



Том 6 выпуск 4  
декабрь 2009

**«Наши научно-исследовательские и производственные организации будут нацелены на внедрение инновационных технологий, таких как разработки с применением эффекта сверхпроводимости, особо актуального для наших протяжённых территорий. Мы продолжаем терять гигантские объёмы энергии при передаче её по территории страны, гигантские объёмы. В будущем именно технология сверхпроводимости кардинально изменит всю сферу производства, передачи и использования электроэнергии.»**

Из послания Президента  
Медведева Дмитрия Анатольевича  
Федеральному Собранию Российской Федерации 2009 года

21 ноября 2009 г. исполнилось 60 лет  
Виктору Евгеньевичу Сытникову



Закончив в 1972 году Ждановский (Мариупольский) металлургический институт, Виктор Евгеньевич по путевке Министерства энергетики приезжает в г. Подольск и поступает на работу в отдел сверхпроводящих проводов и кабелей Всероссийского научно-исследовательского института кабельной промышленности (ВНИИКП). С этим отделом, а ныне отделением, и связана вся его научная и рабочая жизнь. В 1982 году Виктор Евгеньевич защищает кандидатскую диссертацию, в 1992 г. – докторскую и вскоре становится начальником отдела. А там избирается и академиком Академии Электротехнических наук РФ. Свой путь во ВНИИКП Виктор Евгеньевич прошел последовательно через все должности от младшего научного сотрудника до директора научного направления и директора отделения.

Сверхпроводящие кабели были и есть основная научная любовь Виктора Евгеньевича. Количество исследованных и разработанных под его руководством сверхпроводящих кабелей не поддается исчислению. Но дело не только в науке. При непосредственном участии Виктора Евгеньевича и благодаря его организаторским способностям Россия стала одной из основных стран по разработке и поставке крупных сверхпроводящих кабелей для тороидальных и полоидальных катушек Международного проекта ИТЭР. Руководство проекта неоднократно отмечало качество, надежность и соблюдение всех обязательств ВНИИКП, что, несомненно, заслуга Виктора Евгеньевича.

И далее...

## РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

*Успешные испытания трёх-  
фазного ВТСП кабеля длиной  
200 метров в России* 2

## ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

*Развитие технологии ВТСП-  
провода 2-го поколения  
SuperPower* 2

## ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

*Исследование рынка  
ВТСП – 2009* 4

## ВТСП УСТРОЙСТВА

*Перспективы  
ВТСП магнитных систем со  
сверхсильными полями* 5

*Сверхпроводящие  
ЯМР спектрометры* 10

Конечно, Виктор Евгеньевич не остался в стороне и от высокотемпературной сверхпроводимости. В его отделении был разработан и успешно испытан первый в России силовой сверхпроводящий кабель длиной 30 м на основе высокотемпературных сверхпроводников. Также разработан, изготовлен и поставлен на испытания крупнейший (по длине и мощности) в Европе ВТСП кабель длиной 200 м. Таким образом, практически ликвидировано отставание России от мирового уровня в этой области прикладной сверхпроводимости.

Поздравляем с Днём Рождения известного в России и за рубежом ученого, внесшего огромный вклад в исследование, разработку и развитие перспективных сверхпроводящих устройств для нужд отечественной и международной науки и промышленности, перечисление которых займет не одну страницу текста. Пожелаем этому замечательному человеку крепкого здоровья, осуществления всех замыслов и успешной творческой деятельности на благо нашей прикладной сверхпроводимости.

## **РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ**

### ***Успешные испытания трёхфазного ВТСП кабеля длиной 200 метров в России***

В декабре 2009 г. командой сотрудников нескольких российских институтов завершены приёмочные испытания самой крупной в Европе 200-метровой ВТСП кабельной линии с номинальным напряжением 20 кВ и передаваемой мощностью в 50 МВА. ВТСП кабель был создан командой под руководством ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. Собственно кабель разработан и изготовлен в ОАО «ВНИИКП». Токовые вводы разработаны в МАИ им. С. Орджоникидзе совместно с ВНИИКП. Испытания проводились на Полигоне по испытаниям сверхпроводникового оборудования в ОАО «НТЦ Электроэнергетики». Помимо кабеля в МАИ разработана и запущена оригинальная криогенная система для охлаждения сверхпроводящих кабельных линий.

Каждая из фаз кабеля изготовлена из двух слоев ВТСП провода 1-го поколения марки DI-BSCCO производства фирмы Sumitomo Electric Industry (Япония). Экран ВТСП кабеля – сверхпроводящий из одного слоя того же ВТСП проводника. Фазы кабеля размещены в 3-х гибких криостатах производства Nexans (Германия).

В ходе приёмочных испытаний на постоянном токе были измерены критические токи для каждой из фаз, они составили не менее 5,2 кА при температуре 74К. ВТСП кабель успешно выдержал высоковольтные испытания при постоянном напряжении в 50 кВ. Затем ВТСП кабель был подключен к реактивной нагрузке и более 24 часов передавал мощность в 50 МВА.

Созданию 200-метрового ВТСП кабеля предшествовали успешные работы над 30-метровым ВТСП кабелем с аналогичными параметрами (его испытания проводились с ноября 2008 г. по июнь 2009 г.), в ходе которых был накоплен необходимый опыт.

В дальнейшем предполагается провести расширенные испытания ВТСП кабеля, и в конце следующего года поставить его на эксплуатацию в московской кабельной сети.

*В.С. Высоцкий*

## **ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ**

### ***Развитие технологии ВТСП-провода 2-го поколения SuperPower***

SuperPower на сегодня является мировым лидером в производстве ВТСП-лент второго поколения. Благодаря усилиям этой компании стали реальностью ленты длиной более 1 км с критическим током около 300 А на 1 см ширины. Такими результатами, вкуче с предлагаемой ценой порядка 200-400 долл/кА·м, конкуренты пока не могут похвастаться. Недавно компания SuperPower объявила о переносе исследовательской деятельности в Хьюстон. В Шенектеди при этом остаются производственные мощности и около 60 человек персонала. Предполагается, что реструктуризация позволит фирме сосредоточиться на производстве ВТСП-ленты и более эффективно совершать новые разработки.

Слабым местом SuperPower является технология буферных слоёв, основанная на недешёвых высоковакуумных методах роста покрытий. Для того чтобы сделать поликристаллическую металлическую подложку пригодной для нанесения ориентированного слоя ВТСП, на электрополированную ленту из хастеллоя необходимо осадить пять буферных слоёв, все они на сегодня получаются «дорогими» методами (рис. 1). Это может стать препятствием для дальнейшего снижения стоимости провода. Сегодня SuperPower пользуется серьёзной государственной поддержкой, и неизвестно, сможет ли такая технология существовать без неё.

Компанией в течение последних лет предпринимаются попытки удешевить технологию ВТСП-провода. Этой цели можно добиться, упрощая архитектуру буферного слоя или увеличивая производительность отдельных технологических стадий. На совещании, прошедшем в ноябре этого года в Корее [1], SuperPower было подробно рассказано о новых подходах к упрощению технологии.

В 2009-м году в SuperPower предпринято следующее (все данные о производительности – для ленты шириной 4 мм):

1) электрополировка ведётся одновременно для двух лент – производительность процесса выросла соответственно в 2 раза – до 16,8 км в неделю;

- 2) процессы осаждения  $Al_2O_3$  и  $Y_2O_3$  интегрированы в одну установку – скорость процесса 750 м/ч;
- 3) также в одной установке проводится осаждение слоев  $MgO$  и  $LaMnO_3$ ;
- 4) ленты длиной 1400 м покрываются 4-мя буферными слоями с использованием одной установки с производительностью 8.4 км/неделю;

**LaMnO<sub>3</sub>** - улучшение рассогласования с YBCO  
**MgO** - утолщение слоя  
**IBAD MgO** - текстурирование  
**Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - предотвращение взаимодействия  $Al_2O_3$  и  $MgO$   
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - предотвращение окисления подложки  
**Хастеллой** - подложка

- 5) введение процесса уменьшения шероховатости (планаризации) металлической подложки с использованием аморфных оксидных слоев, осажденных из раствора; для этого процесса предполагается производительность 16,8 км в неделю.

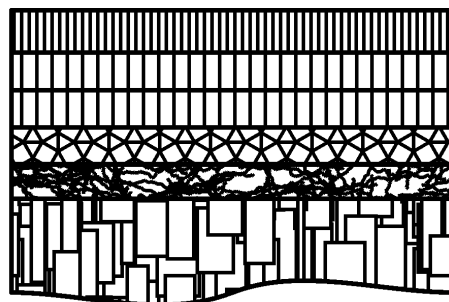


Рис. 1. Архитектура буферных слоев ВТСП-провода второго поколения с рекордными характеристиками, производимого компанией SuperPower. Можно ли упростить эту многослойную структуру без потери в свойствах ленты?

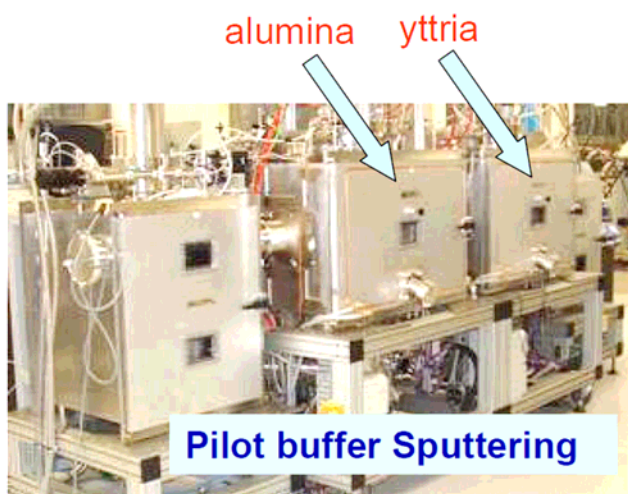


Рис. 2. Установка SuperPower с интегрированными процессами осаждения двух слоёв.



Рис. 3. Установка для нанесения выравнивающего слоя с термической обработкой, осуществляемой *in situ*.

Процесс уменьшения шероховатости за счёт нанесения слоёв химическими методами достаточно интересен. Как обычно, разработки делегированы национальным лабораториям – слоем оксида алюминия занимается ORNL, а оксида иттрия (рис. 3) – LANL. Нанесение 4-х слоев оксида иттрия на хас-

теллой позволило снизить шероховатость ( $R_a$ ) с 2,5 до 0,7 нм (амплитуда при этом снизилась с 23 до 2 нм). Показано, что предложенный процесс обеспечивает нужное качество конечного продукта – на планаризованной подложке получено 20 м ВТСП-ленты – свойства при этом аналогичны ленте, изготовленной с использованием полированной ленты ( $I_c = 140$  А/см). Этот подход, возможно, позволит использовать в качестве подложки и другие сплавы, более дешёвые, чем хастеллой.

Толщина слоя серебра в лентах SuperPower обычно составляет полтора-два микрона – только такой толщины слоя достаточно для защиты ВТСП от химического взаимодействия с кислотным электролитом при осаждении меди. В учреждении министерства энергетики США, National Renewable Energy Laboratory (NREL), опробован электролит для осаждения меди, не содержащий кислоты. В его состав входят нитрат меди, диметилсульфоксид и тиомочевина. В презентации этого не сказано, но вероятно, что осаждение меди из данного электролита происходит без протекания тока (electroless plating). В NREL показали, что этот электролит позволяет осажать слой меди прямо на ВТСП, без существенного снижения критических свойств слоя! В компании SuperPower такое кардинальное изменение технологии пока не считают необходимым, но планируют перейти на слой серебра толщиной 0,5 мкм, что должно втрое увеличить скорость производства и сделать провод дешевле. В исследованиях также показано, что медь можно осажать из кислотного электролита на тонкий слой меди, выращенный по новой методике. Эта ремарка позволяет предположить, что новый метод осаждения меди не отличается высокой скоростью и его предполагается использовать в связке с традиционным методом осаждения.

В 2009-м году процесс осаждения ВТСП-плёнок, содержащих включения цирконата бария, был пе-

ренесён специалистами SuperPower с исследовательского оборудования на пилотную установку.

Мы, конечно, не знаем, что из перечисленного перейдёт в технологический цикл компании. О двух упрощениях технологии SuperPower мы уже рассказывали (буферный слой  $ZrO_2-Sm_2O_3$  и смешанный слой  $Al_2O_3-Y_2O_3$ : 2008, т. 5, вып. 1). Те разработки, однако, не были реализованы в производстве. Очевидно, внедрение нового процесса при устоявшейся технологической последовательности требует наличия «критической массы» преимуществ. Обладают ли ей перечисленные выше подходы, покажет ближайшее будущее.

С.В. Самойленков

*1. Y. Xie et al., "2G HTS wire research effort for cost reduction", KEPRI-EPRI Joint Superconductivity Conference, Daejeon, South Korea (2009).*

## ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

### Исследование рынка ВТСП - 2009

Американская фирма Bento Strategy, консультирующая по вопросам менеджмента и специализирующаяся на исследованиях рынка, уже второй год проводит оценку состояния мирового рынка сверхпроводников и изделий из них. Метод исследования – анкетирование респондентов – профессионалов в научных, промышленных и управленческих структурах, имеющих отношение к сверхпроводимости.

Исследования преследовали следующие цели:

- получение количественной, информации о наиболее вероятных областях использования ВТСП материалов;
- оценка тенденций, сроков и потенциала развития рынка;
- оценка конкурентоспособности ВТСП материалов в различных областях их использования.

Лидерами по числу респондентов стали страны Западной Европы - 30%, на втором месте США - 28%, в Японии - 12%, Корею - 7%, российские респонденты представлены 3%.

Наиболее активно в опросах приняли участие учёные из академических институтов (40%). Сотрудники государственных научных учреждений составили 29%. Следует отметить, что по сравнению с прошлым годом на 5% вырос интерес к ВТСП у представителей промышленного сектора, достигший в 2009 году 18%. Возросло на 7% число респондентов из среды инженерно-технических работников и руководства. Эти цифры позволяют предположить рост активности персонала, занятого использованием сверхпроводимости в своих проектных работах. Однако некоммерческий сектор все еще занимает три четверти от списка респондентов.

Собранная и представленная в отчёте большим количеством диаграмм и таблиц информация, позво-

лила аналитикам Bento Strategy сделать ряд интересных выводов.

1. Более половины опрошенных (60%) уже купили сверхпроводящий провод, или хотят купить его в ближайшие 3 года. Почти 90% респондентов планируют в будущем купить ВТСП провод второго поколения.

2. 95% респондентов назвали американские фирмы SuperPower (50% голосов) и AMSC (45% голосов) наиболее вероятными поставщиками ВТСП провода в течение ближайших 3-х лет. Японская фирма Sumitomo Electric заняла третье место (37%). С большим отрывом отстают Европейские фирмы Bruker HTS, Columbus Superconductors (12%) и Zen-ergy Power (10%).

3. Наибольшей коммерческой выгодой при использовании ВТСП материалов респондентами признаны сверхпроводниковые ограничители тока (COT), токовводы, магниты для физических исследований (ЯМР, физика высоких энергий и т.д.), магниты для медицинских исследований (МРТ), а также СКВИД электроника.

4. Веским козырем при внедрении ВТСП устройств будет возможность использования для их охлаждения микрофридженаторов вместо жидких хладагентов. Однако многих волнует современное состояние разработок в этой области и особенно понимание того факта, что недостатки современного криогенного оборудования могут сильно замедлить выход ВТСП устройств на рынок, что становится существенной помехой в среднесрочной перспективе коммерциализации ВТСП оборудования.

5. С точки зрения респондентов в ближайшей перспективе наиболее вероятна коммерциализация ВТСП изделий в сферах науки и техники, медицины и обороны.

6. Следует отметить возникновение интереса к использованию провода на основе  $MgB_2$  в магнитах для МРТ.

7. Отмечена оригинальность использования ВТСП в индукционных нагревателях; их высокие показатели по энергосбережению могут привлечь широкое внимание общественности.

8. Для применения ВТСП технологий в промышленности необходимо иметь сначала в наличии работающие прототипы изделий, чтобы привлечь внимание к крупным проектам. В настоящее время уже существует ряд готовых прототипов изделий и нужны только спонсоры для создания демонстрационных образцов.

9. Базовой характеристикой сверхпроводящего провода 43% респондентов называют доступность цельных 1000 метровых кусков. Однако 66% опрошенных специалистов считают приемлемыми и 500 метровые куски. Для высокополевых магнитных

систем, как отмечается, необходимы провода 2 км длины.

10. Примечательно, что призывается перестать задавать цену сверхпроводящих проводов в единицах \$/кА-м.

11. Как видно из таблицы 1, приемлемой ценой на ВТСП провода для нужд НИОКР признаны цены от 150 до 500 и более \$/кА-м, для прототипов изделий – от 75 до 150 \$/кА-м и для начального производства – от 25 до 75 \$/кА-м. Рентабельной для широкомасштабного использования ВТСП материалов большинство респондентов считают цену ниже 10 \$/кА-м.

12. Характеристики сверхпроводящих изделий остаются самым главным фактором, но их рентабельность по-прежнему определяется ценой.

13. Хотя ВТСП 2-го поколения и признаются наиболее приемлемыми для применения в большом числе устройств, однако для ЯМР и магнитных систем с полем >15 Тл и МРТ с полем >3 Тл респонденты отдают предпочтение низкотемпературным сверхпроводникам или MgB<sub>2</sub> (см. Таблицу 2).

Таблица 1

	НИОКР, %	Прототипы изделий, %	Начальное производство, %	Коммерческое применение, %
>\$500/кА-м	88	5	4	3
\$300/кА-м	64	33	1	2
\$150/кА-м	42	49	9	1
\$100/кА-м	31	48	18	4
\$75/кА-м	14	46	31	9
\$50/кА-м	12	28	45	15
\$25/кА-м	3	18	44	36
\$10/кА-м	4	4	30	63
<\$10/кА-м	6	3	4	87

Таблица 2

	НТСП (%)	ВТСП-1 (%)	ВТСП-2 (%)	MgB <sub>2</sub> (%)	СП не нужны (%)
СОТ(>69 кВ)	1	10	71	3	4
СОТ(<69 кВ)	1	10	65	8	6
Электродвигатели (>10 МВА)	3	9	64	5	6
Генераторы (>2,5 МВА)	3	8	64	5	7
Лабораторные соленоиды >1 Тл (ж/азот)	5	13	62	7	2
Трансформаторы (>10 МВА)	4	11	51	4	21
ЯМР >15 Тл	35	11	34	9	1
Лабораторные соленоиды >15 Тл (ж/гелий)	34	12	34	8	1
МРТ >3 Тл	30	5	26	26	1

Приведенная в отчете таблица иллюстрирует высокую оценку научной общественностью ВТСП провода 2-го поколения.

Ю.А. Терентьев

1. *Superconductor Market Research HTS in 2009, prepared by Bento Strategy (2009).*

## ВТСП УСТРОЙСТВА

### Перспективы ВТСП магнитных систем со сверхсильными полями

Прогресс производства высокотемпературных сверхпроводящих материалов расширяет возможности их применения в различных областях науки и техники. С помощью сверхпроводящих магнитов с ВТСП вставками станет возможным при темпера-

туре жидкого гелия относительно дешево получать поля с индукцией более 30 Тл. Это даст огромные преимущества, так как для низкотемпературной сверхпроводимости такие поля просто недостижимы, а биттеровские магниты неприемлемо дороги в эксплуатации.

С помощью комбинированных (ВТСП+НТСП) целиком сверхпроводящих соленоидов исследователи смогут проводить измерения в сверхвысоких магнитных полях сколь угодно долго, что качественно поднимет уровень исследований в магниторезонансной томографии, биологических исследованиях, физике полупроводников и металлов, а также изучении самих ВТСП материалов.

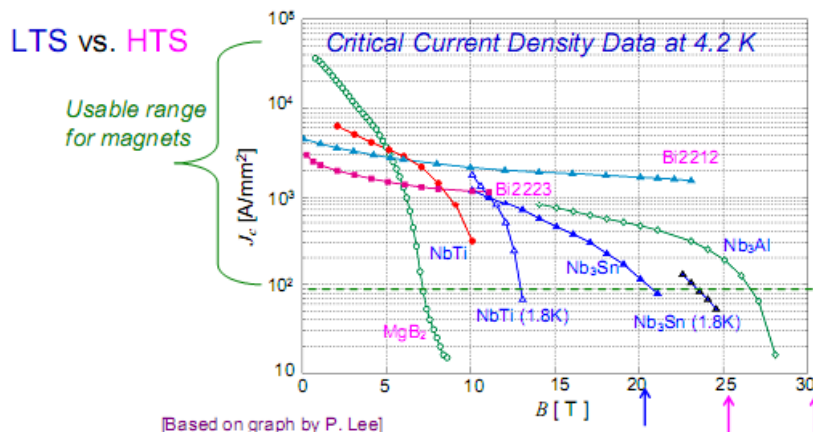



Рис. 1. Сравнение полевых зависимостей критических токов ВТСП и НТСП проводников.

ВТСП вставка



Coil ID	9.5 mm (clear)
Winding ID	19.1 mm
Winding OD	~ 87 mm
# of Pancakes	12 (6 x double)
2G wire length used	~ 462 m
Coil constant	~ 44.4 mT/A
Average Ic of wires in coil	78 A in 4 mm width (77 K, self field)

Ic of Wires in Coil	72 A – 82 A (77K, sf)
4.2 K Coil Ic - self field	221 A
4.2 K Amp Turns @ Ic- self field	612,612
4.2 K Je @ Ic, self field	346.7 A/mm²
4.2K Peak Radial Field @ Ic, self field	3.2 T
4.2 K Central field – self field	<b>9.81 T</b>
4.2 K Coil Ic – 19 T background (axial)	175 A
4.2 K Amp Turns @ Ic – 19 T background (axial)	485,100
4.2 K Je @ Ic, 19 T background (axial)	274.6 A/mm²
4.2 K Peak Radial Field @ Ic, 19 T bkgd (axial)	2.7 T
4.2K Central Field – 19 T background (axial)	<b>26.8 T</b>

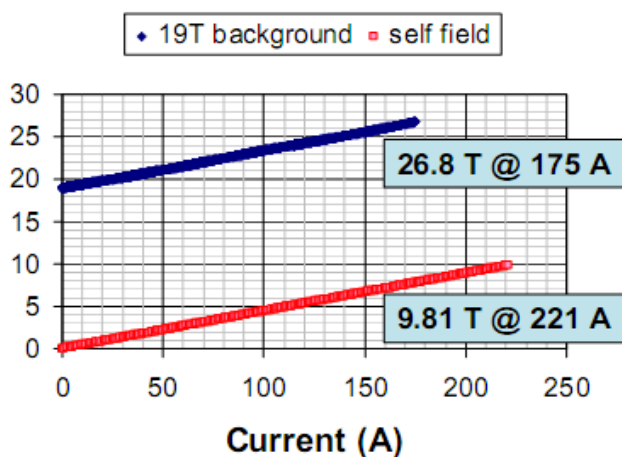


Рис. 2. Гибридный магнит MagLab&SuperPower на 26,8 Тл при 4,2 К (ВТСП-7,8/Битер-19 Тл).

Из данных, приведенных на рис. 1, видно, что даже с использованием переохлажденного гелия (1,8 К), что само по себе дорого и неудобно, Nb<sub>3</sub>Sn проводники не пригодны для получения высоких полей в силу сильной деградации их критических токов. Хотя для более экзотических проводников на основе Nb<sub>3</sub>Al падение токонесящей способности не столь сильно,

на сегодняшний день не налажено их промышленного производства с более или менее представительными длинами. Решением проблемы может стать использование ВТСП проводников на основе Bi2223, Bi2212 и YBCO, критические поля которых составляют до (а при 4,2К превышают) 100 (!) Тл.

Сегодня инженеры из Национальной Лаборатории Сильных Магнитных Полей (MagLab, Флорида, США) в сотрудничестве с SuperPower Inc., как никогда близки к прорыву в производстве высокополевых магнитов для различных физических исследований. За короткий срок ими было заявлено сразу о двух мировых рекордах в достигнутой индукции магнитного поля – 10,4 Тл на ВТСП-2 соленоиде, и 33,8 Тл на гибридной маг-

нитной системе (биттеровский магнит на 31 Тл и ВТСП-2 вставка на 2,8 Тл). события развивались следующим образом.

В 2007 году SuperPower сообщила об испытаниях ВТСП галетной катушки (рис. 2) с индукцией поля при 4,2К в 9,8 Тл (0,73 Тл при 77 К). При использовании этой катушки в качестве высокополевой вставки в 20 МВт биттеровский магнит с индукцией 19 Тл и отверстием диаметром 20 см удалось достигнуть рекордного на тот момент поля в 26,8 Тл.

Спустя год, на похожей галетной катушке, намотанной из ВТСП проводников 2-го поколения легированных цирконием, было достигнуто магнитное поле в ~ 1,1 Тл при 77К.



Coil ID	12.7 mm (clear)
Winding ID	19.1 mm
Winding OD	~ 84 mm
Coil Height	~ 73.6 mm
# of Pancakes	16 (8 x double)
2G wire used	~ 600 m
# of turns	~ 3696
Coil $J_e$	~155.3 A/mm <sup>2</sup> @ 100A
Coil constant	~ 51.8 mT/A
Wire $I_c$ (77 K, sf)	120 A – 180 A

Рис. 3. Гибридный магнит MagLab&SuperPower на 27,4 Тл при 4,2К (ВТСП-7,5 Тл/Битер-19,9 Тл).

Temperature (K)	77	65	4.2
Central field – self field (T)	1.39	2.49	10.4
Total Central Field – in background field (axial) (T)	1.93	4.60	27.4
With Background field (T)	1.0	3.0	19.89

Самым главным недостатком описанных выше биттеровских магнитных систем является чрезвычайно высокие энергозатраты и, как следствие, стоимость их эксплуатации. Средняя цена часа работы мощного биттеровского магнита составляет 774\$, в то же время, работа сверхпроводящего магнита обходится в 18\$/час. СП магнит практически не расходует электроэнергию после достижения рабочего поля, за исключением энергозатрат на обеспечение работы криогенной системы. Дни и даже недели работы полностью сверхпроводящих магнитов могут быть очень дешевы, в сравнении с работой громоздких энергоемких биттеровских магнитов.

В свете всего вышесказанного неудивительно, что сразу же после обнародования удачных опытов с ВТСП вставками в биттеровских магнитах началось финансирование проекта MagLab по созданию полностью сверхпроводящего (ВТСП+НТСП, рис. 4) комбинированного магнита на 32 Тл (что на 45% выше

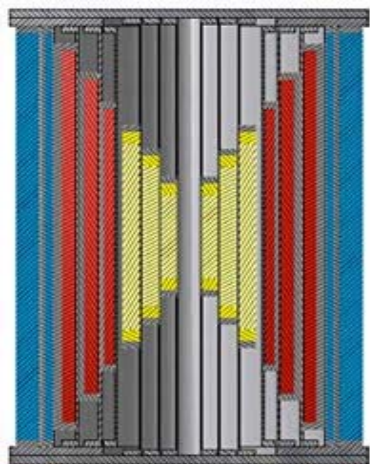
И наконец, в октябре 2008 года, абсолютным (на сегодняшний день) мировым рекордом достигнутой индукции магнитного поля стал гибридный магнит на 33,8 Тл, состоящий из ВТСП вставки на 2,8 Тл (из 40 м ВТСП ленты 2-го поколения) в узкоканальном биттеровском магните на 31 Тл.

Вторым рекордом MagLab и SuperPower в июле 2009 года стала более крупная ВТСП катушка (было использовано в 15 раз больше проводника, чем в катушке на 2,8 Тл), способная создавать поле в 10,4 Тл при 4,2К. При ее совместном включения в широком канале биттеровского магнита на 19,9 Тл удалось достигнуть поля в 27,4 Тл (рис. 3).

полей, получаемых при помощи самых мощных низкотемпературных магнитов). Национальный научный фонд США и Университет Флориды выделили на эти цели \$2 и \$1 млн., соответственно. Предполагаемый срок поставки готового устройства - осень 2012. Одновременно с MagLab британская компания Magnifye занимается поиском способов снижения стоимости первичной запитки током таких магнитов.

Необходимо добавить, что экспериментами с использованием ВТСП вставок также занимается группа ученых из Японского Национального Института Материаловедения и Международного Технологического Центра Сверхпроводимости Японии. И хотя достигнутые ими поля несколько меньше рекордов MagLab, тем не менее, эти работы заслуживают внимания. В качестве материалов для высокополевых вставок они используют ВТСП проводники 2-го поколения собственного производства ( $J_e = 560$  А/мм<sup>2</sup> в 20 Тл) и GdBCO ( $J_e = 415$  А/мм<sup>2</sup> в

29 Тл при 4,2К). С помощью чисто сверхпроводящего комбинированного магнита при 4,2 К было достигнуто максимальное поле в 20,1 Тл (НТСП - 14,1 Тл/YBCO - 6 Тл). Параметры ВТСП вставки: 5 витков, 125 слоев без пропитки, длина проводника - 138 м. В свою очередь, в резистивном магните на 28,3 Тл ВТСП вставка смогла поднять индукцию на 1 Тл. Параметры вставки: 8 витков, 17 слоев без пропитки, длина проводника - 14 м.

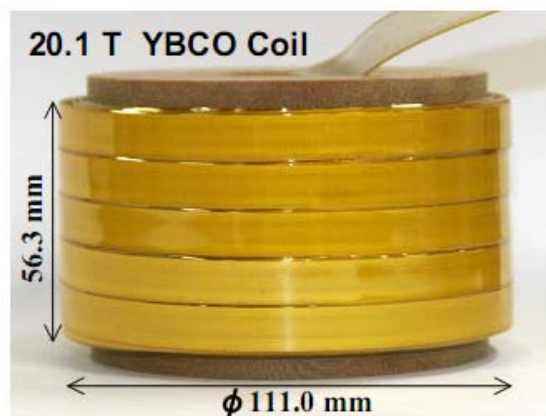


Диаметр отверстия - 34 мм  
 Цена - 3 млн. долл.  
 Длина YBCO ленты - 8 км  
 Однородность поля  $5 \cdot 10^{-4}$  в  $1 \text{ см}^3$

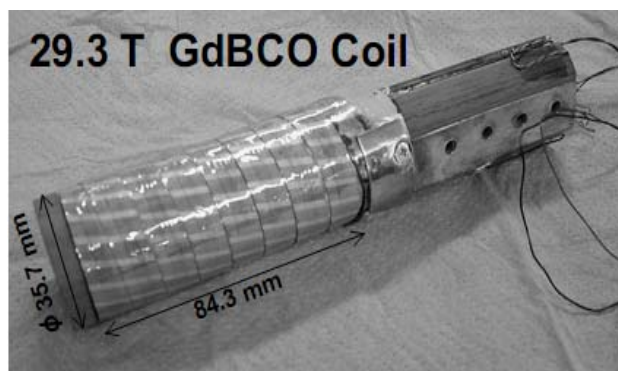
Рис. 4. Проект комбинированного чисто сверхпроводящего магнита (желтым показаны ВТСП катушки, красным – Nb<sub>3</sub>Sn, синим – NbTi).

Одной из наиболее важных областей применения высокопольных магнитов является ЯМР спектроскопия сверхвысокого разрешения. Использование ВТСП вставок в магнитах спектрометров позволит не только создать ряд уникальных установок с рекордными параметрами (поле выше 23,5 Тл), но и превратить единичные ЯМР спектрометры на 800-1000 МГц в серийное лабораторное оборудование. На рис. 6 показана история развития ЯМР магнитов. Видно, что использование ВТСП вставок сможет существенно повысить рабочие характеристики.

Работы над высокополевыми магнитами для ЯМР активно ведутся в ряде зарубежных научных центров. Особенно следует отметить работы исследовательской группы Массачусетского Технологического Института (MIT, США) под руководством профессора Ивасы, нацеленные на разработку ЯМР магнитов с частотами  $\geq 1$  ГГц, за счет использования вставок из Bi-2223.



а



б

Рис. 5. ВТСП вставки японских гибридных магнитов на 20,1 (полностью сверхпроводящий) и 29,3 Тл (с резистивным магнитом внешнего поля).

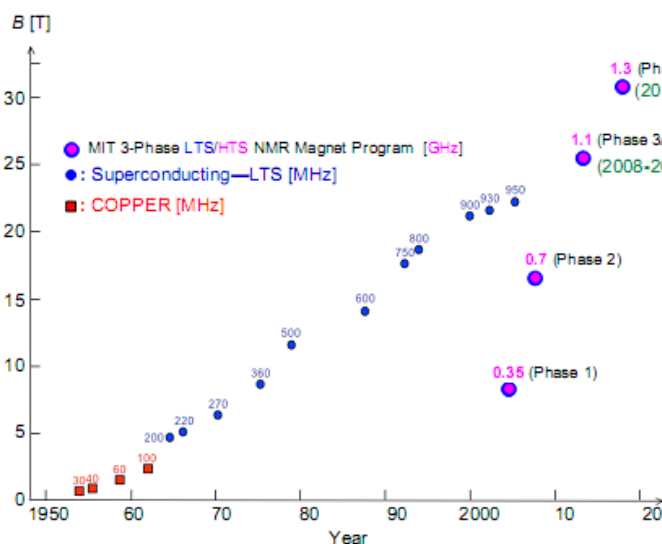


Рис. 6. История развития ЯМР магнитов.



HTСП 600 МГц



ВТСП 100 МГц

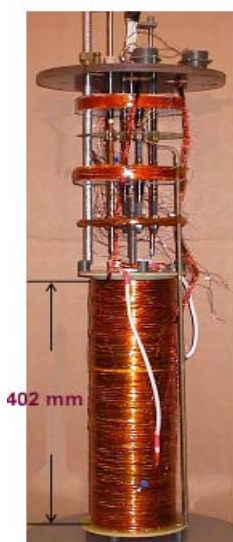


Рис. 7. 700 МГц (16,5 Тл) ЯМР магнит с ВТСП вставкой Массачусетского Технологического Института.

На рис. 7 показаны HTСП магнит на 600 МГц с холодным каналом в 140 мм и 100 МГц ВТСП вставка в виде 48 двойных галет Bi-2223 (диаметр теплового канала 55 мм). Следующим шагом исследователей из MIT должны стать 1,1 ГГц (2012 г.) и 1,3 ГГц (2017 г.) магниты – см. рис. 8.

Даже первые эксперименты с комбинированными HTСП/ВТСП магнитами открывают огромные возможности в получении дешевых в эксплуатации сверхсильных магнитных полей. Рекордные критические поля ВТСП материалов (~ 100 Тл) позволяют надеяться на новые рекорды, и в недалеком будущем высокопольные магниты из уникальных штучных устройств, могут превратиться в серийное лабораторное оборудование.

Phase 3A: 1.1 GHz

Phase 3B: 1.3 GHz

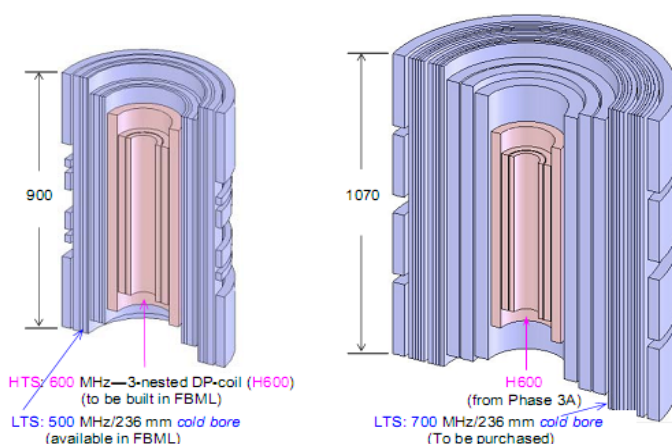


Рис. 8. Проект 1,1 и 1,3 ГГц комбинированных (HTСП/ВТСП) ЯМР магнитов MIT.

Д.И. Шумова

1. *Superconductor Week*, 23, no. 20 (2009).
2. *SuperPower presentation on International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, "High Field Magnet Made of Second Generation High Temperature Superconducting (2G HTS) Wire"* (2008).
3. <http://www.losangeleschronicle.com/articles/view/115001>.
4. <http://nextbigfuture.com/2009/10/32-tesla-ycho-magnet-project-targets.html>.
5. *SuperPower presentation on 21 International Conference on Magnetic Technologies, Hefei, China, "Second-Generation HTS Wire for Magnet Applications"* (2009).
6. *ISTEC presentation "YBCO Coil and Long Coated YBCO Coil and Long Coated Conductors in High Magnetic Field conductors in High Magnetic Field"*.
7. *LANL presentation on 19th International Symposium on Superconductivity, Nagoya, Japan, "Overview of Japan Progress"* (2006).

### Сверхпроводящие ЯМР спектрометры

Разработкой и производством ЯМР спектрометров в мире занимается около десяти компаний, которые можно разделить на три основные группы: производители спектрометров низкого разрешения (как правило, на постоянных магнитах), производители сверхпроводящих ЯМР спектрометров, а также производителей электроники, программного обеспечения и аксессуаров для ЯМР спектроскопии. Мировыми лидерами в разработке и производстве сверхпроводящих ЯМР спектрометров являются компании Varian NMR, Bruker Biospin и JEOL, которые предлагают законченный модельный ряд спектрометров с частотами от 400 МГц до 1000 МГц. Следует отметить, что для спектрометров высокого и сверхвысокого разрешения сверхпроводя-

щие магнитные системы практически всегда изготавливаются на заказ сторонними фирмами, например компанией Oxford Instruments. При производстве ЯМР спектрометров среднего разрешения также часто прибегают к контрактному производству, что не вносит ясности в вопрос о том, кто же конкретно изготовил сверхпроводящую магнитную систему спектрометра и ее криостат. ЯМР спектрометры можно разбить на несколько групп, каждая из которых рассчитана на решение своего круга задач:

- **ЯМР Спектрометры низкого разрешения**, рабочая частота 100 МГц или менее. Как правило, такие установки часто выполнены на базе постоянных магнитов или несверхпроводящих электромагнитов; их разрешающей способности недостаточно чтобы отличить одно сложное органическое соединение от другого. Основное назначение таких ЯМР спектрометров - проведение различных экспресс тестов, как для научных задач, так и для задач контроля качества химической и пищевой продукции.

- **ЯМР спектрометры среднего разрешения**, рабочие частоты 400 и 500 МГц (9,36 и 11,75 Тл), в год в мире выпускается около тысячи штук. Применяются для широкого круга химических и биологических исследований, задач контроля качества и сертификации в фармацевтике и на производствах со сложной химической технологией (производство полимеров, нефтехимия). Следует отметить, что прогресс в электронике привел к тому, что современные ЯМР спектрометры с частотами 400 и 500 МГц по своим характеристикам часто не уступают устройствам на 600 МГц двадцатилетней давности. Магнитная экранировка соленоида является обязательной для ЯМР спектрометров данного класса, за счет чего он может быть установлен в любой лаборатории без специальной подготовки помещения.

- **ЯМР спектрометры высокого разрешения** с рабочими частотами 600 и 700 МГц (14,04 и 16,38 Тл) предназначены для исследований в области молекулярной биологии, биохимии, химии и физике наносистем. Они стали обязательным атрибутом лаборатории любой крупной фармацевтической компании. В фармацевтике ЯМР спектрометрия высокого разрешения помогает значительно ускорить процесс химического анализа и сократить сроки разработки новых лекарств. Разрешающая способность этих устройств позволяет производить детальный анализ нуклеиновых кислот и протеинов. Как правило, спектрометры этого класса имеют экранированную магнитную систему, что снижает воздействие магнитного поля на другое лабораторное оборудование и позволяет разместить его более компактно. В год в мире производится несколько сот таких ЯМР спектрометров.

- Для исследований в молекулярной биологии, физике и химии наносистем и в целом ряде других областей необходимы ЯМР спектрометры с максимально возможным разрешением. Стоимость подобных устройств чрезвычайно высока; используемые в них технические решения лежат на пределе возможностей современной сверхпроводящей технологии. Если ЯМР спектрометры с частотами 800 - 900 МГц (18,72 - 21,06 Тл) еще производятся малыми сериями (суммарно по всем производителям несколько десятков единиц в год), то рекордные спектрометры на 1000 МГц (23,5 Тл) представлены единичными образцами далекими от законченного коммерческого продукта (в основном, по причине отсутствия экранировки магнитного поля). Как правило, такие спектрометры охлаждаются жидким гелием с пониженной до 2,2 К температурой, что сильно затрудняет их эксплуатацию. Высокая стоимость и необходимость выделения под ЯМР спектрометр сверхвысокого разрешения специального помещения ограничивает их использование центрами коллективного использования в крупных научных центрах. На рис. 1. изображены рекордные спектрометры производства BrukerBiospin.



Рис. 1. ЯМР спектрометры на 950 МГц (22,33 Тл) и 1000 МГц (23,5 Тл), Bruker Biospin.

Высокой разрешающей способности в современных ЯМР спектрометрах удалось добиться за счет использования так называемых криогенных проб, высокочастотная часть которых охлаждается до температуры жидкого гелия с целью уменьшения шумов. Современные криогенные пробы (рис. 2.) позволяют снимать ЯМР спектр на водороде, углероде, фторе и фосфоре без перекоммутации аппаратуры, что сильно ускоряет работу экспериментатора.

Недавно были разработаны специальные криогенные пробы способные превратить ЯМР спектрометр в миниатюрный МРТ томограф с пространственным разрешением до 10 мкм и уникальной возможностью совмещения данных ЯМР спектрометрии и МРТ томографии. К сожалению, размер образцов, которые можно исследовать по данной технологии ограничен одним-двумя сантиметрами. ЯМР спектрометр на 600 МГц и криогенная проба

(устанавливается в рабочем отверстии спектрометра снизу) изображены на рис. 2.



Рис. 2. Криогенная проба, ЯМР спектрометр на 600 МГц вместе с установленной в нем криогенной пробой, Bruker Biospin.

Следует обратить внимание на разрабатываемую в Bruker Biospin технологию усиления ЯМР сигнала при помощи сверхпроводящего гиротрона (источника СВЧ излучения) с частотой 263 ГГц (магнитное поле соленоида гиротрона 9,7 Тл) и мощностью 25 Вт, за счет чего чувствительность спектрометра

возрастает в 20-80 раз. Данный метод будет полезен при обнаружении следовых количеств различных веществ. Технология была успешно опробована на стандартном ЯМР спектрометре с частотой 400 МГц (9,36 Тл). На рис. 3 изображен гиротрон на 263 ГГц и стандартный спектрометр серии Nanobay.



Рис. 3. Сверхпроводящие ЯМР спектрометр на 400 МГц (слева) и гиротрон на 263 ГГц (справа), Bruker Biospin.

Появление ВТСП проводников второго поколения открывает широкие перспективы в создании ЯМР спектрометров сверхвысокого разрешения, становится возможной разработка и изготовление установок на частоты 1100 МГц, 1200 МГц и в перспективе даже 1500 МГц (поле 35,25 Тл). Рост разрешающей способности ЯМР спектрометров в 1,5

раза сулит некоторую революцию в молекулярной биологии, биохимии, фармацевтике. Использование ВТСП вставок в сверхпроводящие магнитные системы ЯМР спектрометров позволит не только сделать ряд уникальных установок на рекордные параметры, но и превратить ЯМР спектрометры на 800-

1000 МГц из единичных уникальных установок в серийное лабораторное оборудование.

1. [www.bruker-biospin.com](http://www.bruker-biospin.com).

2. <http://www.jeol.com/>.

*В.И. Щербаков*

**Издатель Корпорация "Русский сверхпроводник"**

Научный редактор: *В.С. Круглов*, зам. директора ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт»

Редакторы: *В.С. Высоцкий* [vysotsky@gmail.com](mailto:vysotsky@gmail.com), *В.И. Щербаков* [sherby@isssph.kiae.ru](mailto:sherby@isssph.kiae.ru)

Ответственный редактор: *М.П. Смаев* [perst@isssph.kiae.ru](mailto:perst@isssph.kiae.ru)

В подготовке выпуска принимали участие: *С.В. Самойленков*, *Ю.А. Терентьев*,

*А.К. Чернышева* [perst@isssph.kiae.ru](mailto:perst@isssph.kiae.ru), *Д.И. Шутова*

Верстка: *И.Л. Фурлетова*