

## КОНЦЕПЦИЯ ВТСП МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОТРОНА «НОВЫЙ НУКЛОТРОН»

*Г. Г. Ходжибагиян, М. С. Новиков, Э. З. Фишер, А. В. Шемчук*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Работа выполнена в рамках мегасайенс-проекта нового ускорительно-коллайдерного комплекса NICA в ОИЯИ в Дубне. Существующий сверхпроводящий синхротрон работает с 1993 г. и требует модернизации. Новый нуклотрон планируется создать с использованием магнитов, изготовленных из ВТСП-материала второго поколения, производимого в компании «С-Инновации» в Москве. Магниты будут охлаждаться до 30 К потоком двухфазного неона внутри каналов кабеля обмотки или до 50–65 К потоком газообразного гелия с применением ВТСП-материала следующего поколения. Представлена схема охлаждения и конструкция магнита.

The work was done within the mega-science project for the new accelerator-collider complex NICA at the JINR in Dubna. The existing superconducting synchrotron has been operating since 1993 and requires a modernization. It is planned to build the New Nuclotron using magnets made from the second-generation HTS material produced at the SuperOx company in Moscow. The magnets will be cooled down to 30 K by a two-phase neon flow inside the cable channels of the coil, or to 50–65 K by gaseous helium for the HTS material of the next generation. We present the cooling scheme and the status of magnet design.

PACS: 29.20.db; 29.20.dk; 41.85.Lc

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитная система нуклотрона [1] изготовлена из магнитов с полем, формируемым холодным (4,6 К) железным ярмом и обмоткой из трубчатого сверхпроводящего кабеля. Система насчитывает 96 дипольных магнитов длиной около 1,4 м, 64 квадрупольных магнита длиной 0,45 м и 28 корректирующих магнитов длиной 0,3 м, охлаждаемых принудительным потоком кипящего гелия [2]. Магнитная система находится в эксплуатации в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ЛФВЭ ОИЯИ) в Дубне с 1993 г., 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 потребуются ее обновление, чтобы обеспечить на длительный период бесперебойную работу в составе комплекса NICA [3].

В рамках проекта обновления магнитной системы нуклотрона планируется:

- оптимизировать структуру магнитной оптики ускорителя;
- изготовить обмотки магнитов из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), что позволит в несколько раз снизить эксплуатационные расходы на охлаждение магнитов;

- дипольные магниты изготавливать изогнутыми (секторными), что позволит вдвое уменьшить их число и получить возможность размещения на кольце ускорителя дополнительного оборудования;
- разместить на кольце ускорителя оборудование, предназначенное для работ по исследованию спиновой физики;
- обмотки изготавливать однослойными, что позволит уменьшить размеры поперечного сечения магнитов.

## ОБНОВЛЕНИЕ КРИОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА

Обмотки магнитов обновленного нуклотрона будут изготовлены из высокотемпературного сверхпроводника второго поколения [4] типа ReBCO.

Планируется к применению ВТСП-провод (лента) производства российской компании «С-Инновации» с критическим током выше 600 А при 30 К в поле 2 Тл, толщиной 70–80 мкм, шириной 4 мм. Из лент наматывается сильноточный кабель с помощью кабельной машины, прототип которой разработан и изготовлен в ОИЯИ (рис. 1).

ВТСП-ленты наматываются на мельхиоровую трубку по спирали во много слоев по несколько лент, аналогично кабелю нуклотрона [5, 6]. На рис. 2 приведены для сравнения кабели нуклотрона и ВТСП нового нуклотрона (НН).

Для серийного изготовления ВТСП-магнитов в ОИЯИ монтируется кабельная машина, позволяющая изготавливать за один проход кабель из 40–50 ВТСП-лент.

Из ВТСП-кабеля собственного производства был изготовлен и прошел испытания при температуре до 30 К модельный квадрупольный магнит [7]. Магнит устойчиво работал в номинальном цикле с  $I_{\max} = 10$  кА,  $dI/dt = 40$  кА/с при температуре 30 К.

Проведен первый эксперимент по созданию ВТСП-кабеля, импрегнированного эпоксидным компаундом для улучшения механической и тепловой устойчивости к импульсному полю. Кабель из 40 лент, импрегнированный эпоксидной смолой горячего отверждения с кварцевым наполнителем, работал без срыва сверхпроводимости

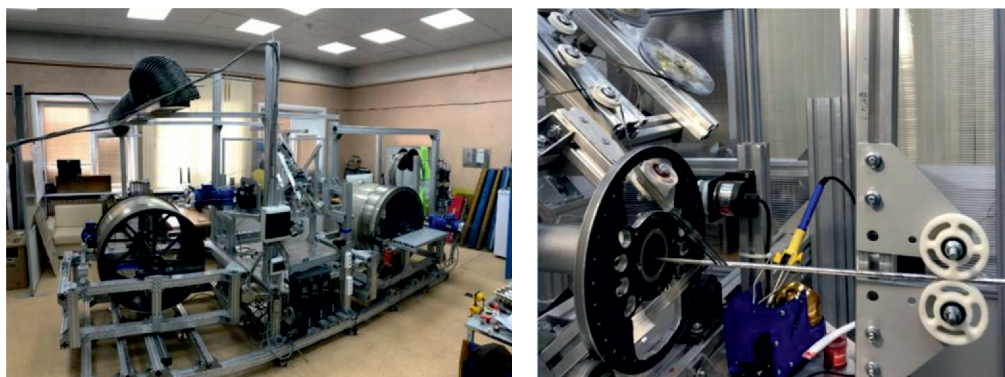


Рис. 1. Прототип машины для производства ВТСП-кабеля

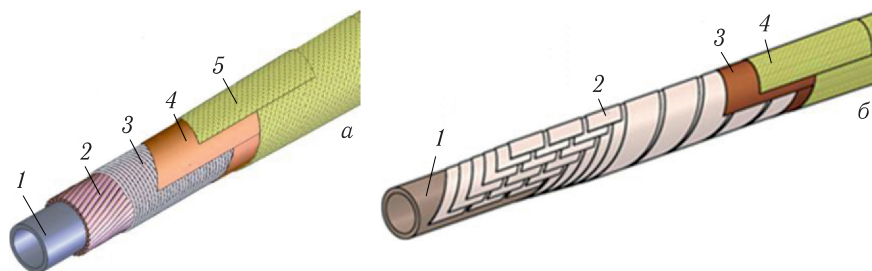


Рис. 2. Кабель нуклотрона (а) и кабель ВТСП НН (б): 1 — охлаждающая трубка; 2 — сверхпроводник; 3 — бандаж; 4, 5 — электроизоляция

при 15 кА амплитуды импульсного тока со скоростью изменения 40 кА/с при температурах до 60 К в поле собственного тока, что близко к расчетному значению критического тока. Исследования и разработки в этом направлении продолжаются.

Разработаны конструкции терминалов и спаев ВТСП-кабелей, позволяющие получить переходное сопротивление всего в несколько наноом при токе 10–15 кА и температуре 30–65 К.

В ОИЯИ ведутся исследования влияния облучения протонами, ионами и нейтронами на зависимость критического тока ВТСП-ленты второго поколения от магнитного поля и температуры для выяснения возможностей создания методом облучения искусственных центров пиннинга с целью увеличения критического тока в магнитных полях. Радиационные дефекты структуры сверхпроводника могут улучшать сверхпроводящие свойства в задаваемых диапазонах полей и температур. Одной из целей этих исследований является получение ВТСП-проводов следующего поколения (HTS 2+G), пригодных для изготовления магнитов ускорителей, работающих при температуре жидкого азота.

Первые успехи испытаний на коротких образцах ВТСП-лент описаны в [8]. Облучение протонами 660 МэВ на пучке фазотрона с вторичными нейтронами и ионами подняло критический ток в 2–3 раза при температуре 65–78 К в поле 2 Тл; облучение ионами Хе 167 МэВ на пучке ИЦ-100 подняло в 2–3,5 раза критический ток в широком диапазоне полей и температур. Найдены приблизительные значения флюенсов, позволяющих получить пик критического тока. Разрабатываются технологии получения длинных кусков материала ВТСП 2+.

## **МАГНИТЫ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ОБМОТКИ ОКОЛО 30 К**

Магниты имеют «холодное» железное ярмо, формирующее магнитное поле и воспринимающее поперечные силы, а также седлообразную обмотку из ВТСП-материала, охлаждаемую до 28 К потоком кипящего неона. Основные характеристики магнитов нового нуклотрона приведены в табл. 1 и на рис. 3. Схема охлаждения магнитов показана на рис. 4.

Таблица 1. Основные характеристики магнитов НН с температурой обмотки около 30 К

Параметр	Диполь	Линза
Периметр ускорителя, м	251,52	
Число магнитов	48	64
Магнитная жесткость, Тл·м	40,5	
Максимальные магнитное поле, Тл градиент поля, Тл/м	1,8	30
Эффективная длина магнита, м	2,88	0,46
Скорость изменения магнитного поля, Тл/с градиента поля, Тл/(м·с)	0,84	14
Неоднородность магнитного поля на $R = 30$ мм	$\leq 6 \cdot 10^{-4}$	
Апертура вакуумной камеры $h/v$ , мм	128/65	
Радиус кривизны средней траектории, м	22,5	
Расстояние от оси до полюса, мм		47,5
Угол поворота, °	7,5	
Ток при максимальном магнитном поле, кА	9,3	

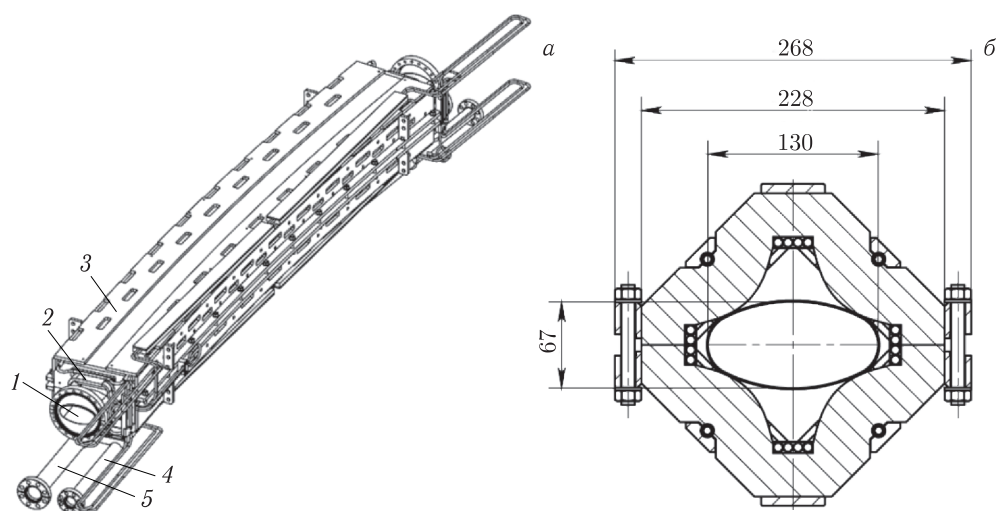


Рис. 3. а) Вид дипольного магнита: 1 — вакуумная камера; 2 — обмотка; 3 — ярмо; 4, 5 — коллекторы неона. б) Поперечное сечение квадрупольной линзы

### МАГНИТЫ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ОБМОТКИ ОКОЛО 50 К

Магниты имеют «холодное» железное ярмо при температуре 80 К, охлаждаемое потоком кипящего азота, формирующее магнитное поле и воспринимающее ponderomotive силы и седлообразную обмотку из ВТСП-материала с искусственными центрами пиннинга, охлаждаемую до 50 К потоком газообразного гелия. Меж-

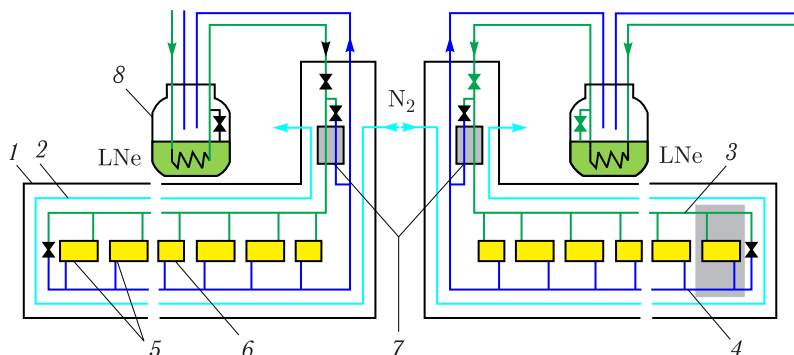


Рис. 4. Схема охлаждения магнитов двухфазным Ne: 1 — вакуумный кожух; 2 — тепловой экран; 3 — питающий неоновый коллектор; 4 — отводящий неоновый коллектор; 5, 6 — магниты; 7 — переохладитель; 8 — сепаратор жидкого неона

Таблица 2. Основные характеристики магнитов нового нуклотрона с температурой обмотки около 50 К

Параметр	Диполь	Линза
Периметр ускорителя, м	251,52	
Число магнитов	48	64
Магнитная жесткость, Тл·м	40,5	
Максимальные магнитное поле, Тл градиент поля, Тл/м	1,8	14
Эффективная длина магнита, м	2,88	0,46
Скорость изменения магнитного поля, Тл/с градиента поля, Тл/(м·с)	0,84	34
Неоднородность магнитного поля на $R = 30$ мм	$\leq 6 \cdot 10^{-4}$	
Апертура вакуумной камеры $h/v$ , мм	112/56	128/65
Радиус кривизны средней траектории, м	22,5	
Расстояние от оси до полюса, мм		47,5
Ток при максимальном магнитном поле, кА	10,5	

ду ярмом и обмоткой расположена теплоизолирующая проставка. Основные характеристики магнитов НН с температурой обмотки около 50 К приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Схема охлаждения дипольного магнита НН с комбинированным охлаждением показана на рис. 6.

### ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ В ДИПОЛЬНОМ МАГНИТЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Тепловыделения в ярме зависят от марки стальных листов, их толщины, начальной и конечной величин магнитной индукции в цикле, скорости изменения магнитного поля, частоты повторения циклов намагничивания и др.

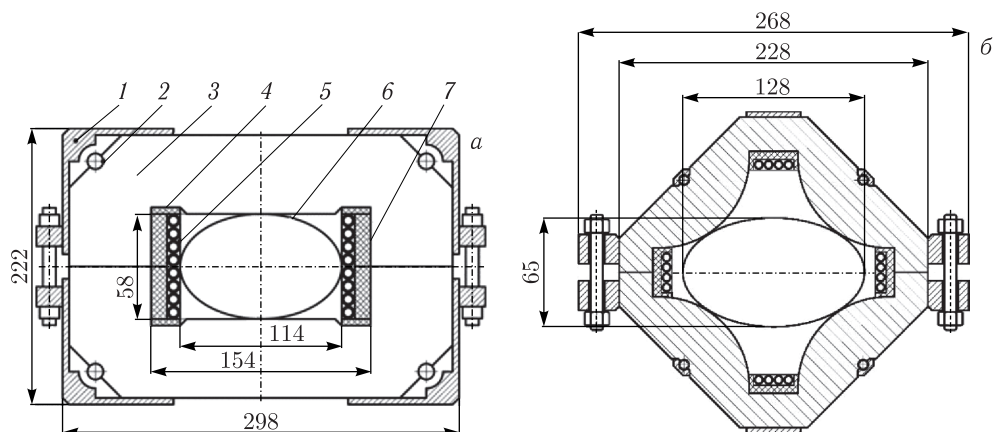


Рис. 5. а) Поперечное сечение дипольного магнита нового нуклотрона с комбинированным охлаждением: 1 — уголок; 2 — трубка для охлаждения ярма; 3 — ярмо; 4 — торцевая проставка; 5 — обмотка; 6 — пучковая камера; 7 — боковая проставка. б) Квадрупольная линза

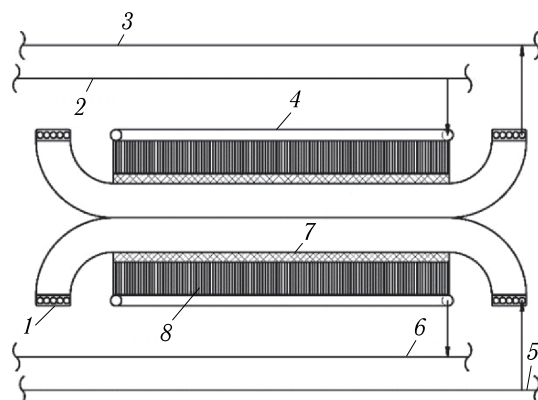


Рис. 6. Схема магнита с комбинированным охлаждением потоками газообразного гелия и кипящего азота: 1 — сверхпроводящая обмотка; 2 — питающий коллектор с жидким азотом; 3 — отводящий коллектор с газообразным гелием; 4 — трубка для охлаждения ярма; 5 — питающий коллектор с газообразным гелием; 6 — отводящий коллектор с азотом; 7 — тепловая изоляция обмотки от ярма; 8 — железное ярмо магнита

Проектом NICA предусмотрены три режима функционирования (рис.7) нового нуклотрона: при работе НН в качестве инжектора тяжелых ионов, поляризованных протонов и дейтронов в коллайдер, а также как ускорителя с выводом пучка на фиксированную мишень. Наибольшая мощность тепловыделений в магнитах будет при работе НН в режиме инжектора тяжелых ионов.

На основании большого числа экспериментальных данных по тепловыделениям в железных ярмах магнитов нуклотрона и бустера NICA нами сделана оценка мощности динамических тепловыделений в ярме дипольного магнита НН с комбинированным

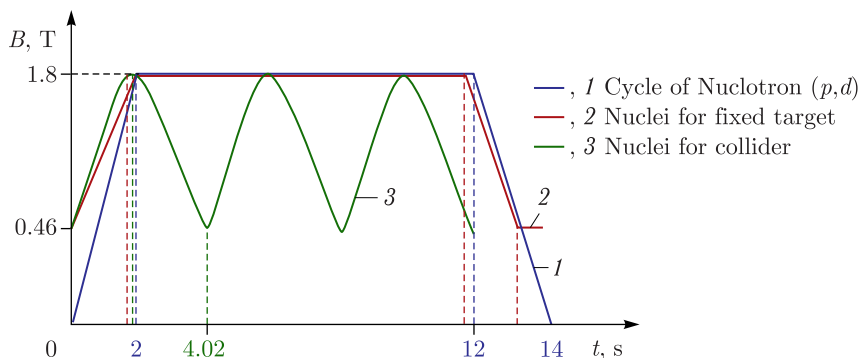


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Циклы работы нового нуклотрона

охлаждением длиной 2,88 м, которая не превысит 10,3 Вт. С учетом статического притока тепла к яру из окружающей среды теплоприток к азоту в магните составит около 40,3 Вт.

Динамические тепловыделения в обмотке состоят из потерь энергии на вихревые токи в мельхиоровой трубке, а также гистерезисных и вихревых потерь в сверхпроводнике. Оценка максимальной динамической мощности тепловыделений в обмотке дипольного магнита, сделанная на основании экспериментальных данных, дает 2,2 Вт при работе НН в режиме инжектора тяжелых ионов. С учетом статического притока тепла к обмотке от яра через изоляционные проставки теплоприток к гелию в магните составит около 29,2 Вт.

Ожидаемая тепловая нагрузка на криогенную систему ускорителя НН не превысит 2,8 кВт при температуре 50 К и 3,8 кВт при температуре 80 К, что потребует на охлаждение магнитной системы меньше затрат электроэнергии в 10 и более раз в сравнении с существующей магнитной системой сверхпроводящего синхротрона нуклотрон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено два варианта модернизации магнитной системы синхротрона нуклотрон, основанных на применении обмоток из ВТСП-материала. В первом варианте магнит охлаждается потоком кипящего неона при температуре 30 К. Во втором варианте магнит имеет комбинированное охлаждение. Железное ядро охлаждается потоком кипящего азота при температуре 80 К, а обмотка — потоком газообразного гелия при температуре 50 К. Представлены основные характеристики магнитов и схемы их охлаждения. Дана оценка тепловой нагрузки на криогенную систему ускорителя «Новый нуклотрон».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khodzhbagiyani H. G., Smirnov A. A.* The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron // Proc. of the Twelfth Intern. Cryogen. Eng. Conf. "ICEC12", Southampton, UK, July 12–15, 1988. P. 841–844.

2. *Baldin A. M. et al.* Superconducting Fast Cycling Magnets of the Nuclotron // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. V. 5. P. 875–877.
3. Nuclotron-Based Ion Collider Facility. <http://nica.jinr.ru/>.
4. Recent Advances in SuperOx 2G HTS Wire Manufacturing Facilities, Performance and Customization. Presented at ASC2020.
5. *Khodzhbagiyani H. et al.* An Approach to Development of the HTS Magnet for SMES at JINR // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1590. P. 012057.
6. *Khodzhbagiyani H. et al.* Quadrupole Superconducting Model for Update of the Nuclotron Synchrotron // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32, No. 6. P. 1–4.
7. *Шемчук А. В. и др.* ВТСП прототип квадрупольного магнита нового нуклотрона // Сб. тр. IX Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2023), 28–31 марта 2023 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 272.
8. *Новиков М. С. и др.* Разработка технологий радиационных центров пиннинга в ВТСП-лентах 2-го поколения для магнитов нового нуклотрона с азотным охлаждением // Сб. тр. IX Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2023), Москва, 28–31 марта 2023 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 242.

Получено 6 сентября 2023 г.