



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2016–6

И.В. Богданов, С.С. Козуб, В.М. Смирнов, В.В. Сытник,
И.С. Терский, Л.М. Ткаченко, О.В. Трусов, Л.С. Ширшов,
В.И. Шувалов, П.А. Щербаков,
А.А. Молодык¹, С.Р. Ли¹, С.В. Самойленков¹

ВТСП дипольный магнит

Направлено в журнал *Superconductor
Science and Technology*

¹ ЗАО «СуперОкс»

Аннотация

Богданов И.В., Козуб С.С., Смирнов В.М. и др. ВТСП дипольный магнит: Препринт ИФВЭ 2016–6. – Протвино, 2016. – 19 с., 17 рис., 4 табл., библиогр.: 18.

Представлены конструкция и результаты испытаний дипольного магнита с ВТСП обмоткой, изготовленной из ВТСП ленты второго поколения производства ЗАО «СуперОкс». Дипольный магнит рассчитан на центральное магнитное поле 1 Тл в апертуре $40 \times 80 \text{ мм}^2$ при 77 К. Приведены характеристики ВТСП ленты, ее изоляционного покрытия и сталей, использованных в этом магните. Представлены результаты испытаний магнита при температурах 77, 65 и 4.2 К и проведено сравнение измеренных и расчетных результатов.

Abstract

Bogdanov I.V., Kozub S.S., Smirnov V.M. et al. HTS dipole magnet: IHEP Preprint 2016–6. – Protvino, 2016. – p. 19, figs. 17, tables 4, refs.: 18.

The design and test results of the dipole magnet with HTS coil, made of a second-generation HTS tapes, which was produced by JSC "SuperOx", are presented. The dipole magnet is designed on the central magnetic field of 1 T in the aperture of $40 \times 80 \text{ mm}^2$ at 77 K. The characteristics of the HTS tape, an insulation coating and steels, used in this magnet, are presented. The test results of the magnet at temperatures of 77, 65 and 4.2 K are presented and a comparison of measured and calculated results is performed.

1. Введение

В настоящее время в России ведутся интенсивные разработки нового перспективного направления в сверхпроводимости (СП) – использование высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2) в установках промышленного и научного назначения [1-11]. В отличие от низкотемпературных сверхпроводников, требующих охлаждения весьма дорогостоящим жидким гелием, эти материалы достаточно охлаждать существенно более дешевым и доступным жидким азотом. Обмотки из ВТСП лент второго поколения представляют большой интерес не только для электрических машин, но и для создания ВТСП магнитов для ускорителей элементарных частиц. Такие магниты позволят значительно повысить экономичность и эффективность работы высокоэнергоемкой ускорительной магнитной системы. В СП магните с ВТСП вставками получены магнитные поля 27 Тл [1] и 24.6 Тл в ВТСП магните [2]. ВТСП дипольный магнит для коммерческих целей был разработан с использованием ВТСП провода первого поколения [3]. Замена резистивных магнитов на ВТСП обмотки в ускорителях обеспечивает значительное снижение эксплуатационных расходов [4, 5]. Одним из первых был создан дипольный магнитов из ВТСП второго поколения, который достиг 2 Тл при 1.8 К [6]. В настоящее время совместными усилиями под руководством ЦЕРНа продолжают работы по созданию ВТСП дипольных магнитов в качестве вставок в СП магниты, чтобы в ускорительных магнитах достигнуть магнитные поля, превышающие 20 Тл [5,7]. В статье представлены конструкция и результаты испытаний дипольного магнита, изготовленного из ВТСП ленты второго поколения в России.

2. Конструкция ВТСП дипольного магнита

На Рис. 1 показано поперечное сечение ВТСП дипольного магнита, в таблице 1 представлены его основные геометрические характеристики.

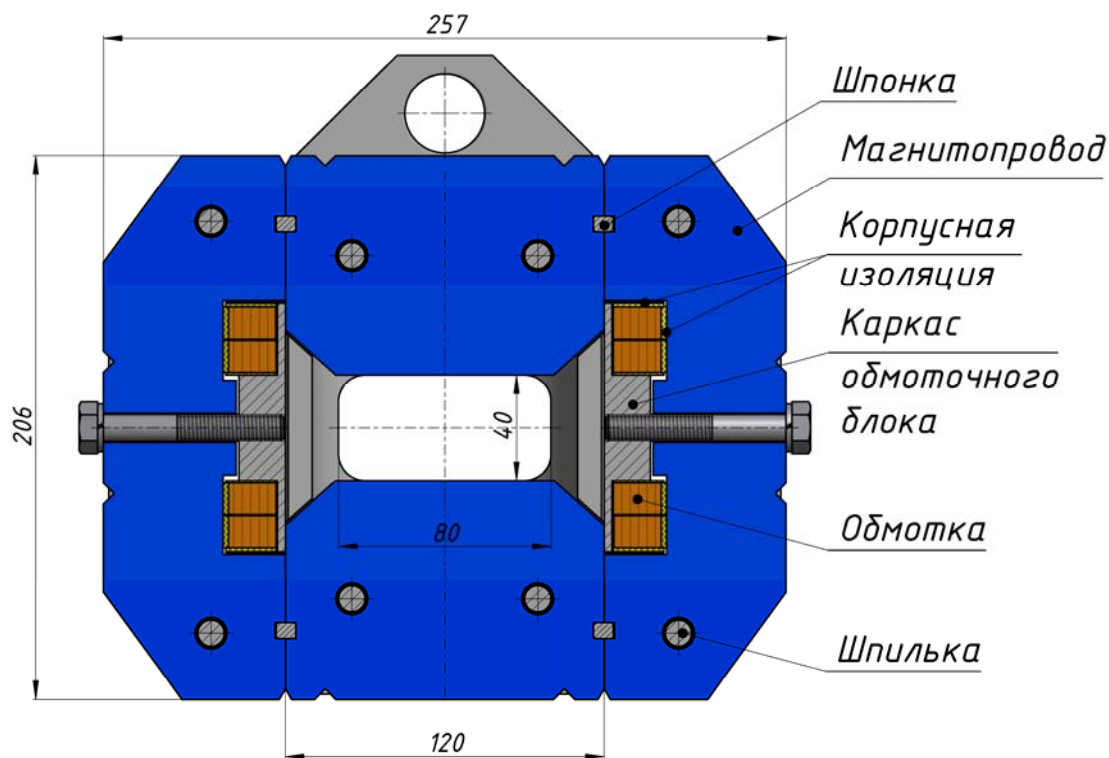


Рис. 1. Поперечное сечение ВТСП дипольного магнита.

Таблица 1. Основные конструктивные параметры ВТСП дипольного магнита

Параметр	Значение
Номинальное магнитное поле в апертуре	1 Тл
Номинальный ток	100 А
Количество обмоток в обмоточном блоке	2
Количество слоев в обмотке	2
Число витков в обмотке	180
Число витков в обмоточном блоке	360
Размеры ВТСП-2 ленты без изоляции	0,1×12 мм ²
Толщина изоляции ВТСП-2 ленты	40 мкм
Длина магнита	425 мм
Длина обмотки	418 мм
Длина прямолинейной части обмотки	250 мм
Длина магнитопровода	250 мм
Размеры апертуры	40×80 мм ²
Вес магнита	103 кг

2.1. Обмоточный блок

Обмоточный блок дипольного магнита состоит из двух рейтрековых обмоток, расположенных симметрично в верхней и нижней части каркаса, изготовленного из нержавеющей стали 304L. Каждая обмотка состоит из двух слоев, соединенных между собой пайкой по мостовой схеме на длине 60 мм. Сопротивление спаев, измеренное на двух коротких образцах ВТСП-2 ленты, составило 13 нОм в собственном поле при температуре 77 К. Число витков в слое равно 90, в обмотке – 180, в обмоточном блоке магнита – 360. Между слоями обмотки проложена изоляция из стеклотекстолита G11 толщиной 0,5 мм. Обмотки отделены от каркаса и магнитопровода корпусной изоляцией из G11 толщиной 2 мм.

2.2. Магнитопровод

Как показано на Рис. 1, магнитопровод состоит из четырех частей. Каждая часть набирается из пластин толщиной 0.5 мм, изготовленных из электротехнической стали марки 2212 и имеющих лаковое покрытие толщиной 5 мкм с каждой стороны. Пакет пластин магнитопровода сжимается в продольном направлении через торцевые пластины толщиной 8 мм посредством изолированных шпилек диаметром 10 мм из стали 304L и сваривается продольными швами. Коэффициент заполнения магнитопровода равен 0.97. Для юстировки частей магнитопровода в поперечном направлении относительно обмоточного блока при сборке используются четыре шпонки размером $6 \times 7.5 \text{ мм}^2$ из стали 304L. Части магнитопровода крепятся болтами М10 к каркасу обмоточного блока, а затем свариваются между собой продольными швами.

3. Свойства материалов

3.1. ВТСП лента

Для изготовления обмотки дипольного магнита была использована ВТСП-2 лента производства ЗАО «СуперОкс», характеристики которой приведены в таблице 2 [5]. В качестве подложки использован немагнитный сплав Hastelloy C276. Оксидные

буферные слои получены методом распыления и осаждения в ассистирующем ионном пучке (IBAD), а ВТСП слой состава $GdBa_2Cu_3O_7$ – методом импульсного лазерного осаждения (PLD) [12]. Снаружи ВТСП лента имеет двухстороннее покрытие серебром и медью, общей толщиной слоев 1.5 и 40 мкм, соответственно.

Таблица 2. Характеристики ВТСП-2 ленты «СуперОкс»

Параметр	Значение
Подложка	Hastelloy C276
Минимальный критический ток (77 К, собственное поле)	Не менее 400 А
Ширина ленты	12 мм
Толщина ленты без изоляции	100 мкм
Покрытие серебром	1,5 мкм
Покрытие медью	40 мкм

На Рис. 2 показано распределение критического тока по длине ВТСП ленты для одной из произведенных партий, определенное в режиме протяжки из намагниченности ВТСП-ленты бесконтактным способом, описанным в [13]. Результаты измерений на коротких образцах с длиной измерительного участка образцов 50 мм (таблица 3) подтверждают, что в собственном поле при температуре 77 К критический ток полученной ВТСП-2 ленты «СуперОкс» составляет более 400 А.

Таблица 3. Критический ток коротких образцов ВТСП-2 ленты «СуперОкс»

№ образца	Критический ток, А		
	0,1 мкВ/см	1 мкВ/см	10мкВ/см
1	411	440	472
2	416	445	477
3	410	438	469
4	414	442	474

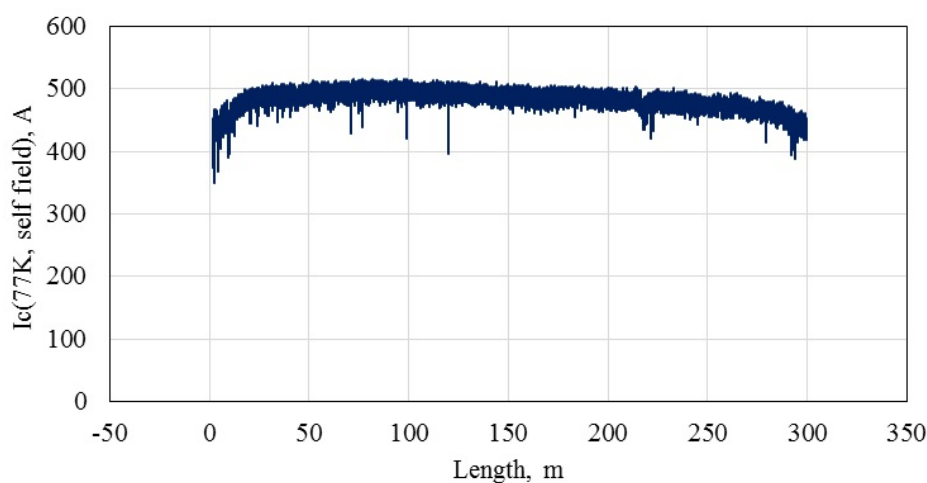


Рис. 2. Критический ток в собственном магнитном поле при 77 К в зависимости от координаты ленты, измеренный для партии ВТСП-2 ленты «СуперОкс».

Критический ток ВТСП-лент уменьшается при увеличении магнитного поля в различной степени, в зависимости от направления приложенного внешнего поля [14]. Анизотропия зависит не только от фундаментальных свойств ВТСП-материала, но и от количества и характера внедренных дефектов, а поэтому определяется методом и условиями получения самой ленты. Для ВТСП-лент производства «СуперОкс» минимальное значение критического тока в магнитном поле наблюдается при направлении силовых линий перпендикулярно поверхности ленты (т.н. перпендикулярное поле или B_{\perp}) [15]. Эта тенденция достаточно универсальна и соблюдается в широком интервале температур. В связи с этим, для оценки критического тока ленты при заданной величине магнитного поля и температуре удобно пользоваться значением $I_c(T, B_{\perp})$, так как при всех остальных направлениях магнитного поля критический ток ВТСП-ленты не ниже этого значения. Для определения критического тока удобно пользоваться отношением $I_c(T, B_{\perp})$ при заданных температуре и поле к критическому току, определенному при температуре кипения жидкого азота без внешнего магнитного поля (в собственном поле, с.п.), $I_c(T, B_{\perp})/I_c(77\text{ K, с.п.})$. Для ВТСП-лент производства «СуперОкс» это значение хорошо воспроизводится от партии к партии [15].

В таблице 4 приведены значения отношения $I_c(T, B_{\perp})/I_c(77\text{ K, с.п.})$ для ВТСП-2 ленты «СуперОкс», где $I_c(T, B_{\perp})$ - критический ток при разных значениях температуры T и перпендикулярной к поверхности ленты компоненты магнитного поля B_{\perp} , $I_c(77\text{ K, с.п.})$ - критический ток при температуре 77 К в собственном магнитном поле ВТСП-ленты [16].

Таблица 4. Отношение $I_c(T, B_{\perp})/I_c(77\text{ K, с.п.})$ от B_{\perp} и T для ВТСП-2 ленты «СуперОкс»

Поле B_{\perp} , Тл	Температура T , К				
	5	20	40	65	77
0.0	11.1	8.40	5.13	2.30	1
0.5	8.25	5.10	2.53	0.82	0.30
1.0	6.06	3.60	1.78	0.55	0.18
1.5	4.93	2.89	1.43	0.42	0.12
2.0	4.22	2.45	1.21	0.33	0.08
2.5	3.78	2.17	1.07	0.28	0.06
3.0	3.41	1.95	0.96	0.23	0.04
3.5	3.11	1.79	0.88	0.20	0.03
4.0	2.88	1.67	0.80	0.17	0.02
4.5	2.67	1.55	0.74	0.15	0.02
5.0	2.52	1.45	0.69	0.13	0.01

3.2. Изоляция ВТСП ленты

В ИФВЭ ВТСП-2 лента была покрыта полиимидной пленкой толщиной 20 мкм с 50% перекрытием, таким образом, толщина изоляции на сторону составила 40 мкм. Измерения электрической прочности изоляции проводились на пакетных образцах ВТСП-2 ленты (Рис. 3) на участке длиной 70 мм при комнатной температуре и

давлении до 10 МПа, приложенном к широкой стороне ленты. Электрическое напряжение прикладывалось поочередно между соседними лентами, что позволило измерить электрическую прочность межвитковой изоляции между всеми ВТСП-2 лентами пакетного образца. Исследуемые образцы размещались под прессом, давление в котором создавалось масляным насосом и контролировалось с помощью манометра. Электрическое сопротивление изоляции измерялось с помощью мегомметра Е6-32, позволяющего проводить измерения в интервале 50-2500 В.

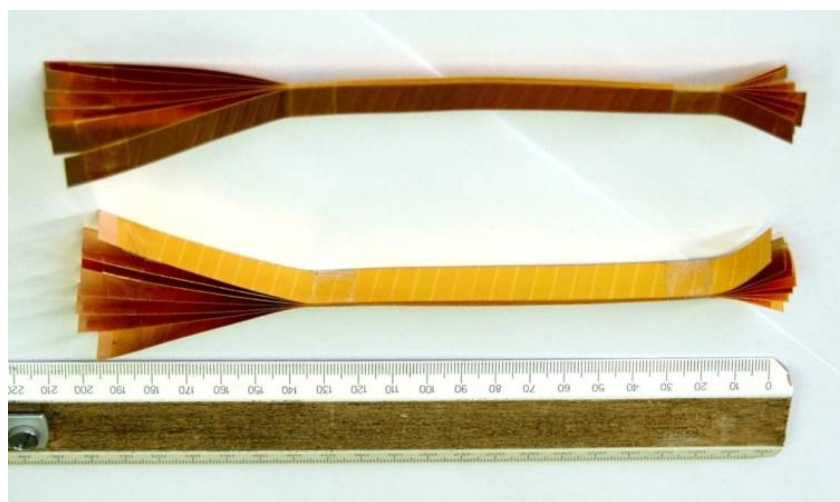


Рис. 3. Пакетные образцы ВТСП-2 ленты.

Исследования, проведенные на 11 парах лент, показали, что изоляция ВТСП ленты из полиимидной пленки толщиной 20 мкм, шириной 10 мм, намотанной с перекрытием 50%, выдержала напряжение до 2.5 кВ, приложенное между соседними лентами, при давлении на изоляцию до 10 МПа.

3.3. Материал магнитопровода

Магнитопровод изготовлен из стали 2212 [17], ее основные характеристики: H_c – коэрцитивная сила, равная 65 А/м, M_S – магнитный момент насыщения, равный 2.12 Тл. Зависимость магнитной проницаемости μ от поля H представлена на Рис. 4. Максимальное значение магнитной проницаемости равно 4680. Зависимость $\mu(H)$ для стали 2212 практически не зависит от температуры [17].

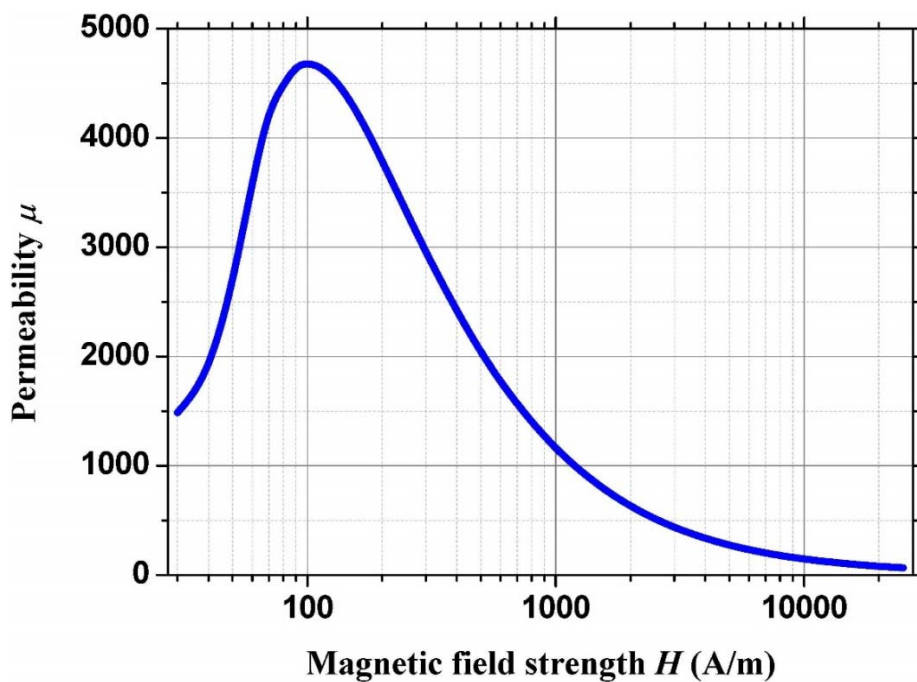


Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости от поля для материала магнитопровода (сталь 2212).

3.4. Нержавеющая сталь

В диполе использовалась аустенитностабильная нержавеющая сталь 304L, обладающая низкой магнитной восприимчивостью при комнатной и низких температурах. При температурах 77 и 4.2 К магнитная восприимчивость 304L не превышает значения 0.01 [17].

4. Магнитные характеристики диполя

Все магнитные характеристики были рассчитаны с помощью компьютерной программы MULTIC [18].

4.1. Эффективная длина магнита

Эффективная длина диполя L_{ef} определяется по формуле:

$$L_{ef} = \frac{1}{B_0(0,0,0)} \int_{-\infty}^{\infty} B_0(0,0,z) dz$$

где $B_0(0,0,0)$ – магнитное поле в центре диполя, $B_0(0,0,z)$ – поле вдоль продольной оси диполя. Центр координат совпадает с центром магнита.

Зависимость эффективной длины диполя от величины рабочего тока представлена на Рис. 5.

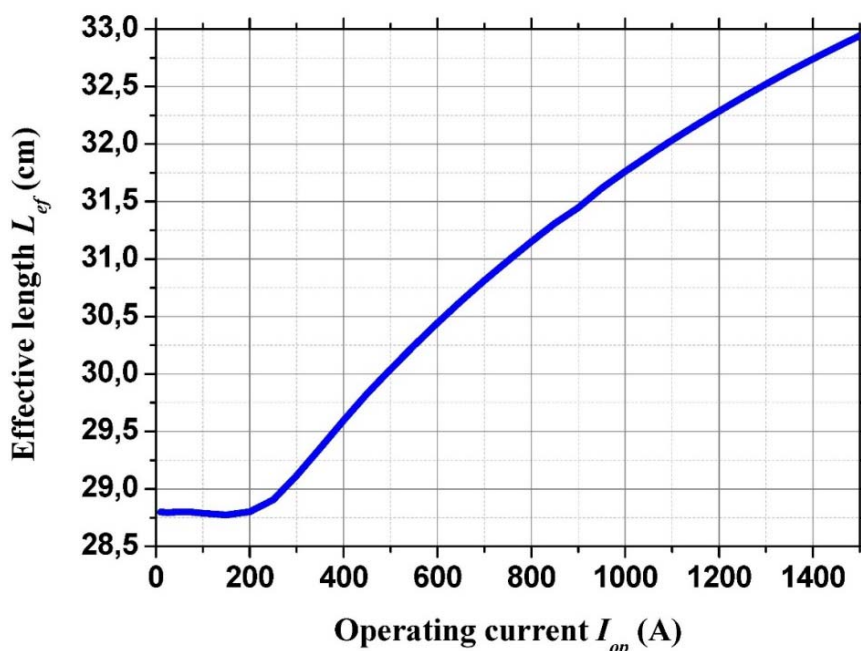


Рис. 5. Зависимость эффективной длины ВТСП диполя от рабочего тока.

Рост эффективной длины диполя при токах свыше 200 А объясняется тем, что в центральном сечении магнитопровод насыщается быстрее и центральное поле растет медленнее роста рабочего тока.

4.2. Пондеромоторные силы

Зависимости компонент пондеромоторных сил в первом квадранте обмотки от рабочего тока представлены на Рис. 6 – Рис. 8. Обозначения на графиках: 1 coil и 2 coil – нумерация слоев катушки, отсчитываемая от медианной плоскости; Total – сила, действующая на оба слоя обмотки в первом квадранте.

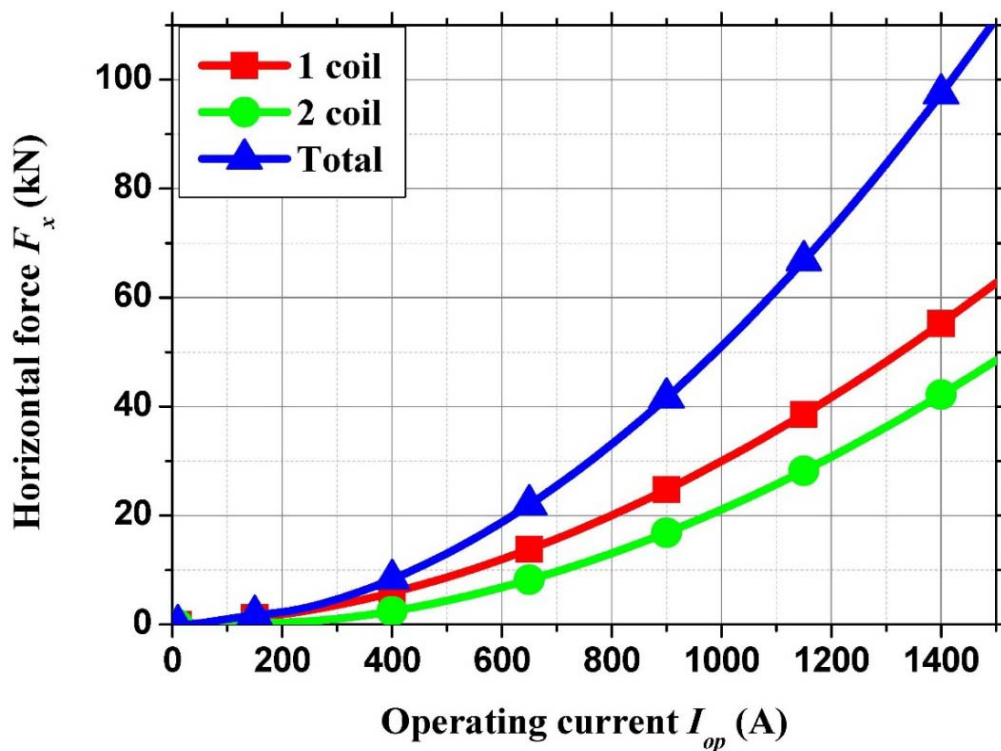


Рис. 6. Горизонтальная компонента пондеромоторной силы в первом квадранте обмотки.

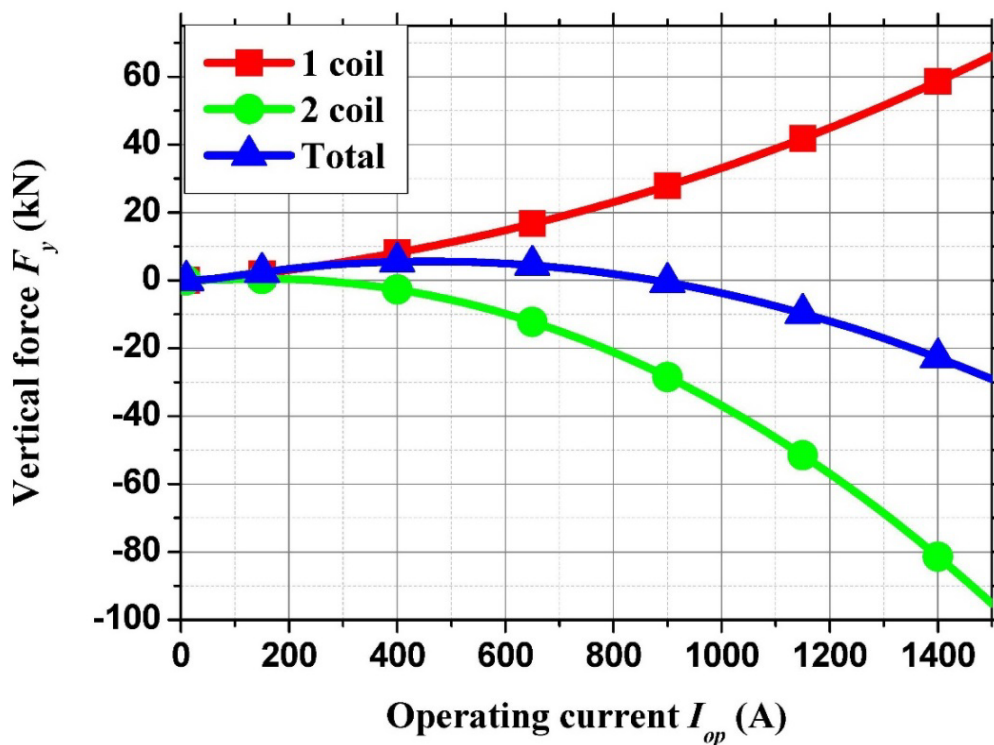


Рис. 7. Вертикальная компонента пондеромоторной силы в первом квадранте обмотки.

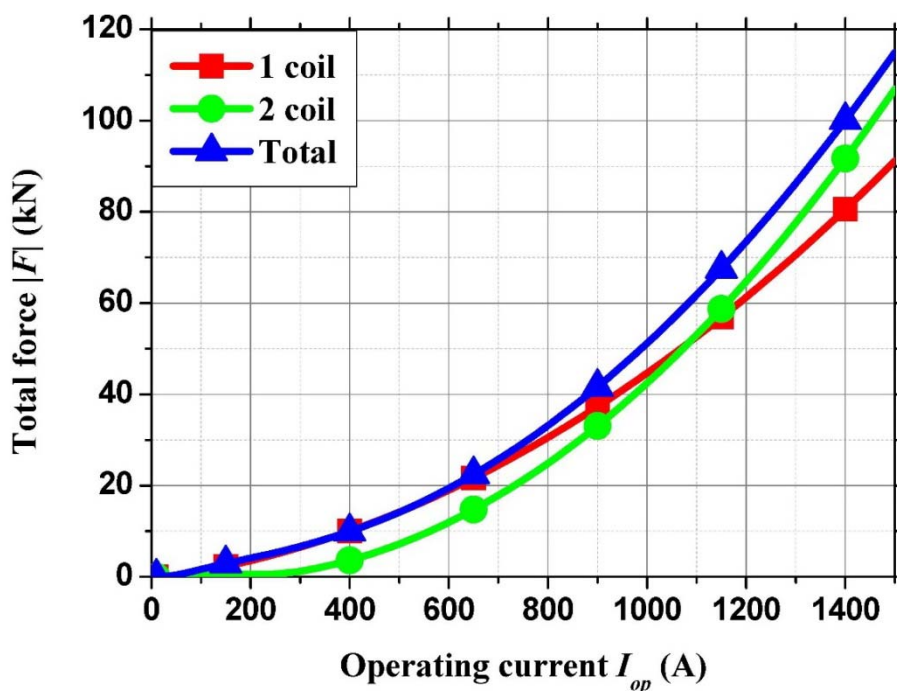


Рис. 8. Суммарная сила в первом квадранте обмотки.

4.3. Запасенная энергия и индуктивность магнита

Результаты расчета индуктивности и запасенной энергии этого магнита представлены на Рис. 9 и Рис. 10. Спад индуктивности при повышении рабочего тока объясняется насыщением магнитопровода и отклонением роста центрального поля от линейной зависимости.

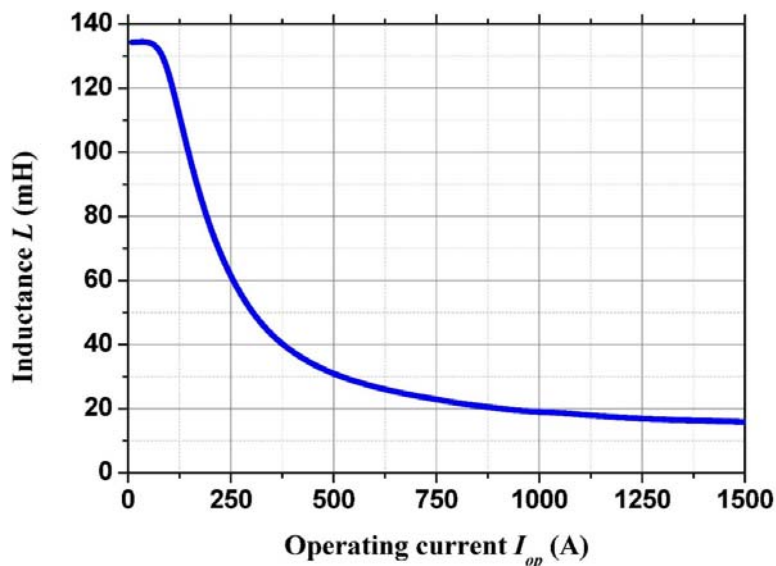


Рис. 9. Зависимость индуктивности ВТСП дипольного магнита от рабочего тока.

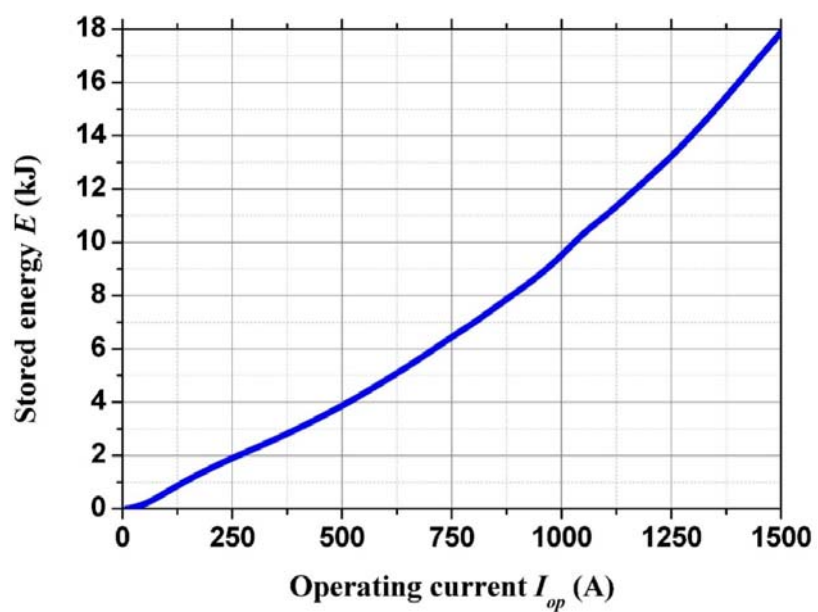


Рис. 10. Зависимость запасенной энергии в ВТСП диполе от рабочего тока.

На Рис. 11 показан общий вид ВТСП дипольного магнита.



Рис. 11. Общий вид ВТСП дипольного магнита.

5. Результаты испытания ВТСП дипольного магнита

5.1. Измерительная аппаратура

При испытаниях ВТСП диполя использовалась измерительная схема, представленная на Рис. 12.

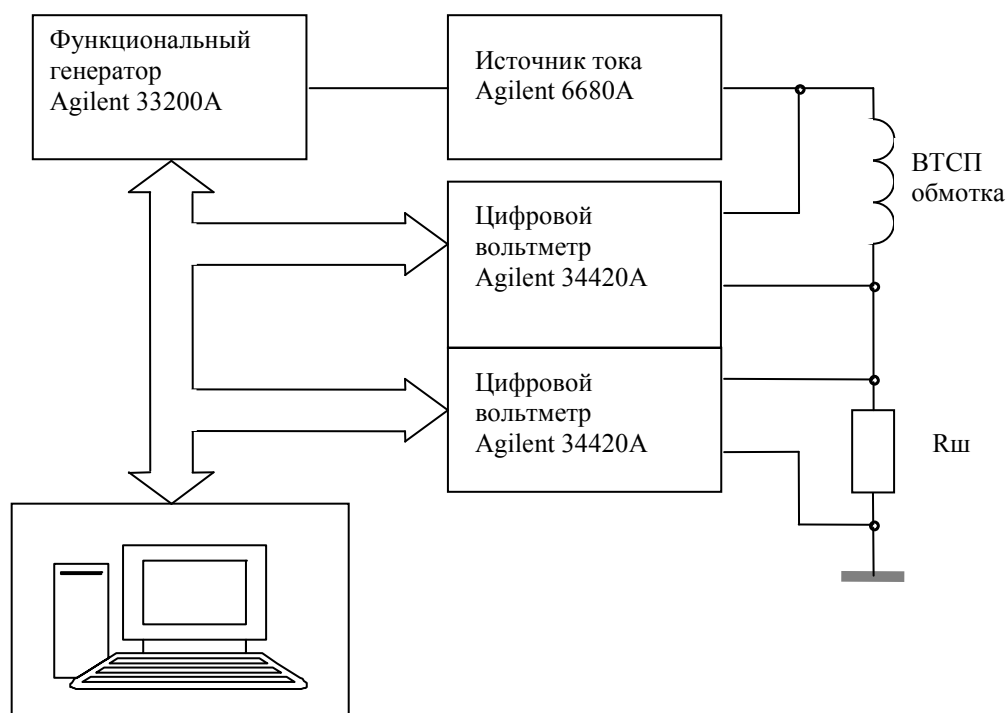


Рис. 12. Схема измерения критического тока в ВТСП диполе.

ВТСП обмотка запитывалась от источника питания Agilent 6680A. Источник работал в режиме стабилизации тока и управлялся с помощью функционального генератора Agilent 33200A, который задавал форму и параметры опорного напряжения, подаваемого на вход источника питания. При данных измерениях использовалась линейная развертка тока, а скорость изменения тока составляла 0.5 А/с.

Для измерения тока через катушку использовался измерительный шунт 300А — 75 мВ точностью 0.5%, напряжение на котором измерялось с помощью вольтметра Agilent 34420A. Для измерения напряжения на ВТСП катушке также использовался вольтметр Agilent 34420A.

Магнитное поле измерялось однокомпонентным датчиком Холла, передвигаемым вдоль оси с помощью штанги. При измерениях осуществлялась

непрерывная запись напряжения датчика Холла и напряжения с токового шунта при вводе тока со скоростью 0.5 А/с.

5.2. Испытания в жидком азоте

Испытания ВТСП дипольного магнита проводились в жидком азоте при температурах 77 и 65 К. Вольтамперная характеристика магнита при этих температурах представлена на Рис. 13. Ток в магнит вводился со скоростью 0.5 А/с. Большие пульсации напряжения в начальной области связаны с неравномерностью ввода тока (источник нестабильно работал с нагрузками, имеющими низкое сопротивление и относительно большую индуктивность). Наблюдаемое при токах более 75 А снижение напряжения связано с изменением значения индуктивности магнита из-за насыщения магнитопровода.

При температуре 77 К ток в обмотке ВТСП диполя составил 110 и 113 А для уровней напряжения на обмотке, соответствующих критерию 1 и 10 мкВ/см. При токе 113 А магнитное поле в центре магнита было равно 1.12 Тл.

При 65 К ток в обмотке ВТСП диполя составил 226 и 228 А при 1 и 10 мкВ/см, соответственно. При токе 228 А магнитное поле в центре магнита было равно 1.66 Тл.

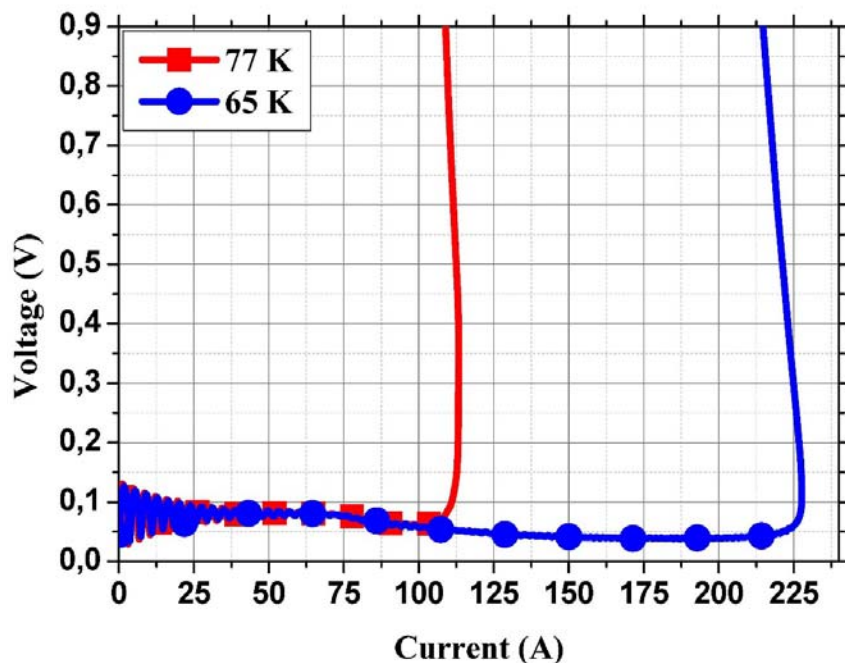


Рис. 13. Вольтамперная характеристика ВТСП диполя при температурах 77 и 65 К.

На Рис. 14 приведена измеренная зависимость величины магнитного поля в центре диполя от тока. Для сравнения на этом рисунке приведена расчетная нагрузочная зависимость, обозначенная на графике сплошной линией, а также зависимость критического тока короткого образца ВТСП-2 ленты от магнитного поля при 77 и 65 К (для критического тока ленты 400 А в собственном поле при температуре 77 К). Видно, что в магните практически достигнут ток короткого образца ВТСП ленты в рабочем поле магнита.

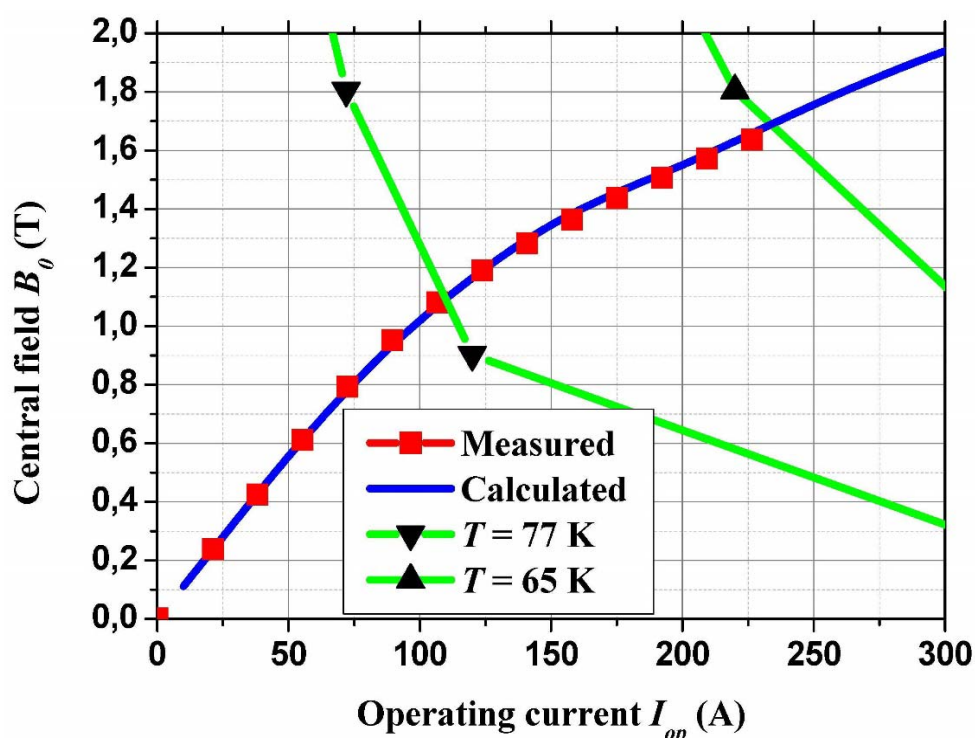


Рис. 14. Зависимости величины магнитного поля в центре диполя от тока, а также критического тока ВТСП-2 ленты от магнитного поля при температурах 77 и 65 К.

На Рис. 15 представлена зависимость передаточной функция диполя от тока. При токах выше 75 А влияние насыщения магнитопровода возрастает и его вклад в магнитное поле уменьшается. На этом же рисунке сплошной линией представлены расчетные значения.

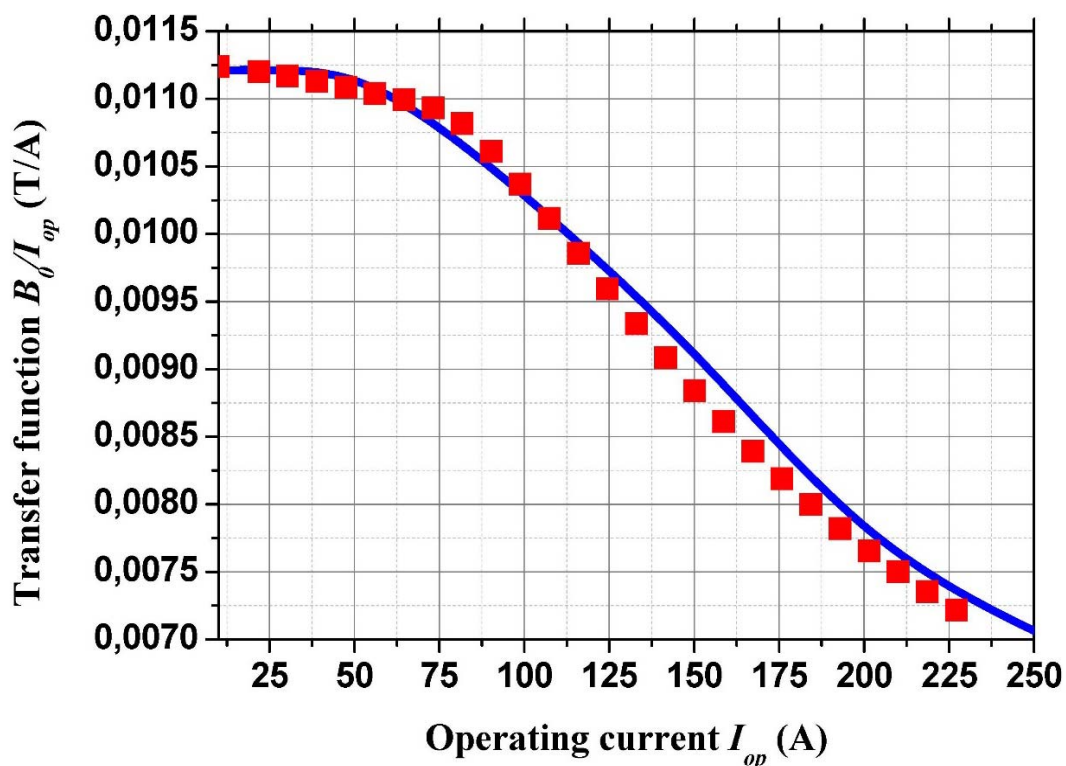


Рис. 15. Зависимость передаточной функции ВТСП диполя от тока.

На Рис. 16 приведено распределение магнитного поля вдоль оси диполя при токе 30 А. Сплошной линией на рисунке представлены расчетные данные.

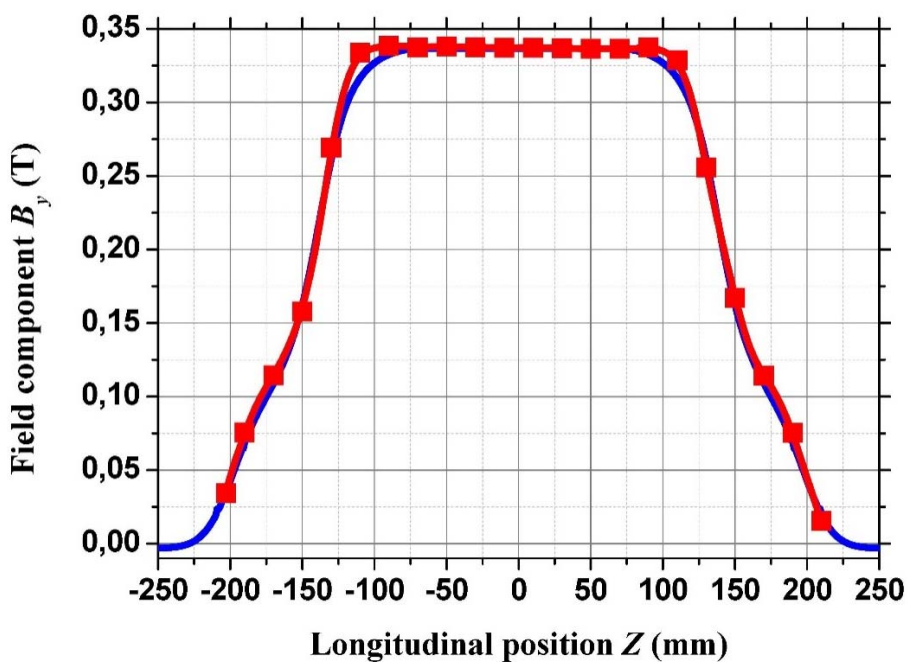


Рис. 16. Распределение магнитного поля вдоль оси магнита при токе 30 А.

5.3. Испытания в жидком гелии

При испытаниях в жидком гелии был введен ток 847 А (максимальный ток источника питания) при скорости 2 А/с, при этом поле в центре магнита составило 3.03 Тл. При повторном вводе ток опять был равен 847 А, признаков начала перехода замечено не было. Перехода магнита при максимальном рабочем токе не наблюдалось. На Рис. 17 представлены измеренная и расчетная зависимости поля в центре магнита от тока при температуре жидкого гелия.

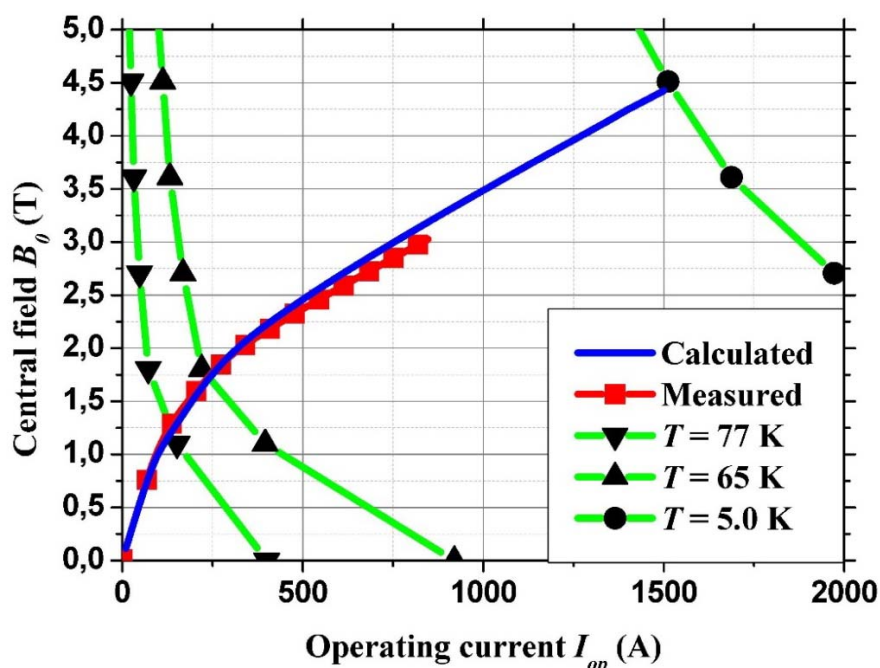


Рис. 17. Зависимости величины магнитного поля в центре диполя от тока, а также критического тока ВТСП-2 ленты от магнитного поля при температурах 77, 65 и 5 К.

Возможная причина расхождения расчетных и измеренных результатов при токе выше 400 А связана с механической обработкой магнитопровода после его сборки. Механическая обработка металла создает скин-слой толщиной около 0.1 мм на его поверхности с ухудшенными магнитными свойствами. Этот скин-слой насыщается в средних и высоких полях раньше, чем происходит насыщение остального металла, увеличивая таким образом эффективный зазор между полюсами магнитопровода, что приводит к уменьшению центрального магнитного поля.

Можно видеть, что при рабочем токе выше 400 А зависимость поля от тока становится линейной. Это означает, что магнитопровод находится в полном насыщении

и повышение центрального поля происходит только за счет роста вклада токовой составляющей поля.

На этом же рисунке показана зависимость критического тока короткого образца ВТСП-2 ленты от магнитного поля при 77, 65 и 5 К. Видно, что в случае достижения тока короткого образца поле в центре магнита составит примерно 4.5 Тл.

Заключение

Изготовлен и успешно испытан первый в России дипольный магнит с апертурой 80×40 мм² из ВТСП ленты второго поколения производства компании «СуперОкс».

При температуре 77 К ток в обмотке ВТСП диполя составил 113 А, при этом магнитное поле в центре диполя было равно 1.12 Тл.

При 65 К ток в обмотке ВТСП диполя был равно 228 А, магнитное поле в центре диполя составило 1.66 Тл.

При испытаниях в жидком гелии был введен ток 847 А (максимальный ток источника питания), при этом поле в центре магнита составило 3.03 Тл.

Список литературы

- [1] H. Weijers, W. Markiewicz, A. Gavrillin, A. Voran, Y. Viouchkov, S. Gundlach, P. Noyes, D. Abraimov, H. Scott, T. Hannahs, and T. Murphy, Progress in the Development and Construction of a 32 T Superconducting Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond., 26(4), 2016, 4300807.
- [2] S. Yoon, J. Kim, K. Cheon, H. Lee, S. Hahn, S.-H. Moon, 26.4-T All HTS Magnet Wound with Multi-Width No-Insulation GdBCO Tape, presented at ISS 2015, November 16-18, 2015, Tokyo, Japan.
- [3] T. Huang, X. Gao, D. Pooke, V. Chamritski, N. Briggs, M. Christian, S. Gibson, J. Mitchell, M. Miles, and J. de Feijter, A Commercial HTS Dipole Magnet for X-Ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD) Experiments, IEEE Trans. Appl. Supercond., 22(3), 2012, 4203504.
- [4] J. Muratore, J. Escallier, G. Ganetis, A. K. Ghosh, R. C. Gupta, P. He, A. Jain, P. Joshi, P. Wanderer, M. Fee, and M. Christian Magnetic Field Measurements of an HTS Retrofit Synchrotron Dipole, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21(3), 2011, 1653.
- [5] L. Bottura, The FCC Magnet Program: Challenges and Opportunities for HTS, Presented at WAMHTS-1, Hamburg, Germany, 21-23 May 2014, available online at:

https://indico.cern.ch/event/308828/session/0/contribution/1/attachments/589800/811796/Opportunities_for-HTS_in-FCC.pdf

- [6] G. Nielsen, N. Zangenberg, D. Hazelton, N. Hauge, B. R. Nielsen, S. P. Moller, A. Baurichter, Dipole Magnet from High Tc Superconductor, *Physics Procedia* 36 (2012) 824 – 829.
- [7] G. A. Kirby, J. van Nugteren, A. Ballarino et al. Accelerator-quality HTS Dipole Magnet Demonstrator Designs for the EuCARD-2 5-T 40-mm Clear Aperture Magnet, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25(3), 2015, 4000805.
- [8] D. Dezhin, R. Ilyasov, S. Kozub et al. “Synchronous Motor with HTS-2G Wires”. *Proceedings of EUCAS 2013, Genoa, Italy, September, 2013.*
- [9] S. Kozub, I. Bogdanov, D. Dezhin, E. Kashtanov, K. Kovalev, V. Shuvalov, V. Smirnov, V. Sytnik, P. Shcherbakov, L. Tkachenko. “HTS Racetrack Coils for Electrical Machines”. *Proceedings of Cryogenics 2014, Prague, April, 2014.*
- [10] D. Dezhin, K. Kovalev, L. Verzhbitsky, S. Kozub, V. Firsov. "Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Rotor Coils". *Proceedings of EUCAS 2015, Lyon, France, September, 2015.*
- [11] K. Kovalev, V. Poltavets, R. Ilyasov, L. Verzhbitsky, S. Kozub. "1 MW HTS 2G Generator for Wind Turbines". *Proceedings of EUCAS 2015, Lyon, France, September, 2015.*
- [12] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky and S. Fetisov, 2014 Development and Production of Second Generation High T-c Superconducting Tapes at SuperOx and First Tests of Model Cables *Supercond. Sci. Technol.* 27 044022.
- [13] A. Kaul et al., “MOCVD Buffer and Superconducting Layers on Non-magnetic Biaxially Textured Tape for Coated Conductor Fabrication”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23, 2013, 6601404.
- [14] C. Senatore et al., “Field and Temperature Scaling of the Critical Current Density in Commercial REBCO Coated Conductors”, *Supercond. Sci. Technol.*, 29, 2015, 014002. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/29/1/014002/meta>
- [15] S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee, V. Petrykin, V. Kalitka, I. Martynova, A. Makarevich, A. Markelov, M. Moyzykh, A. Blednov, “Customized 2G HTS Wire for Applications”, *Supercond. Sci. Technol.*, 29, 2016, 024001.
- [16] Results of Independent Measurements of SuperOx 2G HTS Wire in Digital Format 2012-2015, available online at <http://www.superox.ru/en/products/42-2G-HTS-tape/>

- [17] I. Bogdanov, S. Kozub, P. Shcherbakov, L. Tkachenko, E. Fischer, F. Klos, G. Moritz, C. Muehle. "Study of Electrical Steel Magnetic Properties for Fast Cycling Magnets of SIS100 and SIS300 Rings", EPAC-2004, Lucerne, Switzerland, 2004, pp.1741-1743.
- [18] Л.М. Ткаченко. Пакет программ MULTIC для расчёта магнитных полей произвольной конфигурации. Препринт ИФВЭ 98-28. – Протвино, 1998.

Рукопись поступила 25 апреля 2016 г.

И.В. Богданов, С.С. Козуб, В.М. Смирнов и др.

ВТСП дипольный магнит.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 26.04.2016. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1,5. Уч.–изд.л. 2,016. Тираж 80. Заказ 8. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2016-6,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2016
