# Министерство образования и науки Российской Федерации **Казанский (Приволжский) федеральный университет**

# Институт физики

Кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии

# Бакалаврская работа

Изготовление и исследование характеристик модельного магнита на основе ВТСП ленты

Специальность: 010800.62 - радиофизика

Работа заг	вершена:	
«»	2015г	(Ф.Ф. Шафиков)
Работа до	пущена к защите:	
Научный	руководитель	
к.фм.н.,		
« <u> </u> »	2015г	(А.В. Клочков)
Заведующ	ций кафедрой	
д.фм.н.,	профессор	
« <u></u> »	2015г	(М.С. Тагиров)

# Содержание:

1.	Введение	3
2.	Открытие сверхпроводимости	5
3.	Сверхпроводники 1 и 2 рода	8
4.	Высокотемпературные сверхпроводники и их структура	.12
5.	Варианты изготовления магнитных систем на основе ВТСП	.16
6.	Изготовление макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП	.26
7.	Испытание макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП	.31
8.	Выводы	36
9.	Список литература	37

#### ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Сегодня сверхпроводимость — это одно из наиболее перспективных направлений для изучения в физике. Оно открывает перед человечеством большие перспективы. Проводники, свободные от всяких энергетических потерь при совершенно обычных условиях, совершили бы революцию в электротехнике. Большое распространение получили приборы, основанные на явлении сверхпроводимости, а именно высокотемпературные сверхпроводники (далее ВТСП). Без них уже не может обойтись ни современная электроника, ни медицина, ни космонавтика.

<u>**Цель.**</u> Подробнее рассмотреть явление сверхпроводимости, его свойства, практическое применение, выяснить перспективы развития данной области физики. Сконструировать и испытать макет сверхпроводящего магнита на основе ВТСП ленты.

#### Задачи:

- 1) Выяснить, что собой представляет сверхпроводимость, причины ее возникновения и условия возможного перехода вещества из нормального состояния в сверхпроводящее.
- 2) Объяснить причины, влияющие на разрушение сверхпроводящего состояния.
  - 3) Раскрыть свойства и применение сверхпроводников.
  - 4) Разработать макет магнита на основе ВТСП ленты.
- 5) Рассчитать теоретические значения магнитного поля при различной величине тока подаваемого на магнит.
- 6) Провести испытания макета магнита. Провести измерения зависимостей магнитного поля от величины тока при азотной температуре.
  - 7) Найти критический ток магнита при температуре 77К.

<u>Практическое применение.</u> Явление сверхпроводимости используется для получения сильных магнитных полей. Сверхпроводники применяются при создании аналого-цифровых приборов (АЦП), использующие

сверхбыстрые (доли пикосекунды) переключения от джозефсоновского к гиверовскому режиму работы, для применений в новейших системах связи, цифровых вычислительных устройствах для обработки и анализа аналоговых сигналов. А так же при создании приборов, основанных на эффекте появления на джозефсоновском переходе постоянного напряжения при подаче на него СВЧ сигнала, для использования в прецизионных измерительных системах. Важным является создание СКВИДов (приборы на основе джозефсоновских переходов) как детекторов слабых магнитных полей, геофизике, ДЛЯ применения В медицине, геологии И материаловедении, военной технике, научных исследованиях, связи и навигации.

## 1. Открытие сверхпроводимости

В 1911г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Он проводил измерения электрического сопротивления ртути при очень низких температурах. Он хотел выяснить сколь малым сопротивление вещества электрическому может стать току, если максимально очистить вещество от примесей и максимально снизить тепловой шум. Результат этого исследования оказался неожиданным: при температуре 4.15 К сопротивление мгновенно исчезло. График такого поведения сопротивления в зависимости от температуры приведен на рисунке 1.

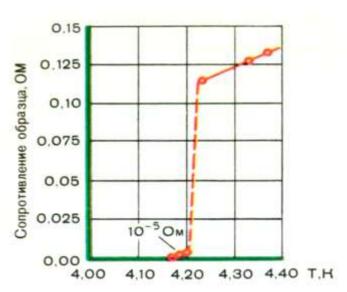


Рисунок 1 - Зависимость сопротивления сверхпроводника от температуры.

Сверхпроводимость ЭТО не только отсутствие электрического сопротивления, а нечто более сложное. Это еще и определенная реакция на внешнее магнитное поле, называющаяся эффект Мейснера. Он заключается в слабое постоянное магнитное поле TOM, что выталкивается сверхпроводника. Внутри сверхпроводника магнитное поле ослабляется до нуля. Опыт, демонстрирующий эффект Мейснера, представлен на рисунке 2: В постоянный сверхпроводящей чашечкой. магнит парит над

сверхпроводнике возникают выталкивающие магнитное поле токи, которые удерживают магнит на весу.

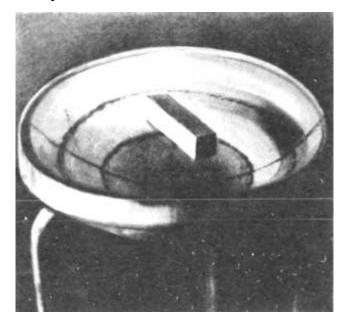


Рисунок 2 - Левитация постоянного магнита над сверхпроводящей чашей.

При поиске новых сверхпроводников ищут оба главных свойства сверхпроводимости: обращение в ноль электрического сопротивления и выталкивание из сверхпроводника магнитного поля.

Различают 2 вида сверхпроводников, в зависимости от их поведения в сильных магнитных полях: сверхпроводники 1 и 2 рода. К первому роду относятся все отдельные элементы сверхпроводники таблицы Менделеева, кроме ниобия. Химические соединения и сплавы относят ко второму роду сверхпроводников. Различия связаны с разностью величин  $\lambda$  и  $\xi$ . Величина  $\lambda$  характеризует глубину проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Длина когерентности  $\xi$  показывает масштаб расстояний, на которых электроны сверхпроводника взаимодействуют друг с другом и движутся когерентно. Материалы с  $\xi > \lambda$  относятся к сверхпроводникам 1 рода, если же  $\lambda > \xi$  говорят о сверхпроводниках 2 рода. Эффект Мейснера проявляется у сверхпроводников 1 рода.

$$\lambda = \sqrt{\frac{mc}{4\pi ne^2}} \tag{1}$$

где m — масса электрона, n — концентрация электронов, e — заряд электрона.

$$\xi \simeq \frac{\hbar v_F}{kT_C} \tag{2}$$

где  $\hbar$  — постоянная планка,  $\mathcal{U}_F$  — скорость электронов, обладающих энергией Ферми, k — постоянная Больцмана.

Рассмотрим на рисунке 3 зависимость магнитной индукции В от внешнего магнитного поля Н<sub>о</sub>. Индукция В не меняется с увеличением Н<sub>о</sub>. Когда внешнее поле превысит критическое значение Н<sub>ст</sub> сверхпроводник разрушится и перейдет в нормальное состояние. При этом поле проникнет в сверхпроводник и В станет равным Н<sub>о</sub>.

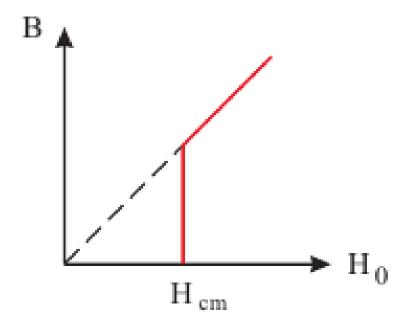


Рисунок 3 - Зависимость магнитной индукции от магнитного поля.

Связь магнитной индукции В и внешнего магнитного поля Но выражается через уравнение:

$$B = Ho + 4\pi M, \tag{3}$$

где М намагниченность, равная —  $Ho/4\pi$ . Поэтому, когда внешнее магнитное поле не превосходит критическое значение, индукция в сверхпроводнике равна нулю. Намагниченность создается циркулирующими круговыми токами, которые компенсируют друг друга, так что в сверхпроводнике остается только поверхностный ток.

# 2. Сверхпроводники 1 и 2 рода

Сверхпроводники 1 рода обладают следующими свойствами:

- 1) Магнитные силовые линии вне сверхпроводника всегда касательны к его поверхности.
- 2) По поверхности сверхпроводника, находящегося во внешнем магнитном поле, течет только поверхностный электрический ток.
- 3) В односвязном сверхпроводнике токи текут только при наличии внешнего магнитного поля.

У сверхпроводников существует переходное состояние. Для того, чтобы разобраться в нем можно разобрать задачу сверхпроводящего шара помещенного во внешнее магнитное поле.

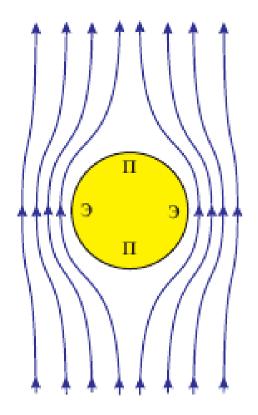


Рисунок 4 - Сгущение магнитных полей на экваторе сверхпроводника.

Зная, что силовые линии всегда касательны к поверхности можно сказать, что магнитное поле на полюсах шара равно нулю. А на экваторе силовые линии сгущаются, что является следствием увеличения магнитного поля. При таких параметрах системы сверхпроводник может частично выйти из сверхпроводящего состояния и перейти в промежуточное. Это происходит за счет того, что поле на экваторе при определенных значениях Но превосходит критическое значение. Полный переход шара в нормальное состояние невозможен, так как поле во всем пространстве должно быть однородным и равным внешнему полю. Так как Но < Нст, то шар при этом перешел бы снова к сверхпроводящее состояние. С другой стороны невозможно и полностью сверхпроводящее состояние шара, так как поле на экваторе достигло своего критического значения. Пример показан на рисунке 5.

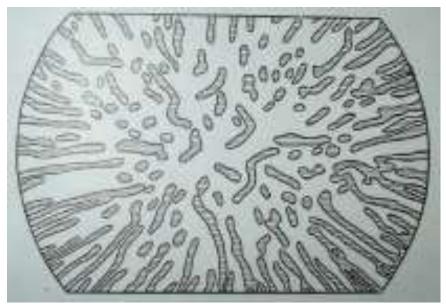


Рисунок 5 - Проникновение магнитного поля в сверхпроводник 2 рода.

Сверхпроводники рода характеризуются тем, что глубина проникновения магнитного поля значительно больше длины когерентности. Вследствие этого на границе нормальной и сверхпроводящей фазы энергия, определенных поверхностная при условиях, тэжом стать отрицательной. Исходя из этого, можно понять, что в сверхпроводящей фазе должны появиться измельченные области, так как выгодна обширная поверхность раздела. При заданном потоке на бесконечности области будут иметь форму тонких цилиндрических трубок, через которые проходят силовые линии магнитного поля. По периферии такой трубки течет сверхпроводящий незатухающий ток. Такие трубки называют вихрями Абрикосова в честь ученого который додумался о их существовании и вообще понял, что существуют 2 типа сверхпроводников.

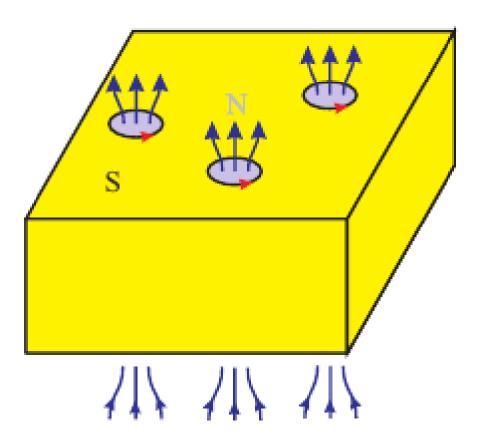


Рисунок 6 - Сверхпроводник находящийся в фазе Шубникова, образование Абрикосовых вихрей.

Проникновение магнитного поля в сверхпроводник 2 рода. Возникновение Абрикосовых вихрей происходит при определенных значениях магнитного поля H, значения которого можно рассчитать:

$$H_{c1} \sim \frac{\Phi_0}{\lambda^2} \tag{4}$$

где  $\Phi_0$  квант магнитного потока равный  $\frac{hc}{2e}$ . Состояние сверхпроводника с абрикосовыми вихрями называется фазой Шубникова. Все возможные состояния сверхпроводника 2 рода в зависимости от приложенного к нему поля изображены на графике:

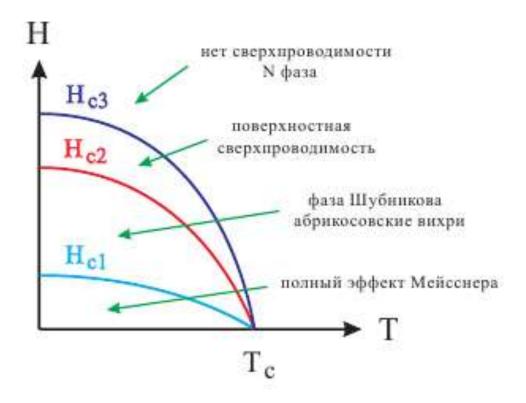


Рисунок 7 - Зависимость состояний сверхпроводника 2 рода от величины магнитного поля.

обладают настоящее время все которые свойствами материалы, подразделяют две сверхпроводимости, условно на группы: низкотемпературные сверхпроводники. К И высокотемпературные низкотемпературным относятся сверхпроводники, у которых критическая температура  $T_k$  = 25К. В 1986 году были открыты высокотемпературные сверхпроводники у которых  $T_{m{k}}$  выше температуры жидкого азота 77 К. Это сложные соединения керамики на основе оксида меди, например  ${
m Tl_2Ca_2Ba_2Cu_3O_{10}}$  с  $T_k=127$  K.

# 3. Высокотемпературные сверхпроводники и их структура

Одним из применений высокотемпературных сверхпроводников является создание на их основе магнитов, позволяющих получать сильные магнитные поля. Постоянными магнитами люди научились пользоваться достаточно давно. Но для большинства практических применений они не пригодны. Напряженность магнитного поля, относительно ИХ сверхпроводящих магнитов, не большая и не может меняться со временем под действием Поэтому человечество перешло внешних сил. К использованию электромагнитов.

Для получения в электромагнитах больших напряженностей поля необходимо значительно увеличивать силу тока и, соответственно терять энергию на джоулево тепло. Поэтому для получения напряжённостей в 10000 Э. используют сверхпроводящие магниты.

В данной дипломной работе будет рассматриваться сверхпроводящий магнит на основе ВТСП ленты второго поколения производства компании ЗАО «СуперОкс», занимающейся разработкой ВТСП на монокристаллических подложках.

Существует несколько способов изготовления ВТСП. В настоящее время в мире наиболее перспективными и продвинутыми считаются производства ВТСП провод второго технологии поколения  $(2G)_{,}$ заключающиеся в последовательном нанесении на металлические подложки нескольких оксидных буферных слоев, чтобы необходимую текстурированную основу для эпитаксиального роста ВТСП слоя (как правило, на основе YBCO). Далее обычно наносится тонкий защитный серебряный слой. Иногда наносятся дополнительно более толстые металлические стабилизирующие слои с обеих сторон провода, чтобы достигнуть требуемых электрических, тепловых и механических свойств. Различные компании (в США – American Superconductor, SuperPower; в Японии – Fujikura, ISTEC, Sumitomo; в Германии – Bruker, Theva; в Корее -KERI) конкурентной основе развивают собственные патентнозащищенные методы получения ВТСП проводов второго поколения. Вклад в себестоимость производства может быть разделен несколько составляющих: стоимость сырья и материалов, стоимость рабочей силы,

капитальные затраты на оборудование, на сооружение зданий, текущие расходы на электроэнергию и воду. Затраты на сырье определяются установившейся рыночной ценой единицы измерения материала, а также расходом этого материала на один метр готового провода. Сечение 2G провода определяется в основном подложкой и стабилизирующим слоем. Буферные слои очень тонкие и поэтому фактические затраты на материал буферных слоев не вносят существенного вклада в себестоимость провода.

SuperPower на сегодня является мировым лидером в производстве ВТСПлент второго поколения. Благодаря усилиям этой компании стали реальностью ленты длиной более 1 км с критическим током около 300 A на 1 см ширины. Такими результатами, вкупе 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 чтобы поликристаллическую ΤΟΓΟ сделать металлическую подложку ВТСП, пригодной ДЛЯ нанесения ориентированного слоя необходимо электрополированную ленту из хастеллоя осадить ПЯТЬ буферных слоёв, все они на сегодня получаются «дорогими» методами (рисунок 8). Это может стать препятствием для дальнейшего снижения стоимости провода. Сегодня SuperPower пользуется серьёзной государственной поддержкой, и неизвестно, сможет ли такая технология существовать без неё.

Метод химического осаждения из паровой фазы наиболее сильное производственное развитие получил в американской компании SuperPower, которая является признанным лидером производства ВТСП ленты 2-го поколения. Этот метод не относится к высоковакуумным методам и при этом обеспечивает очень высокие скорости роста эпитаксиальных покрытий. Фактически, габариты MOCVD-установок для получения ВТСП-провода ничем не отличаются от размеров высоковакуумных установок. У метода есть, по сути, один недостаток - большое количество параметров, сильно влияющих на качество слоя. Именно поэтому для достижения высоких этого результатов c использованием метода требуются большие

исследовательские усилия по сравнению с физическими методами осаждения. В то же время, метод MOCVD по аппаратурному оформлению и эксплуатационным расходам является весьма доступным, что позволяет надеяться на то, что он внесёт свой вклад в снижение стоимости ВТСП-провода в будущем.

Помимо SuperPower, в мире есть ещё несколько компаний поменьше, занимающихся развитием этой технологии - MetOx, PerCoTech, СуперОкс. Главное отличие подхода этих компаний от пути SuperPower заключается в том, что эти компании используют метод MOCVD нетолько для получения слоя ВТСП, но и для роста буферных слоев, а в SuperPower применяется буферная архитектура, полученная высоковакуумными, физическими, методами. Уровень развития технологии в вышеупомянутых компаниях позволяет говорить, что метод МОСVD подходит также и для роста буферных слоев высокого качества.

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.

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 Al2O3 и Y2O3 интегрированы в одну установку скорость процесса 750 м/ч;
- 3) также в одной установке проводится осаждение слоев MgO и LaMnO3;
- 4) ленты длиной 1400 м покрываются 4-мя буферными слоями с использованием одной установки
- 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.

Структура ВТСП ленты второго поколения производства фирмы SuperPower и ассортимент коммерчески доступных ВТСП лент представлен на рисунках 8 и 9.

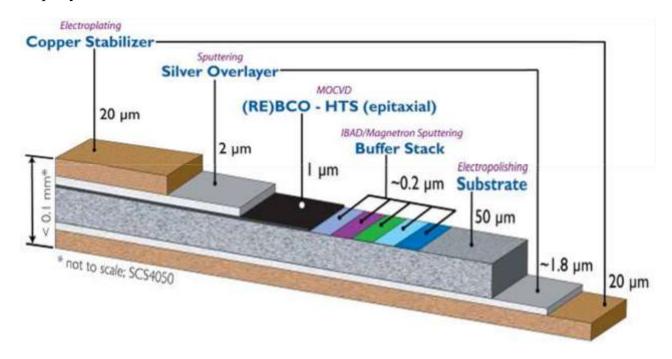


Рисунок 8 - ВТСП лента второго поколения производства фирмы SuperPower.

Spec SF = Statistics Free SCS = Sanound Copper Statistics	SCS3050	SF4050	SC54050	SF6050	SC56050	SF12050	5C512050	SF12100	Unit	Comment
Minimum I,	75	100	100	150	150	300	300	300	amp	measured by continuous direct current
Widths	3	4	4	6	6	12	12	12	mm	
Total Wire Thickness	0.1	0.055	0.1	0.055	0.1	0.055	0.1	0.105	mm	
Standard Copper Stabilizer Thickness	0.04	n/a	0.04	n/a	0.04	nia	0.04	n/a	mm	surround stabilizer with rounded corners
Critical Tensile Stress	> 550		> 550		> 550		> 550		MPa	at 77K
Critical Axial Tensile Strain	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.4%		at 77K
Critical Bend Diameter in Tension	11	.11	- 11	11	-11	11	11	25	men	at room temperature
Critical Bend Diameter in Compression	11	11	11	- 11	11	11	- 11	25	mm	at room temperature

Рисунок 9 - Коммерчески доступные ВТСП ленты второго поколения производства фирмы SuperPower.

### 4. Варианты изготовления магнитных систем на основе ВТСП

В настоящее время магнитные системы на основе ВТСП лент в основном используются в качестве дополнительных вставок в гибридных магнитах. Широкое использование подобных магнитных систем для ЯМР ограничено отсутствием перемычек на основе ВТСП сверхпроводников и сложностями соединения ВТСП лент. Однако, не следует исключать возможность создания технического решения ВТСП-перемычки в ближайшее время и решения данной проблемы.

Существует два основных способа намотки магнитных систем из ВТСП лент: послойная намотка (layerwound) и галетная намотка (pancakewound). Последний тип наиболее предпочтителен и практичен. Примеры магнитных систем показаны на рисунках 10 - 12.

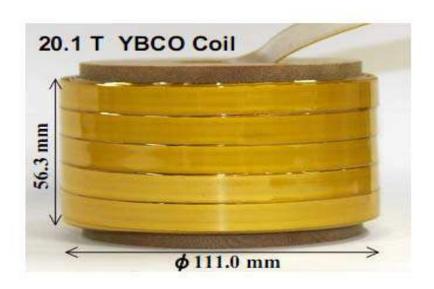


Рисунок 10 - Пример намотки магнита из ВТСП ленты по галетной технологии.

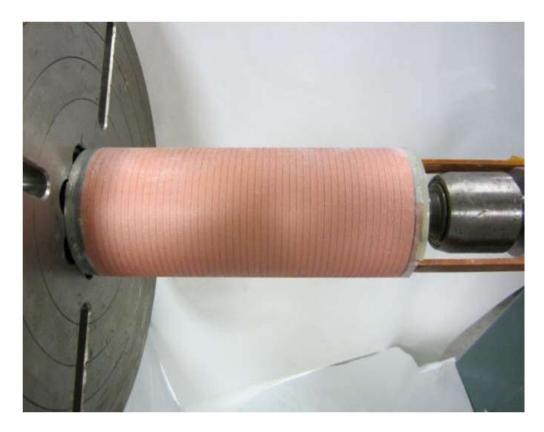


Рисунок 11 - Пример намотки магнита из ВТСП ленты методом послойной намотки.



Рисунок 12 - Пример намотки одной галеты магнита из ВТСП ленты.

В 2003 году была показана возможность использования объемного (bulk) ВТСП магнита для создания магнитных полей выше 17 Тл при температуре 29 К. Для этого использовался крупнозернистый редкоземельный ВТСП ReBaCuO. Заморозка поля в данной конфигурации возможна без использования сверхпроводящей перемычки. Заморозка магнитного потока внутри массивного ВТСП образца осуществлялась методом PFM (pulsed field magnetizing). На рисунке 13 показана процедура заморозки магнитного потока.

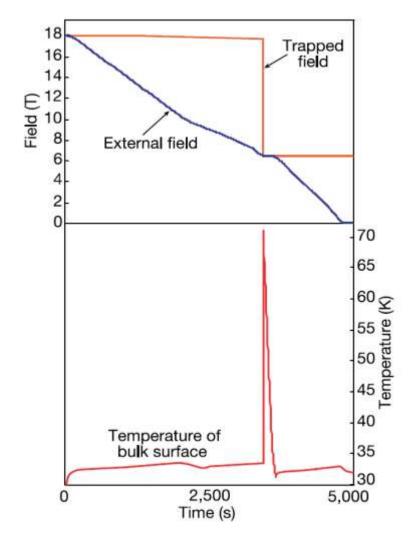


Рисунок 13 - Значения захваченного поля для двух дисков YBCO в упаковке из углеродного волокна, пропитанной смолой. Показано значение магнитного поля между двумя дисками, внешнее поле, и температура дискового магнита YBCO, как функция времени, когда приложенное поле понижалось от 17,9 Тл до нуля.

На рисунке 14 показана зависимость величины замороженного магнитного поля от температуры.

Таким образом, авторами была экспериментально продемонстрирована возможность создания магнитной системы с замороженным магнитным полем на основе ВТСП. Данное техническое решение может быть использовано в ядерном магнитном р езонансе, при температурах выше температур жидкого гелия, т.е. с применением криоаккумуляторов, либо при температурах жидкого азота.

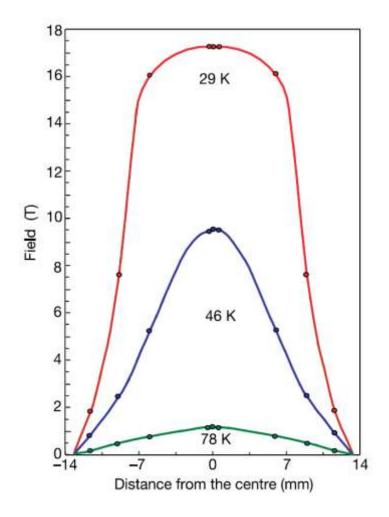


Рисунок 14 - Зависимость величины захваченного поля от температуры и расстояния от центра ВТСП диска. Поле было захвачено между двумя дисками YBCO диаметром 26,5 мм в упаковке из углеродного волокна, пропитанной смолой. Представлены данные для 29 К, 46 К и 78 К.

Недавно, экспериментально была показана возможность создания магнитной системы на основе коммерческих ВТСП лент без использования ВТСП перемычки. В первом случае для заморозки магнитного потока использовался метод РFM, во втором случае использовался метод заморозки

магнитного потока путем перевода ВТСП в сверхпроводящее состояние в приложенном внешнем магнитном поле. На рисунках 15 - 17 представлены экспериментальные данные стопки из кусков ВТСП ленты размером 12х12 мм.

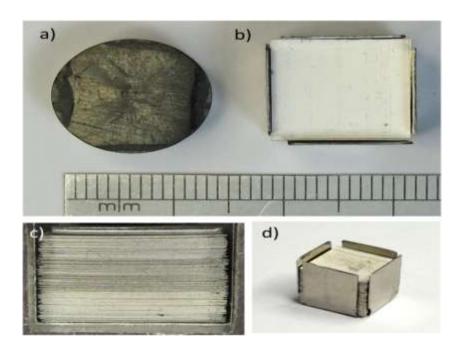


Рисунок 15 - (а) Вид сверху, диаметр 14 мм, толщина 6 мм, цельный образец YBCO и (b) квадрат со стороной 12 мм из ленты (RE)BCO в держателе. (c) Сжатая стопка - вид сбоку 145 слоев ленты (RE)BCO, толщиной 8,1 мм, (d) несжатая стопка в держателе.

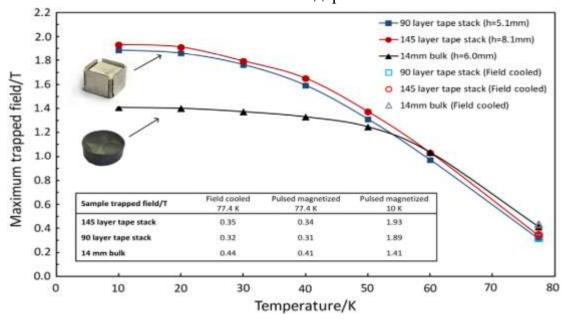


Рисунок 16 - Максимальное значение захваченного поля измеренного на расстояние 0,8 мм от стопки из ВТСП ленты и цельного образца после

импульса намагниченности в зависимости от температуры.

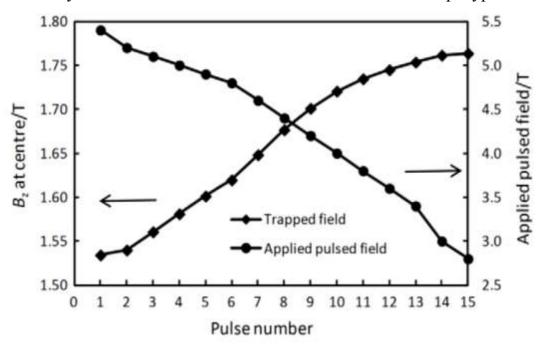


Рисунок 17 - Пример ИМРА последовательности импульсов используемого при замораживании магнитного поля в стопке из 90 слоев ВТСП ленты при температуре 30 К.

На рисунке 18 представлена конфигурация магнитной системы из ВТСП пленки и зависимость амплитуды магнитного поля от времени (деградация).

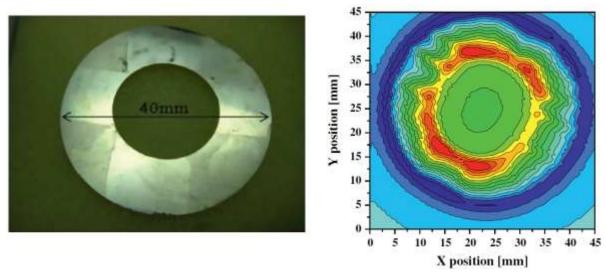


Рисунок 18 Фотография круглого тонкого кольца из пленки ҮВСО и

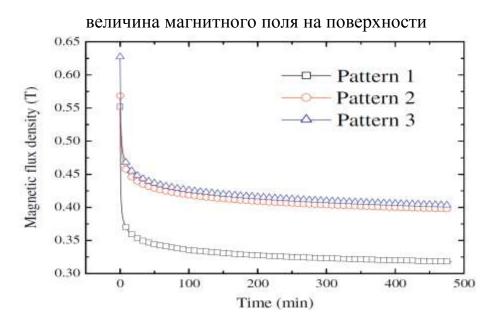


Рисунок 19 - Зависимость магнитного поля от времени с момента заморозки поля магнитной системой из 500 колец при температуре 77 К во внешнем поле 1 Тл.

Как видно из графика 19 величина замороженного магнитного поля внутри магнитной системы из 500 колец ВТСП ленты уменьшается, что является серьезным препятствием для создания ЯМР магнита. Подобная деградация магнитного поля объясняется, в первую очередь, неоднородностью захваченного магнитного потока в момент заморозки, также неоднородностью распределения температур магнитной последующим выравниванием системе, неоднородностей. По нашему мнению, подобные проблемы могут быть контакта каждой ВТСП улучшением теплового термостатом и изменениями в процедуре заморозки магнитного потока.

Наиболее практичное решение создания магнитной системы из ВТСП было предложено в 2012 году. В данной статье предложено использование новой, компактной технологии, а именно использование сверхпроводящей магнитной системы с высокой  $T_c$ , изготовленной из колец  $GdBa_2Cu_3O_y$ . На рисунках 20 - 21 представлены цельный образец сверхпроводника и магнитная система, изготовленная из 10 ВТСП колец.

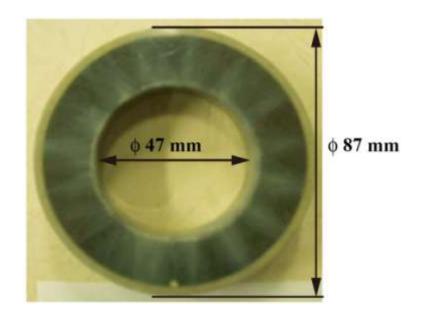


Рисунок 20 - Кольцо из сверхпроводника GdBaCuO.



Рисунок 21 - Магнитная система из 10 колец, изготовленных из ВТСП  ${\rm GdBaCuO}.$ 

Максимальное значение захваченного поля достигалось внутри кольцевого магнита и составляло от 0,75 Тл до 2,59 Тл (при температуре 77 К во внешнем магнитном поле), от одного до десяти колец, соответственно. Результаты показывают, что также можно создать постоянную магнитную систему на основе соединения LREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>v</sub>(где LRE = La, Nd, Eu, Sm, Gd).

На рисунках 22 и 23 представлены зависимости величины замороженного магнитного поля от количества колец в магнитной системе и от времени после заморозки поля.

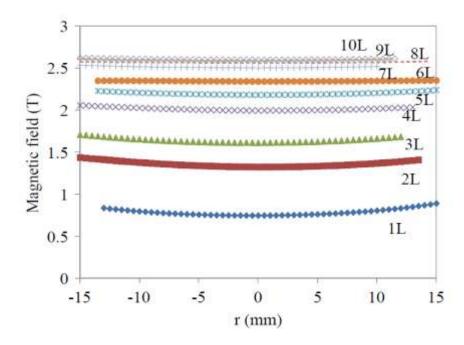


Рисунок 22 - Магнитное поле, создаваемое магнитной системой из колец сверхпроводника GdBaCuO в зависимости от числа колец и радиуса от оси системы.

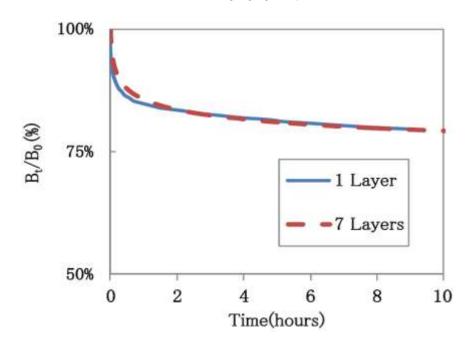


Рисунок 23 - Деградация магнитного поля, создаваемого одним кольцом и магнитной системой из 7 колец при температуре 77 K, как функция от времени после выключения внешнего магнитного поля.

Из рисунка 23 также видна деградация замороженного магнитного поля, даже в случае использования объемного (bulk) ВТСП.

Как было отмечено выше, существует два основных способа "замораживания" магнитного поля (потока) внутри сверхпроводника. Для целей ядерного магнитного каротажа и использования магнитной системы из ВТСП в условиях скважины наиболее практичным способом является метод импульсного захвата магнитного потока (PFM). Схема представлена на рисунке 24.

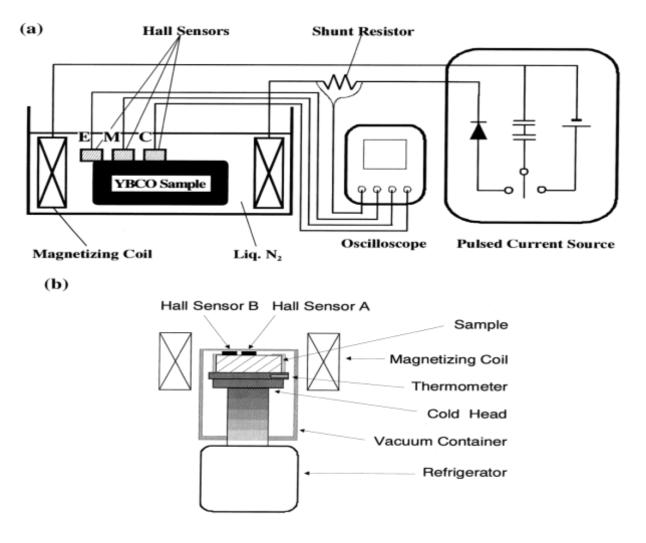


Рисунок 24 - Схема, иллюстрирующая принцип ввода магнитного поля в образец ВТСП методом импульсного намагничивания (PFM).

# **5.** Изготовление макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП

Для проведения измерений магнитной системы на основе ВТСП ленты второго поколения был изготовлен макет, При изготовлении магнита использовалась плоский многослойный (галетный) способ намотки магнита. Были произведены расчеты магнитного поля, создаваемой одной галетой, и произведено сравнение экспериментально измеренных величин с расчетными.

Для изготовления была приобретена ВТСП лента второго поколения шириной 4 мм ЗАО «СуперОкс».

### Параметры ленты:

ВТСП соединение - GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>

Длина, м 42

Ширина, мм 4

Критический ток, А > 120 А (Т=77К в собств. магнитном поле)

Толщина серебряного покрытия, мкм 1,5

Толщина медного покрытия, мкм 20

Материал подложки Хастеллой С276

Общая толщина ленты, мкм ~ 110

Минимальный радиус изгиба, мм 12,5

Схема галеты представлена на рисунке 25.

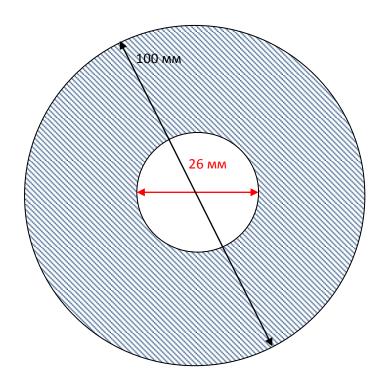


Рисунок 25 - Схема галеты из ВТСП ленты для изготовления макета.

В качестве межвитковой изоляции была выбрана изоляционная лента BARNIER шириной 5 мм и толщиной 50 мкм. Галета была намотана на оправку, сделанную из плексигласа. Процедура намотки показана на рисунке 31. Внутренний диаметр 26 мм. Толщина внутреннего диска 5 мм. Толщина боковых дисков 5 мм. Длина ВТСП ленты 42 метра. Количество витков – 227. К ВТСП ленте были припаяны тоководы, вырезанные из медной фольги 0.8 мм, к которым были припаяны медные многожильные провода сечением 6 кв.мм. Фотография макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП представлена на рисунках 26-28.

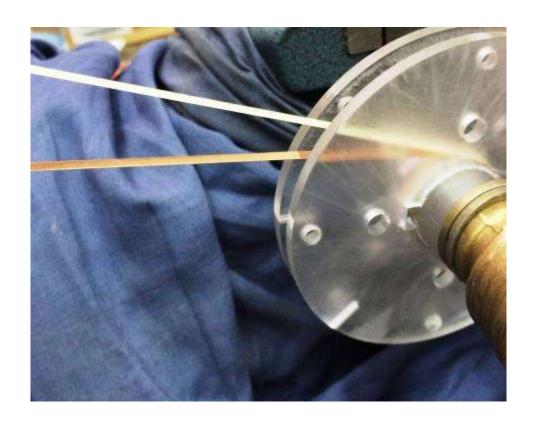


Рисунок 26 - Процедура намотки галеты.

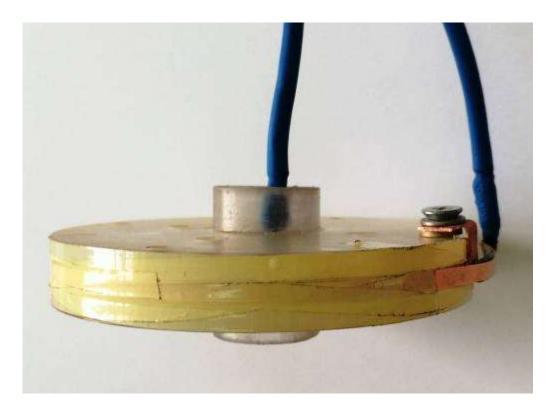


Рисунок 27 - Макет сверхпроводящего магнита на основе ВТСП (вид сбоку).

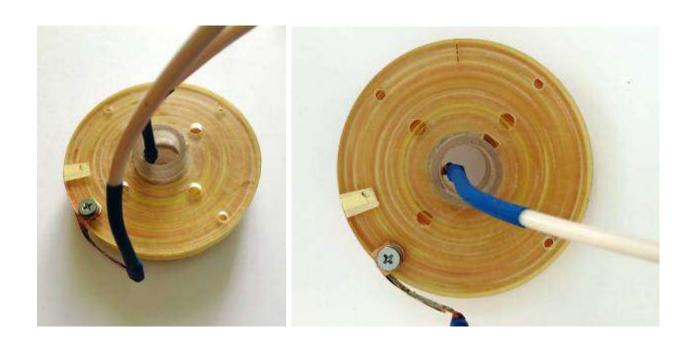


Рисунок 28 - Макет сверхпроводящего магнита на основе ВТСП (вид сверху).

Данные ВТСП ленты, использованной при изготовлении макета, приведены на рисунках 29 — 31. На рисунке 34 представлена зависимость локального критического тока ВТСП ленты в зависимости от положения на ленте, измеренная бесконтактным методом производителем ленты в собственном поле.

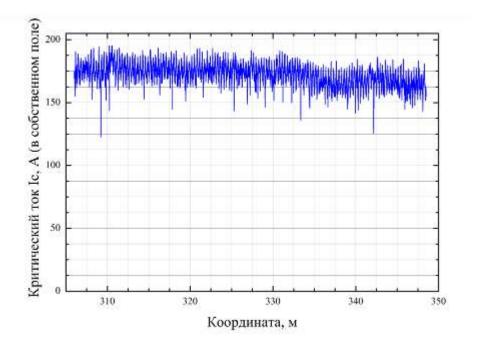


Рисунок 29 - график зависимости локального критического тока в собственном поле от положения на ВТСП ленте.

Видно, что минимальным критическим током является значение 120 А. Однако при расчете и испытании макета следует учитывать также то, что магнит будет создавать магнитное поле и значение критического тока будет существенно меньше 120 А. На рисунке 35 представлена зависимость (лифтфактор) критического тока от температуры и внешнего магнитного поля, при направлении поля, перпендикулярно плоскости ленты. На рисунке 36 представлена зависимость критического тока от направления внешнего магнитного поля и его величины при температуре 77 К. Значение лифтфактора показывает во сколько раз отличается значение критического тока в данных условиях (температура, внешнее магнитное поле, направление) от значения критического тока в собственном поле при температуре 77 К.

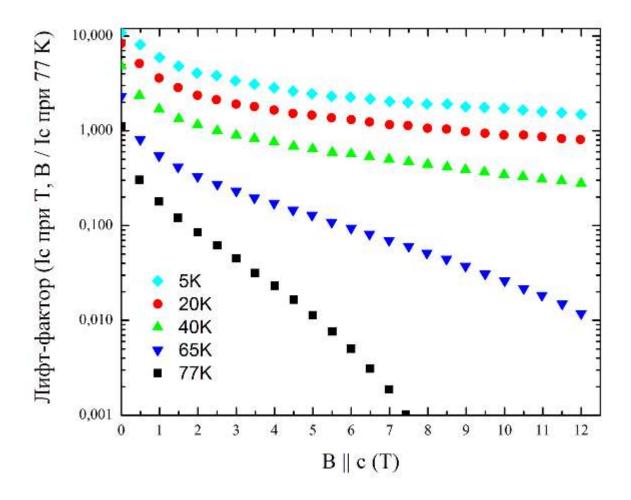


Рисунок 30 - график зависимости (лифт-фактор) критического тока от температуры и внешнего магнитного поля, при направлении поля, перпендикулярно плоскости ленты.

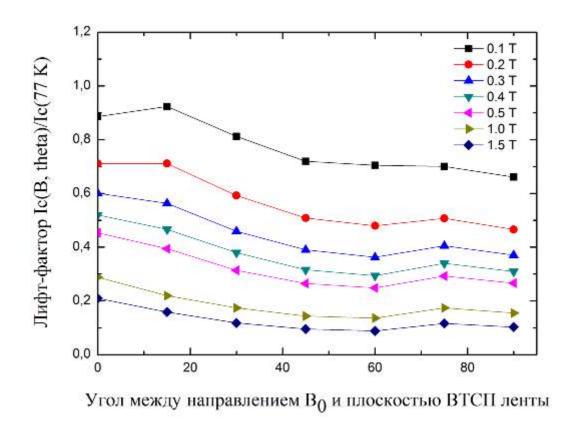


Рисунок 31 - график зависимости критического тока от направления внешнего магнитного поля и его величины при температуре 77 К.

# 6. Испытание макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП

Для испытания макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП был собран измерительный стенд, представленный на рисунке 32. Стенд состоит из сосуда дьюара, источника тока (KEPCO power supply), измерителя магнитной индукции (GM-2 AlphaLab Inc.) и позициометра датчика. Перед измерениями и запуском генератора тока макет магнита помещался в сосуд дьюара и заливался жидким азотом. Температура магнита считалась равной температуре жидкого азота (Т=77 К) после прекращения интенсивного кипения (порядка 10 минут). Для расчетов магнитного поля, создаваемого магнитом, использовались данные, приведенные на рисунке 37 и параметры намотки галеты. Расчеты были проведены в программе FEMM (Finite Element Method Magnetics, http://www.femm.info). Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными.







Рисунок 32 - Стенд для проведения испытаний макета сверхпроводящего магнита на основе ВТСП, сосуд дьюара с магнитом в жидком азоте, источник тока и измеритель магнитной индукции.

После достижения температуры магнита 77 К через витки пропускался постоянный ток величиной  $10-70~{\rm A}$  с шагом  $10~{\rm A}$ . Через 5 минут после установки значения тока проводились замеры величины индукции магнитного поля по оси магнита и в плоскости магнита, как функция удаления от его центра. При достижении величины тока  $70~{\rm A}$  магнит

перешел в нормальное состояние. Картина магнитного поля при токе 60 A, моделированная в программе FEMM представлена на рисунке 33.

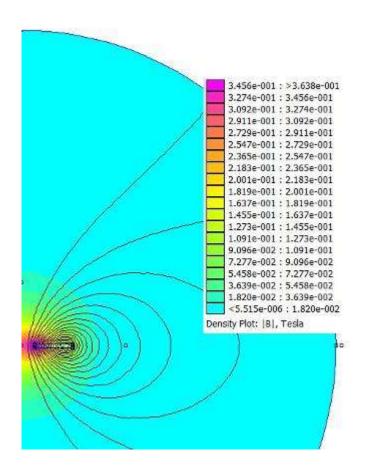


Рисунок 33 - Картина магнитного поля при токе в обмотке 60А.

Измеренные зависимости и их сравнение с расчетными значениями приведены на рисунках 34 - 37 для двух значений тока — 20 и 60 А. Из приведенных данных видно, что расчетные и измеренные значения величины магнитной индукции не отличаются более чем на 20%, что является приемлемым значением для такого типа измерений. Переход магнита в нормальное (не сверхпроводящее) состояние при токе 70 А является расчетным, учитывая данные рисунков 41 - 42. Полное моделирование магнитной системы и картины магнитного поля вблизи поверхности сверхпроводника с учетом данных рисунков 36 и 37 свидетельствует о невозможности получения величины магнитного поля внутри магнитной системы выше 1 Тл при температуре 77 К, и требует обязательного использования криоаккумулятора и понижения температуры до 20-30 К.

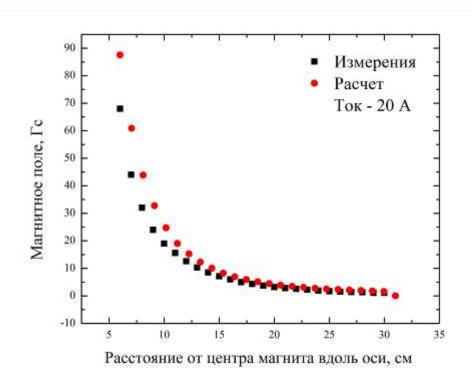


Рисунок 34 – Значение индукции магнитного поля при токе в обмотке 20А.

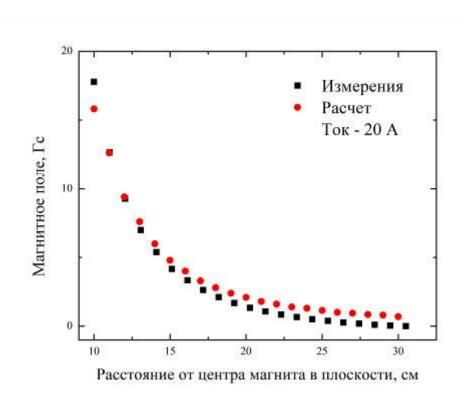


Рисунок 35 – Значение индукции магнитного поля при токе в обмотке 20А.

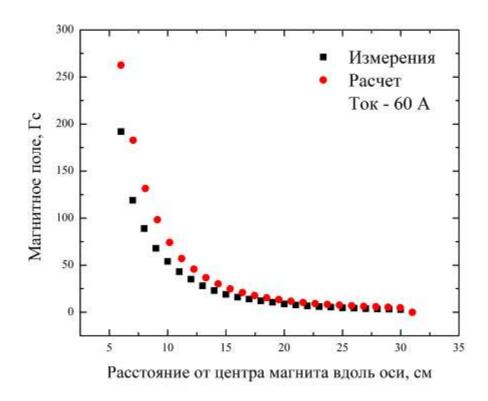


Рисунок 36 – Значение индукции магнитного поля при токе в обмотке 60А.

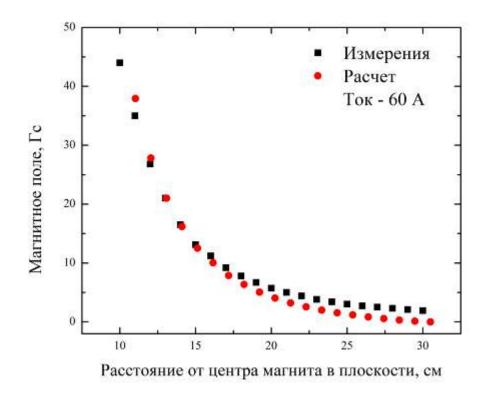


Рисунок 37 – Значение индукции магнитного поля при токе в обмотке 60А.

#### 7. Выводы

Изготовленный макет сверхпроводящего магнита на основе ВТСП показал хорошие результаты при испытании. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретически рассчитанными значениями. Расчетные характеристики и измеренные значения величины индукции магнитного поля не отличаются более чем на 20%, что является допустимым для данного вида измерений.

При токе 70 A в обмотке сверхпроводящего магнита ВТСП лента перешла в нормальное состояние, что совпадает с расчетными значениями при температуре 77 К.

### Список литературы:

- [1] Сверхпроводники для электроэнергетики. 2009. Т.б., В.2.
- [2] Сверхпроводники для электроэнергетики. 2009. Т.б., В.4.
- [3] Гинзбург, В.Л. Сверхпроводимость / В.Л. Гинзбург. Москва издательство "Педагогика" 1990. 112с.
- [4] http://www.superpower-inc.com
- [5] Tomita, M. High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K / Tomita M., Murakami M. // Nature. 2003. V.421. P. 517.
- [6] Patel, A. Trapped fields up to 2 T in a 12 mm square stack of commercial superconducting tape using pulsed field magnetization / A. Patel, S.C. Hopkins and B.A. Glowacki // Supercond. Sci. Technol. 2013. V. 26. P.032001.
- [7] Kim, S.B. Study on optimization of YBCO thin film stack for compact NMR magnets / S.B. Kim, T. Kimoto, S. Hahn, Y. Iwasa, J. Voccio, M. Tomita // Physica C. 2013. V.484. P.295.
- [8] Tomita, M. Development of a compact magnet system based on high  $T_c$  superconductors / M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, A.Ishihara, M. Muralidhar // QR of RTRI. 2012. V.53., N.3. P.155.