Информационный бюллетень
СВЕРХПРОВОДНИКИ для электроэнергетики
Исследовательские центры Фирмы Инвесторы
Провода Кабели Генераторы Накопители
Трансформаторы Токоограничители
Том 9 выпуск *1*
март 2012

ВТСП УСТРОЙСТВА

ВТСП материалы для физики высоких энергий (обзор некоторых зарубежных публикаций на начало 2012 г.)

1. 2G квадруполь для установок получения ионных пучков редкоземельных изотопов (США).

Обмотки квадруполей в ионных установках подвержены большим тепловым нагрузкам (более 200 Вт), и сильному ионизирующему излучению (~ 10 мегаГрей в год - 1 Грей = 1 Дж/кг). Поэтому использование ВТСП полезно в силу высоких рабочих температур (~ 30 - 50 К) и, следовательно, большей теплопоглощающей способности (обычные НТСП материалы при температурах 4-10 К имеют крайне низкую теплоемкость, и небольшого теплового возмущения может быть достаточно, чтобы вызвать преждевременный переход в нормальное состояние).

Несколько лет назад американские ученые из Брукхевенской национальной лаборатории совместно с Мичиганским Госуниверситетом США спроектировали, изготовили и успешно испытали 10 Тл/м BSCCO-2223 ВТСП квадруполь с апертурой в 290 мм и рабочей температурой ~ 30 К для ускорителя редкоземельных изотопов (Rare isotope accelerator - RIA).

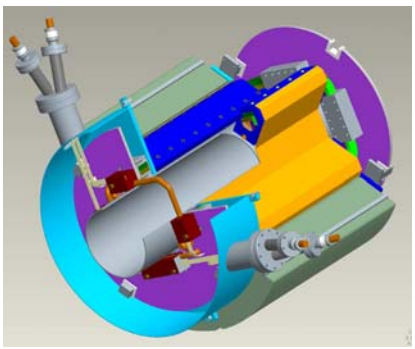
В настоящее время проект получил развитие, и начата разработка квадрупольного магнита на основе 12 мм 2G YBCO ленты (Super-Power/American Superconductor) для получения мощных пучков редкоземельных ионов (Facility for rare isotope beams – FRIB), которая станет частью Национальной сверхпроводниковой циклотронной лаборатории [1]. Согласно планам, с ее помощью для исследовательских целей будут получены пучки с энергиями порядка 600 МэВ для протонов и 200 МэВ/а.е.м. для ионов. В этом квадруполе планируется уже более высокая рабочая температура ~ 50 К для увеличения стабильности обмоток, подвергающихся серьезным тепловым нагрузкам ~ 5 кВт/м3. Запланировано изготовление нескольких двухслойных YBCO катушек почти прямоугольной формы (по 110-165 витков в каждом слое) с резистивно-связанными витками. Будут использованы ленты, ламинированные нержавеющей сталью, поскольку нержавеющая сталь гораздо более стойка к ионизирующим излучениям, по сравнению с каптоном, эпоксидной смолой и прочими органическими изоляторами.

Параметры проектируемого квадруполя: длина - 880 мм, наружный диаметр теплого железного ярма - 720 мм, продольное поле - 1,9 Тл, поперечное – 1,6 Тл, градиент поля - 15 Тл/м, I_c=400 А (2Тл,40К), I_c=280 А (2Тл, 50К), номинальный рабочий ток - 280 А, индуктивность - 1 Гн, запасенная энергия - 37 кДж.

И далее…

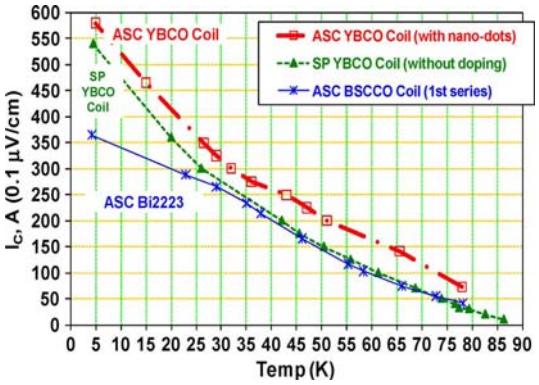
ВТСП И НТСП УСТРОЙСТВА

Использование сверхпроводниковых устройств в космической отрасли 8



а

б

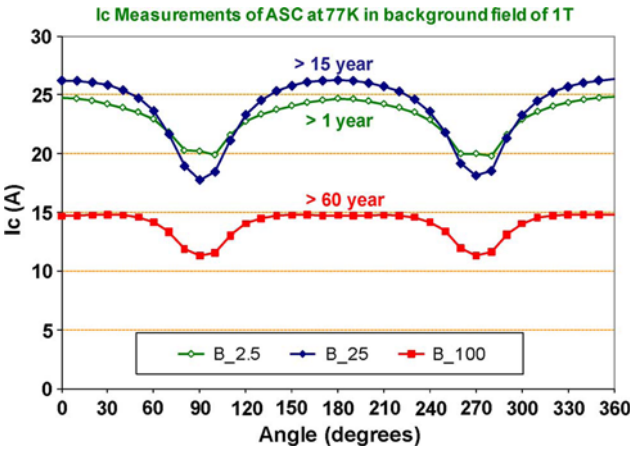


в

Рис.1. Проект установки для получения мощных пучков редкоземельных ионов (Facility for rare isotope beams – FRIB) – а; модельные катушки на основе YBCO – б; их критические свойства - в.

Параллельно в Брукхевене проведены исследования изменений критических свойств YBCO лент при длительном облучении протонными пучками с энергией порядка 140 МЭв.

На Рис. 2 показаны критические токи лент при 77 К American Superconductor (ASC) и SuperPower в зависимости от ориентации магнитного поля величиной в 1 Тл. Обозначения на графиках B_2.5, B_25, B_100 означают интегральные дозы излучения, эквивалентные продолжительности работы установки FRIB от 1 до 60 лет (например, 15 годам - B_25 соответствует доза в 10^{17}протон/см^2). В отсутствии магнитного поля ленты обоих производителей имеют одинаковую радиационную стойкость. Но при наложении поля, как видно на Рис. 2, они значительно отличаются.



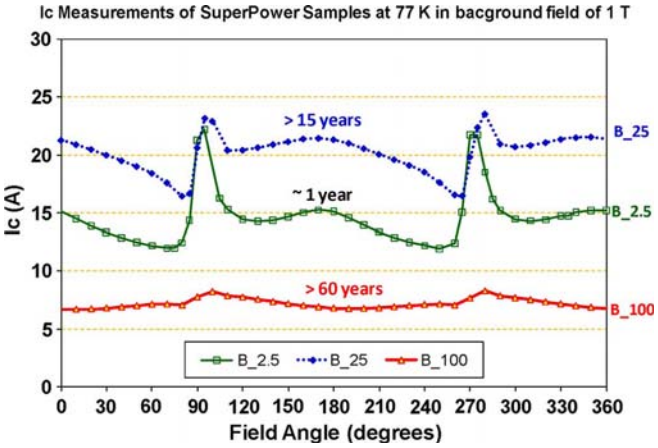


Рис. 2. Влияние ионизирующего излучения на критические свойства лент при 77 К: ASC (верхний Рис. 2) и SuperPower (нижний Рис. 2) при разной ориентации поля в 1 Тл.

Пока участники проекта испытали 6 прямоугольных YBCO катушек (4 из ленты ASC и 2 из ленты Superpower) с параметрами как у первого 1G-проекта RIA (результаты экспериментов на Рис.1.в) – по банальной причине – они были изготовлены до начала проекта FRIB по технологии, отработанной для 1G. Поскольку эти катушки были изготовлены достаточно давно, и с тех пор критические свойства лент значительно выросли, авторы полагают, с что с новыми лентами им удастся достигнуть еще больших результатов.

Главное же утверждение разработчиков сводится к тому, что использование новых ВТСП материалов являются идеальным решением для борьбы с большими радиационными и тепловыми нагрузками и дает ряд преимуществ по сравнению НТСП проводниками.

2. 2G диполь для изохронных циклотронов медицинского назначения (Китай).

Широкое применение радионуклидов в современной медицине создало на рынке такую ситуацию, когда спрос на эту продукцию оказался гораздо выше предложения. Всплеск интереса медиков к изотопам объясняется высокой эффективностью их применения в диагностике.

Один из способов получения медицинских изотопов – при помощи циклотрона. В сообщении китайских ученых из Университета Науки и Технологии Хуажонг [2] обсуждается концепция ВТСП магнита с теплым железным ярмом для небольшого циклотрона (диаметром менее 1 м) с энергией протонного пучка ~ 20 МэВ, позволяющая получать изотопы прямо в больничных условиях.

В статье приведены расчетные параметры дипольного магнита из галет на основе ВТСП лент SuperPower SCS4050 шириной 4 мм. Циклотрон имеет теплое железное ярмо, магнитная индукция в зазоре составит 2,2 Тл, радиус траектории частиц - 300 мм, рабочий ток - 200А при температуре 22 К (охлаждение косвенное, от криокулера). Использование железного ярма позволит добиться хорошей однородности и высокого градиента магнитного поля, а также частично подавить перпендикулярную компоненту B, снижающую критические свойства лент.

В статье много слов об оптимизации устройства по цене и энергоэффективности, выполнен ряд оптимизационных расчетов. Однако описание конструкции, конкретные свойства галет и степень готовности устройства носят крайне туманный характер. Тем не менее, авторы сообщения в заключении резюмируют, что предложенная концепция вполне жизнеспособна и (хоть пока и на бумаге) позволяет существенно поднять рабочие характеристики и снизить габариты маломощных циклотронов, по сравнению с устройствами на обычных электромагнитах.

3. Концепт YBCO-ондулятора для лазеров на свободных электронах (США).

Еще одна область потенциального использования ВТСП – ондуляторы. Эти устройства служат рабочими лошадками в целом ряде применений – главным образом для задач материаловедения. Магниты, из которых собран ондулятор, могут быть обычными электромагнитами, постоянными, либо сверхпроводниковыми. Использование последних может открыть некоторые перспективы - в частности для лазеров на свободных электронах.

В отличие от газовых, жидкостных или твердотельных лазеров, где электроны возбуждаются в связанных состояниях, здесь источником излучения является пучок электронов в вакууме, проходящий сквозь ондулятор (ряд расположенных специальным образом магнитов), заставляющий электронный пучок двигаться по синусоидальной траектории. При этом потеря энергии электронным пучком создает поток фотонов. Малый период ондулятора важен при генерации жесткого синхротронного излучения.

В настоящее время в мире разрабатывается и используется ряд ондуляторов, позволяющих получать синхротронное излучение в диапазоне от мягкого до жесткого рентгена и широким спектром свойств фотонного пучка (приведенная формула определяет связь между длиной волны испускаемых фотонов λ_R, периодом ондулятора λ_u и индукцией магнитного поля B_0.

$$\lambda_R\ [\text{Å}] = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}\left(1+\frac{K^2}{2}\right) \approx 13.056\,\frac{\lambda_u\ [\text{cm}]}{(E\ [\text{GeV}])^2}\left(1+\frac{K^2}{2}\right)$$

$$K = \frac{e\cdot B_0\cdot\lambda_u}{2\pi\cdot m_0 c} \approx 93.36 B_0\ [\text{T}]\cdot\lambda_u\ [\text{m}]$$

В Национальной лаборатории Беркли, США (LBNL) предложена концепция сверхпроводникового ондулятора для лазеров на свободных электронах на основе YBCO лент при 4,2 К [3]. Главное преимущество концепции - это узкий канал (2 мм) и крайне малый период ондулятора (от 5 до 10 мм) - приведены расчетные значения, реальное устройство пока отсутствует.

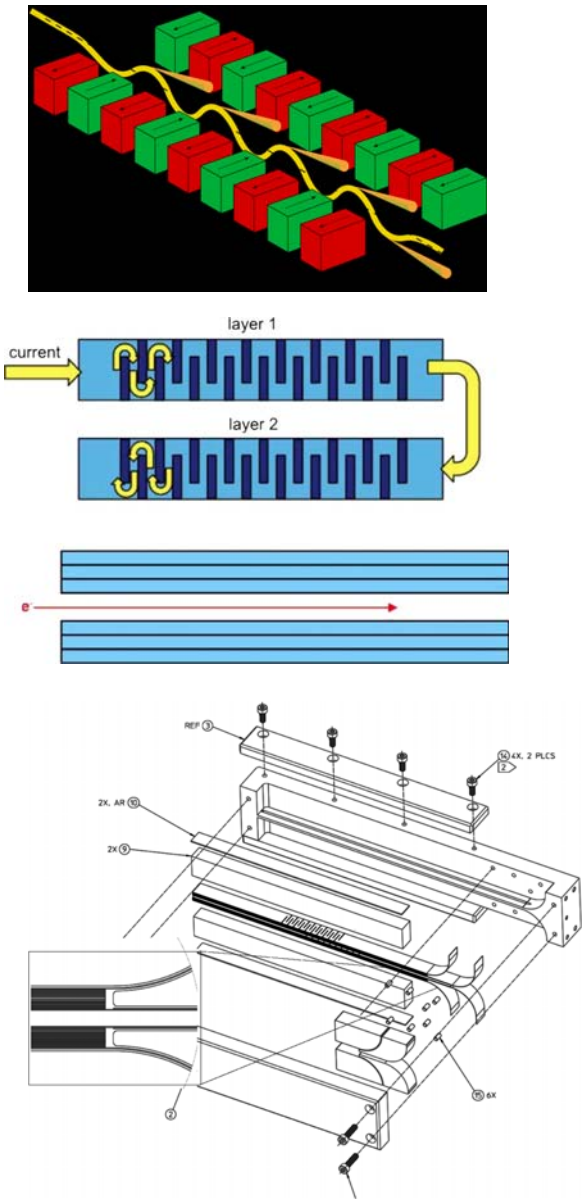


Рис. 3. Концепция сверхпроводникового YBCO ондулятора для лазеров на свободных электронах.

Идея заключается в вытравлении ВТСП слоя в стандартной ленте по строго заданному шаблону методом фотолитографии (Рис. 3). Благодаря такой процедуре ток в ленте течет «змейкой», генерируя переменное магнитное поле, близкое к синусоидальному. Вытравленные таким образом ленты можно складывать в пачки, соединяя последовательно и изолируя друг от друга. Ток достигает конца ондулятора и по спаю перетекает в следующую ленту, вытравленные участки на которой сдвинуты по фазе на 180^0 относительно предыдущей. В результате поперечные вклады поля от каждого слоя складываются (правда, малый коэффициент заполнения по сверхпроводнику накладывает существенные ограничения на эффективность сбора пачек).

По мнению авторов, главным преимуществом является высокая точность литографии, которая обеспечить строгую периодичность ондулятора (в противном случае - если путь, проходимый электроном в каждом полупериоде, будет варьироваться по длине ондулятора, длина волны фотонного пучка также будет меняться в каждом полюсе, что радикально ухудшит характеристики устройства). Метод позволяет добиваться очень высокой точности вытравливаемых форм и может быть использован на больших длинах (в отличие от механических методов, для которых с возрастанием длины куска набегает ошибка в периоде), а также позволяет обрабатывать несколько лент одновременно, что существенно снижает стоимость операции. На Рис.4 показан вытравленный участок (черная область) в YBCO слое, а также маска для одновременного травления многих лент.

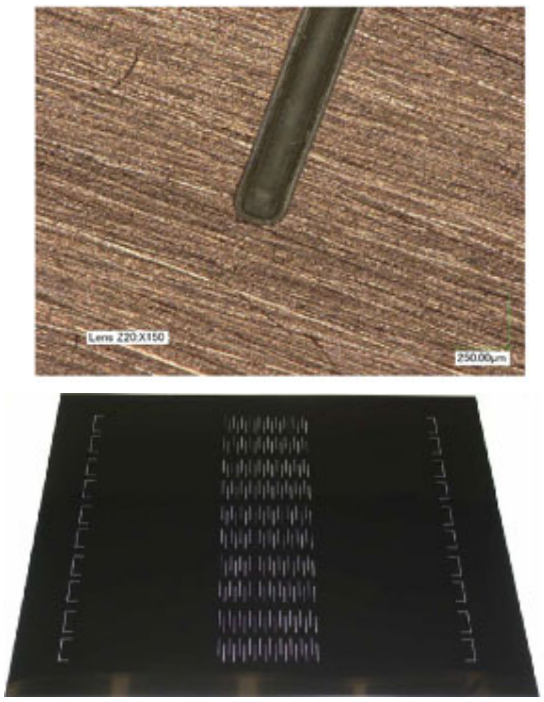


Рис.4. Вытравленный участок YBCO слоя и маска для травления многих лент одновременно.

После прочтения публикации возникает ряд технических вопросов:

1. С одной стороны, авторы хотят сыграть на высокой токонесущей способности YBCO лент в низких полях и при низких температурах. Критическая плотность тока самого ВТСП слоя составляет ~ $1\text{-}5\cdot10^5$ А/мм^2, что значительно больше, чем могут обеспечить коммерческие низкотемпературные композитные сверхпроводники, хотя низкий поперечный коэффициент заполнения ленты по сверхпроводнику (обычно не более 1%), конечно, серьезно снижает инженерную плотность тока до уровня НТСП, и тогда использование ВТСП дает единственные преимущества в виде высоких значений критического поля и температуры. Однако в сообщении отсутствует какая-либо информация о том, как химическое стравливание части ВТСП слоя влияет на критические свойства ленты.

2. Нужно разработать способ последовательного соединения модулей.

3. В установке предусматривается косвенное охлаждение, и весь ВТСП модуль планируют размещать в ультравысоком вакууме, что накладывает жесточайшие требования на выбор изоляции (которая не должна «газить»), технологию изготовления многочисленных спаев (с которых как-то нужно снимать тепло) и т.д.

Предложенный концепт интересен, но пока находится на стадии идеи и потребует последующей детальной проработки.

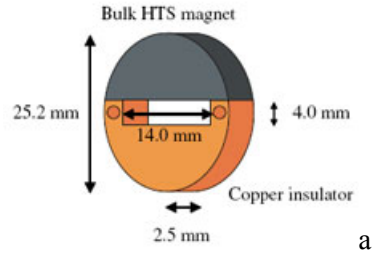
4. Ондулятор на основе массивных ReBCO элементов (Япония).

В продолжение темы ВСТП ондуляторов – гораздо более основательное сообщение японских ученых из Киотского университета [4], которые предлагают альтернативную конструкцию ондулятора из 11 массивных REBCO полюсов, сложенных в шахматном порядке, которая была разработана, изготовлена и успешно испытана при 77 К (для 20 К пока сделаны расчетные оценки).

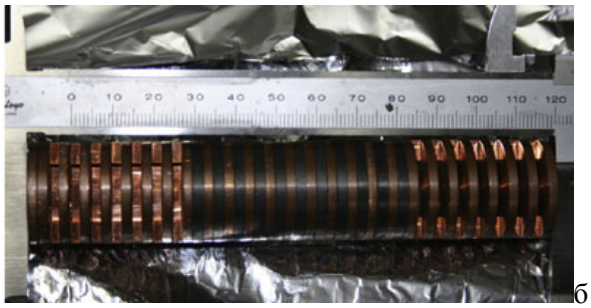
Проблемой НТСП ондуляторов является высокая тепловая нагрузка в сочетании с низкой теплоемкостью сверхпроводников при температурах жидкого гелия. Использование массивных ВТСП элементов более предпочтительно с точки зрения высоких температур ~ нескольких десятков кельвинов и, следовательно, большей тепловой стабильности.

В качестве решения предложена комбинация полюсов из массивных ВТСП элементов на основе DyBaCuO либо GdBaCuO и внешнего намагничивающего соленоида (Рис. 5а). Элементы собраны в массив в шахматном порядке (Рис. 5б). Затем такая сборка помещена в криостат с жидким азотом, который в свою очередь вставлен в резистивный соленоид внешнего поля (Рис. 5в). С помощью соленоида ВТСП элементы намагничиваются по следующей схеме: образец находится при $T>T_c \rightarrow$

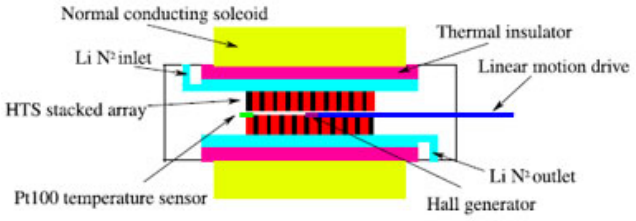
внешнее поле нарастает от B_{start} до B_{end}, → температуру опускают ниже T_c → поле уменьшается до начального значения B_{start} , в результате чего в ВТСП наводится незатухающий кольцевой ток.



а



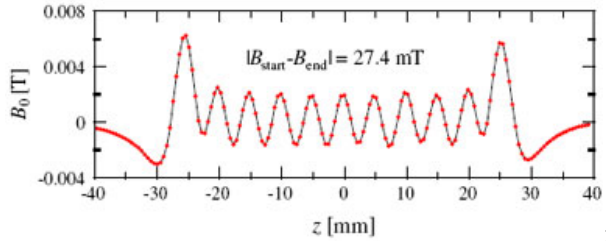
б



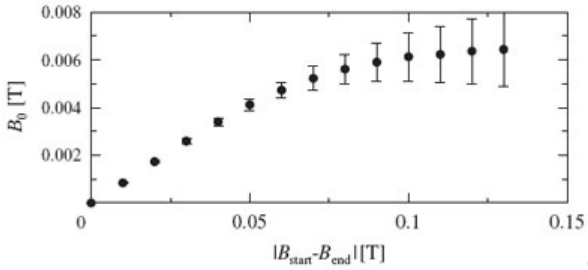
в

Name	Definition	POP experiment	Design value
λ_u	Undulator period	5 mm	10 mm
g	Gap length	4 mm	4 mm
N	Number of periods	11	8
R	Radius of basic unit	12.6 mm	12.6 mm
J_c	Critical current density	100 A/mm²	3.5 kA/mm²
T	Operation temperature	77 K	20–30 K

г



д



е

Рис.5. Ондулятор на основе массивных ReBCOэлементов. а) Массивный элемент ВТСП+медь в изоляторе б) элементы, собранные в шахматном порядке, в) схема ондулятора, г) параметры изготовленного демонстрационного образца и желаемые параметры будущей версии, д) профиль поля по длине ондулятора, е) процесс намагничивания полюсов.

Естественно, что величина намагниченности определяется только разностью B_{start}-B_{end}, но ненулевое значение B_{end} нужно, чтобы контролировать осевую компоненту поля вдоль оси пучка.

Плюсы конструкции:

1. Весь массив намагничивается одним соленоидом, и поле ондулятора можно широко и точно варьировать, чтобы менять параметры фотонного пучка.

2. Массив ВТСП имеет большую площадь теплового контакта с изолированной от него медью, которая хорошо охлаждается и быстро отводит тепло от сверхпроводника.

3. Распределение поля можно легко корректировать с помощью дополнительных постоянных магнитов.

4. Продольное и ондуляторное поле можно независимо подстраивать, варьируя значения B_{end} и B_{start} .

5. Экранирующий ток течет только в приповерхностном слое массивных ВТСП элементов – легко делать расчеты.

В таблице (Рис. 5.г) приведены параметры устройства, изготовленного для демонстрации принципа действия (Proof of principle - POP), и желаемые параметры будущей версии. На изготовленном демонстрационном образце размах ондуляторного поля невелик, и выходит на насыщение примерно при 0,07 Тл (Рис. 5.е). Для того чтобы генерировать достаточное поле ~1 Тл при коротком периоде < 15 мм необходимо повысить уровень намагниченности массивных полюсов. В следующей конструкции предполагается опустить рабочую температуру до 20-30 К с помощью газообразного гелия, охлаждаемого криокулером. Расчетные параметры будущего прототипа в таблице – колонка «design value». Есть основания полагать, что предложенная концепция имеет большие перспективы.

5. YBCO ребель-кабель для физики высоких энергий (Новая зеландия+США).

Проблемы каблирования ленточных проводов являются одним из основных факторов, сдерживающих расширение промышленного использования ВТСП. Одним из лидеров в НИОКР по созданию токонесущих элементов (ТНЭ) ребелевского типа на основе 2G является новозеландская компания Industrial research limited (IRL), о работах которой мы не раз сообщали в нашем бюллетене. В сообщении на конференции по прикладной сверхпроводимости 2011 г., сделанном совместно со специалистами из FermiLab (США), даны результаты изготовления ТНЭ для следующего поколения высокополевых магнитов с полями 40-50 Тл, которые заложены в проект мюонного коллайдера.

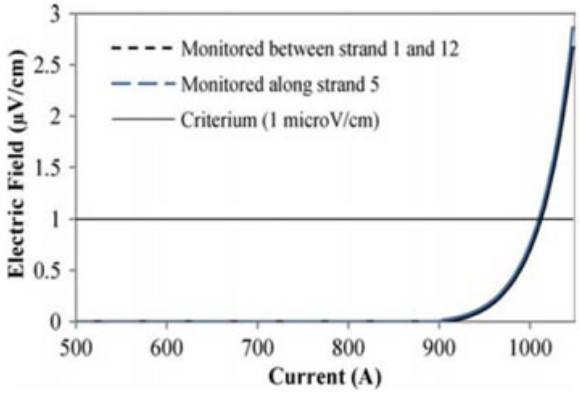
Технология производства ребель-кабелей на основе YBCO, методы резки и контроля качества исходных лент не раз подробно описывалась в наших выпусках (т. 8, вып. 1). Приведем только новые результаты, полученные в IRL на 3х метровых кабелях

«15/5» - 15 зигзагов шириной 5 мм, угол 30°, шаг транспозиции 300 мм (стренды вырезаны из 12 мм лент Superpower: 1 мкм ВТСП, 50 мкм хастеллоя, ламинированного 20 мкм меди с двух сторон) [5].

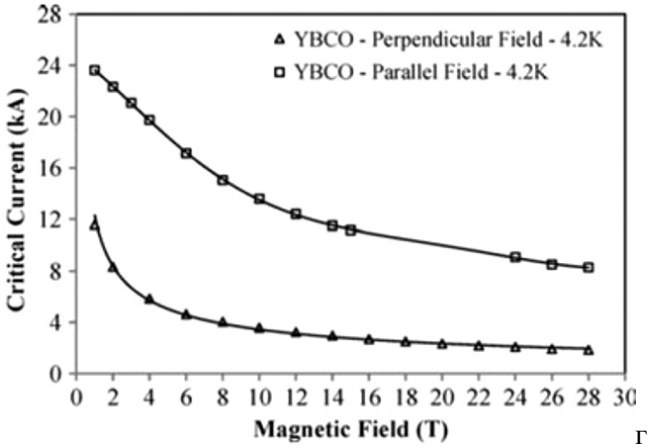
STRAND# (SPOOL)	I_c	n	STRAND# (SPOOL)	I_c	n
Tape #1 (A)	105.1	32.6	Tape #9 (A)	103.8	34.5
Tape #2 (A)	103.9	43.7	Tape #10 (A)	105	30.7
Tape #3 (A)	106.5	34.9	Tape #11 (A)	106.6	33.3
Tape #4 (A)	108.6	36.1	Tape #12 (A)	105.6	30.1
Tape #5 (A)	107.4	39.9	Tape #13 (B)	116.6	n/a
Tape #6 (A)	105.2	34.4	Tape #14 (B)	113.2	n/a
Tape #7 (A)	104	34.7	Tape #15 (B)	120.7	n/a
Tape #8 (A)	104.3	32.4			

а

б



в



г

Рис. 6. а) Критические токи отдельных стрендов ребель-кабеля, б) подготовленный к измерениям 3-х метровый кабель из 15 зигзагов, в) его ВАХ в азоте в собственном поле г) расчетная токонесущая способность такого кабеля в гелии.

Критические токи каждого вырезанного стренда измерялись отдельно в собственном поле при 77 К (Рис. 6а). Затем на специальной машине, разработанной в IRL, на стеклотекстолитовой подложке был собран 3,25 м кабель без изоляции отдельных стрендов (Рис. 6б). Измеренная при 77 К ВАХ кабеля в собственном поле показана на Рис. 6в – критический ток кабеля оказался на 40 % ниже суммарного тока отдельных лент, что соответствует расчетному уменьшению в суммарном поле кабеля.

Таким образом, разработчики показали, что резка и скрутка не снижает токонесущую способность проводников, во всяком случае, при азотных рабочих температурах. Однако использование таких ТНЭ в физике высоких энергий эффективно только при температурах жидкого гелия. Поэтому в заключении ученые из FermiLab, работающие в коллаборации с IRL, сосчитали (но пока не померили) критические токи похожих кабелей в гелии - Рис. 6г. Экспериментальная проверка запланирована на ближайшее время. Будем ждать публикаций.

6. Высокополевой ВСТП соленоид для мюонного коллайдера (США).

Ряд публикаций [6,7] посвящен НИОКР проектированию высокополевых ВТСП вставок в резистивные магниты с суммарным (ВТСП + резистивный магнит) полем ~ 40 Тл для потенциального использования все в том же мюоном коллайдере.

В Брукхевенской Национальной лаборатории (США) к сегодняшнему дню изготовлены и испытаны при температурах 20-80 К 17 ВТСП галет (из 4 мм YBCO лент SuperPower) для будущей высокополевой ВТСП вставки. Конструкция предусматривает две механически разделенные нержавеющим каркасом секции. Разработка каждой секции финансируется отдельным грантом в рамках поддержки инновационных исследований малого бизнеса (т.н. американская аббревиатура SBIR – Small business Innovative Research).

Внешняя ВТСП секция рассчитана на 10 Тл (при 4,2 К) и будет состоять из 14 двойных галет, Øвнеш - 160 мм, Øвнутр - 100 мм. Внутренняя секция рассчитана на 12 Тл и состоит из 7 двойных галет, Øвнеш - 90 мм, Øвнутр - 25 мм. Суммарные параметры двухсекционного ВТСП магнита: индукция - 22 Тл (оптимистичная оценка), запасенная энергия - 110 кДж, индуктивность - 4,6 Гн, рабочий ток - 220 А. Объявив такие параметры, авторы сообщения многократно оговариваются, что проект находится на уровне НИОКР и нет гарантии, что им удастся достигнуть расчетных параметров.

После сборки и тестов двухсекционной ВСТП вставки на 22 Тл, ее планируют испытать в Национальной лаборатории высоких магнитных полей во Флориде в ширококанальном биттеровском магните на 19 Тл – именно под него подобран наружный диаметр ВТСП галет.

В случае успеха данная работа станет важным шагом в понимании того, на что способны ВТСП проводники. Чтобы воплотить проект в жизнь, нужно

решить ряд проблем, важнейшими из которых являются следующие две:

1) Проблема № 1 - деградация свойств проводников из-за высоких механических напряжений (несмотря на то, что ленты SuperPower имеют прекрасные механические свойства, предельные напряжения на разрыв проводника в продольном направлении составляют 700 МРа при комнатной и 1000 МПа при азотной температуре). В Брукхевенской лаборатории развернута собственная программа по изучению механических свойств. Возможно, для снижения механических напряжений внутреннюю ВТСП секцию придется разбить еще на 2 подсекции. Интересно, что в конструкции предусмотрена проклейка витков эпоксидной смолой (хотя, не исключено, что именно она вызывает необратимую деградацию свойств галет при быстром термоциклировании – примечание редактора).

2) Проблема № 2 – стабилизация 2G лент, обладающих при гелиевых температурах недостаточной теплоемкостью и малой скоростью распространения нормальных зон (причем сложности растут с увеличением магнитного поля, запасенной энергии и индуктивности). Авторы сообщения применяют стандартные подходы к защите обмоток, такие как использование дополнительной медной стабилизации и переход к резистивно связанным виткам, использование систем детектирования нормальных зон и вывода энергии из обмоток. Но, к слову сказать, в подробности авторы не вдаются, и описывают только общие подходы.

В настоящий момент изготовлены и испытаны в азоте 17 одиночных галет (по 100 м ленты в каждой, 480 витков, резистивно-связанных через нержавеющую фольгу) – Рис. 7а. Потенциальные концы крепились через каждые 50 витков. На Рис. 7б показан ток перехода галет в зависимости от номинального критического тока коротких образцов в собственном поле.

Помимо этого две двойные галеты (поперечное поле при 40 А ~ 0,3 Тл, параллельное – 0,5 Тл) были испытаны при 20-80 К. При сборке выбирались одиночные галеты с одинаковым I_c (7В/8А и 8В/9А на Рис. 7а). Температура регулировалась скоростью прокачки газообразного гелия через медный теплообменник (Рис. 7в). ВАХ двойной галеты 7В/8А показан на Рис. 7г - по одиночке обе галеты имели одинаковый ток перехода - около 50 А. При измерении ВАХ двойной галеты с помощью многочисленных потенциальных концов одна галета перешла при 30 А, а другая - при 43 А. Во второй двойной галете ситуация аналогичная.

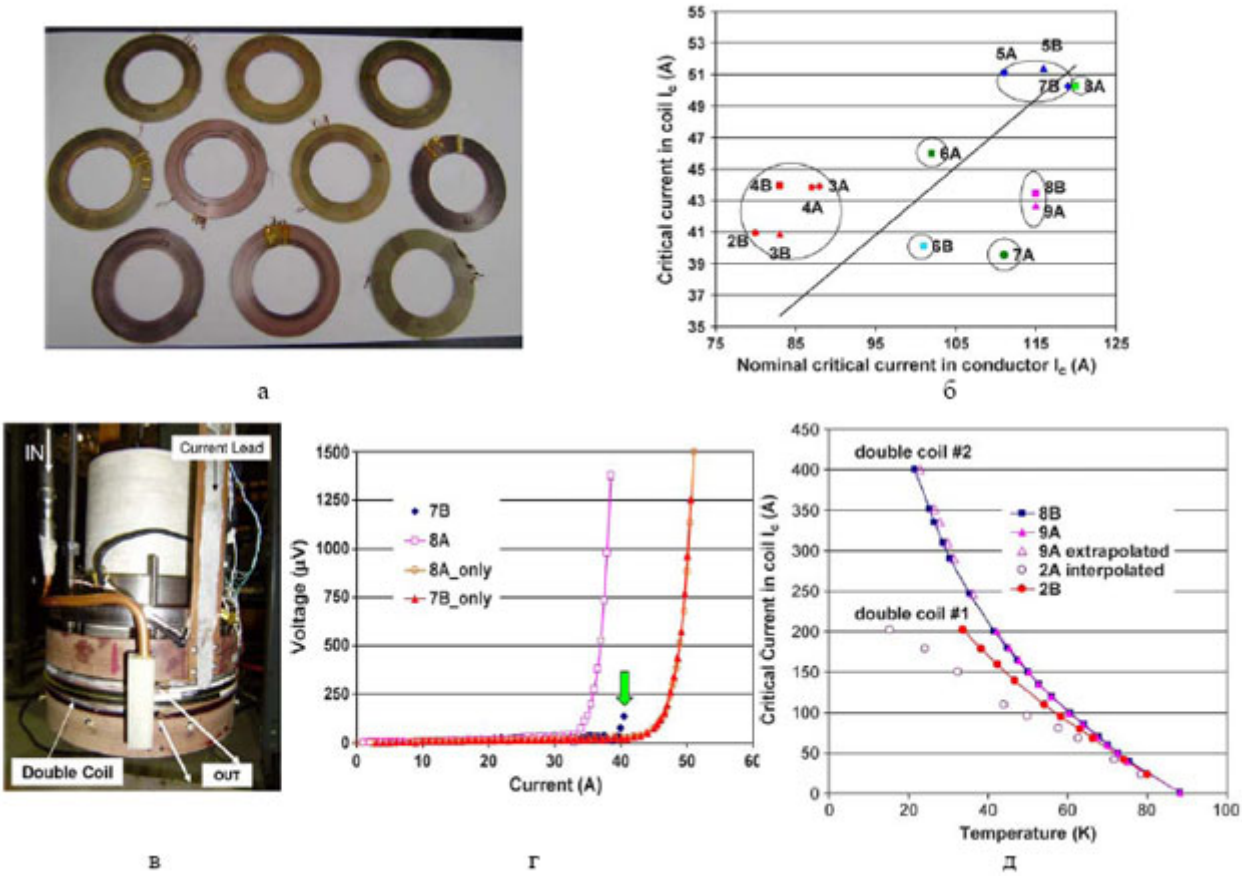


Рис.7. а) одиночные галеты для ВТСП вставки на 22 Тл, б) их токи перехода в нормальное состояние в зависимости от I_c коротких образцов при 77 К, в) сборка для измерения критических свойств двойных галет, г) ВАХ двойной галеты, д) зависимость токов перехода в нормальное состояние двух двойных галет от температуры (верхние кривые – медленно захолаживаемые галеты, нижние – подвергнутые быстрому охлаждению от комнатной до азотной температур, вызвавшему необратимую деградацию критических свойств.

Отдельная тема отведена процессу предварительного захолаживания галет. После быстрой (15 мин.) заливки теплого магнита жидким азотом авторы обнаружили целый ряд неприятностей: появление скачков напряжения на отдельных участках ленты в галете, необратимые снижения крутизны ВАХ (до n ~ 10), гистерезис на ВАХ, и как следствие - высокую необратимую деградацию Ic (накапливающуюся после нескольких термоциклов). Путем проб и ошибок, «убив» несколько галет, авторы установили, что при растягивании времени захолаживания до 2х часов все негативные проявления исчезают.

На Рис.7.д показана зависимость тока перехода в нормальное состояние для двух двойных галет в зависимости от температуры (double coil 1 – галеты, подверженные предварительному быстрому термоциклированию; double coil 2 – галеты, захолаживаемые медленно). При низких температурах корреляция «большой критический ток короткого образца – большой ток перехода галеты» прослеживается гораздо лучше, чем при азоте.

В качестве следующего шага специалисты из Брукхевенской лаборатории планируют испытания половины внешней ВТСП секции (14 одиночных галет в сборе) в жидком гелии. Понятно, что поскольку разные галеты имеют разные I_c, ток перехода секции будет определяться галетой с наихудшими характеристиками, именно потому постоянный контроль их свойств чрезвычайно важен. Чтобы испытать внешнюю секцию на 10 Тл целиком (14 двойных галет) американским ученым, по их оценкам, понадобится полгода, на испытания обеих секций на 22 Тл – около года.

7. Выводы.

На основании приведенного обзора главный вывод можно сформулировать так:

2G ленты являются куда более капризным материалом по сравнению с проводами первого поколения. Их свойства (по разным причинам) нередко деградируют в устройствах; при гелии ленты обладают недостаточной стабильностью и малыми скоростями распространения нормальных зон – и, как следствие, чаще перегорают; неудобны для сборки в токонесущие элементы; дороги и т.д.

Однако заманчивая высокая токонесущая способность при пониженных температурах в больших полях и хорошие механические свойства (в частности возможность намотки на малые радиусы) неизменно подогревают интерес исследователей во всем мире. Будем надеяться, что рано или поздно, эти упорные попытки увенчаются успехом.

Д.И. Шутова

1. *R. Gupta et all., Second generation HTS quadrupole for FRIB., IEEE Trans.on Appl. Supercond., Vol. 21, № 3, 2011 pp.1888-1891.*
2. *F. Jiao et all., A conceptual design of high-temperature superconducting isochronous cyclotron magnet., Physica C., Vol. 471, 2011 pp.1419-1423.*
3. *S. Prestemon et all., Development and analysis of HTS undulator components for FEL application., IEEE Trans.on Appl. Supercond., Vol. 21, № 3, 2011 pp.1880-1883.*
4. *T. Kii et all., Conceptual design of a novel insertion device using bulk superconducting magnet., Physica C., Vol. 471, 2011 pp.897-900.*
5. *V. Lombardo et all., Fabrication, qualification and test of high Jc Roebel Yba2Cu3O7-δ coated conductor cable for HEP magnets., IEEE Trans.on Appl. Supercond., Vol. 21, № 3, pp.2331-2334.*
6. *R. Gupta et all., High field HTS R&D solenoid for muon collider., IEEE Trans.on Appl. Supercond., Vol. 21, № 3, pp.1884-1887.*
7. *Y. Shiroyanagi et all.,Construction and testing of YBCO Pancake coils for a high field solenoid., IEEE Trans.on Appl. Supercond., Vol. 21, № 3, pp.1649-1652.*

ВТСП И НТСП УСТРОЙСТВА

Использование сверхпроводниковых устройств в космической отрасли

Сверхпроводимость – одно из тех физических явлений, возможности практического применения которого сложно переоценить. В настоящий момент существует большое количество различных проектов применения сверхпроводниковых устройств, разрабатываемых практически во всех развитых странах. Большая часть подобных разработок посвящена применению сверхпроводниковых устройств: в медицине и биологии (ЯМР-томографы и спектрометры высокого разрешения), в магнитах сильных полей для широкого спектра научных исследований и др. В последние годы в связи с развитием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) интенсивно ведутся разработки устройств для применения в электросетях: ЛЭП, трансформаторы, устройства ограничения тока короткого замыкания, накопители энергии. В настоящее время явление сверхпроводимости уже находит широкое применение. Однако существует ряд направлений, ориентированных на более далекую перспективу.

Речь идет о применении сверхпроводниковых устройств в космической отрасли. Первые работы в данной области датируются шестидесятыми годами прошлого века и посвящены решению целого ряда вопросов: «проблеме просветления плазмы», вопросам защиты экипажа и оборудования от воздействия ионизирующего космического излучения, проблемам эксплуатации кинетических накопителей энергии в условиях невесомости, вопросам создания электрореактивных двигателей и других.

Практически все вышеперечисленные проблемы, так или иначе, связаны с применением магнитных полей высокой напряженности. В связи с этим, ос-

новными сверхпроводниковыми устройствами, применяемыми в космической отрасли, были и остаются сверхпроводниковые магниты. Основными преимуществами сверхпроводниковых магнитов перед традиционными магнитами с той же индукцией являются малые габаритные размеры и вес. Поскольку условия космических полетов предполагают острый дефицит массы и рабочего пространства, минимизация размеров и веса оборудования является важнейшим критерием. Другим немаловажным фактором является малое энергопотребление сверхпроводникового магнита. Сверхпроводниковый магнит может работать в режиме «замороженного» потока, когда сразу после запитки от источника тока сверхпроводниковый соленоид замыкается сверхпроводниковым ключом, и ток в нем способен циркулировать до нескольких лет безо всякой внешней подпитки.

Поскольку рабочая температура сверхпроводникового магнита лежит в криогенной области, возникает необходимость обеспечить наличие на борту космического аппарата системы охлаждения, способной работать в условиях невесомости. Разработка и создание подобной системы представляет собой сложную инженерную задачу, фактически, это отдельное направление прикладной физики низких температур. Ряд основных проблем данного направления весьма обширен: обеспечение правильной циркуляции хладагента в условиях невесомости, минимизация теплопотерь, защита от воздействия теплового излучения и многое другое [1].

В последние годы широкое применение получили безжидкостные криогенные системы на основе криокулеров. Подобные системы применяются и в космической отрасли. Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества безжидкостных систем, их использование в условиях невесомости не всегда допустимо, в основном из-за влияния двух факторов:

- **инерционности -** поскольку отвод тепла криокулером происходит через контактный теплообменник, время реакции системы значительно больше, чем при жидкостном охлаждении, так как в условиях невесомости отсутствует явление конвекции. Охлаждение системы поэтому происходит только за счет теплопроводности тепловых трубок, что является достаточно медленным процессом.

- **наличия подвижных частей -** конструкция любого современного криокулера включает вращающиеся элементы. Обладая собственным гироскопическим моментом, они могут затруднить управление космическим аппаратом, на борту которого смонтирована система. Кроме того, работающий криокулер создает значительную вибрацию. Особенно остро данная проблема встает при выполнении операций, требующих высокой точности действий (например, наведение спутников связи или орбитальных телескопов). Однако, при наличии на борту космического аппарата каких-либо более крупных подвижных объектов (например, турбины электрогенератора), гироскопический момент, создаваемый криокулером можно считать пренебрежимо малым.

Можно сделать вывод, что, несмотря на развитие безжидкостных методов охлаждения, традиционные криогенные системы продолжают оставаться востребованными в космической отрасли, и данное направление физики низких температур не теряет своей актуальности.

Необходимо отметить, что перечисленные выше проблемы криогенного обеспечения являются общими для сверхпроводниковых устройств, предназначенных для использования в космосе. При этом спектр проблем, которые эти устройства призваны решать, весьма разнообразен. Рассмотрим подробнее основные направления космического использования сверхпроводниковых устройств.

Проблема просветления плазмы возникла вместе с первыми полетами на орбиту Земли. В момент входа космического аппарата в верхние слои атмосферы, вокруг него возникает плазменная оболочка, которая делает практически невозможной любую радиосвязь. Существует, однако, возможность управлять геометрией плазменного облака путем приложения магнитного поля достаточной напряженности. Таким образом, при наличии на борту космического аппарата электромагнита, становится возможным создать в плазменной оболочке область, прозрачную в радиодиапазоне.

Работы по созданию такого электромагнита и сопутствующих систем ведутся с середины шестидесятых годов прошлого века. Необходимо отметить, что первый в мире запуск сверхпроводникового магнита на околоземную орбиту был осуществлен группой советских физиков из Курчатовского Института. Запуск был произведен в 1967 году [1]. За прошедшие годы было произведено множество запусков различных сверхпроводниковых магнитов, предназначенных для формирования плазменного облака. Возможным развитием тематики может быть перевод магнитных систем на высокотемпературные сверхпроводники.

Другой областью применения сверхпроводниковых устройств является создание эффективной **защиты экипажа космического аппарата от ионизирующего излучения**. Если на орбите ниже внутреннего пояса Ван Аллена (около 500 км над Атлантическим океаном) большая часть космического излучения экранируется магнитным полем Земли, то при удалении от нее, проблема биологической защиты экипажа встает в полной мере. Схожая проблема наблюдается для беспилотных космических аппаратов, поскольку интенсивное ионизирующее излучение вызывает нарушения в работе электроники из-за явления радиационной деградации материалов.

Спектр космических лучей более чем на 90% состоит из протонов. Малая доля приходится на альфа-частицы, еще меньшая – на ядра различных тяжелых элементов. Поскольку указанные частицы обладают зарядом, направление их потока может быть изменено магнитным полем. Соответственно, возможно создание практически полностью защищенной области внутри космического аппарата.

Исследования в данной области ведутся с начала шестидесятых годов прошлого века. На сегодняшний день опубликовано ряд статей, разработано несколько завершенных проектов систем защиты и запатентован ряд устройств [2,3]. Однако большая часть работ посвящена гипотетическим космическим перелетам, и полевых испытаний подобных систем защиты практически не проводилось. Это связано с тем, что орбита большинства искусственных спутников (в том числе и МКС) находится ниже внутреннего пояса Ван Аллена, и потребности в подобных системах защиты невелики – сказывается экранирующий эффект магнитного поля Земли. Тем не менее, в случае дальних перелетов проблему космического излучения нельзя недооценивать. Особенно это относится к перелетам в период возрастающей солнечной активности. Согласно отчету Центра Анализа Данных по Влиянию Солнца при Бельгийской Королевской Обсерватории, на 2010 год пришелся очередной минимум солнечной активности (последний максимум зарегистрирован в 2000 году). Если учесть тот факт, что среднее время между максимумами составляет 10 – 12 лет [4], а также увеличение числа вспышек на Солнце за последний год, можно сделать вывод, что в ближайшие десять лет солнечная активность будет существенным образом возрастать, при этом текущий максимум придется, ориентировочно, на 2021 год. Таким образом, исследования по вопросу магнитной защиты от космического излучения в ближайшем будущем могут получить дальнейшее развитие, особенно в свете возросшего интереса мировой научной общественности к перспективам полета человека на Марс и Луну.

Еще одним, важным для астрофизики и физики высоких энергий, направлением является создание размещенных в космосе **детекторов элементарных частиц**, магнитное поле в которых создается сверхпроводниковыми магнитами. Прямое орбитальное наблюдение является очень важным для физики элементарных частиц: в частности, существование позитронов и мюонов было экспериментально подтверждено именно благодаря наблюдению космических лучей. Исследования в этой области ведутся не одно десятилетие. В 1967 году на Всесоюзной конференции по физике космических лучей в Новосибирске сотрудниками Курчатовского Института был сделан доклад «О возможности использования сверхпроводниковых магнитов для анализа состава космических лучей» [5]. В 1969 году тем же научным коллективом был сделан доклад «Использование сверхпроводниковых магнитных систем для анализа потоков электронов и позитронов в первичном космическом излучении» на Всесоюзной конференции по физике низких температур в Тбилиси [6].

Наиболее крупным проектом в этом направлении на сегодняшний день является создание в США сверхпроводникового магнитного спектрометра (AMS) предназначенного, помимо исследования состава космических лучей, для поиска антиматерии. Первая версия подобного детектора, без использования сверхпроводниковых магнитов, была установлена на орбитальной станции «Мир» в 1998 году. Вторая версия, также без сверхпроводников, 19 мая 2011 года была установлена на МКС. Необходимо отметить, что возможности данных версий детектора ограничены по сравнению со сверхпроводниковой моделью, поэтому работы над ней велись параллельно. В настоящий момент сверхпроводниковый спектрометр воплощен в металле, и ожидается его доставка на околоземную орбиту [7,8].

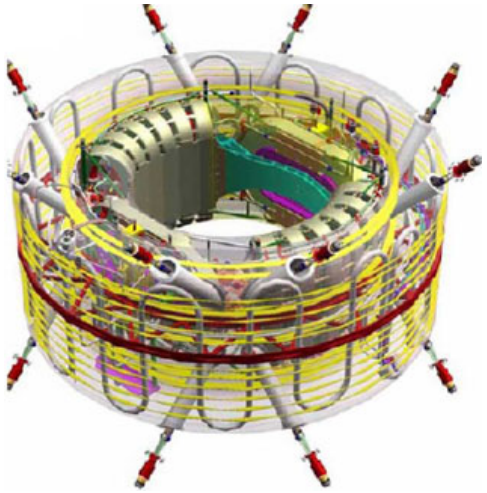


Рис. 1. Модель сверхпроводникового магнита с криогенным обеспечением, разработанного для орбитального AMS.

Еще одним перспективным направлением применения сверхпроводимости является создание **сверхпроводникового электрореактивного двигателя**. Рабочее тело в подобном двигателе ускоряется, находясь в состоянии плазмы. Скорость истечения плазмы значительно выше скоростей, предельных для типовых газодинамических двигателей. Как следствие, при прочих равных условиях, электрореактивный двигатель отличается существенно меньшим расходом рабочего тела и меньшим весом. Использование электрореактивного двигателя возможно только в условиях вакуума, поэтому в настоящий момент такие двигатели используются для поддержания орбиты искусственных спутников. Необходимо отметить, что электрореактивные двигатели малой мощности, не использующие сверхпроводники, производятся серийно, причем идея их создания принадлежит советскому физику

А. И. Морозову, сотруднику Курчатовского Института. Данные двигатели широко используются в конструкции различных искусственных спутников. Однако, в силу физических ограничений, их использование для разгона или корректировки орбиты таких крупных объектов как МКС или перспективные межпланетные космические корабли пока не возможно.

Работы по созданию электромагнитных электрореактивных двигателей с использованием сверхпроводниковых магнитов (американский проект VASIMR) был начат в 1977 году. Основная идея подобного двигателя заключается в переводе рабочего тела в состояние плазмы при помощи высокочастотного нагрева (что автоматически исключает проблему эрозии электродов) с последующим формированием плазменной реактивной струи магнитным соплом. Сверхпроводниковые электромагниты в данном случае являются неотъемлемой частью двигателя, поскольку только с их помощью можно получить магнитное поле с напряженностью, достаточной для формирования нужного профиля реактивной струи и обеспечения защиты компонентов двигателя от прямых контактов с плазмой. Основным предназначением двигателей VASIMR на данный момент является корректировка орбит космических станций и крупных искусственных спутников. В частности, находящийся в разработке двигатель VX-200 планируется установить на МКС. В более далекой перспективе, подобные двигатели можно будет использовать для доставки грузов на лунную орбиту, а также в качестве основной тяговой силы для аппаратов, участвующих в программах по освоению дальнего космоса [9].

Вместе с развитием ВТСП в США была запущена многолетняя программа по использованию ВТСП в условиях космических полетов (HTSSE). Заметим, что, несмотря на то, что ВТСП можно использовать для решения описанных выше задач, основным направлением данной программы является создание различных средств связи. С момента начала программы в 1988 году было разработано, произведено и испытано большое количество различных устройств, например, микроволновых демультиплексоров, малошумящих приемников, полосовых фильтров [10]. Аналогичная программа существует у концерна Bosch в Германии [11].

Как показывают результаты испытаний, сверхпроводниковые приборы на основе ВТСП обладают существенно лучшими рабочими характеристиками по сравнению с аналогичными традиционными устройствами. Не стоит, однако забывать, что, несмотря на достаточно высокую рабочую температуру ВТСП-компонентов, по-прежнему имеют место описанные выше проблемы криогенного обеспечения. В целом данное направление обладает очень широкими возможностями в плане дальнейшего развития и, несомненно, будет очень востребовано при дальнейшем освоении космического пространства.

Рис. 2. Двигатель VX-100

Рис. 3. Сверхпроводниковый магнит, разработанный для двигателя VX-200.

В заключение, необходимо сказать, что применение сверхпроводниковых устройств в космической отрасли является перспективным и постоянно развивающимся направлением научной деятельности. Существует ряд задач, которые не были описаны в данном обзоре, однако имеют отношение к данному направлению: бортовые сверхпроводниковые кинетические накопители энергии, магнитные подшипники для гироскопов на основе ВТСП, дальнейшее развитие сверхпроводниковой электроники с возможностью работы в условиях вакуума и многое другое. Также необходимо отметить, что у истоков всего направления стояли советские физики и инженеры. Российская научная общественность обладает уникальным наследием во многих аспектах обсуждаемого направления: криогенное обеспечение космических аппаратов, электрореактивные двигатели, магнитная защита от космического излучения – все это зарождалось в Советском Союзе. Поэтому развитие данной тематики силами российских ученых не только осуществимо, но и необходимо.

Д.Н. Диев

1. О. П. Анашкин и др. “Сохранение гелия и сверхпроводимости в условиях орбитального полета”, отчет ЦНИРТИ-ФИАН, 1967.
2. G. Kinstler “Method and device for magnetic space radiation shield”, Patent № US 7,464,901 B2, 2008.
3. G. Kinstler “Method and device for magnetic space radiation shield providing isotropic protection”, Patent № US 7,484,691 B2, 2009.
4. R. Jurdana-Šepić et al. “A relationship between the solar rotation and activity in the period 1998–2006 analysed by tracing small bright coronal structures in SOHO-EIT images”, Astronomy and Astrophysics, Vol. 534, 2011.
5. О. П. Анашкин, Б. Н. Белицкий, В. Б. Бродский, Л. В. Курносова, Н. Н. Михайлов, Л. А. Разоренов, Т. М. Сидякина, М. И. Фрадкин “О возможности использования сверхпроводниковых магнитов для анализа состава космических лучей”, доклад на Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Новосибирск, 1967.
6. О. П. Анашкин и др. “Использование сверхпроводниковых магнитных систем для анализа потоков электронов и позитронов в первичном космическом излучении”, доклад на Всесоюзной конференции по физике низких температур, Тбилиси, 1969.
7. P. McIntyre “Integration and testing of the superconducting magnet and cryogenics for AMS”, IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, № 12, April 2010.
8. P. McIntyre “Testing of the superconducting magnet and cryogenics for the AMS-02 experiment”, IEEE Transactions of applied superconductivity, vol. 21, № 3, 2011.
9. Jared P. Squier and al. “VASIMR performance measurement at powers exceeding 50 kW and lunar robotic mission applications”, International Interdisciplinary Symposium on Gaseous and Liquid Plasmas Akiu/Sendai, Japan, September 5-6, 2008
10. M. Nisenoff “The high-temperature superconductivity space experiment (HTSSE): present status and future challenges”, Supercond. Sci. Technology, № 9, 1996.
11. T. Kässer, M. Klauda, B. Mayer, C. Neumann, F. Schnell, U. Wochner “Superconductors and cryotechnology for space communications – adaptation of a new technology for application”, IEEE MTT-S Digest, 2000.

Издатель *НИЦ «Курчатовский Институт»,*
НБИК, НТК «Прикладная сверхпроводимость»

Научный редактор: *В.С. Круглов,* зам. директора *НТК сверхпроводимость*
Редакторы: директор научного направления ОАО «ВНИИКП» *В.С. Высоцкий* vysotsky@gmail.com,
В.И. Щербаков sherby@isssph.kiae.ru
В подготовке выпуска принимали участие: *Д.Н. Диев, Д.И. Шутова*
А.К. Чернышева perst@isssph.kiae.ru,
Верстка: *И.Л. Фурлетова*