УДК 538.945

Обзор

Охлаждение ВТСП магнитов твердым азотом

Д. И. Шутова

НИЦ «Курчатовский институт», площадь Академика Курчатова, д.1, 123182, Москва, Россия
e-mail: shutovadi@mail.ru

В работе приведен обзор некоторых отечественных и зарубежных публикаций за 2018–2023 гг., посвященных охлаждению сверхпроводниковых устройств с помощью твердого азота. Область возможного применения этого хорошо известного хладагента в непривычном агрегатном состоянии весьма обширна. Сегодня ученые из разных стран используют твердый азот для охлаждения ВТСП модельных магнитов авиационных двигателей, магнитных сепараторов, индуктивных накопителей энергии, скоростных поездов на магнитной подушке, ЯМР спектрометров, и др. В обзоре кратко описаны методы создания рабочих температур 10–60 K, особенности работы ВТСП устройств в твердом азоте, а также рассмотрены преимущества, недостатки и перспективы этого относительно нового способа охлаждения сверхпроводников.

Ключевые слова: твердый азот; ВТСП; хладагент; охлаждение; криокулер, магнитная сепарация, Маглев, ЯМР, СПИН; авиационный двигатель; стабильность.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-8-21

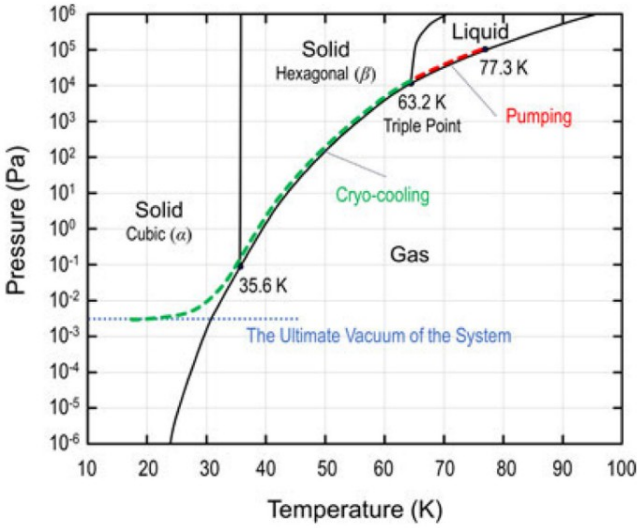
1. Введение

С появлением криокулеров и коммерческих высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) взгляд на привычную сверхпроводимость и криогенику изменился. Открываются новые горизонты и возможности. Все чаще встречаются сверхпроводящие магнитные системы без привычных жидких охлаждающих агентов. Сверхпроводящие магниты, охлаждаемые газообразным гелием до рабочей температуры 10–50 K [1,2], а также полностью «сухие» устройства различного назначения, магниты которых располагаются в вакууме, охлаждаясь только тепловыми мостами от холодных ступеней криокулеров [3,4] перестали быть экзотикой.

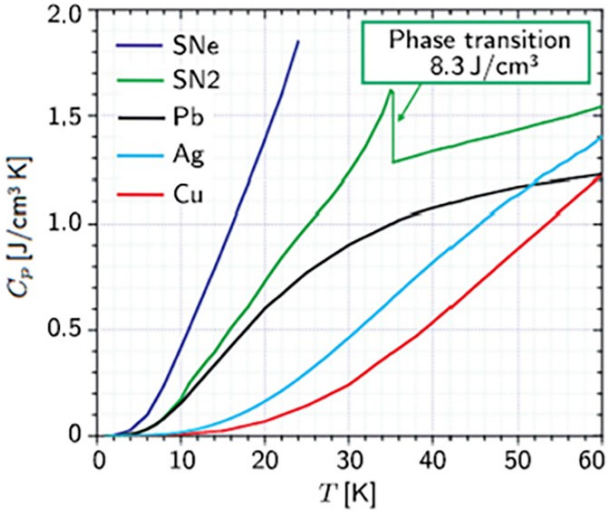
По сравнению с традиционными низкотемпературными сверхпроводниками, ВТСП магниты имеют гораздо более широкий диапазон рабочих температур. Недавно появившаяся идея охлаждения ВТСП магнитов азотом в разных фазовых состояниях вызвала резкий рост интереса ученых-конструкторов из разных стран [4–7].

Твердый азот отличается высокой теплоемкостью, малым удельным весом (в 10 раз легче меди), низкой ценой (в 50 раз дешевле гелия), экологической безопасностью, хорошими электроизоляционными свойствами и неисчерпаемостью этого природного ресурса. К примеру, неон как хладагент, хотя и имеет еще более высокую теплоемкость, по сравнению с азотом в 500 раз дороже. Жидкий водород подходит по температурному диапазону, но является взрывоопасным веществом.

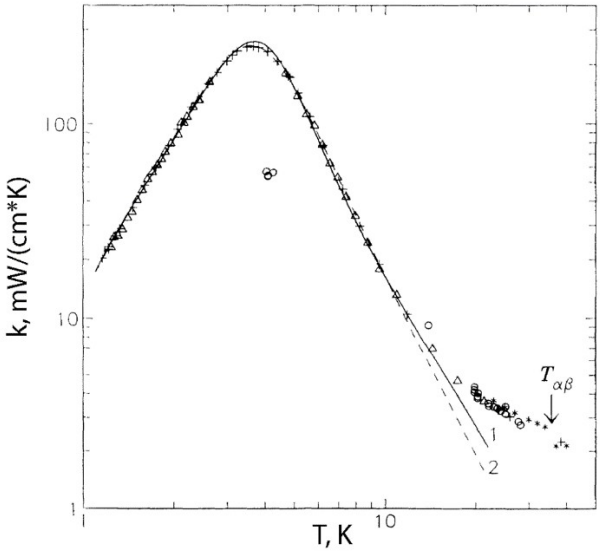
Фазовая диаграмма азота показана на рис. 1а. Твердый азот, в равновесном состоянии со своими парами, может находиться в двух кристаллографических фазах. Низкотемпературная альфа фаза ($T < 35.1$ K) пространственно упорядочена, азотный лед имеет белый непрозрачный вид. Высокотемпературная бета фаза (35.61 K $< T < 63.15$ K) дальнего порядка не имеет, кристалл прозрачен.



(a)



(b)



(c)

Рис.1. Тепловые свойства твердого азота [8,9]. (a) Фазовая диаграмма при низких давлениях и температурах. (b) Теплоемкость. (c) Теплопроводность.

Фазовый переход из одной кристаллической фазы в другую при 35.6 К имеет скрытую теплоту 8.2 Дж/см^3. Зависимости теплоемкости и теплопроводности твердого азота от температуры показаны на рис. 1b, с [8,9]. Теплопроводность и плотность твердого азота зависят от скорости охлаждения. Чтобы на начальном этапе кристаллизации получать не «кашеобразный», а прозрачный монолитный кристаллический азотный кристалл при снижении T ниже 63.15 К, нужно поддерживать скорость охлаждения среды ниже чем 0.001 К·с$^{-1}$. При работе с альфа-фазой при T ниже 35.6 К теплопроводность твердого азота по разным данным также может меняться от 0.1 Вт/(м·К) до 0.35 Вт/(м·К) в зависимости от скорости охлаждения в процессе его получения.

При температуре 50 К теплоемкость твердого азота в 1.5 раза больше, чем у типовых конструкционных металлов и сплавов. В диапазоне 20–30 К значение C_{pSN2} = 0.7–1.2 Дж/(см^3·К) уже в 6 раз выше, чем у меди. Можно оценить характерное тепловое время, за которое прогреется слой кристаллического азота, покрывающий поверхность магнита, как $\tau(T) = (C_p/k)\cdot\Delta^2$. При толщине слоя Δ = 1 см и температуре 40 К такое время составит около 12 минут. При снижении T до 20 К время прогрева сократится до 3 минут. Такие тепловые времена не противоречат возможности обеспечения более высокой термической стабильности сверхпроводников, по сравнению с магнитами, работающими в вакууме и охлаждающимися только медными тепловыми мостами. Ледяная азотная рубашка увеличивает эффективную тепловую массу магнита. Другими словами, твердый азот может одновременно играть роль как хладагента, так и теплового стабилизатора, хотя, конечно, в каждом конкретном случае эффективность теплосъема с поверхности магнита в твердый азот будет зависеть от продолжительности, мощности тепловыделений и еще целого ряда факторов.

Ниже приведён обзор некоторых работ по охлаждению и стабилизации ВТСП магнитных систем при помощи азота в разных агрегатных состояниях.

2. ВТСП роторный магнитный сепаратор, Россия, 2020 г.

Во-первых, хочется упомянуть наш домашний проект, успешно демонстрирующий возможности использования твердого азота для охлаждения ВТСП магнитных систем. В 2017–2020 гг. в Курчатовском институте был спроектирован, изготовлен и удачно испытан на сертифицированном минеральном сырье высокоградиентный магнитный сепаратор на основе ВТСП лент второго поколения [10–13]. Оригинальный дизайн криостата с криокулером позволяет использовать в качестве хладагента азот в жидком, переохлажденном или твердом состоянии, а также заменять его газообразным гелием, обеспечивая рабочую температуру магнита в диапазоне 30–70 К, см. рис. 2.

Достигнутая магнитная индукция в зазоре рабочего канала сепаратора составляла 1.3 Тл, на кассете сепарирующего барабана — 3 Тл. Оригинальная методика охлаждения позволила увеличить рабочий ток устройства в 4 раза, а индукцию магнитного поля в 1.6 раза относительно показателей при 77 К. Сборка и монтаж установки были проведены в Курчатовском институте. Результаты испытаний на промышленных образцах минерального сырья Михайловского ГОКа соответствовали промышленным требованиям при снижении энергопотребления промышленной установки до 6 раз по сравнению с резистивными аналогами. Извлеченный с помощью нашего сепаратора концентрат содержал 60.4 % общего железа при высокой степени извлечения 79.5 %, что подтвердило эффективность применения сверхпроводниковых технологий в сепарации. Кроме этого, авторы предложили методики и программы, учитывающие особенности производственного цикла по обогащению минерального сырья на действующих горно-обогатительных комбинатах. Роторная схема устройства предусматривает возможность масштабирования до промышленной производительности.

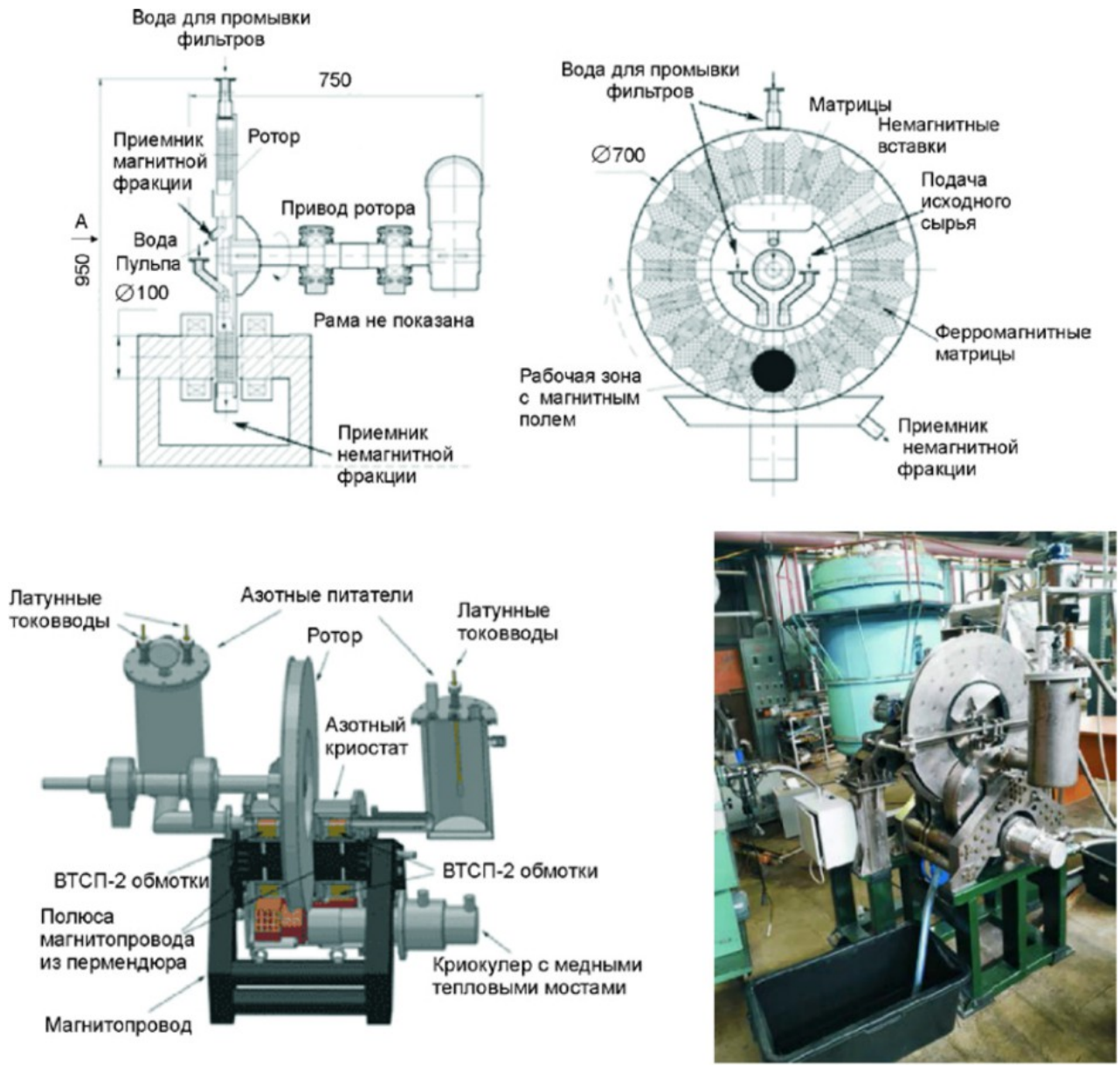


Рис. 2. ВТСП роторный магнитный сепаратор, Россия, 2020 г.
Охлаждение: криокулер + переохлажденный/твердый азот/газообразный гелий.
Рабочая температура 30–70 K [10–13].

3. ВТСП рейстреки для авиационных двигателей, Словакия, 2022 г.

В 2022 г. ученые из Института электрических инженеров Словацкой академии наук (Братислава) занимались измерением потерь на переменном токе в модельных ВТСП рейстреках для авиационных двигателей [14]. Исследование обмоток проводилось в неметаллическом криостате — рис. 3. Для охлаждения использовался жидкий и твердый азот в совокупности с криокулером RDK408. Переменный синусоидальный ток в обмотке составлял 140 A (100 A среднеквадратичное значение) частота 18–576 Гц. Температура обмотки составляла 25 K, либо 35 K.

Чтобы свести на нет влияние массивной медной холодной ступени криокулера на результат измерения потерь, холодная головка была удалена от испытуемой обмотки. Тепловые мосты и держатель обмотки выполнены из AlN керамики с высокой теплопроводностью. Магнит и тепловые мосты были дополнительно покрыты термопастой. В ходе экспериментов сборка кулера с рейстрековым магнитом размещалась в криостате, заливалась 6 л жидкого азота с последующей откачкой и понижением температуры до 64 K. Затем включался криокулер.

Минимальная зарегистрированная температура ВСТП обмотки составила 23 К. Каркас рейстрека изнутри заполнялся полыми керамическими шариками. После затвердевания азота в шариках и промежутках между ними образовывался композит с высокой теплоёмкостью и теплопроводностью. Поверх обмотки накладывалась пластина из AlN для дополнительного выравнивания температуры.

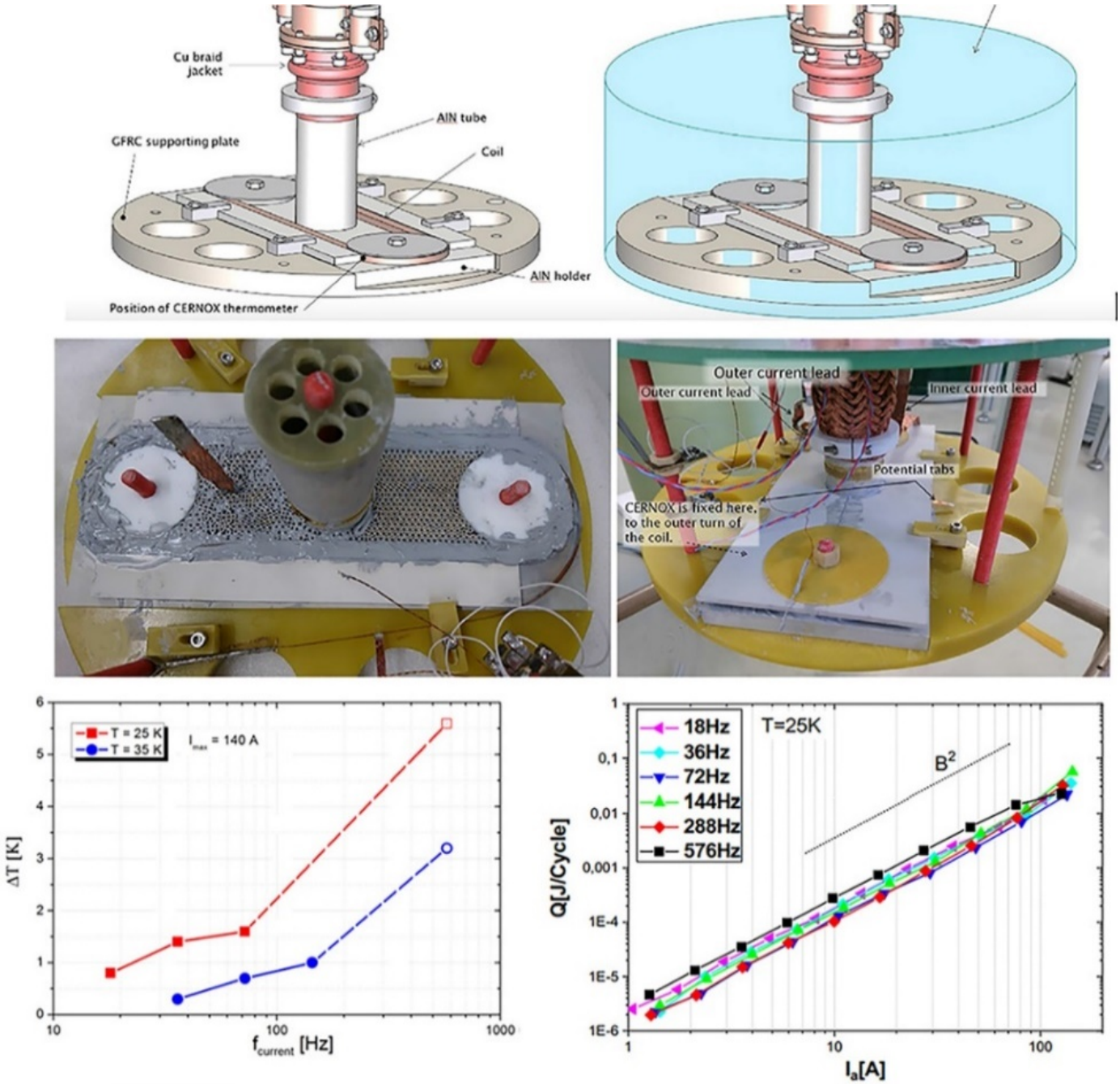


Рис. 3. Измерение потерь на переменном токе в ВТСП рейстреке авиационного двигателя в твердом азоте (Словацкая академия наук, 2022 г). Охлаждение: криокулер + твердый азот. Рабочая температура 25–35 К [14].

Первая серия экспериментов показала хороший тепловой контакт обмотки с ледяным азотом. Повторные измерения выявили ухудшение условий охлаждения. По мнению авторов основная проблема состоит в сложности сохранения хорошего контакта между обмоткой и льдом. Сначала азотный лед намерзает вокруг головки криокулера при *T* порядка 10 К. Затем постепенно обмерзает магнит, имея *T* в интервале 20–40 К. После подачи тока, тепловыделения

в обмотке постепенно плавят лед в приповерхностном слое. С течением времени формируются щели между магнитом и льдом, поверхность обмотки «высыхает». Беда в том, что единственный способ борьбы с таким ухудшением охлаждения — отогрев азота до жидкого состояния. А это долго и энергетически нецелесообразно.

В ходе экспериментов на переменном токе прирост температуры обмотки лежал в пределах 6 К, на постоянном токе изменение температуры не превышало 0.2 К. Потери за цикл, как и предсказывает теория, не зависели от частоты. Однако, был обнаружен странный результат, измеренные потери не зависели и от температуры (хотя такая зависимость согласно теории обязана прослеживаться – при магнитных полях выше поля полного проникновения в сверхпроводящую ленту снижение температуры должно приводить к росту потерь). Кроме этого, наблюдалась атипичная форма зависимости потерь от транспортного тока, что авторы объяснили слабыми магнитными свойствами хастеллоевых подложек лент.

4. Сравнительное исследование тепловой стабильности ВТСП галет при 60 К в твердом азоте, Китай, 2018 г.

Исследования китайских ученых из лаборатории Маглева Юго-западного университета Цзяотун, Чэнду, провинция Сычуань за 2018 г. посвящены изучению тепловой стабильности ВТСП обмоток из лент второго поколения в зависимости от условий охлаждения [15,16]. В качестве хладагента использовался твердый азот, либо только теплопроводность тепловых мостов, замкнутых на ступень криокулера. В работе обсуждается тепловая стабильность ВТСП проводника, а также реакция обмотки на деформацию, возникающую вследствие температурного градиента при квенче и последующем восстановлении сверхпроводящего состояния.

Испытуемая одинарная галета из 11 витков ВТСП ленты второго поколения в изоляции с проклейкой витков эпоксидной смолой, намотанная на массивную медную бобину диаметром 50 мм, размещалась в азотной емкости внутри вакуумного криостата — рис. 4. Охлаждение производилось от холодной ступени криокулера RDK 408 через медную пластину, на которой размещалась обмотка. Кулер включали одновременной с заливкой жидкого азота, без предварительной откачки паров. В ходе экспериментов в обмотку подавались тепловые импульсы от нагревателей при разных транспортных токах.

Критические энергии обмотки в твердом азоте оказались от 30 % до 150 % выше по сравнению с сухой обмоткой, охлаждаемой только тепловыми мостами. Скорость распространения нормальной зоны вдоль ленты оказалась почти на 2 порядка выше, чем поперек витков. При этом при охлаждении твердым азотом она снижалась на 20 % по сравнению с сухой обмоткой. После квенча обмотка в азоте также восстанавливалась почти в 2 раза быстрее, по сравнению с косвенно охлаждаемой. Кроме этого, использование твердого азота позволило снизить пиковое напряжение в витках обмотки при квенче до 27 %, по сравнению с сухой обмоткой. В заключении авторы делают вывод о всестороннем улучшении тепловой стабильности ВТСП обмоток за счет охлаждения твердым азотом, по сравнению с косвенно охлаждаемыми обмотками.

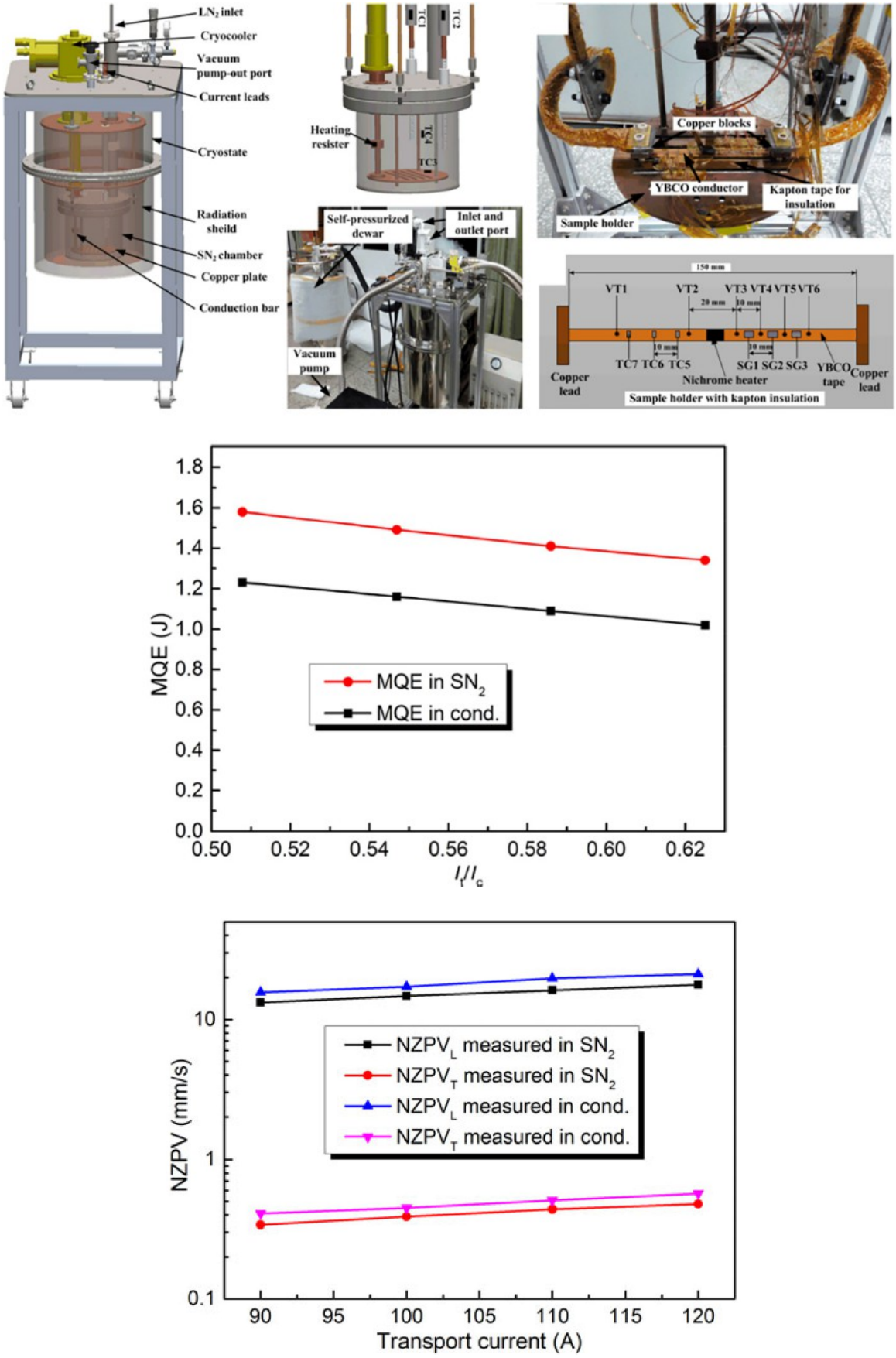


Рис. 4. Измерение критических энергий изолированных ВТСП галет в твердом азоте (Китай, 2018 г). Охлаждение: криокулер + твердый азот, либо только тепловые мосты. Рабочая температура 60 К [15,16].

5. 30 К ВТСП магнит для индуктивного накопителя энергии на 4 кДж, Китай/США, 2018 г.

Индуктивные накопители могут стать промежуточным звеном между экологически чистыми нестабильными источниками электроэнергии и конечными потребителями. Возможна комбинация, при которой сверхпроводящие накопители будут значительно продлевать срок службы литиевых аккумуляторов. Однако, внедрение крупных ВТСП накопителей в энергетику задерживается из-за проблем с защитой и тепловой стабильностью. Интересное сообщение поступило от авторов совместного проекта из Массачусетского Технологического Института США и Пекинского Университета Цинхуа. Их работа посвящена созданию прототипа индуктивного накопителя из ВТСП лент второго поколения на 4 кДж — рис. 5 [17].

Сложность конструирования индуктивных накопителей состоит в следующем противоречии. С одной стороны, полезная энергия устройства возрастает как $LI^2/2$, с другой, с точки зрения минимизации теплопритоков в криостат и нежелательного роста индуктивного напряжения в переменных режимах оба множителя должны быть минимальны.

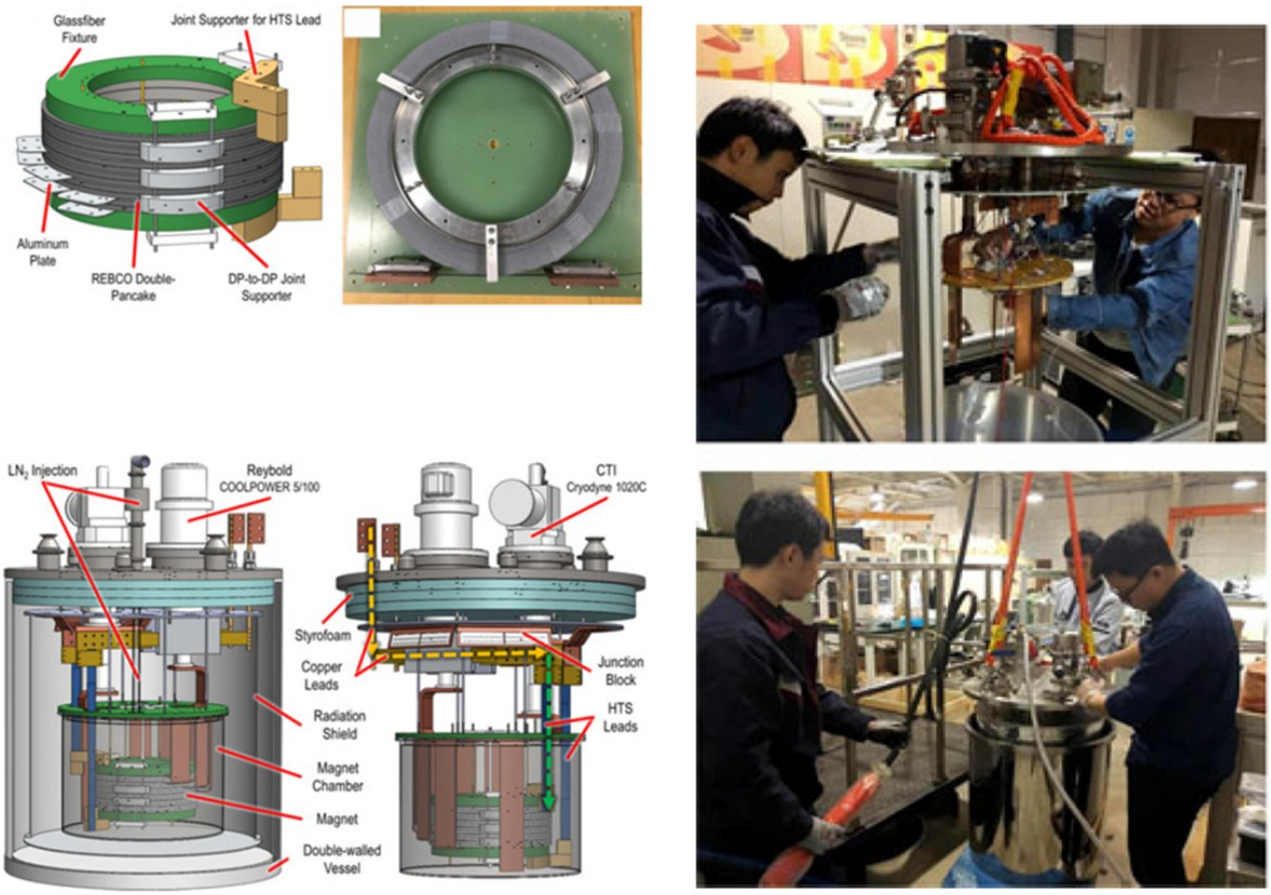


Рис. 5. ВТСП магнит для индуктивного накопителя энергии на 4 кДж (Китай/США, 2018 г). Охлаждение: 2 криокулера + твердый азот. Рабочая температура 18–30 К [17].

Исследовался магнит из 4.5 мм ВТСП ленты второго поколения производства Shainghai Superconductor с медным стабилизатором и каптоновой изоляцией. Магнит, с параметрами оптимизированными под максимально возможную накопленную энергию, состоял из 6 двойных галет. Общая длина провода составляла 500 м. Рабочая температура в 30 К достигалась при помощи 2-х криокулеров Cryodyne 1020 °C с развитыми медными радиаторами на холодной ступени, продетыми в азотную емкость с магнитом, вакуумного криостата с экраном и ВТСП токовводами. Азотный объем сначала скачивался для устранения влаги, затем доверху заливался

азотом, и откачкой охлаждался до тройной точки, после чего включались криокулеры. Минимально достигнутая температура обмотки — 18 K. Время захолаживания — 35 часов. Фазовый кристаллический переход при 35.6 K и давлении 0.1 Па занял примерно 3 часа. Исследуемый магнит вышел на расчетные параметры. Авторы подчеркивают, что твердый азот в их конструкции играл роль пассивной тепловой защиты магнита от преждевременных переходов в нормальное состояние.

6. ВТСП рейстреки на базе портативных холодильных батарей с твердым азотом для Маглева, Южная Корея, 2021 г.

Маглев — поезд на магнитной подушке, использующий при движении эффект магнитной левитации. Он удерживается в нескольких миллиметрах над полотном железной дороги и разгоняется силой электромагнитного поля, не касаясь рельса. Скорость, достигаемая поездом на магнитной подушке, сравнима со скоростью самолёта и позволяет составить конкуренцию воздушному транспорту на ближних и среднемагистральных направлениях (до 1000 км). Пока экономические ограничения не позволяют ей развернуться в полной мере.

Принцип работы сверхпроводникового Маглева заключается в следующем. Под днищем вагона крепятся сверхпроводящие магниты в сантиметрах от П-образного стального полотна — рис. 6. Электродинамический подвес основан на отталкивании сверхпроводящих магнитов поезда от немагнитной путевой структуры. Эта система принципиальна устойчива. Зазор между поездом и рельсом может доходить до 150 мм [18]. Поступательное же движение поезда осуществляется линейным синхронным двигателем: поочерёдно включаются обмотки статора, создавая бегущее магнитное поле. Статор поезда втягивается в это поле и движет весь состав по принципу осла, бегущего за привязанной впереди него морковкой.

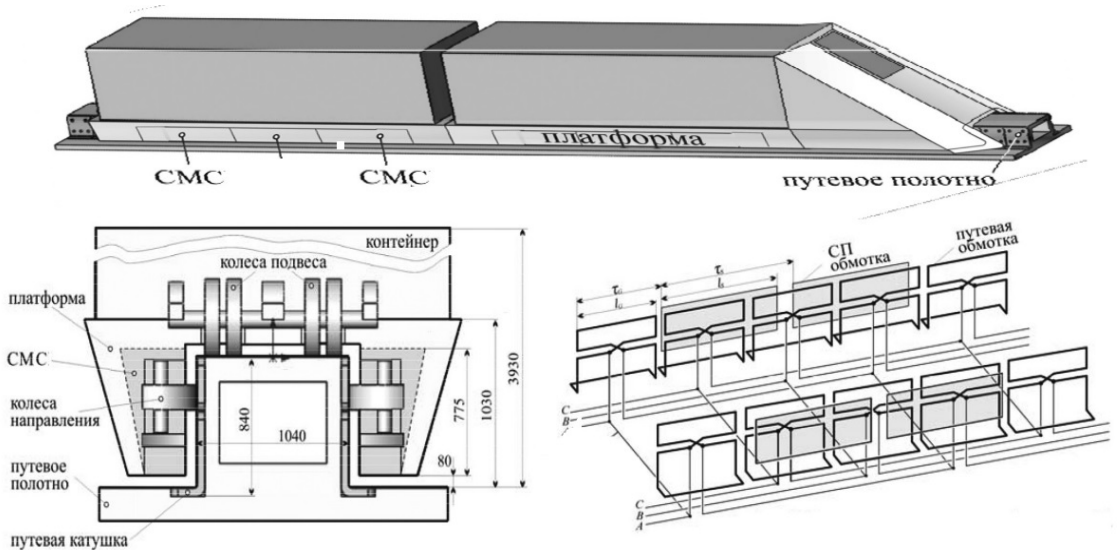


Рис. 6. Принцип действия Маглева [18].

Идея ученых из Чанвонгского Национального университета состоит том, чтобы заменить громоздкую систему охлаждения ВТСП магнитов в вагонах на холодильные батареи с твердым азотом [19] — рис. 7. Авторы полагают, что, учитывая высокую скорость будущих поездов, запаса холода твердого азота хватит, чтобы удержать температуру ВТСП магнитов в разрешенных пределах на перегонах между станциями.

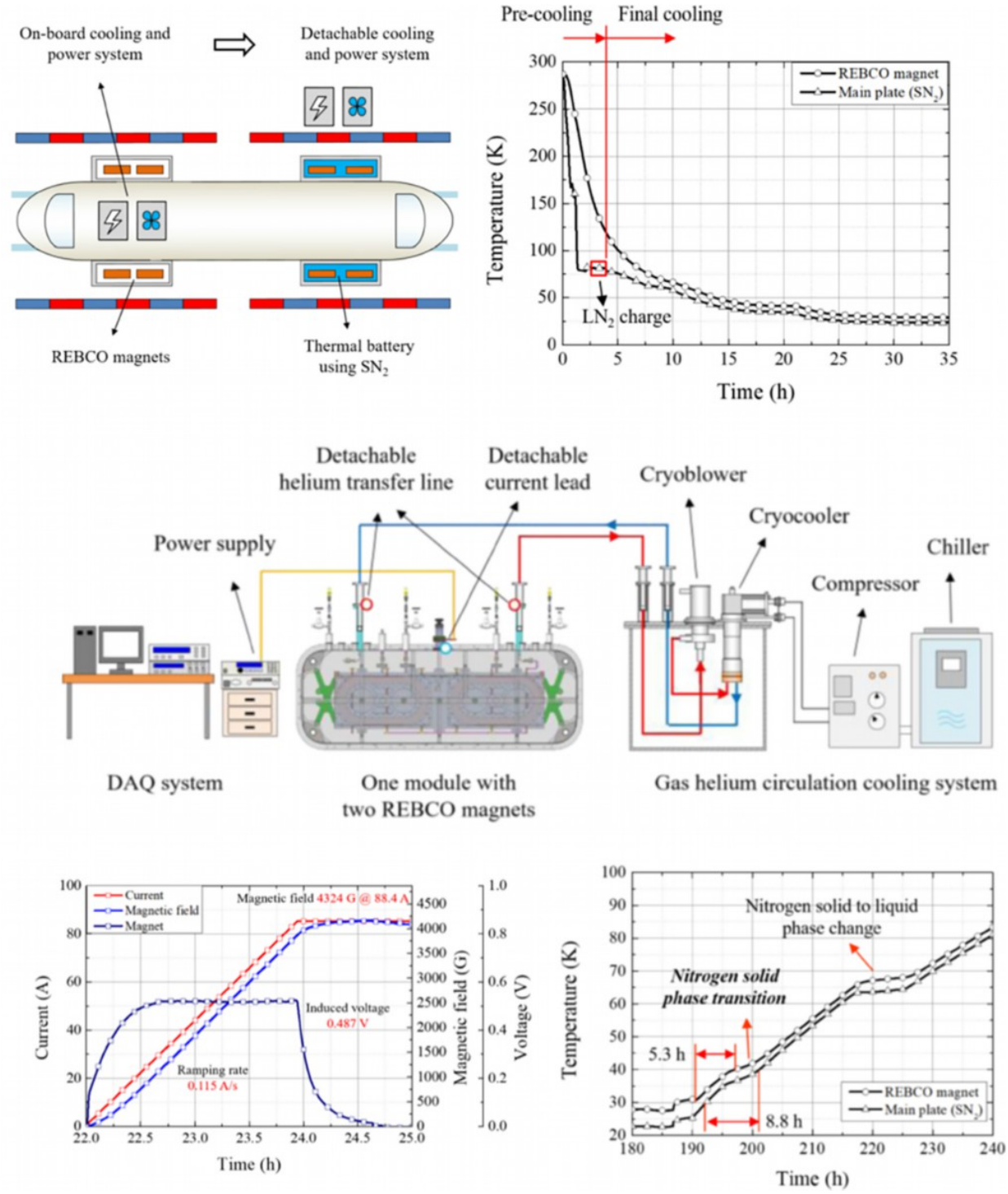


Рис. 7. ВТСП рейстреки Маглева (Южная Корея, 2021 г). Охлаждение: удаленная отстыковывающаяся циркуляционная система на газообразном гелии с криокулером + портативные холодильные батареи с твёрдым азотом. Рабочая температура 30 K [19].

Испытывался рейстрек половинного, по сравнению с настоящим магнитом Маглева размера, намотанный из 4 мм ВТСП ленты второго поколения. Рабочий ток магнита 85 А, критический ток ленты при 77 K — 230 А. Рейстрек намотан с металлической изоляцией (резистивно связанные витки) и был оснащен отстыковывающимися токовводами и ключом для работы в режиме замороженного потока.

Система охлаждения с криокулером монтировалась отдельно от криостата с рейстреком и подавала охлажденный газообразный гелий, циркуляция которого приводила к постепенному

охлаждению и заморозке азота. Захолаживание заняло 30 часов. Температура магнита установилась на уровне 30 К. Запас твердого азота составлял 25 кг, полная тепловая нагрузка на криостат равнялась 10 Вт, из которых только 0.3 Вт генерировались самим магнитом, остальное — теплопритоками по подвесам.

После отстыковки токовводов и системы охлаждения температура магнита без тока держалась ниже 40 К в течение 5.3 часов. При повторе экспериментов с магнитом на полном токе в режиме замороженного потока время автономной работы составило чуть больше 4.4 часа, при этом температура магнита не превышала 40 К. Разница температур между несущей плитой и магнитом составляла 5 К. Причина ее появления — тепловое сопротивление на границе обмотка / лед, по-видимому, та самая щель между обмоткой и льдом, о которой пишут многие исследователи. В заключении авторы добавляют, что это негативное явление можно преодолеть, улучшая тепловой контакт между обмоткой и твёрдым азотом при помощи тепловых мостов в виде плавников. В настоящее время корейская команда работает над полномасштабным рейстреком для Маглева. Исследования продолжаются.

7. ВТСП галетная вставка в гибридный ЯМР спектрометр с суммарным магнитным полем 30.53 Т (1.3 ГГц/6 К), США, 2021 г.

Профессор Иваса — известный специалист в области прикладной сверхпроводимости, вот уже более 10 лет руководит созданием сверхпроводящих ядерных магнито-резонансных (ЯМР) спектрометров ультравысокого разрешения в лаборатории Фрэнсиса Биттера Массачусетского Технологического Института во Флориде, США. В ходе проекта был создан и испытан ряд комбинированных ВТСП + НТСП магнитных систем для ЯМР спектроскопии с полями выше 30 Т. Интересной особенностью проектирования очередной внутренней ВТСП секции такого магнита является ее охлаждение твердым азотом [20].

Проект ЯМР магнита, опубликованный в 2021 г., представляет собой комбинацию внешней НТСП секции на 10.93 Т и внутренней ВТСП вставки второго поколения с наружным диаметром 212 мм, теплым отверстием Ø 5.5 мм и собственным магнитным полем 19.6 Т, при минимальном криттоке 330 А / 4.2 К — рис. 8. Требуемые пространственная и временная стабильности должны составлять < < 0.01 млн$^{-1}$ в сфере 1 мм и < 0.01 млн$^{-1}$/ч. Такая точность может быть достигнута только при помощи дополнительных шимирующих обмоток.

Предыдущая изготовленная ВТСП вставка из 96 двойных галет 2 поколения была намотана без изоляции и сгорела при первом испытании, достигнув поля 18 Т. Анализ повреждений показал, что разрушение обмотки было вызвано в первую очередь механическим повреждением ленты, а не ее перегревом. Проект новой улучшенной модели ВТСП секции отличается наличием металлической межвитковой изоляции (для ускорения ввода тока в обмотку и снижения наведенных токов при квенче, а следовательно и возникающих механических напряжений), а также сниженной до 4 мм шириной ВТСП ленты, вместо прежних 6 мм (для уменьшения нежелательных экранирующих токов). Кроме этого, в обмотку между галетами планируют ввести отсутствовавшие ранее тепловые мосты для сброса тепла в твердый азот и нагреватели для защиты обмотки при переходе в нормальное состояние.

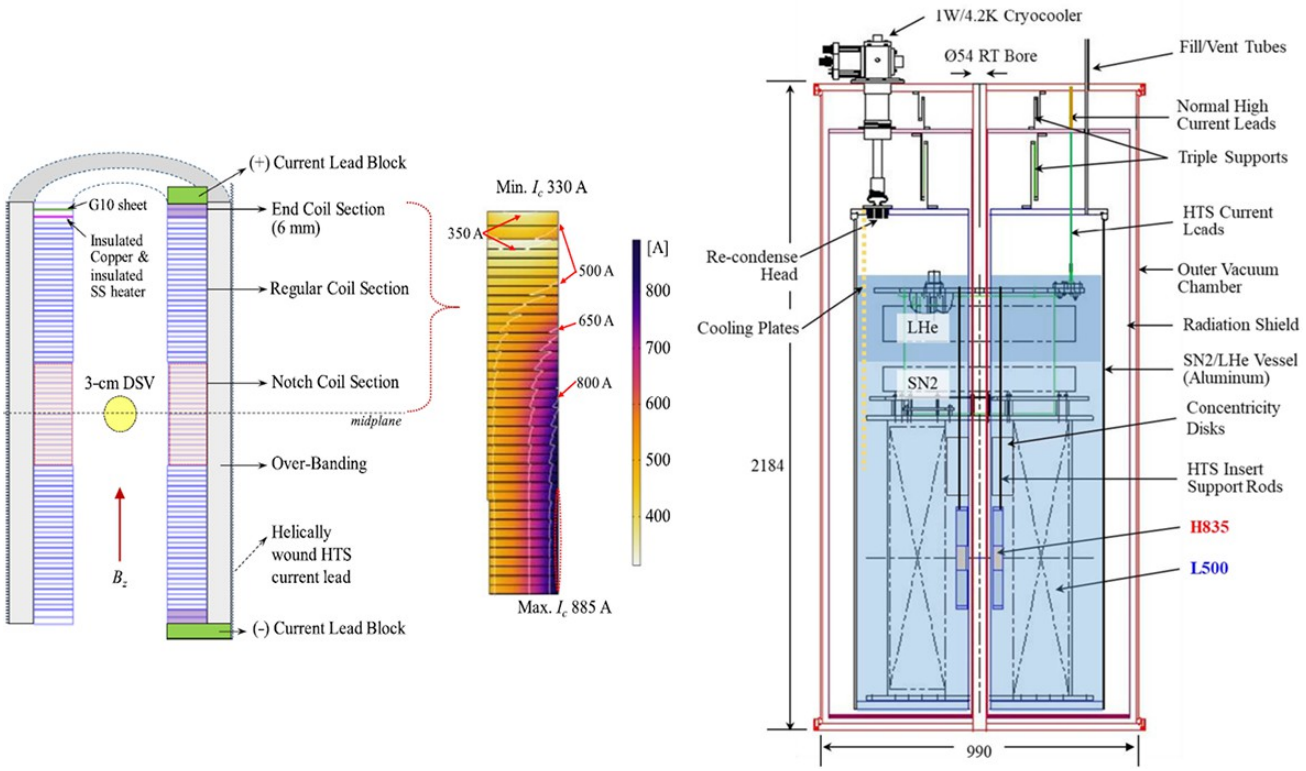


Рис. 8. Комбинированный ЯМР магнит на 30.53 Т (США, 2021 г). Охлаждение: жидкий гелий или твердый азот с криокулером. Рабочая температура 6 К [20].

Испытательный криостат будет оснащен одним криокулером с холодопроизводительностью 1 Вт/4.2 К, тепловыми мостами с развитой поверхностью, тепловым экраном и алюминиевым внутренним объемом с размещенным двухсекционным магнитом, который может заполняться либо жидким гелием, либо твердым азотом. Переход к азоту позволяет расширить диапазон температур, чтобы экспериментировать с подавлением нежелательных экранирующих токов при испытаниях только ВТСП секции, а также частично снимает проблему диамагнитного захвата пузырьков гелия в сильных магнитных полях и снижает рост давления в криостате при квенче. Изготовление магнита продолжается в настоящее время. Будем с интересом следить за результатами.

8. Выводы

1. Исследования метода охлаждения ВТСП обмоток второго поколения твердым азотом ведутся во всем мире. Особенный всплеск интереса наблюдался в 2018 г. Именно тогда вышло наибольшее количество публикаций. В последние годы публикаций на эту тему стало заметно меньше. То ли разочаровались, то ли патентуют.
2. Все работы свидетельствуют об успешном охлаждении магнитов твердым азотом вплоть до температуры 10 К. Магниты выходят на расчетные критические параметры.
3. При температуре 20–30 К теплоемкость твердого азота в 6 раз выше теплоемкости меди. Использование твердого азота значительно увеличивает эффективную тепловую массу магнита. Критические энергии магнитов в твердом азоте возрастают до 1.5 раз, по сравнению с точно такими же обмотками, имеющими только косвенное охлаждение по тепловым медным мостам от криокулера в вакууме.
4. Скорость распространения нормальной зоны в магнитах теплостабилизированных твердым азотом снижается на несколько десятков процентов, по сравнению с косвенно охлаждаемыми обмотками.

5. Переход к твердому азоту частично снимает проблему диамагнитного захвата пузырьков гелия в сильных магнитных полях, приводящему к образованию тепловой «шубы» на магните и ухудшению теплопередачи в хладагент, а также позволяет избежать лавинного рост давления в криостате при квенче.

6. Нерешенная проблема, связанная с использованием твердого азота, заключается в постепенном «высыхании» ВТСП обмотки под действием внутренних тепловых возмущений, образовании щелей между азотным льдом и магнитом, и как следствие, постепенным ухудшением интенсивности теплосъёма. Решением может быть оснащение обмотки холодопроводами в виде плавников, для улучшения теплового контакта с твердым азотом.

7. При условии механической защиты капризного ВТСП слоя лент от прямого контакта со льдом, использование твердого азота будет удачным дополнением при конструировании криостатов с косвенным охлаждением сверхпроводящих магнитных систем.

8. Использование предварительно замороженных холодильных батарей с твердым азотом может сделать возможным изготовление портативных сверхпроводящих магнитных систем со сроком работы ~ 5 часов.

Благодарности

Настоящая работа выполнена в рамках тематического плана НИЦ «Курчатовский институт» на 2024 год. Автор выражает благодарность коллегам из Отдела сверхпроводниковых, криогенных и магнитных технологий, принимавших участие в совместной работе над сверхпроводниковым высокоградиентным магнитным сепаратором.

Литература

[1] E. Sheehan, et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **278**, 012182 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/278/1/012182

[2] O. P. Anashkin, et al., Cryogenics, **42**, 295 – 297 (2002). DOI: 10.1016/S0011-2275(02)00037-1

[3] H. Miyazaki, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **27**, 4, 4300805 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2017.2656858

[4] L. Liu, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **28**, 8, 6602905 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2872818

[5] J. Ling et al., Supercond. Sci. Technol., **30**, 024011 (2017). DOI: 10.1088/1361-6668/30/2/024011

[6] Y. Iwasa, Supercond. Sci. Technol., 30, 053001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6668/aa5fed

[7] T. Nakamura, et al., Physica C, **372**, 1434 – 1437 (2002). DOI: 10.1016/S0921-4534(02)01047-X

[8] Y. Iwasa, Case studies in superconducting magnets — design and operational issues. 2nd ed New York: Springer (2009).

[9] P. Stachowiak, et al., Phys. Rev. B, **50**, 54 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevB.50.543

[10] Diev D.N., et al., Physics of Atomic Nuclei, **81**, 11, 1554–1562 (2018). DOI: 10.1134/S1063778818120037

[11] D. N. Diev, et al., REBCO split coil magnet for high gradient magnetic separation // Proc. 27th ICEC & ICMC, Oxford, England, 3-7th September 2018, 502, 012105 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/502/1/012105

[12] D. N. Diev, et al., Prog. in Supercond. and Cryogen., **20**, 4, 1-5 (2019). DOI: 10.9714/2018.psac.2018.20.4.001

[13] Д. Н. Диев и др., Черная металлургия, **76**, 11, 1097-1106 (2020). DOI: 10.32339/0135-5910-2020-11-1097-1106

[14] J. Kováč, et al., Scientific Reports, **12**, 16454 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-20625-6.

[15] L. Liu et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **28**, 4, 4603705 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2814741

[16] L. Liu, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **28**, 8, 6602905 (2018). DOI:10.1109/TASC.2018.2872818

[17] Y. Li, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **28**, 4, 4603606 (2018). DOI:10.1109/TASC.2018.2814960.
[18] Е. Ю. Клименко, В. И. Омельяненко, Локомотив-информ, **01-02**, 41-47 (2017).
[19] J. Mun, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **31**, 5, 3601405 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3060692
[20] D. Park, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **31**, 5, 300206 (2021). DOI:10.1109/TASC.2021.3064006

Cooling of HTS magnets with solid nitrogen

D. I. Shutova

National Research Centre “Kurchatov Institute”, Kurchatov Sq. 1, 123182, Moscow, Russia
e-mail: shutovadi@mail.ru

The review summarizes some domestic and international publications for 2018–2023 devoted to the cooling of superconducting devices by means of solid nitrogen. The scope of possible application of this traditional coolant in an unusual phase condition is very extensive. Today, scientists from different countries use solid nitrogen to cool prototypes of high-temperature superconducting magnets intended for electric aircraft motors, magnetic separators, inductive energy storage devices, high-speed Maglev trains, NMR spectrometers, etc. The review briefly describes methods for creating an operating temperature of 10–60 K, the main characteristics of HTS devices in solid nitrogen, as well as pros & cons and prospects of this relatively new solution in cryogenics.

Keywords: solid nitrogen; HTS; cryogenics; cooler, magnetic separation; Maglev; NMR; SMES; aircraft motor; stability.

Шутова Дарья Игоревна — к.ф.-м.н., научный сотрудник Национального Исследовательского Центра «Курчатовский Институт».
Dr. Darya I. Shutova — Researcher, National Research Centre “Kurchatov Institute”.