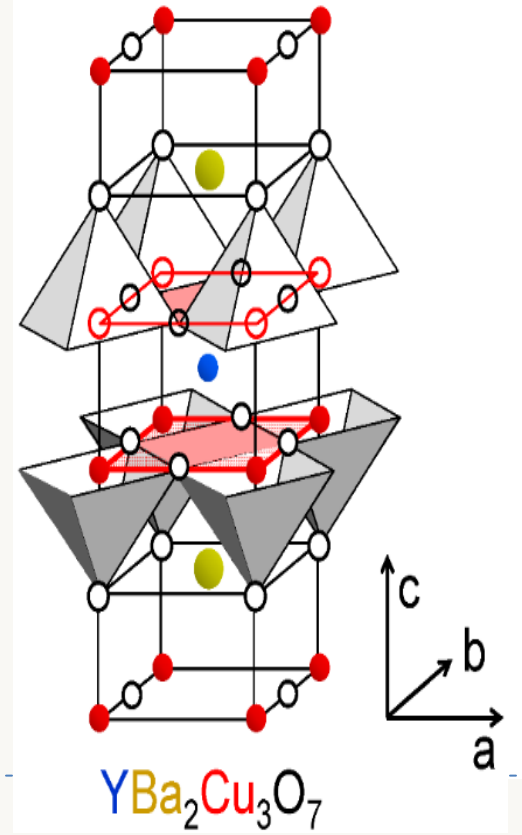
Возможные подходы к созданию ВТСП магнитов Нового Нуклотрона



Новиков М.С.

Семинар «Физика и техника ускорителей, криогеника»

12.02.2026, Дубна, ОИЯИ, ЛФВЭ

для доклада на сессии-конференции СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, 10-13 марта 2026

и публикации в журнале «Ядерная физика»

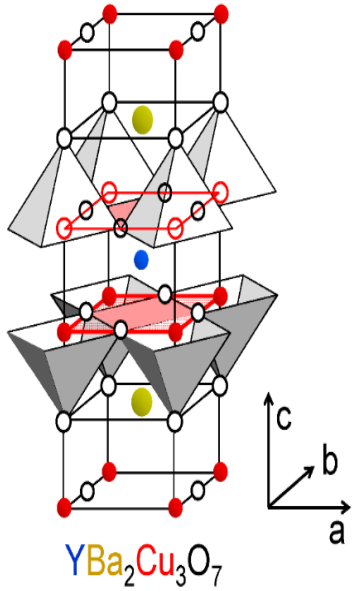
Возможные подходы к созданию ВТСП магнитов Нового Нуклотрона

А. В. Бутенко, П. Н. Дегтяренко, Д. Н. Никифоров, М. С. Новиков,*
Е. М. Сыресин, Г. В. Трубников, Г. Г. Ходжибагиян, А. В. Шемчук
Объединенный институт ядерных исследований
*автор-корреспондент

Аннотация – базовая установка Нуклотрон работает в ЛФВЭ ОИЯИ с 1992 г. В свое время это был первый сверхпроводящий ионный синхротрон в Европе. За более чем 30 лет работы Нуклотрон обеспечил широкий спектр успешных экспериментов в релятивистской ядерной физике. Согласно программе развития ОИЯИ, в рамках продолжения сооружения комплекса NICA, необходима коренная модернизация инжекционного комплекса коллайдера, в том числе создание нового синхротрона-инжектора взамен Нуклотрона. В качестве основного варианта при создании Нового Нуклотрона рассматриваются дипольные и квадрупольные магниты из высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) кабеля с рабочей температурой от 30 до 50 К. ВТСП магниты в системе Нуклотрона нужны как для снижения эксплуатационных расходов, так и для разработки и внедрения перспективных технологий. Возможны различные виды проточного охлаждения магнитов – жидкий неон, газообразный гелий, отдельное охлаждение ярма азотом, целесообразно отдельное охлаждение жидким гелием высоковакуумной камеры пучка. Рассматривается также вариант охлаждения переохлажденным азотом при температуре 65 К – это работа на перспективу. В ОИЯИ разработана конструкция и технология ВТСП трубчатого кабеля (типа «Нуклотрон») и его соединений, технология радиационного пиннинга ионами, модифицируется технология изготовления обмоток и сборки магнитов из ВТСП кабеля. Созданы кабельные машины, станция облучения на циклотронах с перемоткой в вакууме через пучок, модернизирован криогенный токовый испытательный стенд. Изготавливаются ВТСП кабели, в том числе с пропиткой компаундом, и с изоляцией. Получены первые 800 метров ВТСП ленты с увеличенным в два раза критическим током при 1.8 Тл 40 К за счет облучения ионами криптона. Разрабатывается и изготавливается серия экспериментальных магнитов, несколько из них испытаны и показали расчетные параметры. Разрабатываются проекты магнитов Нового Нуклотрона с различными видами охлаждения и конструкциями. Проводится предварительный анализ всех типов магнитных систем, с учетом жизненного цикла Нового Нуклотрона.



Содержание доклада



- Краткий экскурс в историю Нуклотрона, почему Новый Нуклотрон, и зачем ВТСП
- ВТСП лента 2-го поколения – конструкция и технология (С-Инновации)
- ВТСП кабель Нуклотронного типа и наши кабельные машины
- Радиационный пиннинг ВТСП – эксперименты и технология
- Станции облучения, ВТСП магниты Нуклотрона, спаи, импрегнирование кабеля,
- Возможные конструкции ВТСП диполей и квадруполей и их параметры
- Преимущества и недостатки магнитных систем различных конструкций
- Необходимые исследования – планы НИОКР
- Планы по разработке, изготовлению и испытаниям экспериментальных магнитов
- Выводы

Нуклотрон и Бустер NICA

Нуклотрон запущен в 1993 г. – необходимо обновление

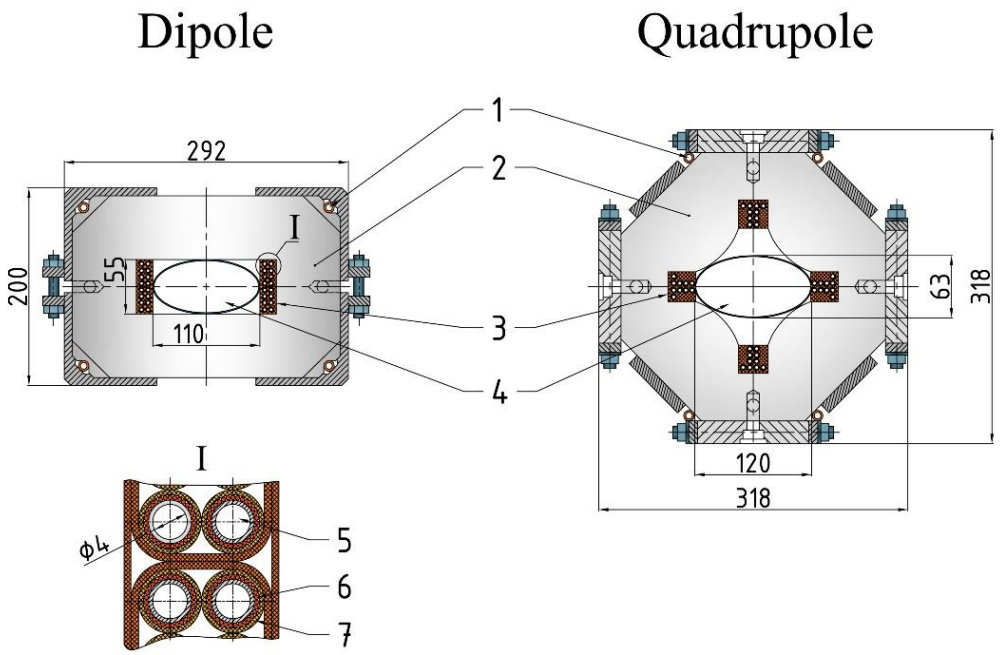




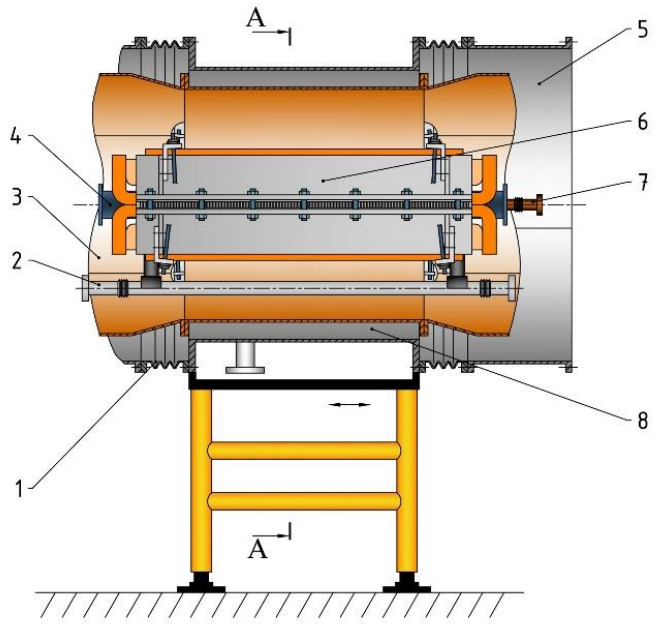
Бустер NICA запущен в 2020 г.

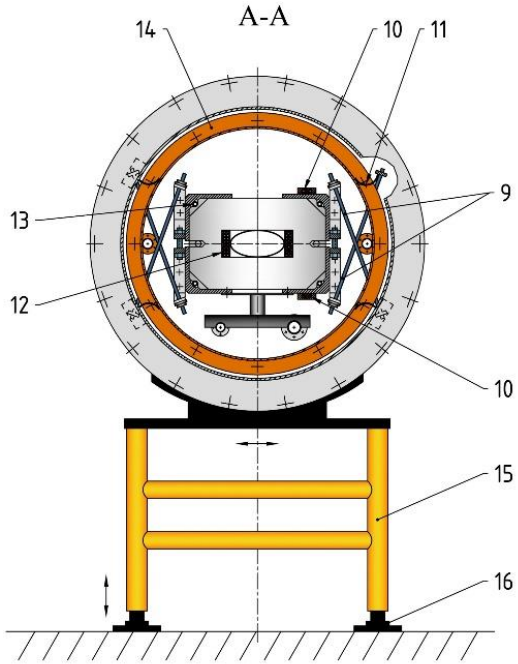
Первый в мире сверхпроводящий (СП) ионный синхротрон Нуклотрон, предназначенный для изучения релятивистской ядерной физики, был запущен в Дубне в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ЛФВЭ ОИЯИ) в1993 г. Магнитная система Нуклотрона периметром 251,6 м изготовлена из магнитов с полем, формируемом холодным (4,6 К) железным ярмом и обмоткой из трубчатого сверхпроводника. Система насчитывает 96 дипольных магнитов длиной около 1,4 м, 64 квадрупольных магнита длиной 0,45м и 28 корректирующих магнитов длиной 0,3 м, охлаждаемых принудительным потоком кипящего гелия.

Магнит типа Нуклотрон



1 – трубка охлаждения железного сердечника; 2 – сердечник магнита; 3 – СП обмотка; 4 – вакуумная камера; 5 – трубка с гелием; 6 – СП-провод; 7 – изоляция.





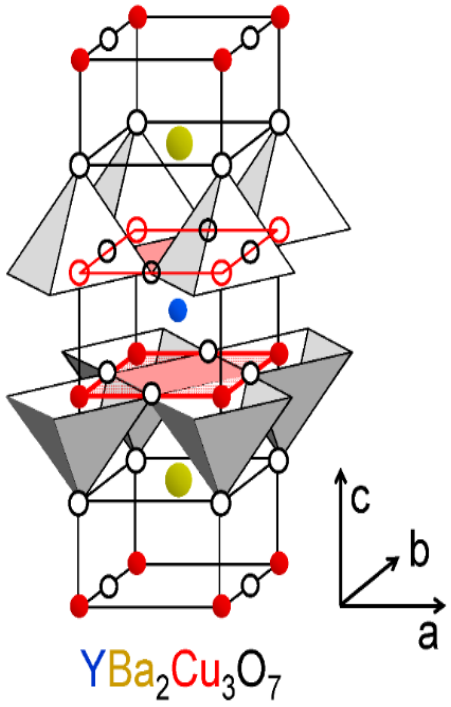
Модуль СП магнитной системы Нуклотрона (изображение схематическое).

1 – гибкий элемент; 2 – участок гелиевого коллектора; 3 – разборная частьазотного экрана; 4 – вакуумная камера; 5 – разъемная муфта; 6 – магнит; 7 – трубопровод с жидким азотом; 8 – вакуумный кожух; 9 – тяги; 10 – кабели связи магнитов; 11 – тепловой мост; 12 – обмотка магнита; 13 – трубка охлаждения железного ярма; 14 – азотный экран; 15 – подставка; 16 – регулировка подставки.

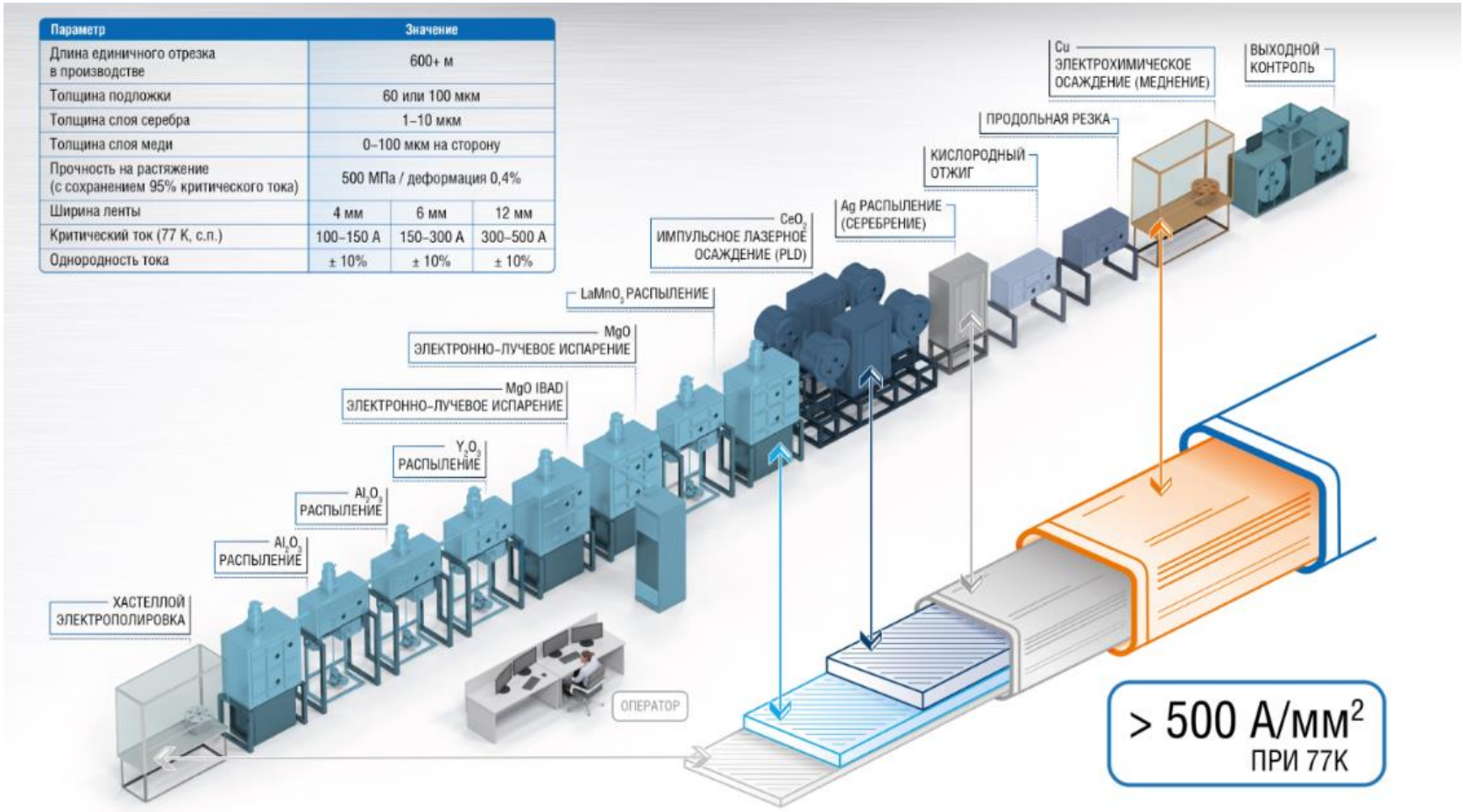
За 30 лет эксплуатации магнитная система Нуклотрона испытала около 60 циклов охлаждения/отогрева от температуры окружающей среды до 4,6 К, несколько десятков миллионов циклов возбуждения током до 6 кА и в ближайшие годы потребуется замена (скорее, потребуется сделать Новый Нуклотрон без демонтажа старого), чтобы обеспечить на длительный период бесперебойную работу в составе комплекса NICA.

Используемая ВТСП лента

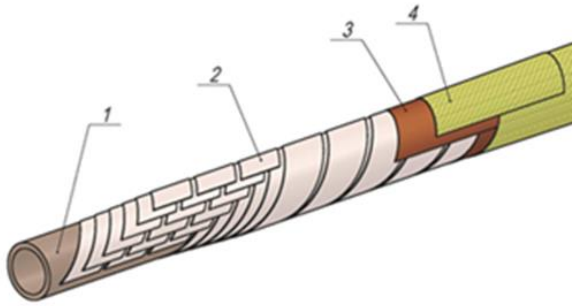
- **Высокополевая от С-Инновации (Суперокс)**
- **Альтернативы?**

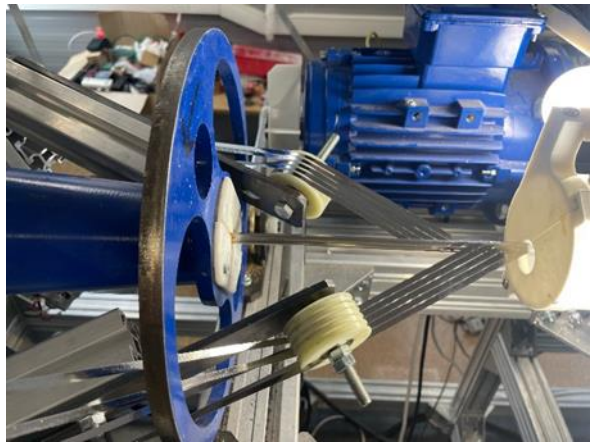


Параметр	Значение		
Длина единичного отрезка в производстве	600+ м		
Толщина подложки	60 или 100 мкм		
Толщина слоя серебра	1–10 мкм		
Толщина слоя меди	0–100 мкм на сторону		
Прочность на растяжение (с сохранением 95% критического тока)	500 МПа / деформация 0,4%		
Ширина ленты	4 мм	6 мм	12 мм
Критический ток (77 K, с.п.)	100–150 А	150–300 А	300–500 А
Однородность тока	± 10%	± 10%	± 10%



ВТСП кабель







- ВТСП Нуклотронный кабель
- Экспериментальная кабельная машина
- Высокая гибкость
- Импрегнированный кабель горячего отверждения
- Низкорезистивные терминалы и спаи
- Серийная кабельная машина с намоткой соленоидов



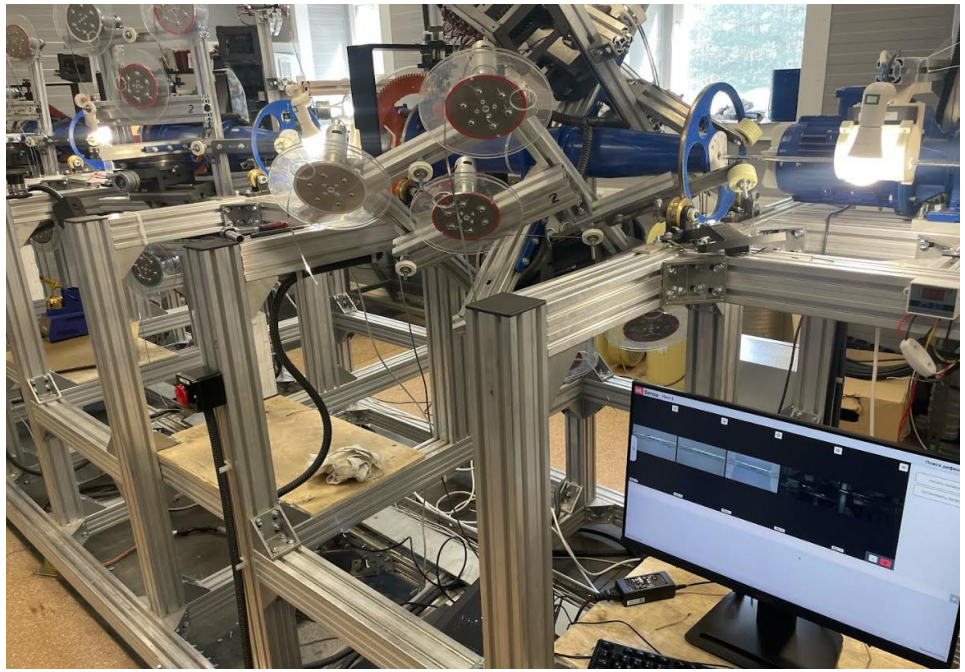
«Серийная» кабельная машина





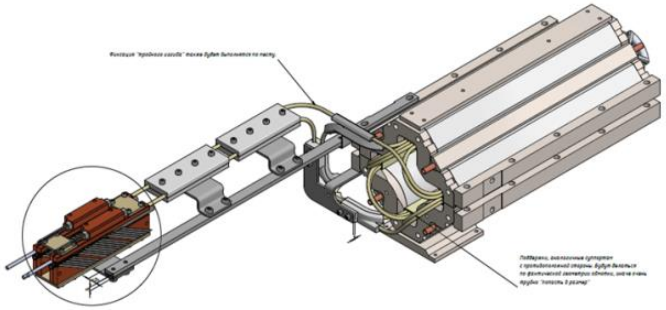


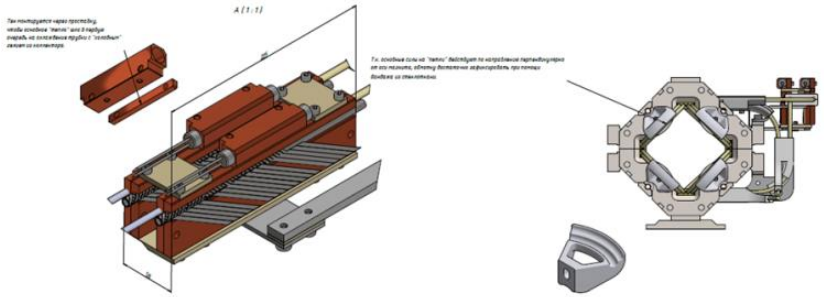




5 узлов для ВТСП лент
+ узел препрега и каптона, + намотка бандажа
+ намотка соленоидов прямо с потока кабеля
+ импрегнирование с электрическим нагревом кабеля
+ машинное зрение для распознавания дефектов

Первые ВТСП магниты

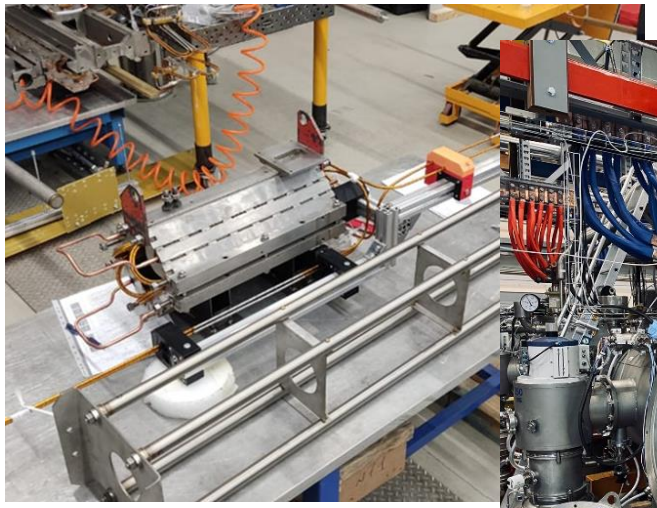


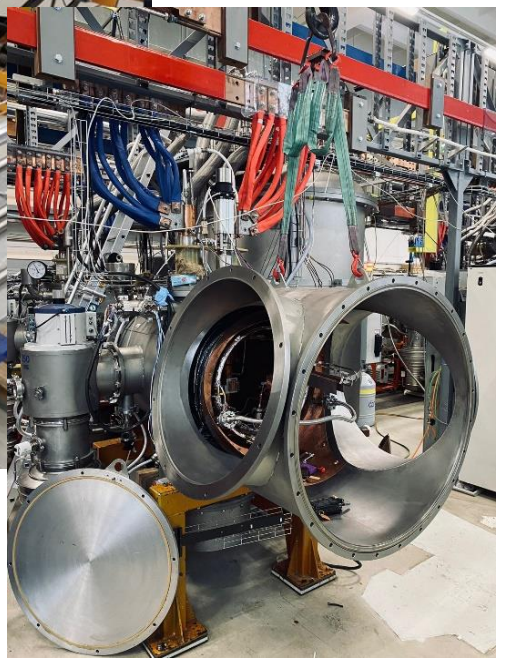


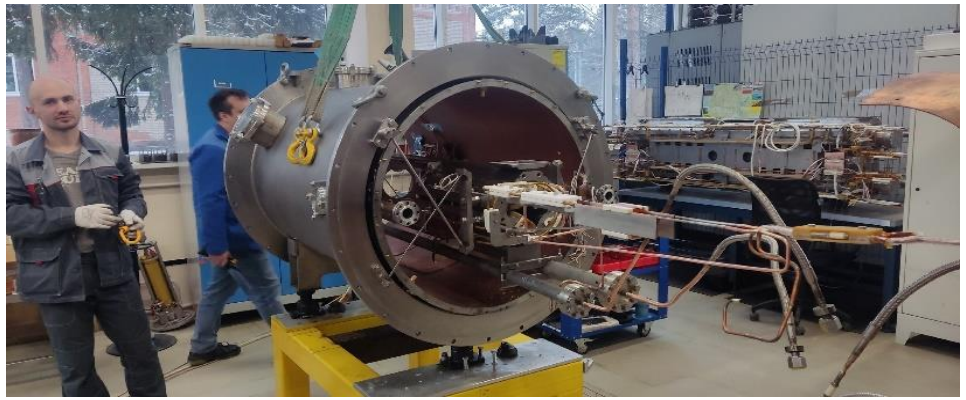


- Квадруполи с ВТСП кабелем из 18 лент, 10 кА 1.8 Тл пока 30 К
- Стенд для ВТСП до 15 кА до 40 кА/с

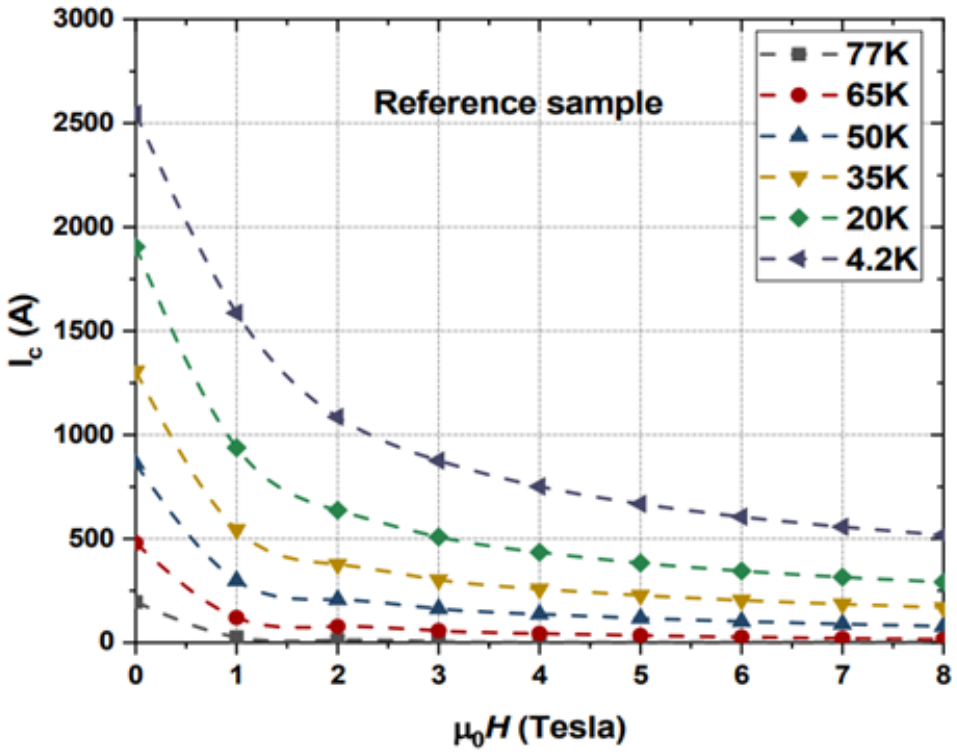
  5-70 К, GHe
- Методика проверки ВТСП ленты при перемотке
- Сотрудничество по расчетам и экспериментальным исследованиям

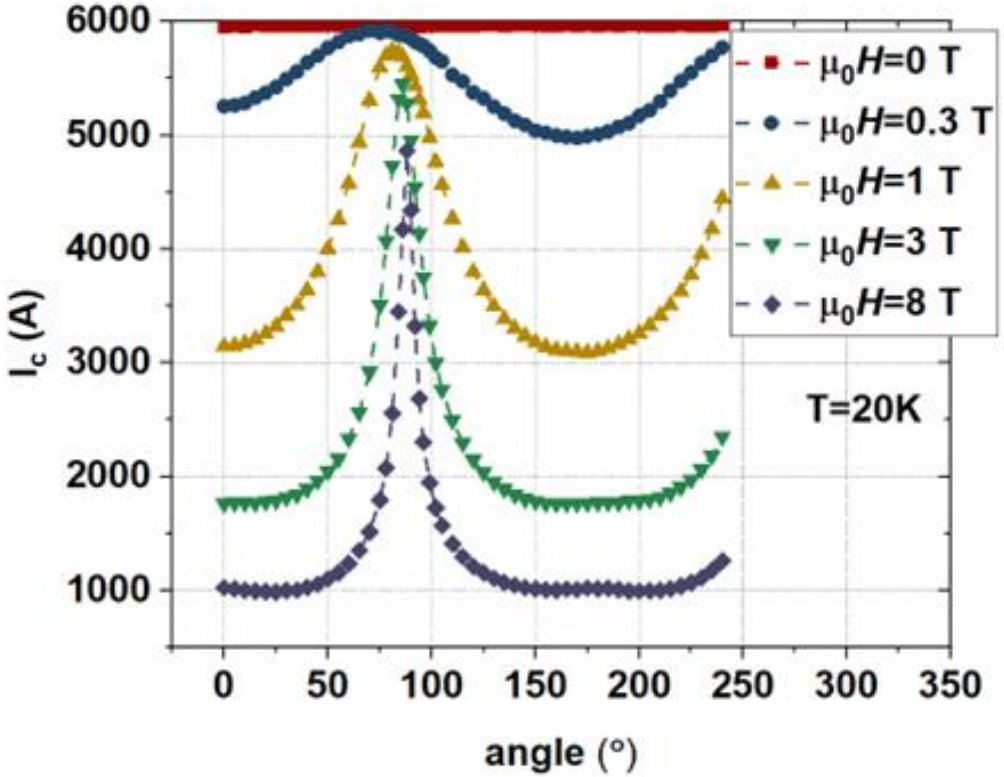




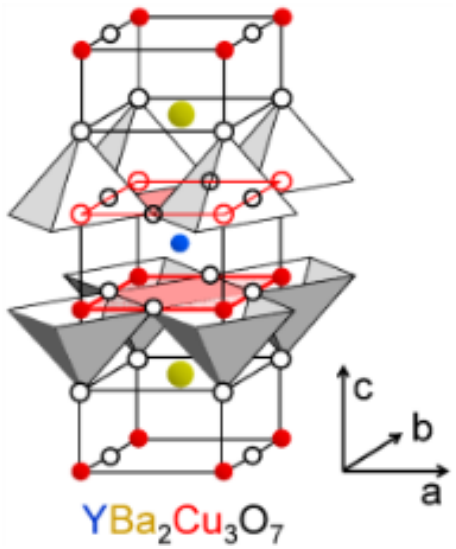


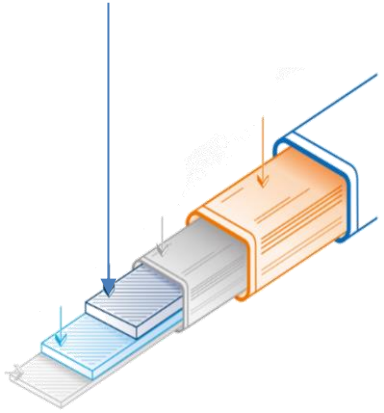
Зависимость от поля и температуры, анизотропия к полю

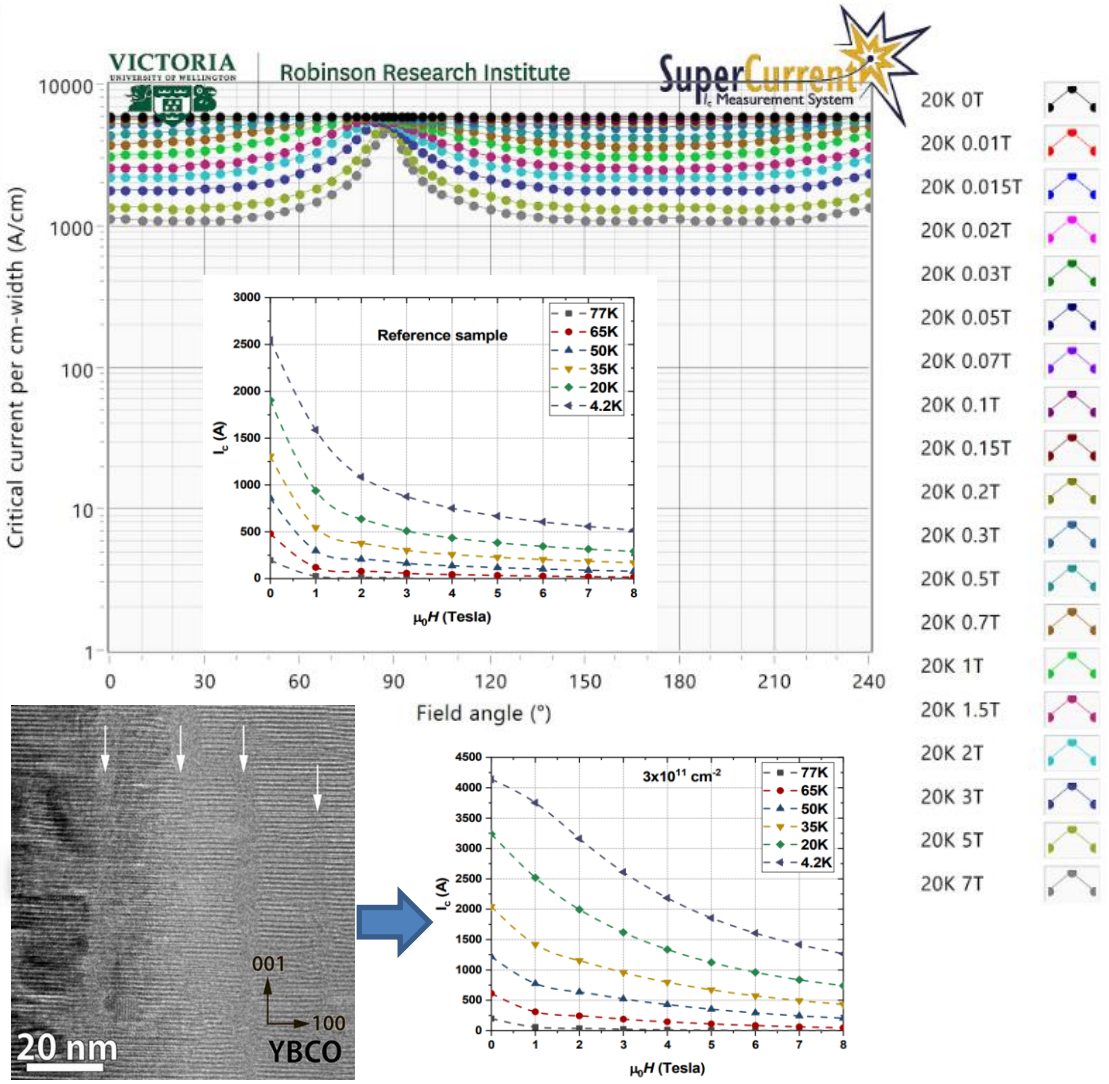




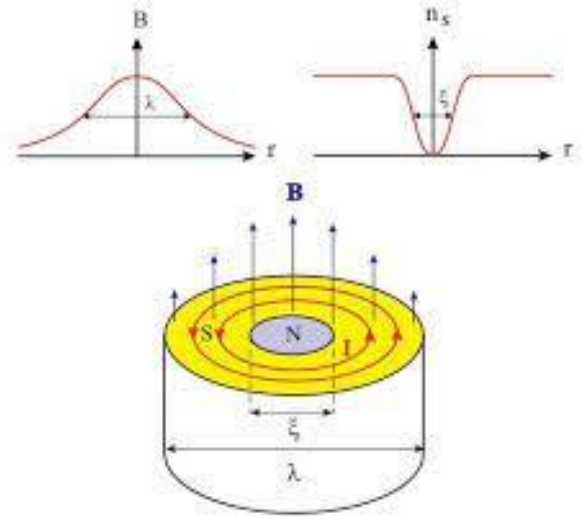
Что такое пиннинг и зачем он в сверхпроводящем проводе



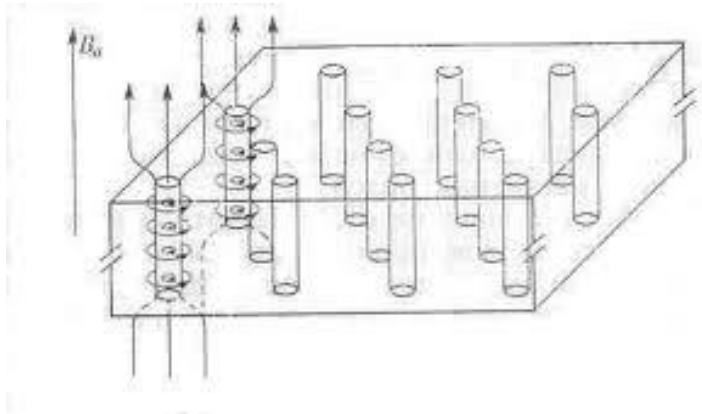




Критический ток ВТСП лент в поле сильно снижается с температурой, и сильно анизотропен по отношению к углу ленты к магнитному полю



Дополнительные центры пиннинга повышают критток в поле при T=const и выравнивают угловую зависимость



Радиационные дефекты от заряженных частиц – лучшие дополнительные центры пиннинга

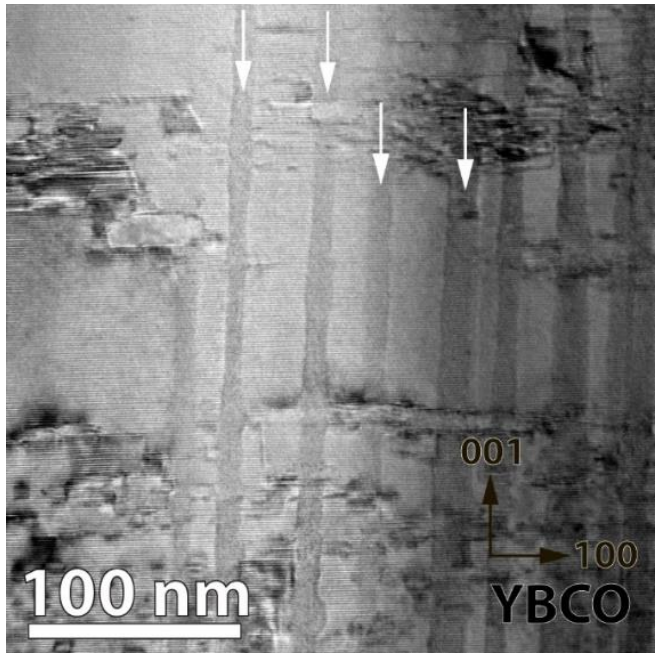
Радиационный пиннинг ВТСП

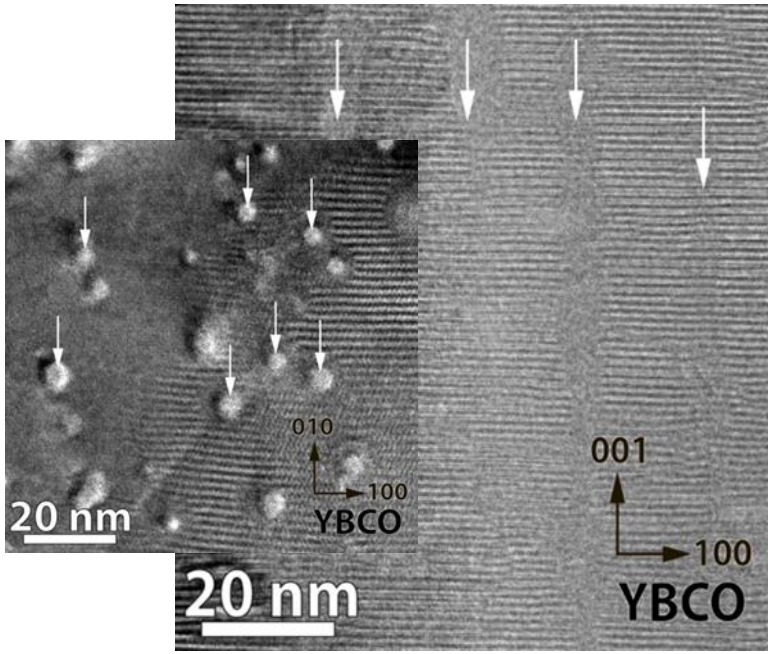
- **Наилучший результат в нашем главном целевом диапазоне - около 2 Тл 50 К – на ионах циклотрона (Xe 167 МэВ) – критток ВТСП ленты увеличивается до x3.5 раз**

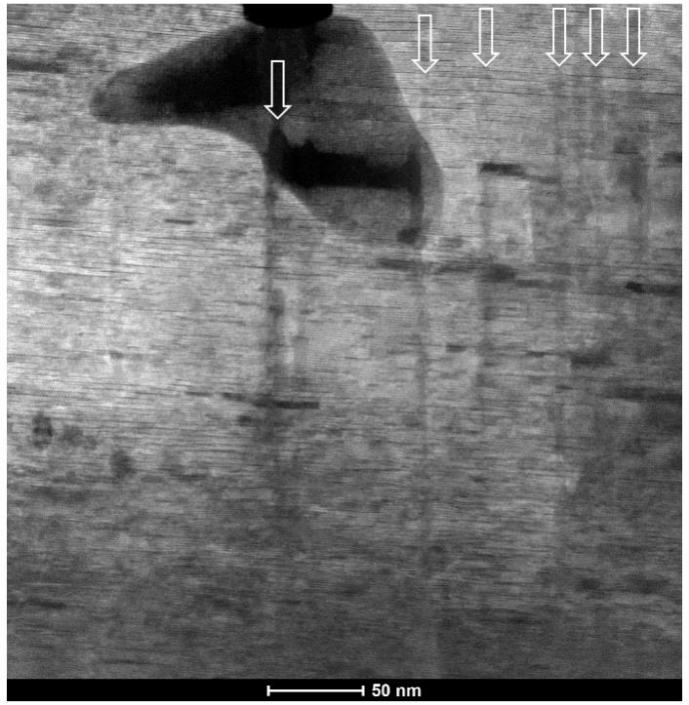
Таблица 1. Параметры исходного и облученных различным флюенсом образцов.

Флюенс, $см^{-2}$	Ic, A (4мм, H=0, 77K)	Ic, A (4мм, H=2T, 50K)	Ic, A (4мм, H=8T, 20K)	Tc, K	XRD RD FWHM, град. (полуширина кривой качания (005)YBCO вдоль ленты)	XRD TD FWHM, град. (полуширина кривой качания (005)YBCO поперек ленты)	XRD Phi (103)YBCO scan средний FWHM, град.
0	195	207	291	88	1.129	1.350	2.86
$3 \cdot 10^{10}$	195	257	336	88	1.144	1.887	3.39
$8 \cdot 10^{10}$	233	368	400	87.8	1.163	2.33	3.81
$1 \cdot 10^{11}$	274	455	496	87.7	1.175	2.413	4.53
$2 \cdot 10^{11}$	270	735	734	87.4	1.227	5.346	5.03
$3 \cdot 10^{11}$	198.5	635	725	87	1.179	3.079	4.39
$5 \cdot 10^{11}$	171	644	921	86.5	1.192	4.359	5.29
$1 \cdot 10^{12}$	63	397	906	84.5	1.268	5.294	5.89

Треки циклотронных ионов в ВТСП слое



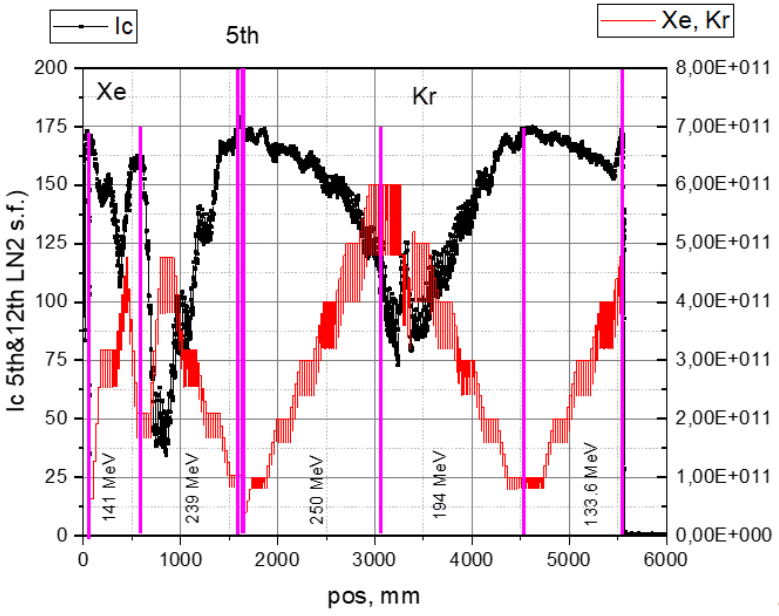




- **Bi 660 MeV** **Xe 167 MeV** **Kr 250 MeV**

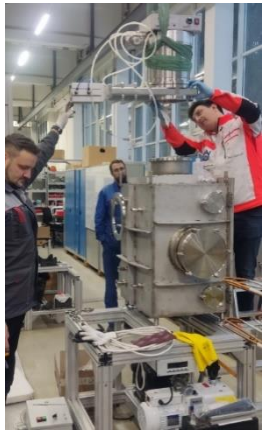
Получено на просвечивающем растровом электронном микроскопе (ПРЭМ) Tecnai Osiris (Thermo Fisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 200 кВ, оснащённом приставкой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа и высокоугловым кольцевым детектором тёмного поля. Поперечные и планарные срезы для проведения исследований были приготовлены с помощью сфокусированного ионного пучка Ga+ на растровом электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 600 (FEI, США), оснащённом системой инжектирования газов на основе Pt и W и наноманипулятором OmniProbe 200.

Разработка технологии облучения длинных кусков ВТСП лент при перемотке через пучок





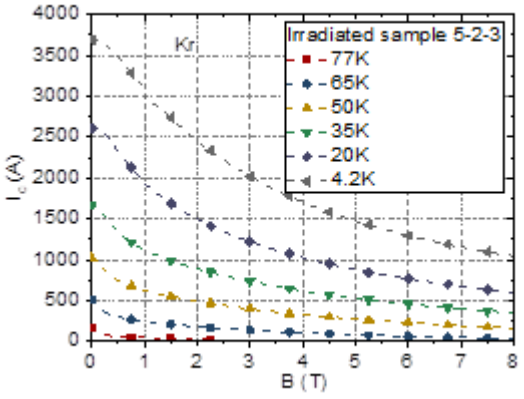


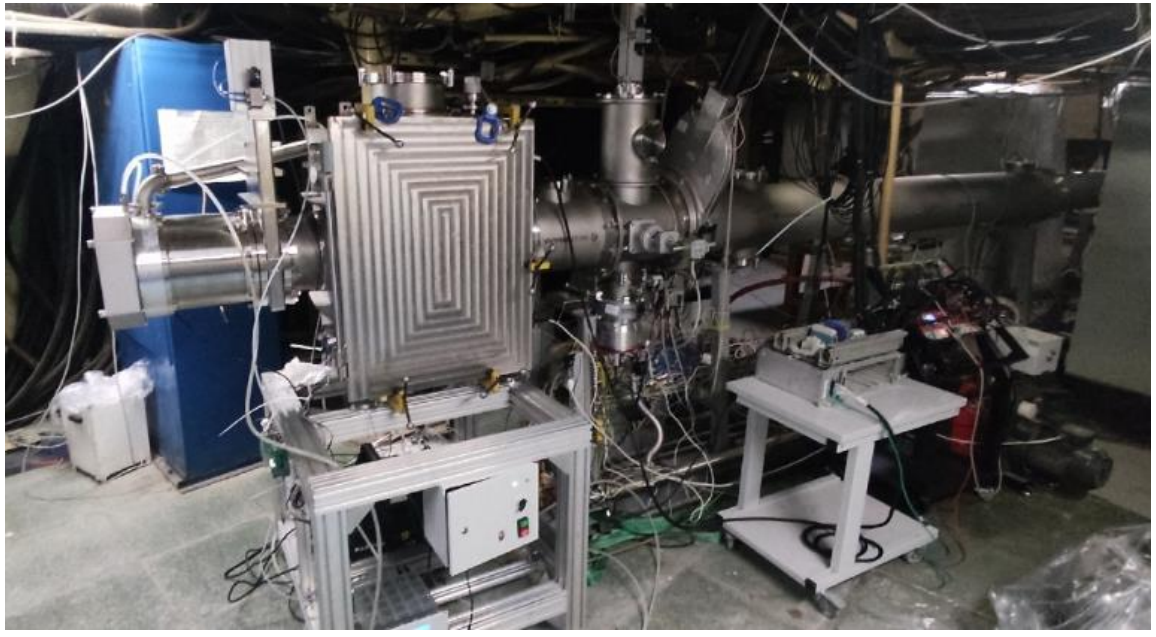




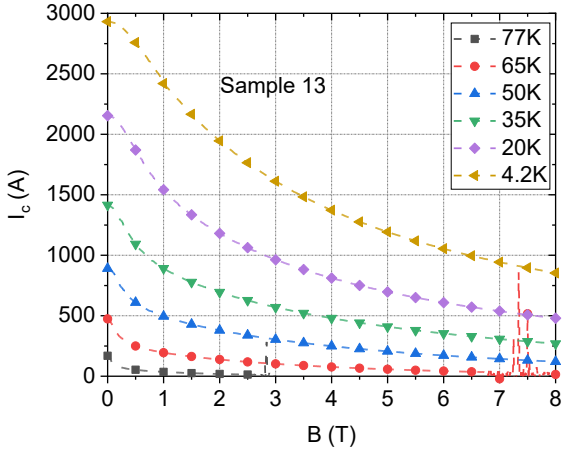


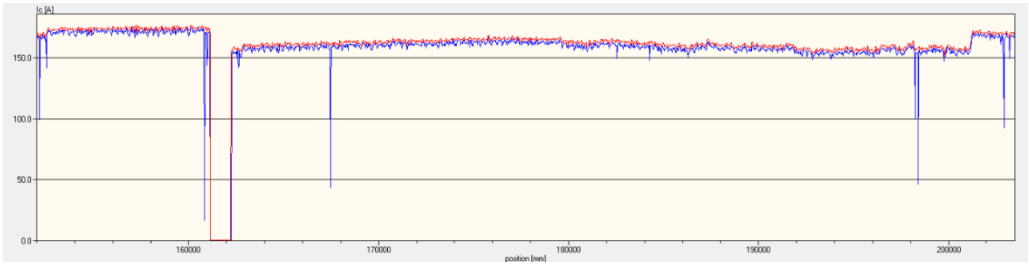


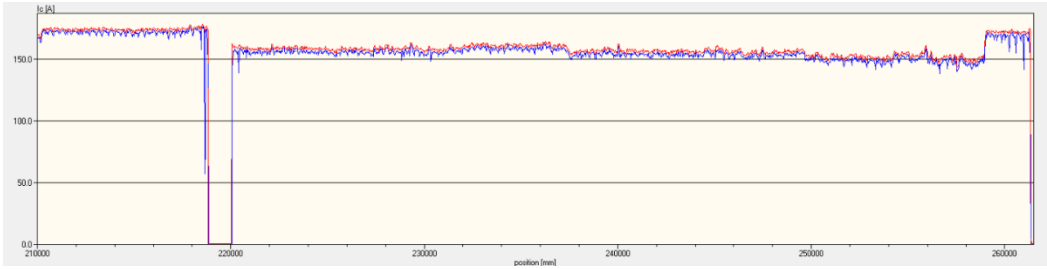


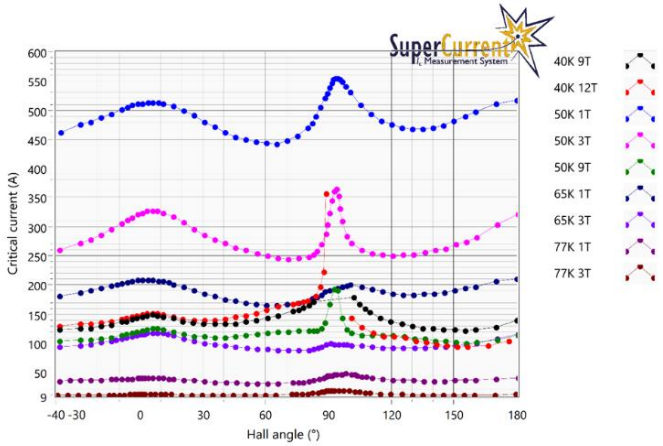


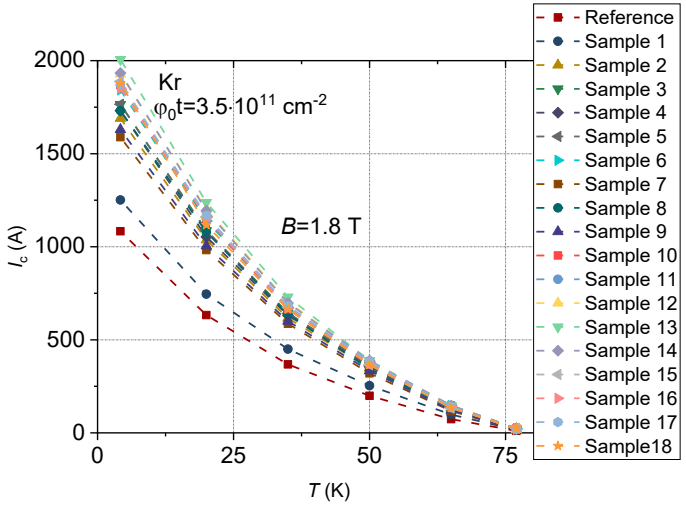
Результаты облучения 18 бобин ВТСП ленты (суммарно около 1 км, а из них 800 м с однородными свойствами) криптоном на У-400







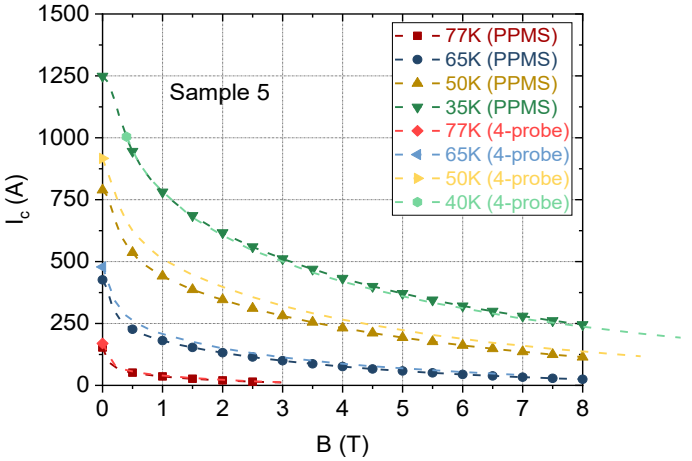




Поток до 6*10^8 ионов/см^2*с

Планы:

- **Сеансы на ДЦ-140 с 2026 г. (большой поток Xe или Kr, создание магнитов Нового Нуклотрона, выход на коммерциализацию технологии)**
- **ЛУТИ – станция облучения аналогичными ионами**



Сравнение вариантов магнитной системы Нового Нуклотрона

Таблица 1. Сравнение видов магнитов – NbTi, и 6 видов с ВТСП

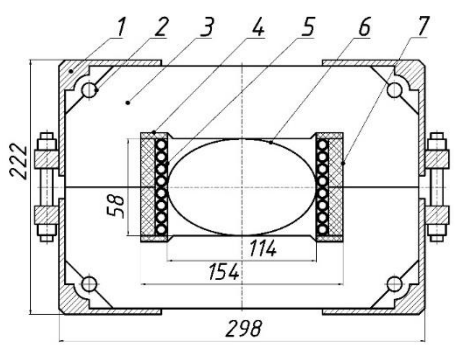
	1	2	3	4	5	6	7
Охлаждения обмотки	**LHe**	**GHe 45 K**	**GHe**	**LNe 30 K**		**LN2 65 K**	
Охлаждения ярма	**5 K**	**LN2 78 K**	**45 K**				
Число различных потоков хладагентов в системе	**2**	**4**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**
Теплоприток и потери в обмотке диполь/линза, Вт	**3 / 1**	**5 / 2**	**2 / 0.6**	**2.5 / 0.8**		**1.8 / 0.5**	
Теплоприток и потери в ярме диполь/линза, Вт	**20 / 6**	**15 / 4.5**	**16 / 5**	**18 / 5**		**14 / 4**	
Энергопотребление криогенной системы, кВт	**620**	**16.5**	**28**	**61**		**12.5**	
Число ВТСП лент в кабеле	**NbTi**	**24**	**24**	**24**	**12**	**50**	**40**
Длина ВТСП лент, км	**-**	**120**	**120**	**120**	**60**	**480**	**360**
Трубка, мм	**-**	**5**	**5**	**5**	**5**	**8**	**6.35**
Слои обмотки	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**
Радиационный пиннинг	**-**	**Ic * 2-2.5**		**нет**	**Ic*2**	**Ic*2**	**Ic*3**
Стоимость ВТСП (+облучение), млн руб.	**-**	**600**		**450**	**300**	**2400**	**2000**
Стоимость электроэнергии за 30 лет в режиме 9 мес/год, млн руб.	**1100**	**30**	**50**	**110**		**22**	
Инновации, кроме применения ВТСП	**-**	**Раздельное охлаждение, пиннинг ионами**	**Пиннинг ионами**	**Неон**	**Неон, пиннинг ионами**	**Азот! + пиннинг ионами**	
Недостатки	**Гелий, +много ЭЭ ест**	**Все же гелий, хоть и газ, да и немного его**		**Неон тоже редкий газ**		**Дорого! Неудобно – обмотка в 2 слоя!**	**Дорого, и лента особая**

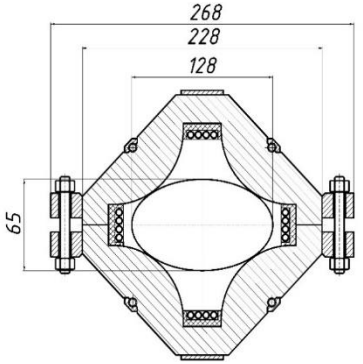
Число дипольных магнитов 48 (длина 2.88 м), квадрупольных 64 (длина 0.46 м) [3].

Мощность криогеники – из формулы идеального цикла с коэффициентами 0.15-0.35 (в зависимости от температуры)
Тариф на электроэнергию около 9 руб./кВт*ч

Целесообразно охлаждать высоковакуумную камеру пучка гелием, через трубку (в нынешнем варианте NICA камера охлаждается от ярма, примерно до 20 К), из соображений получения высокого вакуума – возможно, кроме неонового варианта. Азотные тепловые экраны тоже нужны во всех вариантах.

[3] К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАГНИТНО-ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ «НОВОГО НУКЛОТРОНА» А. В. Бутенко, В. А. Михайлов, А. В. Тузиков, А. В. Филиппов, Г. Г. Ходжибагиян, Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 942–949





План НИОКР

- Изготовление и испытания 10-12 конструкций кабелей и спаев
- НИОКР по пиннингу на ДЦ-140 и на ЛУТИ, эксперименты и создание 2 станций облучения (технологических), расчеты, поиск оптимальных условий облучения – энергии, заряды, углы и флюенсы – для этого – микроскопия и измерения криттоков, исследования структуры и электронной плотности
- Стенды – в 217 модернизация и второе ВТСП плечо, неоновый в 1А
- Методика ресурсных испытаний и ресурсные испытания кабелей
- Исследовательские методики
- Методика проверки ВТСП лент в поле до 2 Тл при температуре 50-78 К
- Разработка, изготовление и испытания 12 видов магнитов, по ходу этого пункта – выбор конструкции и способа охлаждения, модернизация технологий, дальнейшая адаптация «под ВТСП»
- Во второй половине 27 года – развертывание производства

Экспериментальные ВТСП магниты Нового Нуклотрона

Таблица 2. Магниты для Нового Нуклотрона, создаваемые в рамках НИОКР

Вид магнита	Вид охлаждения	Вид кабеля	Вид ВТСП ленты	Вид и т-ра хладагента обмотки	К-во ВТСП ленты, м	№ магнита
Диполь модельный	Ярмо азотное, обмотка гелий/неон, камера гелий	Импрегнир.	Облученная	Гелий 40-50	750	1
			Чистая	Неон 30-35	750	2
		Сухой	Облученная	Гелий 40-50	750	3
			Чистая	Неон 30-35	750	4
	Ярмо и обмотка гелий/неон, камера гелий	Импрегнир.	Облученная	Гелий 40-50	750	5
			Чистая	Неон 30-35	750+	6.1, 6.2
			Облученная 12 лент	Неон		
		Сухой	Облученная	Гелий 40-50	750	7
			Чистая	Неон 30-35	750+	8.1, 8.2
			Облученная 12 лент	Неон		
Диполь полномасштабный	По результатам НИОКР. Ярмо закажем позже.				2000	9
Квадруполь	По результатам НИОКР				800	10

Выводы

- Нуклотрон, первый синхротрон со сверхпроводящей магнитной системой, работает с 1993 года, его оборудование изношено и во многом устарело. Имеет смысл строить Новый Нуклотрон, не разбирая старый.
- Основным вариантом обмоток диполей и квадруполей Нового Нуклотрона являются обмотки из ВТСП кабеля, возможно множество вариантов охлаждения обмоток и ярма, конструкций кабеля, обмоток и ярма.
- В ОИЯИ разработаны или дорабатываются конструкции и технологии: ВТСП кабеля Нуклотронного типа, технология радиационного пиннинга ионами. Адаптируется к ВТСП конструкция и технология магнитов типа NICA. Сделана серийная кабельная машина, станция облучения ионами (разрабатываются 2-я и 3-я), стенд в 217 корпусе переделан под температуры 5-80 К, будет сделан неоновый стенд на основе ожижителя в 1А, методика ресурсных испытний
- Необходимы (и ведутся) НИОКР для выбора варианта (из 6 + импрегнирование кабеля), оптимизации конструкции и технологии ВТСП диполей и квадруполей
- С 27 года можно будет создавать (скорее, модернзировать) производство,

в 28-30 гг производить и испытывать магниты Нового Нуклотрона