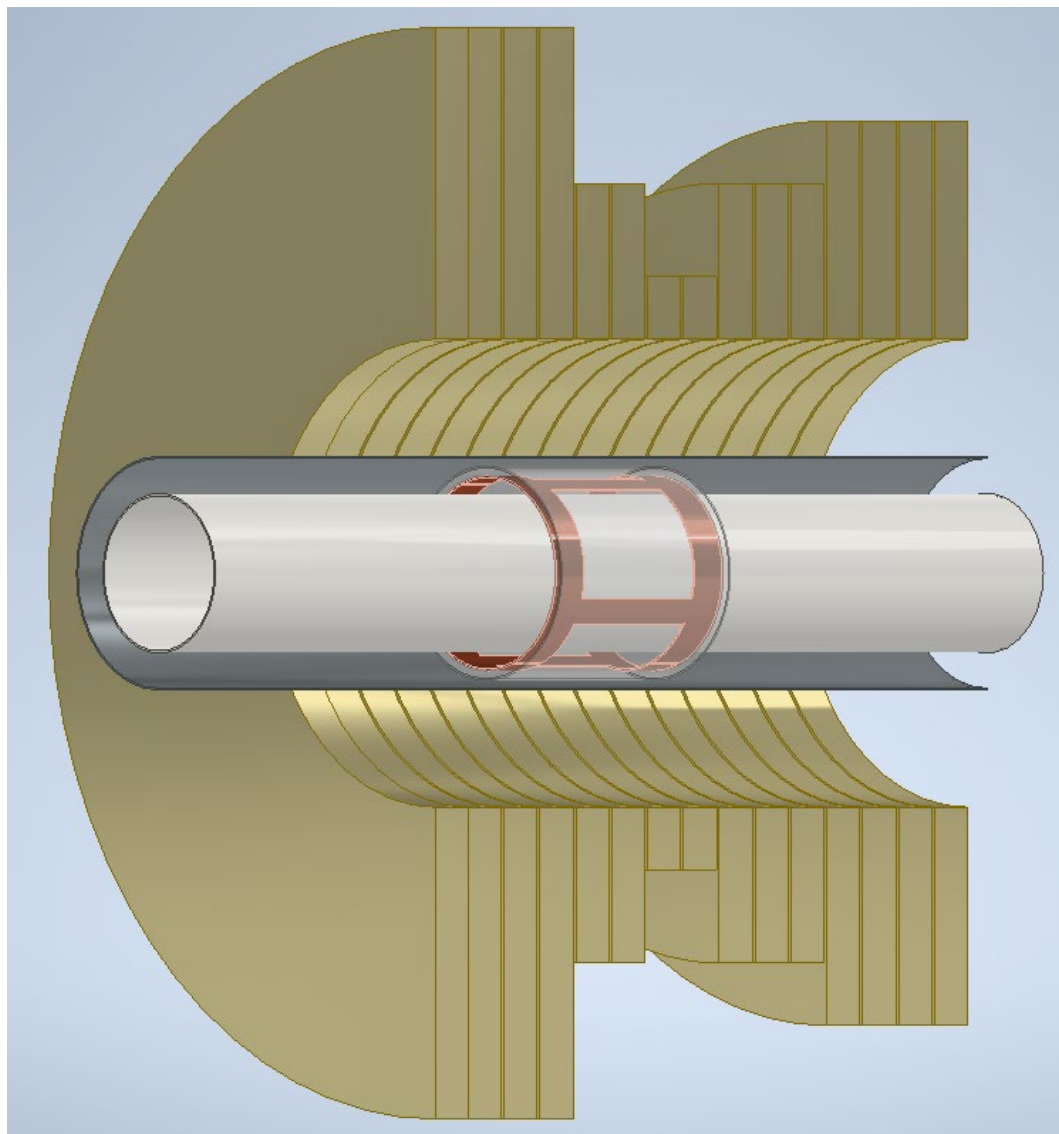
$$f = 70 \text{ MHz}$$

$$\Delta E = 300 \text{ neV}$$

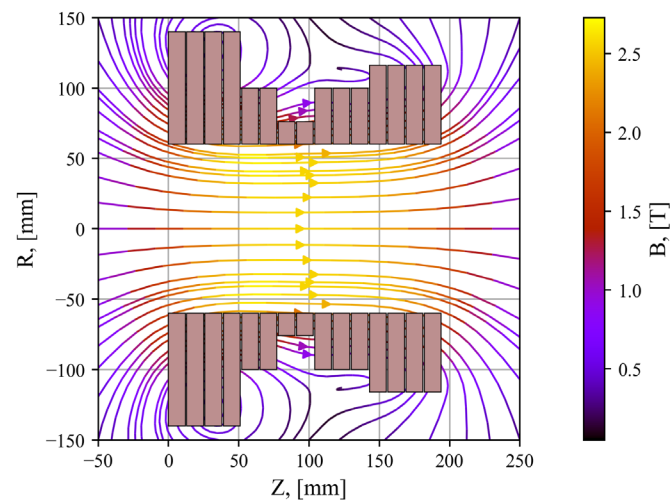
Предлагаемый прототип повторяет основные технические особенности будущего флиппера-замедлителя, но при этом значительно проще и дешевле в изготовлении

Прототип спин-флиппера

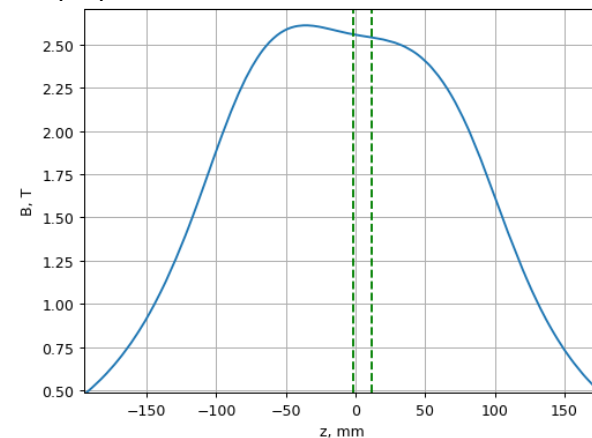
14



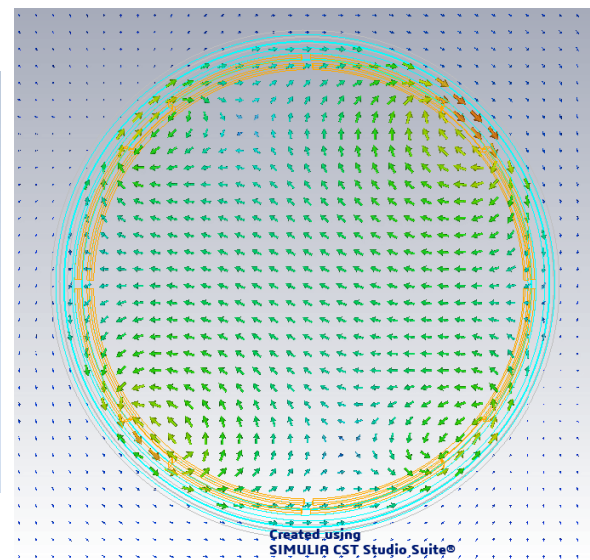
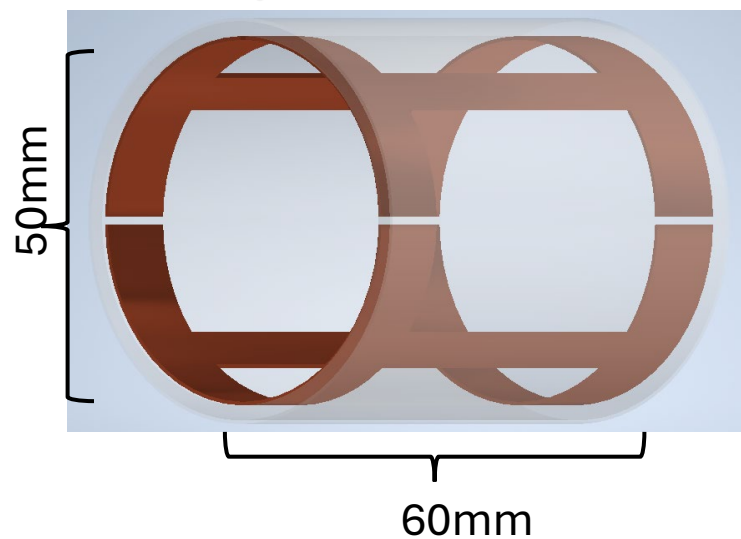
Стационарный градиентный магнит



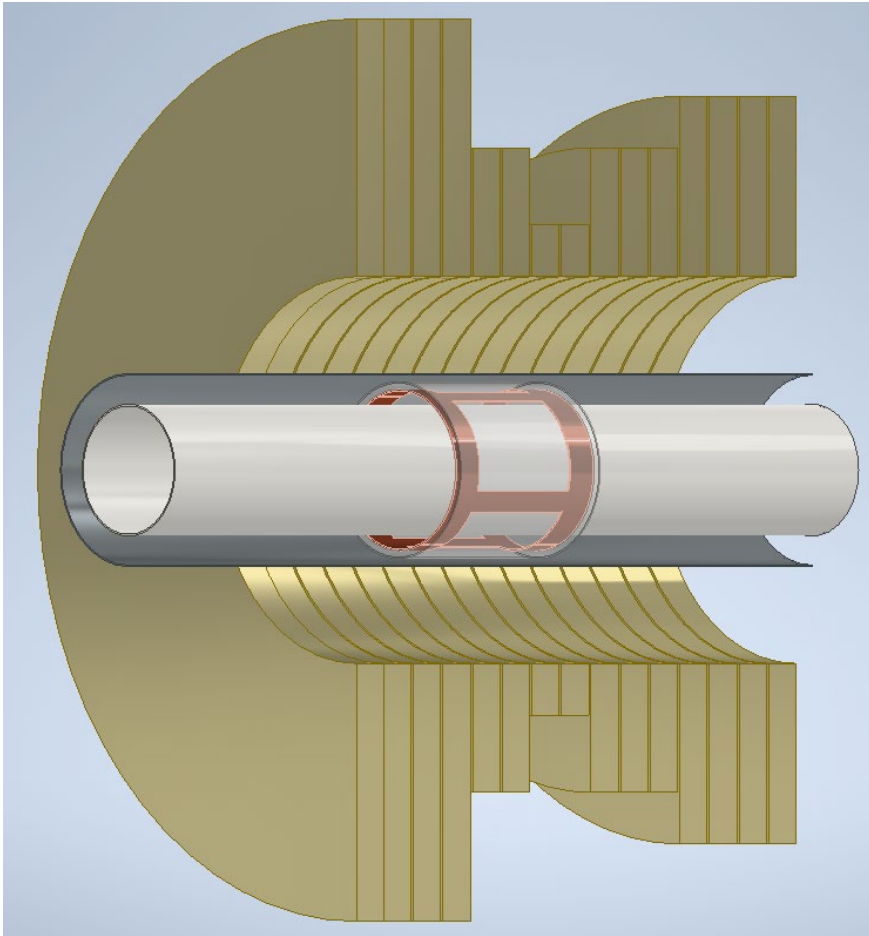
Профиль поля магнита по оси Z



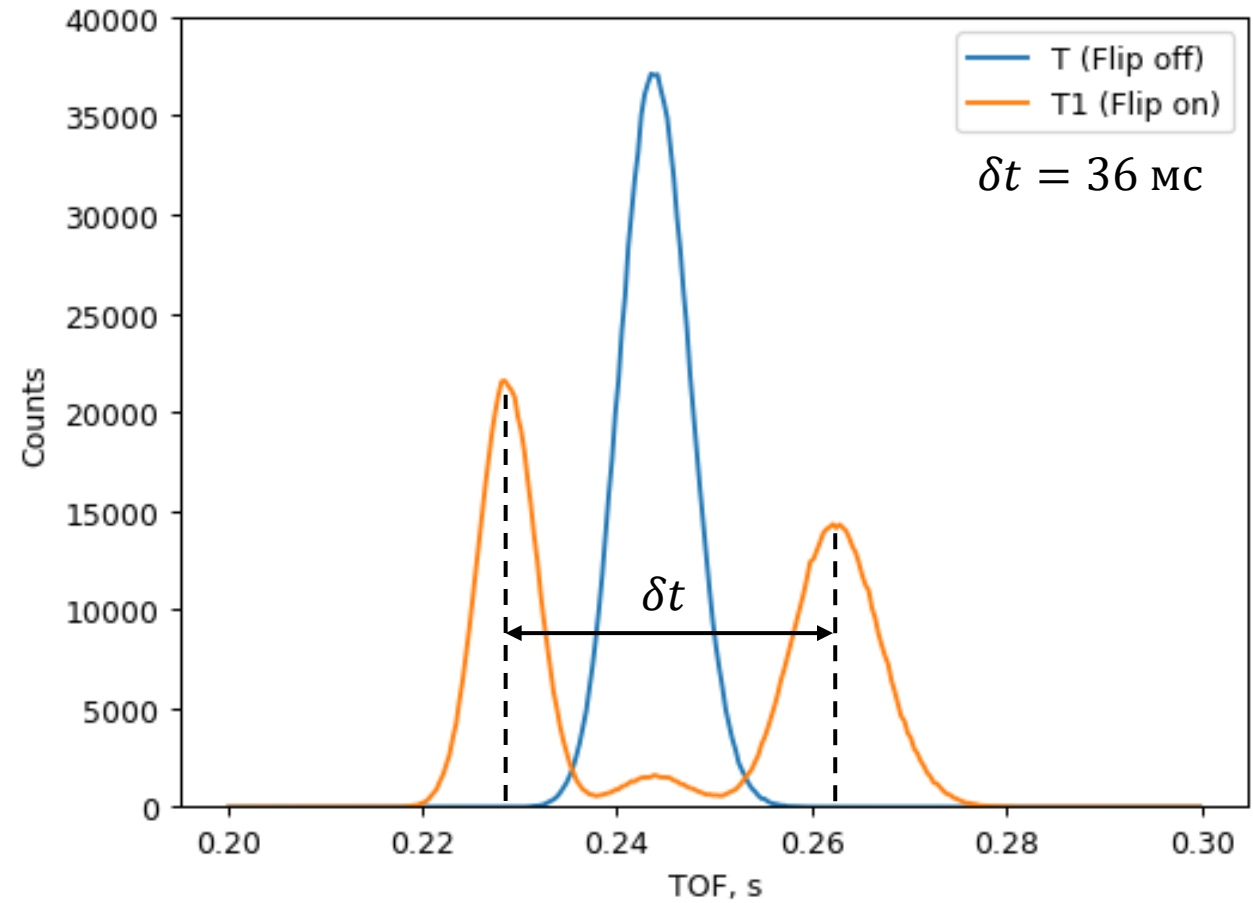
Резонатор



ВЧ поле в поперечном сечении резонатора



Рассчитан спектр времени пролета нейтронов со средней скоростью ~ 20 м/с, прошедших через включенный/выключенный спин-флиппер на пролётной базе длиной 5 метров.



Предложены подходы к решениям для двух основных технических задач проекта источника УХН:

- Для проверки качества нейтроноводов предложен времяпролетный эксперимент с достаточной чувствительностью к уширению временных импульсов.
- Предложен флиппер-прототип для апробации технологии и получения опыта работы с подобными устройствами.

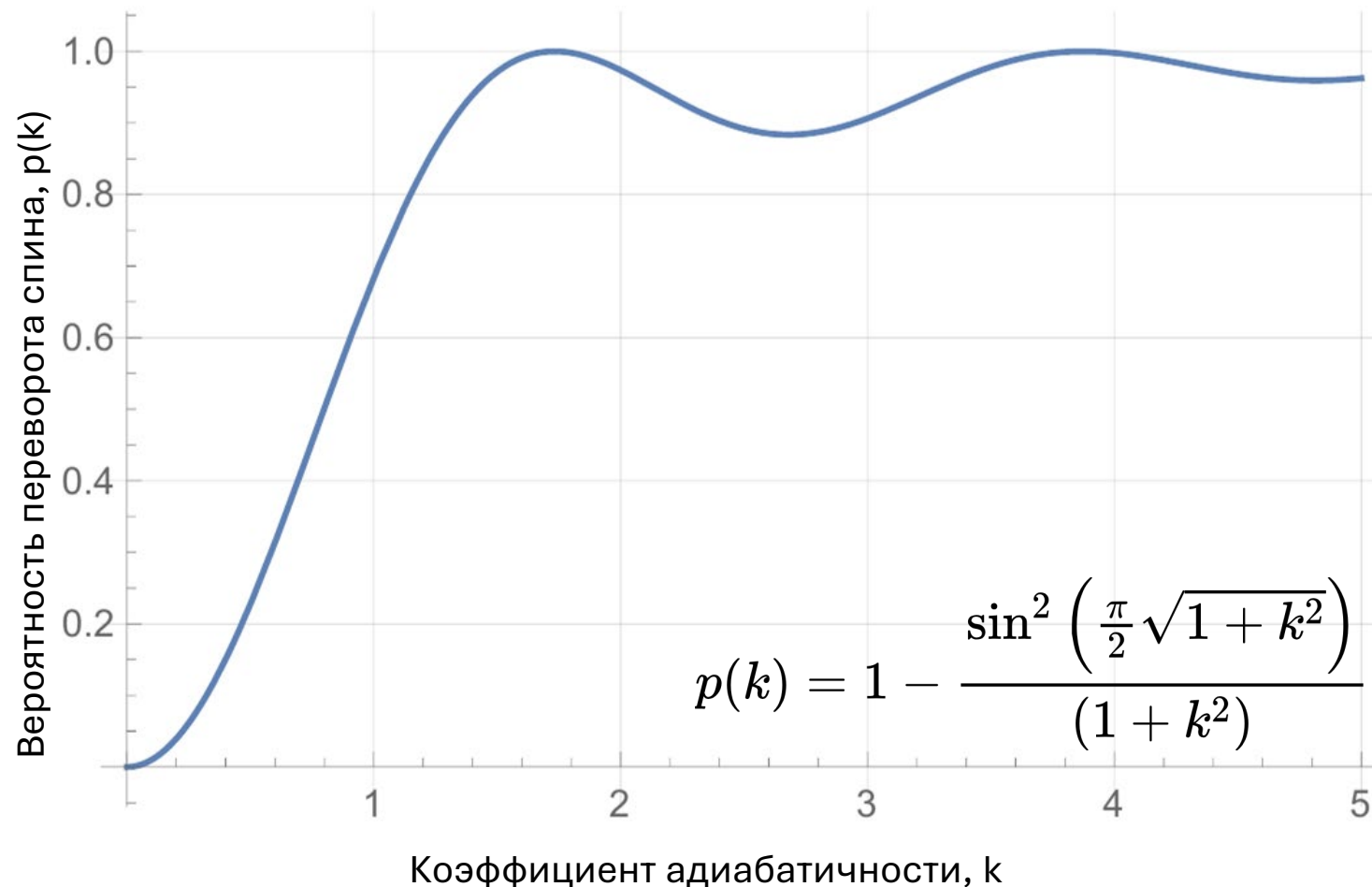
СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Параметр адиабатичности

$$k = \frac{\gamma B_1^2}{(dB/dz)V},$$

где γ - гиромагнитное соотношение ($1.83 \cdot 10^8 [1/(T \cdot s)]$),
 B_1 - амплитуда переменного магнитного поля,
 dB/dz - градиент постоянного поля в области переворота спина,
 V - скорость нейтрона при попадании в поле спин-флиппера (~ 15 [м/с])



Прецессия спина

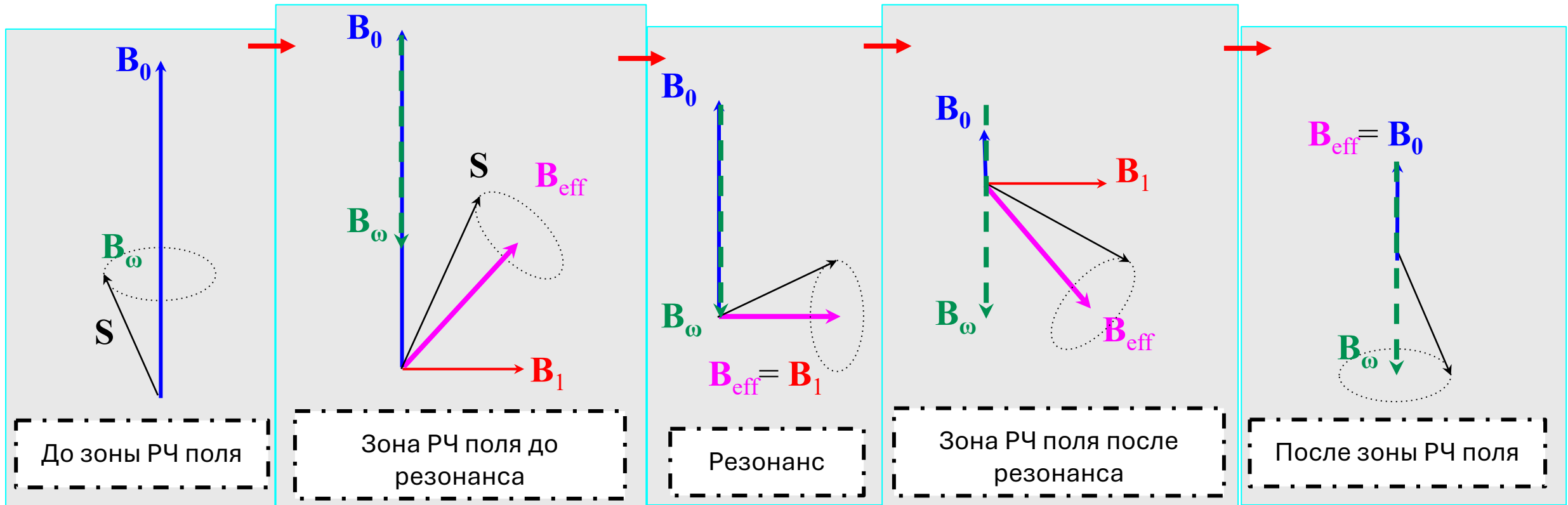
$\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_0^{\text{start}} + z \partial \mathbf{B} / \partial z$ - градиентное
стационарное поле ($\partial \mathbf{B} / \partial z < 0$)

$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_1$ - переменное РЧ поле с постоянной
амплитудой и частотой вращения ω , $\mathbf{B}_1 \perp \mathbf{B}_0$

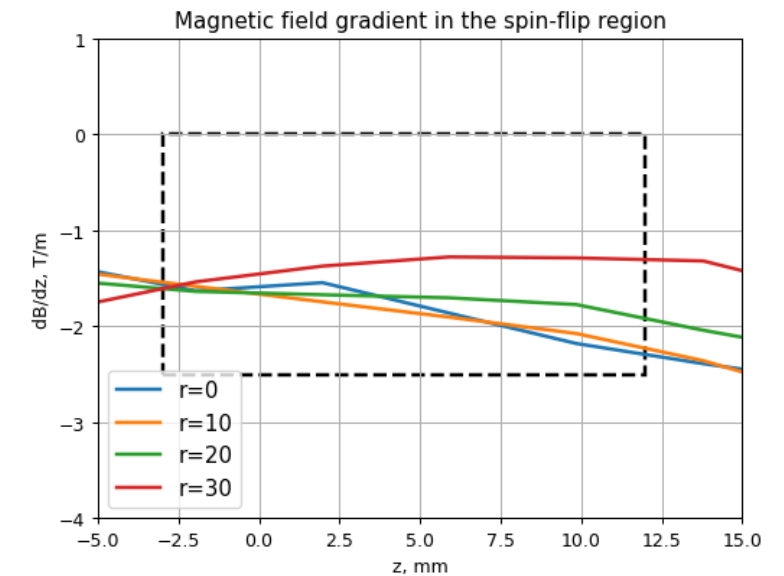
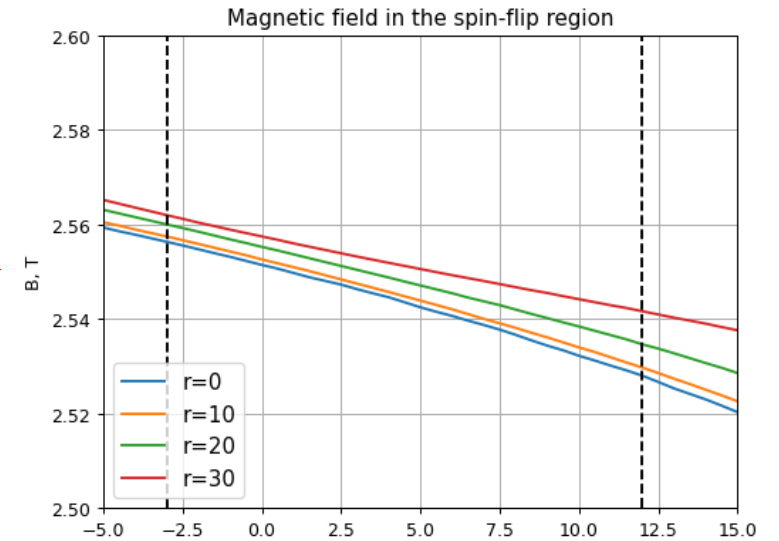
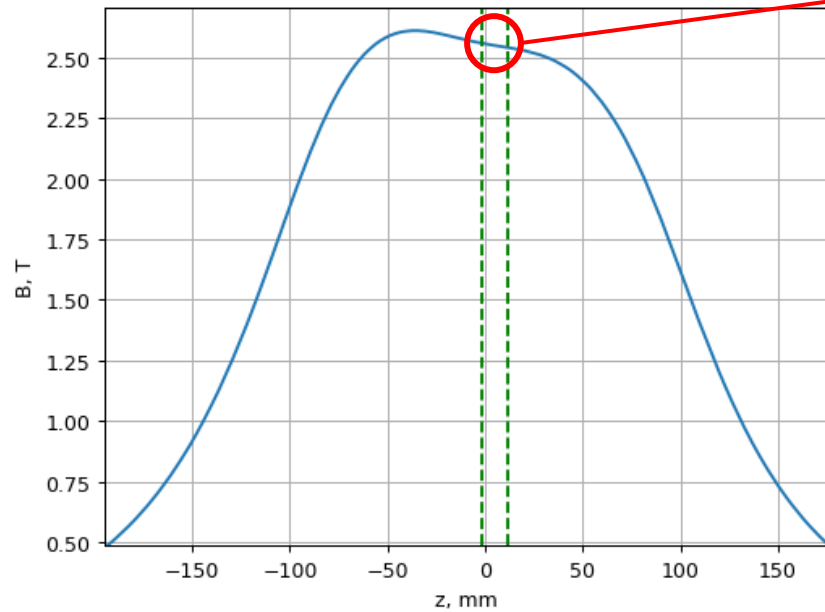
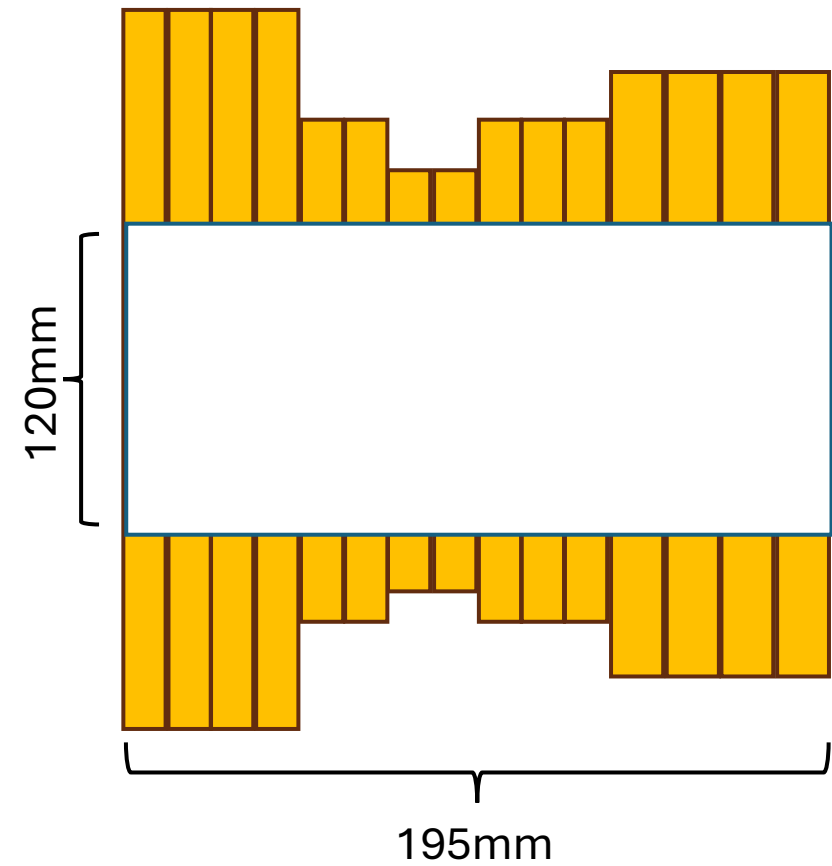
$\mathbf{B}_\omega = -\omega / \gamma$ - фиктивное поле

$\mathbf{B}_{\text{eff}} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_\omega + \mathbf{B}_1$ -
эффективное поле

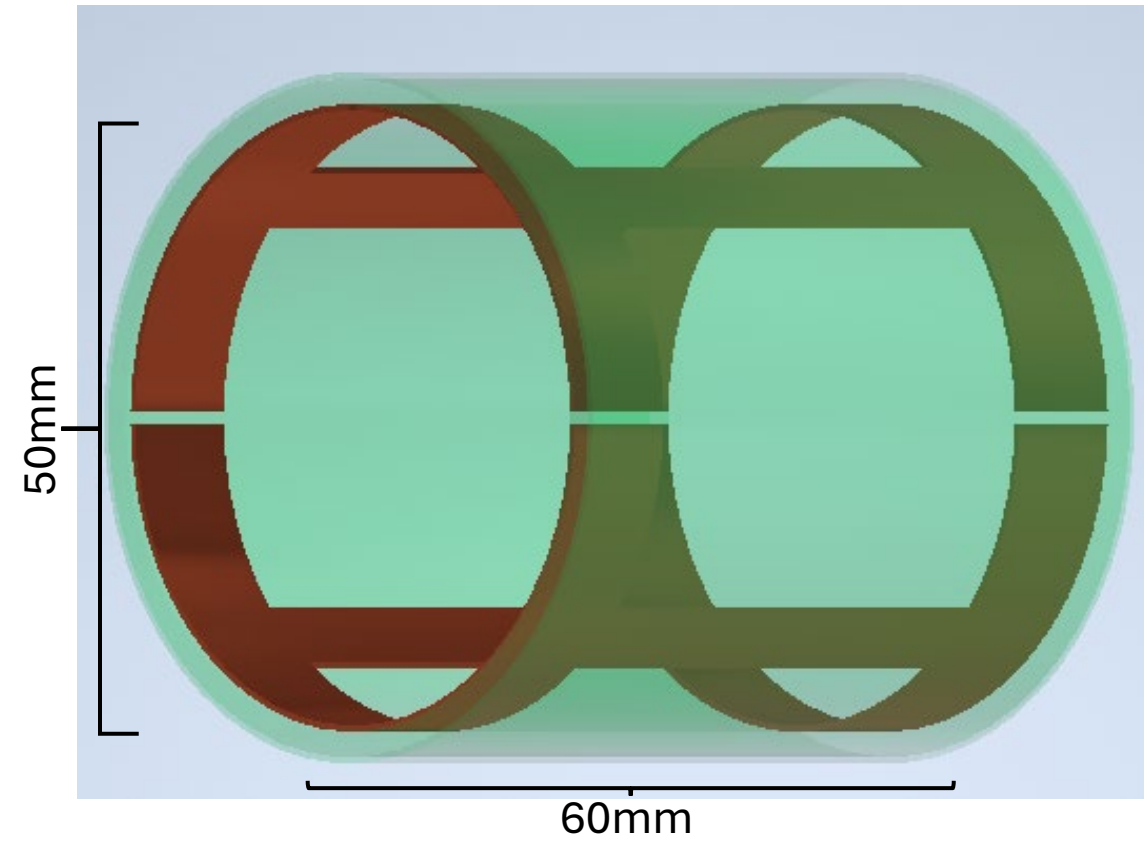
$\mathbf{S}$ - спин



Дизайн прототипа соленооида из ВТСП ленты

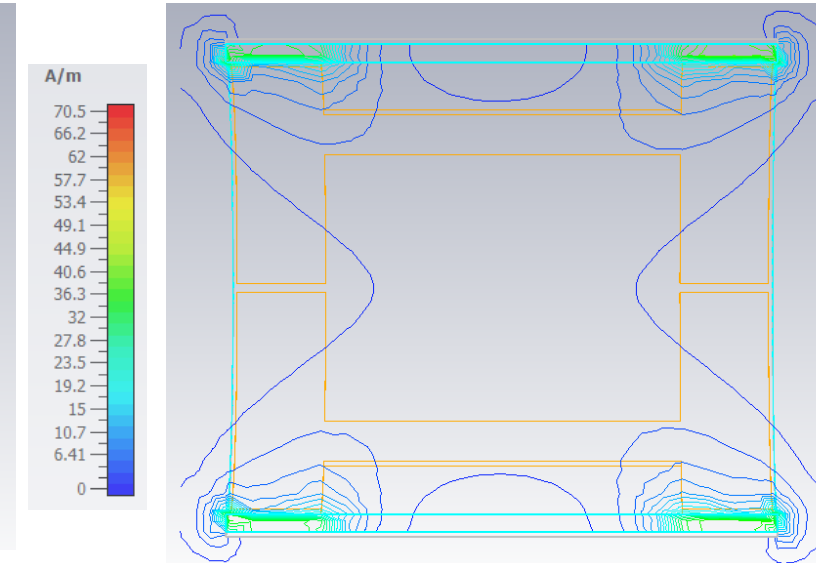
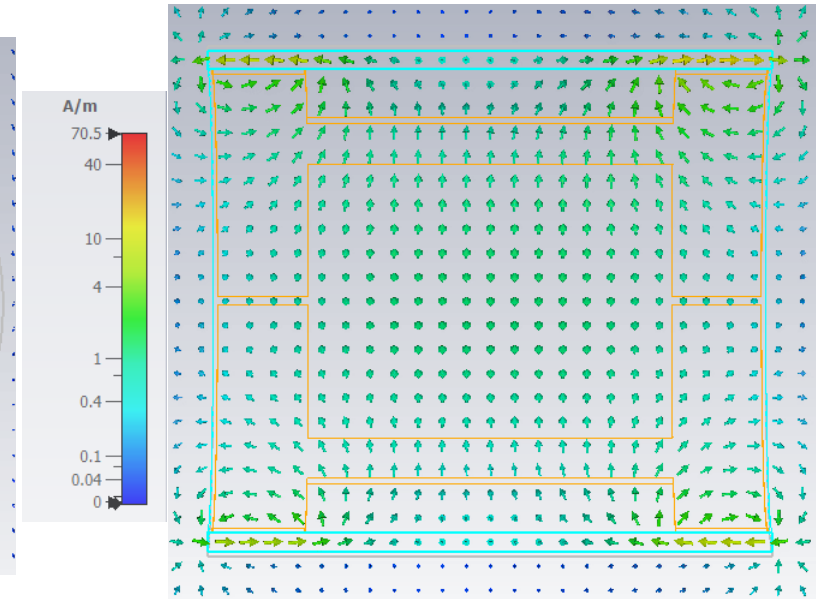
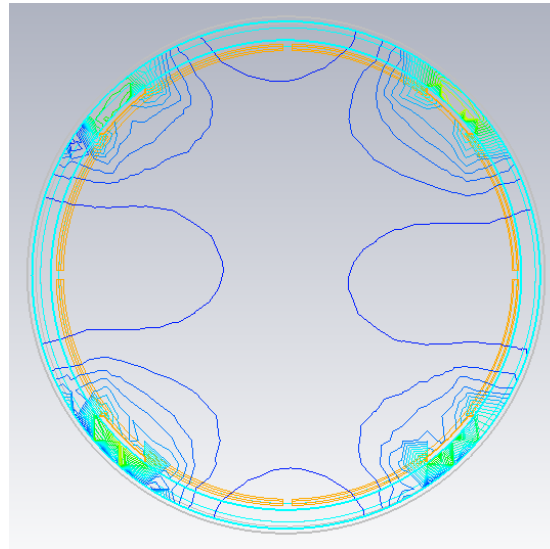
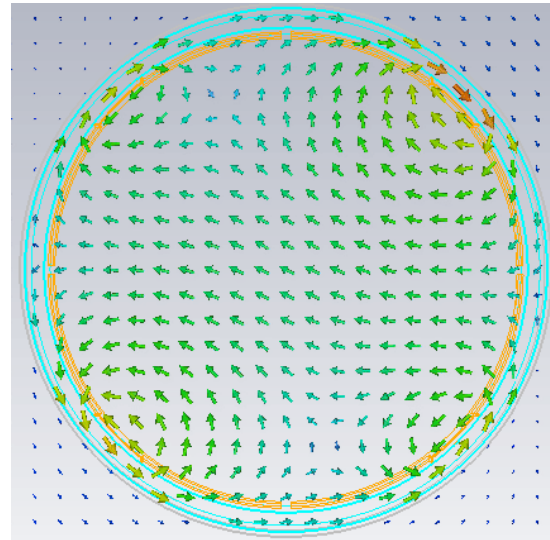


Дизайн прототипа резонатора “птичья клетка”

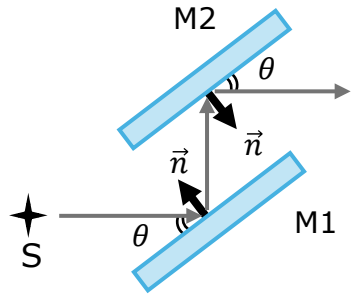


$$B_1 = 0,7mT$$

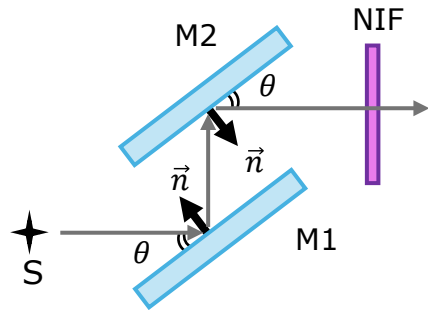
$$Q = 200$$



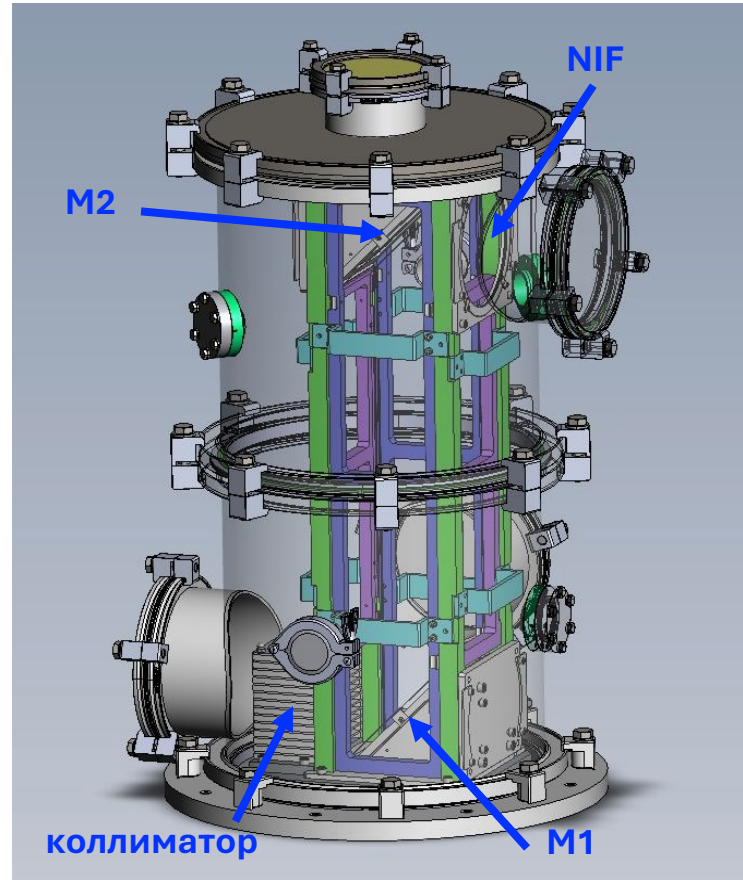
Брэгговский монохроматор с фильтром Фабри-Перо



$$v \approx 20 \text{ m/s}, \Delta v/v \approx 10\%$$

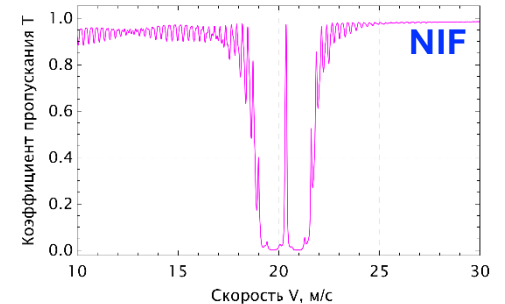
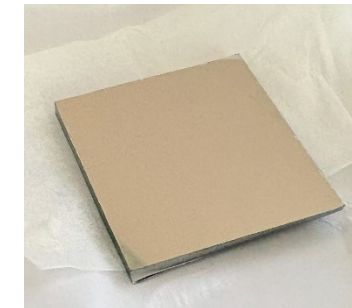
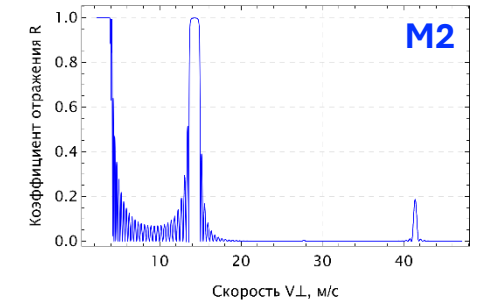
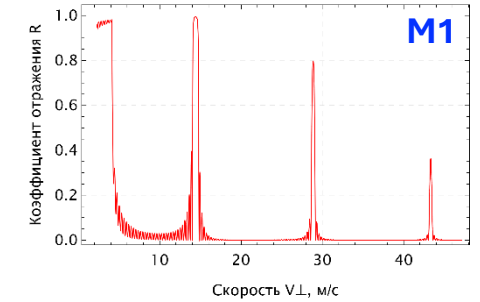


$$v \approx 20 \text{ m/s}, \frac{\Delta v}{v} \approx 2\%$$



Окончательный вариант конструкции монохроматора разрабатывается в ИФМ РАН (Нижний Новгород).

Магистерская работа
Шпилевской В. С.



Подготовлены образцы, выделено время работы на установке BL02: MP (CSNS) (05.06.2026-08.06.2026)

Оптический метод

