УДК 621.318

М.С. Астров, Е.Р. Запретилина, О.А. Ковальчук, И.Ю. Родин, С.Б. Федотова ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова» (ФГУП «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»)

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДУЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

ФГУП «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» имеет более чем пятидесятилетний опыт создания сверхпроводящих магнитов и устройств. В качестве наиболее известных проектов можно выделить магнитные системы УНК, ТСП, Т-15, Глобус-М, ИТЭР и многие другие. Наряду с традиционными низкотемпературными сверхпроводниками в настоящее время интенсивно развивается ВТСПтехнология. НИИЭФА владеет технологией и обладает необходимым опытом для проектирования, изготовления и испытаний сверхпроводящих катушек (унифицированного модуля) транспортной системы магнитной левитации.

сверхпроводящий магнит, УТС, СПИН, объемные ВТСП, магнитная левитация.

Введение

Техническая сверхпроводимость развивается в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова с 1960-х годов. Основным направлением было создание магнитных систем термоядерных реакторов. При разработке ряда токамаков НИИЭФА выступал в качестве предприятия – главного конструктора. К числу этих установок относятся Т-10, Т-15, ТСП, КТМ, Глобус-М и ряд других. Технология сверхпроводящей (СП) магнитной системы является одной из ключевых в управляемом термоядерном синтезе (УТС) с магнитным удержанием плазмы. В НИИЭ-ФА впервые в мире была спроектирована и изготовлена Nb₃Sn-обмотка тороидального поля (рис. 1). В начале 2000-х крупным вкладом в международную термоядерную программу стало создание модельной катушки на ток 46 кА в поле 13 Тл при запасаемой энергии 600 МДж (рис. 2); эта работа выполнялась в рамках международного проекта ИТЭР (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor). В настоящее время НИИЭФА, продолжая участвовать в ИТЭР (рис. 3), осуществляет разработку и изготовление Nb₃Sn-катушки полоидального поля PF1 (рис. 4). Близкими к магнитным системам токамаков параметрами обладают магниты для индуктивных накопителей энергии (СПИН), также традиционно входящие в круг работ НИИЭФА.

Для обеспечения этих работ в НИИЭФА освоен промышленный выпуск комплектующих СП магнитных систем СПИН и токамаков – криостатов, криогенных токовводов, защитных коммутаторов, электроизоляционных развязок криогенных трубопроводов (рис. 5). Созданы уникальные стенды (рис. 6) для их приемо-сдаточных испытаний, на которых в настоящее время проводятся исследования. Освоенные технологии могут быть использованы для решения смежных задач, в частности для разработки систем магнитной левитации.

1 Низкотемпературные сверхпроводниковые (НТСП) магниты и устройства

1.1 Установка УТС LDХ

Альтернативный традиционным установкам с магнитным удержанием плазмы (токамакам, стеллараторам) способ УТС был предложен учеными Колумбийского универ-



Рис. 1. Один из 12 монтажных блоков сверхпроводящей обмотки тороидального поля (ОТП) токамака Т-15, изготовленной на заводе ЭФО в НИИЭФА



Рис. 2. Монтаж Российской модельной катушки-вставки, разработанной и изготовленной в НИИЭФА, на международном испытательном стенде ИТЭР в Японии. 2001 г.



Рис. 3. Международный реактор ИТЭР, по параметрам и размерам близкий к будущим термоядерным электростанциям

ситета (Columbia Univ.) и Массачусетского технологического института (MIT) [1]. В этой концепции горячая плазма удерживается сравнительно простой дипольной магнитной системой, магнитное поле которой напоминает по конфигурации магнитное поле Земли и других планет. При размещении дипольного магнита внутри облака плазмы турбулентные



Рис. 4. Конфигурация и размеры СП магнитной системы ИТЭР. Катушка полоидального поля PF1 (диаметр 9 м, масса 225 т) изготавливается НИИЭФА



Рис. 5. Комплектующие СП магнитных систем, выпускаемые в НИИЭФА: а) электроизоляционные развязки криогенных трубопроводов, промышленно выпускаемые малыми сериями; б) промышленный образец защитного коммутатора для ИТЭР и СПИН (ток до 70 кА, напряжение до 30 кВ); в) промышленный образец блока токовых вводов на 4–80 кА, 30 кВ для СПИН и токамаков (поставлено в 2002 г. в США для СПИН на 100 МДж)

потоки в плазме не снижают ее концентрации (как это происходит в токамаках), а наоборот, увеличивают, что перспективно с точки зрения УТС. Практически концепция была реализована в ходе эксперимента с левитирующим диполем (Levitated Dipole Experiment – LDX), начатого в 2004 г., и перешедшему к исследованию режимов левитации в 2008 г. Установка включает в себя 1) левитирующий диполь (Nb₃Sn магнит с собственным резервуаром жидкого гелия); 2) зарядную NbTi катушку; 3) высокотемпературный сверхпроводниковый (ВTCП) магнит системы левитации; 4) корректирующие катушки (рис. 7). Система левитации необходима для исключения искажений магнитного поля опорами, равно как



Рис. 6. Стендовые установки НИИЭФА для испытаний обмоточных сверхпроводников и комплектующих СП магнитных систем СПИН и токамаков: а) стенд для проведения комплексных испытаний СП образцов; б) установка ЛИС-12 для проведения испытаний в полях до 12 Тл, при токах до 100 кА; в) высоковольтный стенд



Рис. 7. Эксперимент с левитирующим диполем (LDX). Основные системы LDX

и их возможного влияния на характеристики плазмы. Точность поддержания положения 600 кг дипольного магнита в центре камеры составляет \pm 0,5 мм. Положение контролируется с помощью лазерной системы слежения.

В левитирующей Nb₃Sn-катушке (рис. 8) наводился ток 1,5 MA в поле 6 Тл при уровне запасаемой энергии 800 МДж. Запаса гелия 1,5 кг хватало на 8 ч левитации. Криостат сложной конструкции, состоящий из трех концентрических торов, обеспечивал теплоприток менее 1 Вт на температурный уровень 4,2 К, при этом толстостенный гелиевый сосуд был рассчитан на давление 125 атм.

Магнит системы левитации (рис. 9), ставший первым в мире применением ВТСП-



Рис. 8. Левитирующий НТСП дипольный магнит LDX

обмоток в установках УТС, изготавливался из проводника BSSCO-2223. Потери энергии менее 20 Вт на уровне температур 20–25 К снимались с помощью криокулера.

Зарядная NbTi-катушка используется для индукционного заведения рабочего тока в левитирующую катушку в начальной фазе эксперимента и вывода из нее тока в заключительной фазе. Разработку и изготовление зарядной катушки выполнил НИИЭФА [2]. Требования к проводнику включали в себя: а) ограничение максимальной температуры $T_{_{max}}\!<\!150$ К; б) ограничение максимального напряжения $V_{max} = 3 \text{ kB};$ в) исключение эффекта тренировки, что определило выбор рабочей точки I = 0.4I; $\varepsilon < 0.2\%$, обеспечивающей низкий уровень допустимых механических нагрузок на проводник; г) требование использовать коммерчески доступные недорогие стренды (выбор был сделан в пользу стрендов СКНТЭ - 0,86-0,42-2970). Компактированный пропаянный СП кабель (рис. 10) с высокой долей стабилизирующей меди был изготовлен ОАО «ВНИИКП» и предварительно испытан в НИИЭФА. Основные параметры зарядной катушки приведены в табл. 1. Фотографии иллюстрируют основные этапы изготовления зарядной катушки (рис. 11).

Криостат для зарядной катушки обеспечивал низкий уровень теплопритоков излучением к гелиевому уровню (0,11 Вт), что оказалось возможным за счет нанесения специальных высокоотражающих покрытий (рис. 11и) со



Рис. 9. ВТСП-магнит системы левитации LDX

степенью черноты менее 0,004. Используемая технология, совместно разработанная НИИЭ-ФА и ОКБ «Криовакс» (Санкт-Петербург), – модификация ранее применявшейся в ОКБ «Криовакс» для изготовления имитаторов космоса и криогенных сверхвысоковакуумных насосов. Для снижения остаточного давления в вакуумной полости до 10⁻⁷ торр и соответствующего снижения конвекционных теплопритоков до 0,02 Вт на гелиевом уровне температур применялись сорбционные криопанели. Общий расход гелия составил 30 л/день (0,9 Вт), что было признано очень хорошей величиной для криостата диаметром 2,5 м с «теплым» отверстием 1,2 м [2].



Рис. 10. NbTi/Cu кабель, разработанный НИИЭФА/ВНИИКП для зарядной катушки LDX (формула кабельной скрутки 1 (Cu 1,5) + [3 (SC 0,85) + 6 (Cu 0,85)] при отношении Cu : NbTi = 8,6 : 1)

Длина проводника, км	38
Число витков	8388
Рабочий ток А	435
Напряжение, кВ	3
Максимальное поле, Тл	4,3
Запасаемая энергия, МДж	12
Полный вес обмотки, кг	3140
Полный вес криостата, кг	10000
Диаметр теплого отверстия, м	1,2
Режим работы	2 цикла/день
Время ввода/вывода энергии в левитирующую катушку, мин	30

ТАБЛИЦА 1. Зарядная катушка LDX



б



Рис. 11 (начало). Основные этапы изготовления зарядной катушки LDX: а) намотка катушки 38 км NbTi-кабелем; б) обмотка после пропитки компаундом; в) высоковольтные испытания; г) катушка спущена в криостат









Рис. 11 (продолжение). Основные этапы изготовления зарядной катушки LDX: д) сварка гелиевой оболочки; е) организация попарно охлаждаемых выводов; ж) азотный медный экран перед установкой; з) установлена внутренняя азотная емкость; и) установка нержавеющих листов, покрытых монокристаллическим Al; к) установлена гелиевая емкость



Рис. 11 (окончание). Основные этапы изготовления зарядной катушки LDX: л) наружный вакуумный сосуд, опускаемый в процессе сборки (с уже установленной наружной азотной емкостью); м) монтаж зарядной катушки в MIT

В ходе проектирования зарядной катушки решена задача разработки схемы защиты. Вывод энергии осуществлялся на защитный резистор с постоянной времени $\tau = 17$ с. При этом требовалось исключить влияние левитирующей катушки на работу системы детектирования появления нормальной зоны. Оптимальным оказался вариант 6-канальной системы детектирования, в котором обмотка была разбита на 4 участка и независимо контролировались все 4 сигнала; при превышении уровня 30 мВ на каком-либо из участков начинался вывод тока; два дополнительных канала использовались для мониторинга работы токовводов.

После изготовления зарядная катушка была доставлена в Бостон (рис. 11е) и успешно испытана в экспериментах LDX.

1.2 Модельный ряд НТСП СПИН

Запасаемая энергия зарядной катушки составляла 12–17 МДж при рабочем токе в диапазоне 440–550 А с максимальным полем на обмотке около 5 Тл. Это позволило использовать этот магнит (конструктивные и технологические решения) как прототип (рис. 12) при разработке модельного ряда [3] НТСП СПИН на диапазон энергоемкостей вплоть до 1000–2000 МДж из модулей на запасаемую энергию 24–133 МДж. Расчетно-конструкторские работы по СПИН (табл. 2, рис. 13) были выполнены НИИЭФА по заказу ФСК «РАО ЕЭС».

Варианты СПИН, приведенные в табл. 2, предусматривают циркуляционное гелиевое охлаждение. Используется проводник типа «кабель в оболочке» разработки ОАО «ВНИ-ИКП» на максимальный ток 2 кА в поле 5 Тл. Конструкция модулей энергоемкостью до 133 МДж оптимизирована по расходу проводника и минимуму тепловых потерь при заданном внешнем диаметре криостата 3,5 м, что допускает транспортировку автомобильным транспортом. Рассмотрены способы коммутации модулей в единую систему в зависимости от требований по энергоемкости, мощности, по ограничениям на уровень рассеянного магнитного поля. Анализ стоимости изготовления выявил экономическую целесообразность применения соленоидальных модулей перед тороидальными, несмотря на повышенный расход

2014/3



Рис. 12. Многоцелевой сверхпроводящий соленоид с «теплой» апертурой диаметром 1 м. Запас энергии 12–17 МДж; напряжение 3 кВ. Допускает разряд мощностью 1,5 МВт. Разработка НИИЭФА 2002 г.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные конструктивные характеристики модулей СПИН
с циркуляционным охлаждением и тепловые нагрузки на гелиевую
криогенную систему СПИН в режиме ожидания

Энергоемкость, МДж	24	66,6	133,2	300	1200	4800		
Внутр. диам. обмотки, м	0,74	1,81	2,13	4,06	7,91	10,78		
Наруж. диам. обмотки, м	3,15	3,15	3,15	6,0	9,5	12,0		
Высота обмотки, м	0,45	1,24	2,59	1,05	1,81	4,57		
Длина проводника, км	18,0	32,5	54,8	80,6	144,0	346,7		
Теплоприток на уровень 4,5 К, Вт								
- излучением ¹	1,2	1,5	1,8	1,9	3,3	6,7		
– по остаточному газу	0,34	0,42	0,55	0,66	1,1	2,2		
– по опорам ²	0,69	1,2	2,1	3,0	7,4	18,5		
– потери в контактах	1,1	1,9	3,1	4,6	11,3	28,4		
– по токовводам	4,8	4,8	4,8	19,2	19,2	76,8		
 – общая нагрузка на криогенную систему в режиме ожидания, q₀ 	8,1	9,8	12,4	29,5	42,2	132,7		

Примечания. ¹ – изоляция с применением высокоотражающих покрытий (степень черноты < 0,03); ² – сейсмостойкое исполнение криостата.

сверхпроводника. С целью ограничения полей рассеяния предложено встречно-параллельное включение соленоидальных модулей; также

возможно применение конструкции модуля типа «соленоид в соленоиде». При необходимости создания СПИН высокой энергоем-



Рис. 13. Модуль накопителя энергоемкостью 66 МДж, разработанный в НИИЭФА

кости (>1000 МДж) экономически выгоднее использовать моноблочную конструкцию без ограничения внешнего диаметра криостата. В этом случае предлагается изготовление большегабаритного СПИН непосредственно на месте его использования. Адаптация технологии электромагнитных систем ИТЭР к СПИН с диаметром обмоток 10-12 м позволяет рассчитывать на требуемое снижение стоимости СПИН в 1,5-2 раза без дополнительных инвестиций в НИР и апробацию технических решений СПИН с энергоемкостью 2-4 ГДж. Необходимое технологическое оборудование для изготовления обмоток диаметром 10-12 м разрабатывается в НИИЭФА с 2007 г. в порядке выполнения обязательств России по изготовлению и поставке одной из полоидальных катушек ИТЭР (рис. 4, 14).

2 Технологии с использованием ВТСП-ленты

В последние годы в НИИЭФА активно развиваются технологии создания крупных магнитных систем с токонесущим элементом на основе ВТСП-лент второго поколения (ВТСП-2). Одна из текущих разработок – ВТСП СПИН с энергоемкостью 1–10 МДж (рис. 15). Совместно с освоением технологий изготовления ВТСПобмоток ведутся работы по созданию транспонированных токонесущих элементов на основе ВТСП-лент и токовых вводов различных назначений.

Критические токи сегодняшних ВТСП-2лент при температуре жидкого азота невысоки, они не позволяют создавать магнитные системы с полем в несколько тесла на азотном

49



Рис. 14. Технологический участок по изготовлению катушки PF1 магнитной системы ИТЭР



Рис. 15. Опытный образец ВТСП СПИН энергоемкостью 1 МДж

уровне. Однако понижение температуры уже до уровня 30–50 К существенно исправляет ситуацию, что при использовании современных криокулерных установок делает токонесущие элементы на основе ВТСП-2-ленты перспективным кандидатом для сверхпроводящих магнитов систем магнитной левитации.

Опытный образец ВТСП СПИН проектируется для работы при температуре 30 К, силе тока 600 А в поле до 6 Тл (до 1,3 Тл по нормальной компоненте поля). Намотка будет вестись ВТСП-2-лентой шириной 12 мм, тороидальная конфигурация СПИН образуется 40 одиночными галетами. На рис. 16 представлена ВТСП-катушка (двухслойная галета) – прототип секции разрабатываемого СПИН. Эта катушка намотана лентой AMSC шириной 4,8 мм, используется косвенное охлаждение с торцов, при этом корпус играет роль хладоввода, намотка производилась по методу «слой



Рис. 16. Прототип секции СПИН – двойная галета на основе ВТСП-2-ленты



Рис. 17. Испытания прототипа секции ВТСП СПИН: а) подготовка образца к измерениям; б) проведение измерений; в) для двойной галеты при 77 К; г) для однослойной галеты при 77 К

ленты, слой изоляции». Отметим, что технология изготовления галет может быть использована для создания унифицированного модуля транспортной системы магнитной левитации. Результаты испытаний прототипа секции приведены на рис. 17. Сила токе перехода составляет 46–55 А (в собственном поле 0,4–0,26 Тл) при 77 К и 200 А (при параллельной ленте компоненте поля 1,5 Тл и нормальной компоненте 0,8 Тл) – при 30 К. Дополнительно была изготовлена малая катушка диаметром 80 мм, содержащая 104 витка AMSC-ленты. При гелиевой температуре и рабочем токе 530 А она создает магнитное поле ~ 2,5 Тл (рис. 18).

3 Работы с ВТСП объемными проводниками

Одним из перспективных для левитационных технологий направлений является использование ВТСП массивных элементов. Идеальный диамагнетизм сверхпроводника позволяет создавать устройства, в которых ВТСП-элемент отталкивается от магнитного поля, создаваемого внешним источником. В состоянии с замороженным потоком сам ВТСПэлемент становится постоянным магнитом. На протяжении десятка лет в НИИЭФА ведутся работы по исследованию свойств, характери-



Рис. 18. Испытания малой ВТСП-катушки: а) подготовка образца к измерениям; б) Т = 77 К, I_{max} = 50 A, B_{max} = 0,25 Тл; в) Т = 4,2 К, I_{max} = 530 A, B_{max} = 2,5 Тл

стик и режимов работы ВТСП массивов [4, 5]. Созданное экспериментальное оборудование (рис. 19, 20) и разработанные методики эксперимента позволяют проводить такие испытания, как измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) ВТСП материала (рис. 21); квазистационарное намагничивание ВТСП



Рис. 19. Стенд для испытаний ВТСП-массивов. Сверхпроводящий соленоид на 5 Тл

элементов (как методом замораживания потока, так и импульсом магнитного поля) (рис. 22); размагничивание ВТСП-элементов переменным магнитным полем малой амплитуды (рис. 23).

В качестве ВТСП-элемента могут быть использованы одиночные «таблетки», стоп-



Рис. 20. Контейнеры с вакуумной тепловой изоляцией для размещения ВТСП-образцов



Рис. 21. Измерение ВАХ образца в широком диапазоне температур



Рис. 22. Квазистационарное намагничивание образца методом «замороженного потока» (по данным с датчиков Холла измерительного модуля)



Рис. 23. Исследование размагничивания образца под воздействием переменного сигнала частотой 50 Гц малой амплитуды

ки «таблеток», полый цилиндр и т. д. (рис. 24, 25). Измерения могут проводиться в широком диапазоне температур (10–77 К) в магнитном поле до 5 Тл.

Заключение

Опыт НИИЭФА в разработке сверхпроводниковых систем и их компонентов (элек-

троизоляционных развязок, токовых вводов, криостатов, защитных коммутаторов) может оказаться полезным при создании СП катушек транспортной системы магнитной левитации. Развитые технологии позволяют проектировать, изготавливать и испытывать устройства, работающие в области температур от 4,2 до 77 К в широком диапазоне рабочих токов и запасаемых энергий. Технологические осо-



Рис. 24. Внешний вид ВТСП-образцов



Рис. 25. Элементы механического держателя и измерительные модули для исследования ВТСП-«таблеток»

бенности применения НТСП материалов рассмотрены на примере изготовления зарядной катушки для эксперимента с левитирующим диполем LDX. Принципы модульного построения сверхпроводниковых систем обсуждаются на примере модельного ряда НТСП СПИН. Технология разрабатываемых секций ВТСП СПИН соответствует требованиям, предъявляемым к унифицированному модулю транспортной системы магнитной левитации. Созданное в НИИЭФА экспериментальное оборудование и разработанные методики испытаний объемных ВТСП элементов могут найти применение в левитационных технологиях с ВТСП массивами.

Библиографический список

1. **Boxer, A. C.,** Bergman, R., Ellsworth, J. L. at al. (2010). Turbulent inward pinch of plasma con-

fined by a levitated dipole magnet // Nature Phys. Vol. 6, is. 3, 2007–2012.

2. **Zhukovsky, A.,** Schultz, J., Smith, B. at al. (2001). Magnet for the Floating Coil of LDX // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Vol. 11, 1873–1876.

3. Анализ многоцелевого использования сверхпроводящих индуктивных накопителей / М.С. Астров, О.Г. Филатов, В.А. Глухих и др. // Материалы I нац. конф. по прикладной сверхпроводимости НКПС-2011, 6–8 дек. 2011. – Москва : НИЦ «Курчатовский институт», 2011. – С. 384–398.

4. Экспериментальные исследования образцов массивных ВТСП материалов / В.И. Бондаренко, С.А. Егоров, Е.Р. Запретилина и др. // ВАНТ (Электрофизическая аппаратура). – Санкт-Петербург : Янус, 2006. – Вып. 4 (30). – С. 21–26.

5. Araseki, H., Bondarenko, V.I., Egorov, S.A. et al. (2008). Test Facility and Experimental Studies of Monocrystal HTS Pellet // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Vol. 18, N 2, June, 1585–1588.