

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В. П. АСТАФЬЕВА»
(КГПУ им. В.П. Астафьева)

Институт математики, физики и информатики
Кафедра физики и методики обучения физике

Рогов Андрей Николаевич

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Исследование взаимодействия постоянных магнитов и высокотемпературного
сверхпроводника как направление исследовательской деятельности учащихся старших
классов

Направление подготовки 44.03.01 Педагогическое образование

Направленность (профиль) образовательной программы Физика

ДОПУСКАЮ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

доцент, кандидат педагогических наук

С.В. Латынцев

04.06.2024

(дата, подпись)

Руководитель

доктор физико-математических наук

Д.М. Гохфельд

16.05.2024

(дата, подпись)

Обучающийся

А.Н. Рогов

8.05.2024

(дата, подпись)

Дата защиты

20 июня 2024

Оценка

хорошо

(прописью)

Содержание

Введение	3
Глава 1. Изучение взаимодействий постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника (обзор).	6
1.1 Общие сведения о сверхпроводниках и постоянных магнитах	6
1.2 Свойства сверхпроводников	10
1.3 Эффект Мейснера.....	11
Глава 2. Оригинальные результаты.	14
2.1 Взаимодействие сверхпроводника и магнита	14
2.2 Экспериментальное измерение силы притяжения магнита над сверхпроводником.....	19
2.3 Взаимодействие сверхпроводника и магнита после перфорации пластины	21
Глава 3. Организация исследовательской деятельности учащихся старших классов по теме «Взаимодействие постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника».....	23
3.1 Определения понятия организации исследовательской деятельности старших классов	23
3.2 Методические рекомендации по организации исследовательской деятельности старших классов по теме «Взаимодействие постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника»	27
3.3 Методические материалы.....	29
3.4 Техника безопасности при проведения исследовательской деятельности	34
3.5 Результаты исследования учащегося старшей школы.	35
Заключение.....	37
Список использованных источников	38

Введение

Актуальность. Исследование взаимодействий постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) является одной из фундаментальных задач в физике твердого тела, а также основой для практических применений сверхпроводников в магнитных и электрических системах.

Изучение свойств высокотемпературных сверхпроводников дает нам возможность создавать сверхпроводящие устройства, которые могут функционировать только при низкой температуре. ВТСП применяют в разработке систем магнитной левитации (транспорт на магнитных подушках, магнитные подшипники и другие), а также в разработке источников сильного магнитного поля. Главным условием работы этих устройств является величина индукции магнитного поля, которое выдерживает сверхпроводник без разрушения сверхпроводящего состояния. Это критическое поле определяет возможность использования сверхпроводника в качестве постоянного магнита.

На данный момент существует проблема внедрения организации научно-исследовательской деятельности обучающихся в школе. Анализ образовательных практик говорит о том, что такие исследования, в рамках школы, не проводятся учителями. Поэтому нужно ввести новые формы реализации научно-исследовательской деятельности в образовательном процессе, чтобы учащиеся могли больше углубиться в изучении физики.

Внеурочные формы обучения обеспечивают специализацию в конкретной области знаний. Такие формы могут изменяться под влиянием нескольких факторов: научный интерес педагога и учащихся и актуальные открытия научного исследования. Если применить такой подход в школе,

то прямое включение заинтересованных школьников в научно-исследовательскую деятельность становится не в форме имитации, а в форме реального обучения научного познания.

Примером темы таких внеурочных форм организации обучения, является: «Исследование взаимодействия постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника». Взаимодействие магнитов и ВТСП важно для прикладных применений, и обучающихся старших классов следует познакомить с данными физическими явлениями и их применениями.

Проблему исследования можно сформулировать следующим образом: как взаимодействуют постоянные магниты со сверхпроводниками? От чего зависит это взаимодействие? Как можно измерить такое взаимодействие?

Объект исследования: взаимодействие постоянных магнитов и сверхпроводников как содержание научно-исследовательской деятельности.

Предмет исследования: организация научно-исследовательской деятельности учащихся старших классов по взаимодействию постоянных магнитов и сверхпроводников.

Цель работы: изучение вопросов взаимодействий постоянных магнитов и сверхпроводников в рамках научно-исследовательской деятельности учащихся старших классов.

Задачи исследования:

1. Ознакомится с явлением сверхпроводимости;
2. Изучить свойства современных лент из ВТСП;
3. Экспериментально исследовать взаимодействие ВТСП с неодимовыми магнитами;
4. Измерить силу притяжения между магнитом и сверхпроводником;
5. Разработать программный модуль для исследования взаимодействия магнита и ВТСП;
6. Разработать методические материалы для проведения встреч с учащимися по теме исследования.

Апробация и внедрение результатов. Материалы данного исследования были представлены на конференции “Образование и наука в XXI веке: математика, физика, информатика и технологии в смарт-мире” КГПУ им. В.П. Астафьева, май 2024 г. Подготовка научно-исследовательского проекта учащегося физ.-мат. школы СФУ.

Структура выпускной квалификационной работы определена логикой научного исследования. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы.

Глава 1. Изучение взаимодействий постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника (обзор).

1.1 Общие сведения о сверхпроводниках и постоянных магнитах

При понижении температуры в некоторых проводниках возникает сверхпроводимость. Это явление было открыто Камерлинг-Оннесом в 1911 году [1]. Удельное сопротивление таких металлов при определенном значении температуры падает до нуля. Для перехода в сверхпроводящее состояние необходимо понизить температуру проводника ниже определенного значения, то есть до критической температуры.

Сверхпроводник обладает необычным сочетанием свойств, проявляющихся только при низких температурах. Самым главным свойством является полное исчезновение электрического сопротивления при их охлаждении ниже критической температуры [2]. Отсутствие сопротивления позволяет создавать техническо-экономические устройства, которые являются недостижимыми при использовании традиционных проводников, которые применяются в электротехнике. Электротехнические устройства на основе сверхпроводников используются в различных сферах науки и техники: медицина, энергетика, транспорт и другие [3].

Так как функционирование сверхпроводников требует охлаждения до критической температуры, то это приводит к ограничениям широкого распространения и применения их в технике. Сверхпроводники делятся на низкотемпературные и высокотемпературные. Низкотемпературные сверхпроводники проявляют свои свойства при низкой температуры до 20 градусов Кельвина, а в высокотемпературных сверхпроводниках электрическое сопротивление отсутствует, если их охладить до температуры ниже 100 градусов Кельвина [4]. Сверхпроводники используют в разных областях применения, но для этого нужно поддерживать постоянную низкую температуру. Чтобы использовать сверхпроводники, нужно использовать сжиженные газы, такие как жидкий

азот, неон, водород, гелий. В основном жидкий азот используют для ВТСП материалов как криогенный хладагент, так как его температура кипения равна 77.3 градусов Кельвина [5]. Чтобы поддерживать постоянную температуру жидкого газа используются специальные термостаты – криостаты (сосуды Дьюара). Поэтому, чтобы использовать уникальные свойства сверхпроводников, нужно учитывать необходимость постоянного охлаждения и отвода тепла, что и приводит к ограничению этого материала в электротехнике и науке [6].

Сверхпроводники обладают широким применением: создание различных материалов (магниты), макро- и микротехнике. К примеру, сверхпроводники используются в медицинской диагностике (ЯМР-томография). Так же они используются вместо обычных магнитов по двум причинам. Во-первых, технические сверхпроводники могут создать вокруг себя магнитное поле с индукцией 10-15 Тесла, тем временем “теплые” постоянные магниты могут только выдавать 2 Тесла. Во-вторых, затраты электроэнергии на магнит со сверхпроводящей обмоткой значительно меньше, чем затраты мощности на питание обычного электромагнита. Поэтому выбор типа магнита обуславливаются чисто экономическими причинами [7].

Для взаимодействия с сверхпроводником, нужно выбрать определенный магнит, который имеет сильное магнитное поле. На данный момент есть несколько видов магнитов: постоянные, временные и электромагнитные [8].

Постоянные магниты, после намагничивания, обладают своим магнитным полем долгое время. Всего их несколько видов: ферритовые, алмазные, редкоземельные и одномолекулярные.

1) Ферритовые магниты обладают свойством электроизоляции. Они представляют собой ферромагнитными керамическим соединениями, путем смешивание большого количества оксида железа с металлическими соединениями [9]. Феррит уникален в своей природе, так как он не подвергается к коррозии (взаимодействие металлической пластины с окружающей средой), и поэтому он может продлевать жизнь многих других продуктов. А также его можно использовать в жарких условиях. Ферритовые магниты сложно размагничивать, поэтому они обладают коэрцитивной силой, то есть значением напряженности внешнего магнитного поля для размагничивания. Их используют для создания других магнитов, такие как электродвигатели и громкоговорители.

2) Магниты алнико создают в основном из трех металлов: алюминий (Al), никель (Ni) и кобальт (Co). В отличии от других магнитов, они являются электропроводящими и обладают высокой температурой плавления. До редкоземельных магнитов, они являлись самыми сильными магнитами, так как они создают вокруг себя напряженность магнитного поля до 0,15 Тл. Они широко используются в промышленных и бытовых применениях [10].

3) На данный момент времени, сильным типом постоянных магнитов, являются редкоземельные, так как их магнитное поле может превышать 1 Тл, но они легко поддаются к коррозии, поэтому на них наносят специальным слоем для защиты. Есть два типа редкоземельных магнитов – самарий-кобальтовые и неодимовые магниты. Благодаря их маленьким размерам и небольшого веса, они применяются широко в современных технологиях.

4) Ученые в конце 20 века обнаружили, что некоторые молекулы могут обладать своими магнитными свойствами, но только при очень низкой температуре. Они состоят из разных металлов: кобальт, марганец, железо,

никель, ванадий. Так же было обнаружено, что некоторые цепные системы сохраняют свой магнетизм в течении долгого времени при более высоких температурах. Их потенциал применения очень огромен. Они применяются в квантовых вычислениях, хранение данных и обработка информации.

Некоторые вещества обладают свойством намагничиваться при слабом магнитном поле, но если они отдалены от него, то теряют свой магнетизм. Временные магниты используются для изготовления временных электромагнитов. Так же они используются для разделения металлических материалов, на складах металлолома и дают новые возможности в современных технологиях [11].

Электромагниты представляют собой плотно намотанные витки провода. Они обладают свойством намагничиваться при протекании через него электрическим током. Благодаря этому, можно регулировать напряженность магнитного поля с помощью изменения направления и величины тока. Этот тип магнитов широко используется в электрических и электромеханических устройствах.

Из всего перечисленного, хорошо подходит для взаимодействия сверхпроводника – это редкоземельные, а именно неодимовые магниты, а не самарий-кобальтовые магниты, так как они очень дорого стоят и их реже используют, чем другие редкоземельные материалы. Неодимовые магниты состоят из редкоземельного металла Неодим (Nd), а также в состав металла входит железо (Fe) и бор (B). Главная особенность этого магнита в том, что они обладают мощным магнитным полем, из-за кристаллической структуры тетрагонального типа $Nd_2Fe_{14}B$. Благодаря составу они долговечны и сохраняют свою магнитную силу [12].

1.2 Свойства сверхпроводников

Если коротко характеризовать сверхпроводники, то они обладают следующими свойствами:

1) В сверхпроводниках, возбужденные электрические токи могут циркулировать не затухая. Так как сопротивление отсутствует, то время затухания токов очень велико (до нескольких лет).

2) Внутри вещества в сверхпроводящем состоянии магнитная индукция равняется нулю при понижении температуры. Если включить внешнее магнитное поле, то в сверхпроводнике появляются индукционные токи по закону Ленца, эти токи компенсируют внешнее магнитное поле. Обычный проводник характеризуется быстрым затуханием индукционного тока, причем останется только поток, вызванный намагничивающей катушкой. В сверхпроводнике не происходит затухание компенсирующих токов, значит, значение суммарной индукции тела будет равно 0. [13].

3) Если значение напряженности магнитного поля выше, чем определенное значение, то можно наблюдать разрушение сверхпроводимости. Сверхпроводник теряет свои свойства и становится обычным проводником, а магнитное поле входит во внутрь этого вещества. И поэтому магнитное поле можно назвать критическим при данных условиях [14].

Сверхпроводник обладает тремя критическими свойствами при практическом применении: критической температурой (T_k), критическим магнитным полем (H_k) и критической плотностью тока (J_k). В ВТСП при высоких температурах также возникает сопротивление протеканию тока из-за движения вихрей Абрикосова, при магнитных и токовых воздействиях. То есть, когда плотность тока превышает критическую, то под действием силы Лоренца возникают движения магнитных вихрей. Также движение вихрей может быть связано с медленными термоактивированными

перескоками вихрей между центрами пиннинга. Движение вихрей неизбежно приводит к тепловыделению и энергетическим потерям [15]. Они являются примером динамического состояния (ДС), способного при определенных условиях привести к развитию тепловой неустойчивости и резистивному S-N (сверхпроводящее – нормальное состояние) переходу. Повышение температуры в системе, как в случае термического воздействия, так и в случае тепловыделения вследствие движения магнитного потока, напрямую связано с влиянием тепловых флуктуаций на взаимодействие вихрей Абрикосова с центрами пиннинга и приводит к заметному уменьшению реальной плотности критического тока в ВТСП. В случае прямого термического воздействия наиболее интересным, с точки зрения, изучением механизма генерации ДС, обусловленных тепловым депиннингом магнитных вихрей, является, например, быстрый локальный нагрев материала, который может быть реализован с использованием лазерного излучения длительностью десятки пикосекунд и более [16].

Таким образом, магнитное, токовое и лазерное воздействия являются тремя основными видами воздействий, приводящих к возникновению термоиндуцированных динамических состояний. Мы рассмотрим магнитное взаимодействие.

1.3 Эффект Мейснера

В начале 20 века, было экспериментально доказано, что магнитное поле не проникает во внутрь сверхпроводника, не зависимо от условий эксперимента. Оказывается, что сверхпроводник, находящийся в охлажденном состоянии, в постоянном магнитном поле, переходит в состояние диамагнетизма, то есть его магнитная индукция равняется нулю. Это означает, что этот проводник выталкивает от себя внешнее поле. Это явление называется эффектом Мейснера (был открыт в 1933 году). Этот эксперимент доказывает, что эффект Мейснера более сложное явление,

ведь при обычных условиях, где в идеальном проводнике, который был помещен во внешнее магнитное поле, и его сопротивление стало равняться нулю, магнитное поле должно сохраняться. Тем более, при таких условиях, это "сохраненное" поле должно оставаться при отдалении от него внешнего магнитного поля, так как его поддерживают токи сверхпроводимости. Однако этот опыт показывает, что сверхпроводник может отталкивать от себя внешнее магнитное поле [17].

Можно сказать, что эффект Мейснера является главным свойством для сверхпроводников, а не просто исчезновение сопротивления при критически низкой температуре. На поверхности сверхпроводника экранирующие токи, которые постоянны во времени и не затухают в неизмеряющемся магнитном поле, создают свое магнитное поле, строго равное и противоположное внешнему полю. Внешнее и внутреннее магнитные поля складываются так, что их суммарное магнитное поле становится равным нулю, поэтому происходит эффект «выталкивания» внешнего магнитного поля из сверхпроводника.

Однако, эффект Мейснера не выполняется в некоторых сверхпроводниках, если они обладают первым критическим магнитным полем, которое превышает при обычных условиях, при этом удельное сопротивление сверхпроводников может равняться нулю. По этому признаку сверхпроводники разделяются на первый и второй род.

По принципу минимума свободной энергии, сверхпроводники первого рода стремятся к такому состоянию, в котором граница раздела нормальной и сверхпроводящей фазы должна быть минимальной по своей протяженности, поэтому должны отсутствовать внутренние границы раздела зон. При таких условиях эффект Мейснера полностью выполняется в сверхпроводниках первого рода.

Сверхпроводники второго рода ведут себя иначе, так как граница раздела между фазами в них энергетически выгодна, и сверхпроводящий массив во внешнем магнитном поле начинает дробиться на отдельные чередующиеся нормальные и сверхпроводящие зоны. Чем больше таких зон, тем длиннее граница между ними, и тем больше выигрыш в свободной энергии [18]. Благодаря указанным свойствам незатухающие токи могут протекать по всему объему сверхпроводников второго рода, так как границы раздела между фазами могут заполнять весь объем сверхпроводника.

Эффект Мейснера в таких сверхпроводниках на макроскопическом уровне не выполняется и магнитное поле частично проникает в сверхпроводник, начиная с малых, хотя и ненулевых, значений. Поэтому мы можем увидеть такую картину: когда мы подносим магнит с сильным постоянным магнитным полем к этому проводнику, он начинает отталкивать от себя магнит, но когда наоборот отдаляем от него, то проводник начинает притягиваться, то есть происходит проникновение магнитного поля сверхпроводника в виде квантовых вихревых нитей (вихри Абрикосова), которые закрепляются на дефектах в материале [19].

Глава 2. Оригинальные результаты.

2.1 Взаимодействие сверхпроводника и магнита

При проведении исследования были использованы неодимовые магниты разной формы и массы. Так же была использована сверхпроводящая лента второго рода $GdBa_2Cu_3O_x$ компании SuperOx. Из ленты изготавливалась пластина массой $m_{пл} = 6,523$ грамма и площадью $S_{пл} = 12,96$ $см^2$.



Рис 1. Схема сверхпроводящей ленты.



Рис 2. Пластина из сверхпроводящих лент $GdBaCuO$.

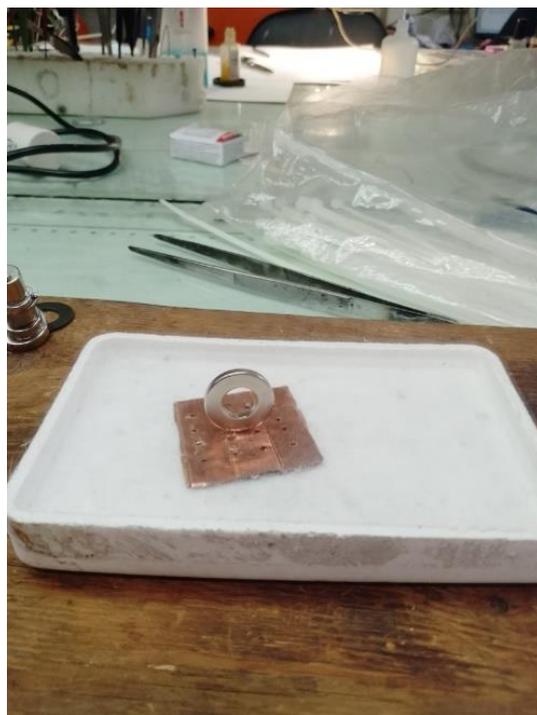


Рис 3. Неодимовый магнит в форме кольца.

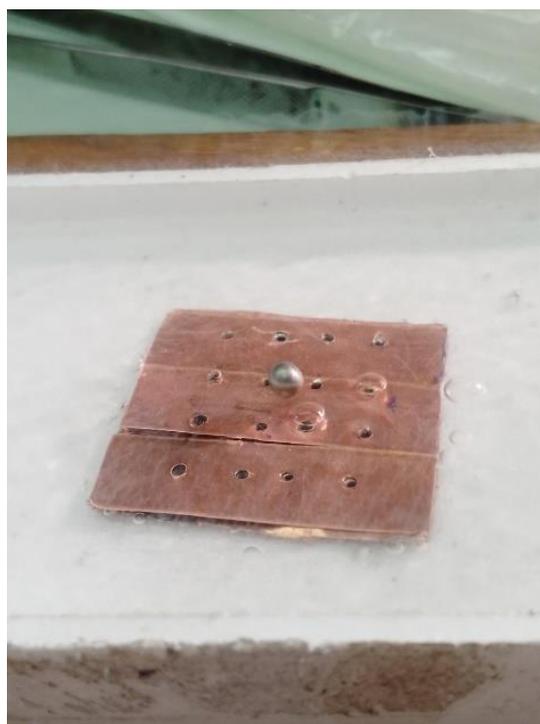


Рис 4. Маленький неодимовый магнит в форме шара.



Рис 5. Неодимовый магнит в форме круглой пластины.



Рис 6. Неодимовый магнит в форме цилиндра.

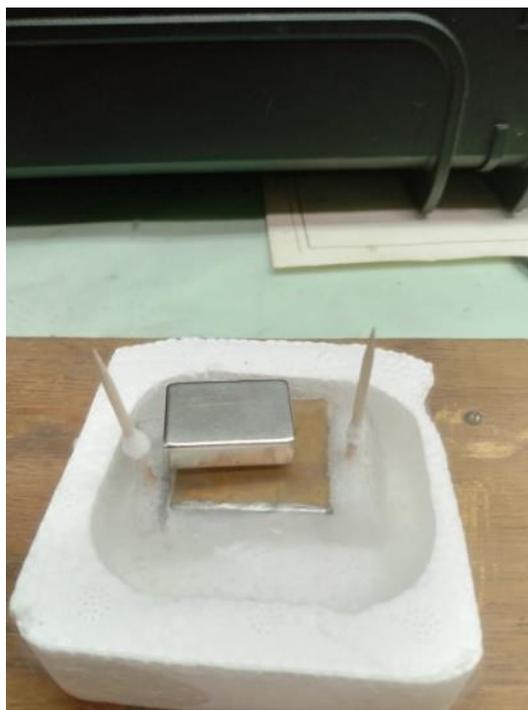


Рис 6. Неодимовый магнит в форме прямоугольной призмы.

В начале исследования мы убедились, что этот сверхпроводник кроме отталкивания от магнита, соответствующего эффекту Мейснера, может притягивать к магниту. При отдалении магнита от проводника, сверхпроводник начинает тянуться за магнитом. Сверхпроводник второго рода может, как и сверхпроводник первого рода, выталкивать магнитное поле, но оно может частично проникать в образец в виде вихрей Абрикосова, несущих квант магнитного потока. Из-за выталкивания магнитного поля сверхпроводники левитируют над магнитами [20]. Но если магнитный поток проник в сверхпроводник и закрепился на дефектах, то отталкивание от магнита начинает сочетаться с притяжением. Сверхпроводник при этом удерживается на постоянном расстоянии от магнита.



Рис 7. Притяжение сверхпроводящей пластины к неодимовому магниту.

Для того, чтобы понять, отчего зависит сила притяжения между магнитом и сверхпроводником, было проведено исследование влияния количества слоев из сверхпроводящей ленты в пластине на левитацию [21]. Всего было нанесено от одного до трех слоев сверхпроводящей ленты на текстолитовую подложку. Пластина лежала в емкости, погруженная в жидкий азот, а магнит левитировал над пластиной. Было экспериментально измерено, что при одном, двух и трех слоях ленты расстояние между пластиной и магнитом было примерно 3 мм, 5 мм и 7 мм соответственно. Таким образом, что при увеличении слоя, сила магнитного поля пластины увеличивалась. Так же было выявлено, что высота левитации не зависела от массы и формы магнита.

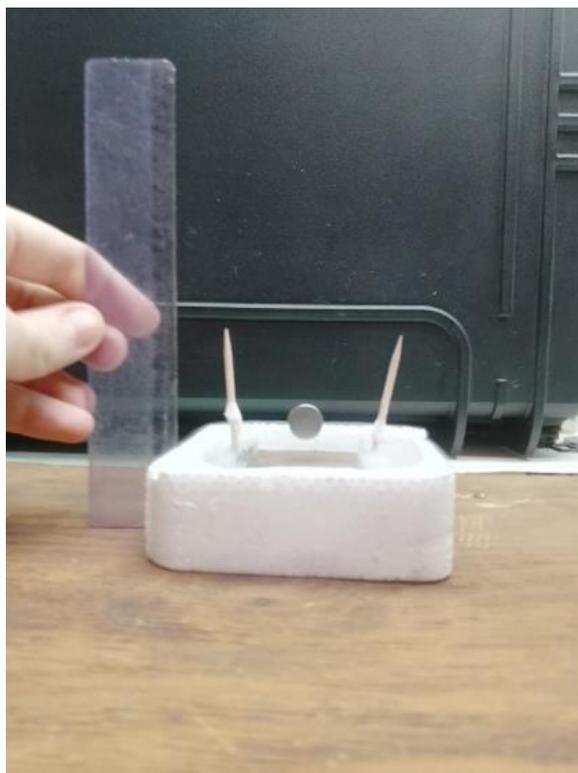


Рис 8. Экспериментальное измерение высоты левитации с помощью линейки.

2.2 Экспериментальное измерение силы притяжения магнита над сверхпроводником

Для исследования взаимодействия сверхпроводника с неодимовым магнитом мы определяли силу притяжения между магнитом и сверхпроводящей пластиной с захваченным магнитным потоком. Для измерения силы притяжения пластины к магниту, мы изменяли вес груза, прикрепленного к пластине, фиксируя вес, при котором пластина отрывалась от магнита.



Рис 10. Притяжение сверхпроводящей пластины к неодимовому магниту с подвесом.

Чтобы понять, какой груз может поднять магнит, был сделан подвес из металлической банки для грузов $m_{\text{под}} = 2,005$ грамм, в который помещались свинцово-оловянные прутки (грузики). Общий вес груза, который смог поднять магнит, равен $m_{\text{г}} = 82,5$ грамм. Общий вес груза, пластины и подвеса равен $m_1 = 90,818$ грамм = 0,09 кг.

То есть данный магнит может поднять не большой груз, из-за своего маленького размера. Поэтому мы можем сказать, что сила притяжения магнита над сверхпроводником равен $F_{\text{пр}} = m \cdot g = 0,09 \cdot 9,81 = 0,8829$ Н.

2.3 Взаимодействие сверхпроводника и магнита после перфорации пластины

Для следующего исследования было проделаны 16 отверстий в пластине (4 ряда) с помощью дрели со сверлом диаметром 1.7 мм [22]. Отверстия являются дополнительными макроскопическими дефектами, на которых могут закрепляться вихри Абрикосова. Также отверстия улучшают отвод тепла, так как жидкий азот проникает внутрь пластины. При этом масса пластины уменьшилась ($m_{\text{пер.пл}} = 6,158$ грамм), также уменьшилась эффективная площадь сверхпроводника $S_{\text{пер.пл}} = 12,5984$ см² (уменьшилась на 2,8 %, $S_{\text{дыр}} = 2,26$ мм² или 0,0226 см²).

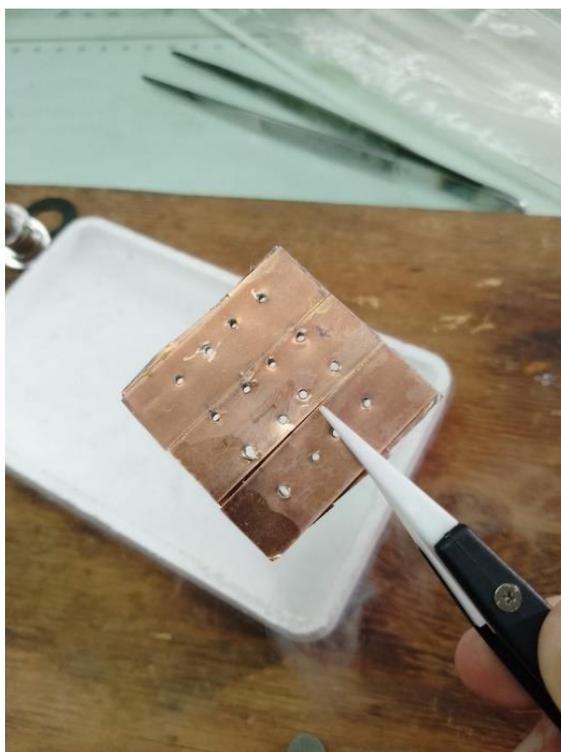


Рис 9. Перфорированная пластина

Далее проверялось влияние перфорации сверхпроводящей пластины на силу притяжения к магниту. После перфорации магнит смог поднять меньшую массу, так что в итоге общий груз был равен $m_2 = 84,5$ грамм вместе с перфорированной пластиной. Сила притяжения магнита над сверхпроводником равен $F_{пр} = m \cdot g = 0,084 \cdot 9,81 = 0,82404$ Н. Вес поднимаемого груза после перфорации пластины уменьшился на 7%.

Таким образом, было установлено, что создание макроскопических отверстий не приводит к увеличению захваченного магнитного потока в сверхпроводнике. После перфорации было определено, что значительных изменений взаимодействия между магнитом и сверхпроводником нет. Согласно теоретическим предположениям, для улучшения закрепления вихрей нужны дефекты с размерами $d = 10$ нм. А наши дефекты слишком большие. Увеличение силы закрепления вихрей возможно, если создавать наноотверстия при помощи специального лазера [23].

Глава 3. Организация исследовательской деятельности учащихся старших классов по теме «Взаимодействие постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника».

3.1 Определения понятия организации исследовательской деятельности старших классов

Организация исследовательской деятельности обучающихся, является самым важным аспектом для модернизации школьного образования в развитии общеобразовательных умений и навыков, такие как исследовательские, рефлексивные и самооценочные.

Понятие “исследовательская деятельность” называют по-разному, но мы рассмотрим пару их них. Е.В. Баранов определяет исследовательскую деятельность, как «деятельность, связанную с поиском ответа на творческий исследовательский вопрос». А Б.А. Викола понимает исследовательскую деятельность обучающихся, «как деятельность, осуществляемую на основе самоорганизации, а не по строгим правилам» [24].

При сравнении этих высказываний, можно привести несколько характеристик исследовательской деятельности [25]:

- исследовательская деятельность дает творческий процесс для обучающихся;
- организация исследовательской деятельности обладает главными этапами при изучении в науке;
- преподаватель является носителем опыта организационной деятельности, а не только источником знаний;

-организация исследовательской деятельности дает связь между участниками образовательного процесса, а также создает новые методы исследования для обучающихся.

- происходит активное изучение темы при данной деятельности, а не пассивное изучение нового материала;

- деятельность происходит на основе самоорганизации;

При описании структуры исследовательской деятельности обучающихся, можно выделить следующие основные этапы:

- ориентирование (выбрать опыт, который нравится);

- проблематизация (вывести главную проблему исследования);

- планирование (определить этапы исследования и роли участников);

- определение средств (выбрать оборудования для опыта);

- проведение эксперимента;

- анализ и рефлексия.

По итогу можно сказать, что исследовательскую деятельность можно рассмотреть, как форму деятельности, которая носит учебно-познавательный характер.

Введение исследовательской деятельности как внеурочное обучение для обучающихся, позволяет педагогу направлять их в познавательную деятельность [26]. Учитель физики должен показать, что с помощью дополнительного занятия в школе, связанная с исследовательской работой, можно наблюдать очень интересные явления. С помощью них можно не только вычислять какие-то параметры явления, но и экспериментировать над ними, что дает возможность больше понимать данную тему.

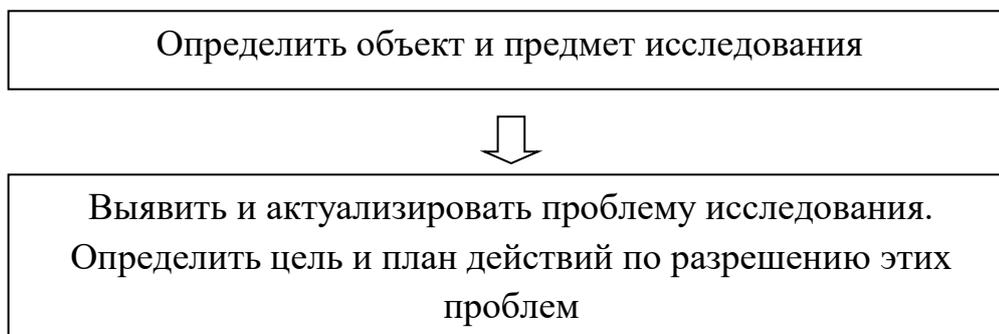
Для проведения таких исследовательских работ, они имеют следующие цели:

- Выявление и поддерживание одаренных обучающихся;
- Развитие интеллектуальных и творческих способностей;
- Поддержка научного интереса.

Задачами таких организаций являются:

- дать возможность обучающимся участвовать в творческой деятельности;
- дать участникам исследования возможность поучаствовать в научно-практических конференциях;
- проводить реализацию творческих идей и создавать научные работы и проекты;
- создать условия для расширения среды общения и получения информации для учащихся;
- развивать интеллектуальные, творческие и коммуникативные способности учащихся.
- формировать у обучающихся навыки исследовательской работы;

Алгоритм исследовательской деятельности учащихся [27]:



Определить границы исследовательского проекта



Предположить гипотезу. Разработать возможные подходы к решению проблемы



Определить задачи исследования



Определить методы исследования, а также разработать приемы и способы для достижения цели



Собрать и обработать информацию. Сделать анализ и обобщить полученный результат.



Оформить полученные результаты работы. Провести научное исследование



Качественно оформить исследовательскую работу. Подготовить презентацию исследовательского проекта

По итогу таких исследовательских работ можно повысить мотивацию обучающихся в изучении физики старших классов, что дает возможность развивать свои творческие и исследовательские навыки. А также, по итогу таких работ, они могут определить свою будущую профессию. Для того, чтобы обучающиеся могли развиваться в науке, им нужен опытный руководитель, который должен обладать некоторыми умениями:

- 1) иметь повышенную педагогическую квалификацию;
- 2) уметь формировать умения и навыки у обучающихся;
- 3) уметь организовывать этапы исследовательской работы.

Благодаря этих навыков, учитель дает возможность формировать исследовательскую стиль мышления и расширить научное мировоззрение обучающихся, а также узнать получше своих учеников, для дальнейшего обучения.

3.2 Методические рекомендации по организации исследовательской деятельности старших классов по теме «Взаимодействие постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника»

Реализацию научно-исследовательской деятельности по физике для старших школьников в рамках темы «Взаимодействие постоянных магнитов и высокотемпературного сверхпроводника» целесообразно начинать с разбора **этапов выполнения исследовательской работы [28]:**

- выделение и постановка проблемы;
- выработка гипотезы;
- поиск и предложение возможных вариантов решения;
- сбор материала;
- анализ и обобщение полученных данных;

Чтобы реализовать эти этапы, нужно грамотно распределить время и выбрать определенную форму контроля для промежуточного оценивания исследовательской работы.

Правильная структура исследовательской работы учащегося является одним из важных критериев для ее оценивания, что формирует у обучающихся навыки для грамотного оформления доклада [29].

Структура исследовательской работы школьника должна содержать следующие заголовки [30]:

- 1) титульный лист;
- 2) содержание;
- 3) введение (актуальность, проблема исследования, объект и предмет исследования, цели и задачи исследования);
- 4) основная часть (главы и параграфы);
- 5) заключение (выполнение целей и задач исследования);
- 6) список использованной литературы;
- 7) приложения (при необходимости).

Описанная выше структура полностью отражает требования к научно-исследовательским работам учащихся и может быть реализована в рамках одной из форм организации научно-исследовательской деятельности в школе.

3.3 Методические материалы

Для успешной реализации научно-исследовательской деятельности учащихся старших классов физической-математической школы СФУ в рамках нашей темы были разработаны следующие методические материалы:

1. Примерный тематический перечень занятий;
2. Вопросы для обсуждения по теме «Взаимодействие постоянный магнитов и высокотемпературных сверхпроводников»;
3. Задания для учащихся в рамках исследовательской работы;
4. Критерии оценивания докладов на конференции.

Примерный перечень занятий в рамках исследовательской работы для учащихся старших классов

	Тема	Виды деятельности	Часы
1	Изучение неодимовый магнитов и сверхпроводников	Лекция, объяснение	2
2	Рефлексия по изучению высокотемпературных сверхпроводников	Беседа	2
3	Исследовательская работа по теме «Взаимодействие постоянного магнита и сверхпроводника»	Исследовательская работа по группам	4
4	Подготовка групповых исследовательских проектов	Самостоятельная работа, индивидуальные и групповые консультации	10
5	Заслушивание групповых докладов	Урок-конференция	2
Итого			20

Вопросы для обсуждения в рамках темы «Исследование взаимодействия постоянного магнита и высокотемпературного сверхпроводника»:

1. Дайте определение сверхпроводника?
2. Опишите свойства сверхпроводника?
3. Какие бывают сверхпроводники и в чем отличие?
4. В чем отличие сверхпроводников первого и второго рода?
5. Почему эффект Мейснера частично наблюдается у сверхпроводников второго рода?
6. Опишите вихри Абрикосова и их закрепление на дефектах.
7. Что такое постоянный магнит? Какие магниты самые лучшие?
8. Что общего между постоянными магнитами и сверхпроводниками второго рода?

Задания для выполнения в группах

- Задание 1. Выбор темы исследования
- Задание 2. Формулируем цели, задачи, выводы исследования
- Задание 3. Проведение конференции для анализа результатов

Задание 1. Выбор темы исследования

Выберите исследовательскую работу, которую вас заинтересовала. Исследовательских работ всего три:

1. Взаимодействие постоянного магнита и высокотемпературного сверхпроводника;
2. Взаимодействие постоянного магнита и высокотемпературного сверхпроводника после перфорации;
3. Экспериментальное измерение силы притяжения магнита и сверхпроводника до и после перфорации.

Задание 2. Формулируем цели, задачи, выводы исследования

Продумайте и составьте для вашего исследования следующие важнейшие компоненты [31]:

1. Актуальность;
2. Проблема исследования;
3. Цель исследования;
4. Задачи (несколько пунктов);
5. Объект исследования;
6. Выводы (несколько пунктов, по количеству не менее, чем в задачах).

Задание 3. Проведение конференции для анализа результатов

Проанализируйте, от чего зависит взаимодействия неодимового магнита и высокотемпературного сверхпроводника, а также, будут ли изменения после перфорации сверхпроводника? При экспериментальном измерении силы притяжения до и после перфорации, есть ли какие-то отличия и совпадает ли результат с вашей гипотезой?

Критерии оценивания докладов на конференции

Критерии оценивания	Баллы
1. Собственные оригинальные идеи при исследовании	
- Обучающийся не обладает собственными оригинальными идеями	0
- Совместно с преподавателем	1
- Собственные оригинальные идеи	2
2. Обучающийся смог сам вывести проблему исследования	
- Не смог вывести проблему исследования	0
- Не значительный личный вклад в выведении проблемы исследования	1
- Самостоятельное выведение проблемы исследования	2
3. Оформление работы обучающегося	
- Работа оформлена по всем требованиям	1
- Текст логически построен правильно	1
- Орфографические ошибки не присутствуют	1
- Оформлен в единый шрифт	1
4. Структура оформления исследовательской работы	
- Работа соответствует по содержанию	1
- Цель была поставлена в работе	1
- Задачи и ход исследования понятны преподавателю	1
- Эксперимент был проведен	1
- Результат был получен	1

- Выводы были сделаны	1
- Результаты и выводы соответствуют цели исследовательской работы	1
5.Качество доклада и ответы на вопросы обучающегося	
- Обучающийся не смог объяснить суть работы	0
- Обучающийся смог самостоятельно объяснить суть работы, но не смог ответить на вопросы учителя	1
- Обучающийся смог самостоятельно объяснить суть работы и отвечать на вопросы	2
6.Содержание презентации	
- Слайды в едином стиле	1
- На слайде указаны показания при ходе работы	1
- Текст не содержит грамматических ошибок на слайдах	1
Максимальный балл	20

Докладчик получает следующую оценку, если:

“5”- набрано 19-20 баллов;

“4”- набрано 16-18 баллов;

“3”- набрано 13-15 баллов;

“2”- набрано 10-12 баллов.

3.4 Техника безопасности при проведения исследовательской деятельности

При исследовательской работе с жидким азотом, можно получить обморожение открытых участках тела, так как он обладает пониженной температурой [32]. Так же при работе используется дрель для перфорации сверхпроводника. Так как эта деятельность опасна для здоровья, нужно ввести несколько правил техники безопасности данной деятельности.

Работа с жидким азотом:

- 1) Проверить осмотром исправность криостата (сосуд Дьюара);
- 2) Работать в специальной одежде и рабочих перчатках;
- 3) Волосы должны быть убраны во время работы;
- 4) Запрещается плотно закрывать крышку сосуда, так как испарение жидкости создает избыточное давление;
- 5) Запрещается заглядывать в сосуд для определения уровня жидкости;
- 6) Заливать жидкость с помощью специального переливного устройства (металлорукав).

Работа с дрелью:

- 1) При работе с дрелью надеть спецодежду и защитные очки;
- 2) Проверить надежность крепления сверла;
- 3) Не выполнять работу с дрелью без присмотра учителя;
- 4) Следить за тем, чтобы на обрабатываемом материале не было металлических предметов;
- 5) Запрещено сильно надавливать дрель при сверлении материала;
- 6) При отлучения рабочего места, отключить прибор от электрической сети;
- 7) Поставить инструмент в безопасном положении.

После выполнения исследовательской работы:

- 1) Выключить питание всех приборов и устройств;
- 2) После выполнения работы, расставить использованные предметы по своим местам;
- 3) Навести порядок на рабочих местах.

3.5 Результаты исследования учащегося старшей школы.

Учащийся 10 класса физическо-математической школы СФУ провел свое исследование по экспериментальному измерению силы притяжения между неодимового магнита и высокотемпературного сверхпроводника, чтобы проверить оригинальные результаты.

Масса пластины из сверхпроводника до перфорации равна $m_{пл} = 3,885$ грамм и площадью $S_{пл} = 12,96 \text{ см}^2$. Груз, который смог поднять магнит, равен $m_1 = 56,976$ грамм = 0,056 кг. Сила притяжения магнита над сверхпроводником до перфорации равен $F_{пр} = m \cdot g = 0,057 \cdot 10 = 0,57 \text{ Н}$. После перфорации, масса пластины равна $m_{пер.пл} = 3,849$ грамм = 0,003 кг (уменьшилась на 0,036 грамм), а так же эффективная площадь сверхпроводника равна $S_{пер.пл} = 12,8244 \text{ см}^2$ (уменьшилась на 1,05%). Таким образом магнит смог поднять груз после перфорации $m_2 = 51,961$ грамм (уменьшилось примерно на 5 грамм). Сила притяжения магнита над сверхпроводником равен $F_{пр} = m \cdot g = 0,052 \cdot 9,81 = 0,51012 \text{ Н}$.

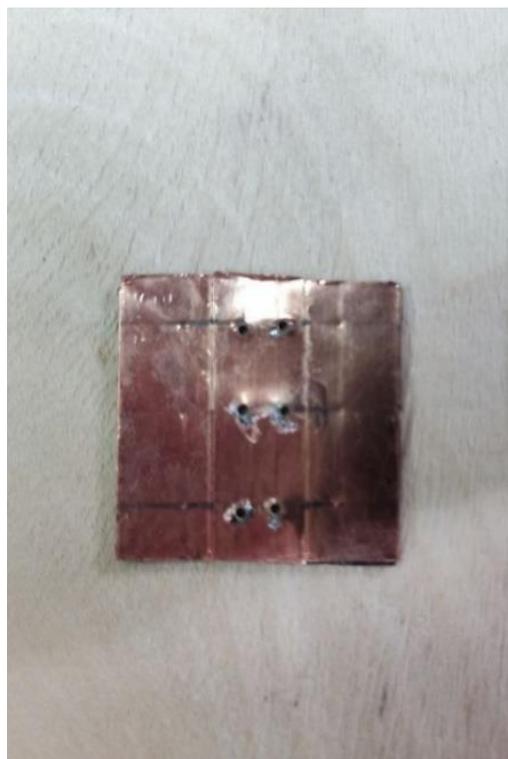


Рис 11. Пластина из сверхпроводящих лент GdBaCuO обучающегося.

Обучающийся своим экспериментом доказал, что создание макроскопических отверстий не приводит к увеличению захваченного магнитного потока в сверхпроводнике, что доказывает оригинальные результаты.

Заключение

В ходе данного исследования были получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Разработан программный модуль для проведения исследования взаимодействия постоянного магнита и высокотемпературного сверхпроводника;

2. Получены результаты по взаимодействию сверхпроводников и постоянных магнитов в ходе исследовательской деятельности;

3. Установлено, что взаимодействие зависит от количества слоев сверхпроводящей ленты, а также не зависит от массы и формы магнита;

4. Показано, что после перфорации пластины, сила притяжения магнита и сверхпроводника не увеличивается, так как для эффективного захвата магнитного потока нужны дефекты меньшего диаметра;

5. Определены направления и формы работы с обучающимися старшей школы, которые соответствуют по времени и задачам интеграции школьников в научный процесс;

6. Разработаны методические материалы для проведения встреч с учащимися по данной теме исследования.

Таким образом, все поставленные задачи исследования выполнены, а цель достигнута. В рамках дальнейшего научного исследования в ходе реализации темы, целесообразно провести апробацию результатов исследования для оценки эффективности реализации исследовательской деятельности по физике для учащихся старших классов.

Список использованных источников

1. Калимов А. Г., Физические основы сверхпроводимости [Электронный ресурс] / А. Г. Калимов. - СПб. : [б. и.], 2007. - 104 с. - Б. ц.
2. Мартиросян, И. В., Руднев, И. А. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ : специальность 1.3.8 «физика конденсированного состояния» : Диссертация на соискание кандидата физико-математических наук / Мартиросян, И. В., Руднев, И. А. ; ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ. — Москва, 2023. — 195 с.
3. Li, B., Zhou, D., Xu, K., Hara, S., Tsuzuki, K., Miki, M., Felder, B., Deng, Z., Izumi, M. Materials process and applications of single grain (RE)–Ba–Cu–O bulk high-temperature superconductors / Li, B., Zhou, D., Xu, K., Hara, S., Tsuzuki, K., Miki, M., Felder, B., Deng, Z., Izumi, M. [Электронный ресурс] // Phys. C Supercond. Appl. 482, 50–57: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.04.026>
4. Bartolomé, E., Granados, X., Puig, T., Obrados, X., Reddy, E.S., Kracunovska, S. Critical state of YBCO superconductors with artificially patterned holes / Bartolomé, E., Granados, X., Puig, T., Obrados, X., Reddy, E.S., Kracunovska, S. [Электронный ресурс] // IEEE Trans. Appl. Supercond. 15, 2775–2778 pp. 482, 50–57: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.848210>.
5. Burlachkov, L., Geshkenbein, V.B., Koshelev, A.E., Larkin, A.I., Vinokur, V.M. Giant flux creep through surface barriers and the irreversibility line in high-temperature superconductors / Burlachkov, L., Geshkenbein, V.B., Koshelev, A.E., Larkin, A.I., Vinokur, V.M. [Электронный ресурс] // Phys. Rev.

B 50, 16770–16773 : [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.16770>

6. Kuchárová, V., Diko, P., Volochová, D., Antal, V., Lojka, M., Hlásek, T., Plecháček, V. Microstructure and superconducting properties of bulk EuBCO-Ag with and without holes. / Kuchárová, V., Diko, P., Volochová, D., Antal, V., Lojka, M., Hlásek, T., Plecháček, V. [Электронный ресурс] // J. Eur. Ceram. Soc. 42, 6533–6541: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.081>

7. Lousberg, G.P., Fagnard, J.F., Haanappel, E., Chaud, X., Ausloos, M., Vanderheyden, B., Vanderbemden, P. Pulsed-field magnetization of drilled bulk high-temperature superconductors: flux frontpropagation in the volume and on the surface. / Lousberg, G.P., Fagnard, J.F., Haanappel, E., Chaud, X., Ausloos, M., Vanderheyden, B., Vanderbemden, P. [Электронный ресурс] // Supercond. Sci. Technol. 22, 125026: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/12/125026>

8. Muralidhar, M., Srikanth, A.S., Pinmangkorn, S., Santosh, M., Milos, J. Role of Superconducting Materials in the Endeavor to Stop Climate Change and Reach Sustainable Development. / Muralidhar, M., Srikanth, A.S., Pinmangkorn, S., Santosh, M., Milos, J. [Электронный ресурс] // J. Supercond. Nov. Magn. 1–10: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-023-06515-6>

9. Chung, P.M.Y., Kawaji, M. The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels. / Chung, P.M.Y., Kawaji, M. [Электронный ресурс] // Int. J. Multiphase Flow 30, 735–761 : [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1016/J>. (дата обращения: 16.06.2024).

10. Clem, J.R. A model for flux pinning in superconductors. / Clem, J.R. [Электронный ресурс] // In: Low Temperature Physics-LT 13. pp. 102–106

11. Matsumoto, K., Mele, P. Artificial pinning center technology to enhance vortex pinning in YBCO coated conductors / Matsumoto, K., Mele, P.

[Электронный ресурс] // Supercond. Sci. Technol. 23, 014001: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/1/014001>

12. Bean, C.P. Magnetization of high-field superconductors. / Bean, C.P. [Электронный ресурс] // Rev. Mod. Phys. 36, 31–39: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.36.31>

13. Pannetier, M., Wijngaarden, R.J., Fløan, I., Rector, J., Dam, B., Griessen, R., Lahl, P., Wördenweber, R. Unexpected fourfold symmetry in the resistivity of patterned superconductors. / Pannetier, M., Wijngaarden, R.J., Fløan, I., Rector, J., Dam, B., Griessen, R., Lahl, P., Wördenweber, R. [Электронный ресурс] // Phys. Rev. B 67, 212501: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.212501>

14. Lousberg, G.P., Fagnard, J.F., Haanappel, E., Chaud, X., Ausloos, M., Vanderheyden, B., Vanderbemden, P. Pulsed-field magnetization of drilled bulk high-temperature superconductors: flux frontpropagation in the volume and on the surface. / Lousberg, G.P., Fagnard, J.F., Haanappel, E., Chaud, X., Ausloos, M., Vanderheyden, B., Vanderbemden, P. [Электронный ресурс] // Supercond. Sci. Technol. 22, 125026: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/12/125026>

15. Jang, G., Lee, M., Han, S., Kim, C., Han, Y., Park, B. Trapped field analysis of a high temperature superconducting bulk with artificial holes / Jang, G., Lee, M., Han, S., Kim, C., Han, Y., Park, B. [Электронный ресурс] // J. Magn. 16, 181–185: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.4283/JMAG.2011.16.2.181>

16. Laurent, P., Mathieu, J.P., Mattivi, B., Fagnard, J.F., Meslin, S., Noudem, J.G., Ausloos, M., Cloots, R., Vanderbemden, P. Study by Hall probe mapping of the trapped flux modification produced by local heating in YBCO HTS bulks for different surface/volume ratios. / Laurent, P., Mathieu, J.P., Mattivi, B., Fagnard, J.F., Meslin, S., Noudem, J.G., Ausloos, M., Cloots, R., Vanderbemden, P. [Электронный ресурс] // Supercond. Sci. Technol. 18, 1047–1053: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/18/8/004>

17. Gokhfeld, D.M., Maksimova, A.N., Kashurnikov, V.A., Moroz, A.N. Optimizing trapped field in superconductors with perforations. / Gokhfeld, D.M., Maksimova, A.N., Kashurnikov, V.A., Moroz, A.N. [Электронный ресурс] // Phys. C Supercond. Appl. 600, 1354106: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2022.1354106>
18. Maksimova, A.N., Kashurnikov, V.A., Moroz, A.N., Gokhfeld, D.M. Trapped field in superconductors with perforations / Maksimova, A.N., Kashurnikov, V.A., Moroz, A.N., Gokhfeld, D.M. [Электронный ресурс] // J. Supercond. Nov. Magn. 35, 283–290: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-021-06067-7>
19. Berdiyrov, G.R., Milošević, M.V., Peeters, F.M Composite vortex ordering in superconducting films with arrays of blind holes. / Berdiyrov, G.R., Milošević, M.V., Peeters, F.M [Электронный ресурс] // New J. Phys. 11, 013025: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/1/013025>
20. И. А. Руднев, И. В. Анищенко, “Физические принципы создания магнитолевитационных систем на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов второго поколения (Обзор)”, ЖТФ, 91:12, 1813–1847
21. Zeng, X.L., Karwoth, T., Koblishka, M.R., Hartmann, U., Gokhfeld, D., Chang, C., Hauet, T. Analysis of magnetization loops of electrospun nonwoven superconducting fabrics. / Zeng, X.L., Karwoth, T., Koblishka, M.R., Hartmann, U., Gokhfeld, D., Chang, C., Hauet, T. [Электронный ресурс] // Phys. Rev. Mater. 1, 044802: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.044802>
22. Lousberg, G.P., Ausloos, M., Vanderbemden, P., Vanderheyden, B. Bulk high-T_c superconductors with drilled holes: How to arrange the holes to maximize the trapped magnetic flux? / Lousberg, G.P., Ausloos, M., Vanderbemden, P., Vanderheyden, B. [Электронный ресурс] // Supercond. Sci.

Technol. 21, 025010: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/02/025010>

23. Pokrovskii, S.V., Mavritskii, O.B., Egorov, A.N., Mineev, N.A., Timofeev, A.A., Rudnev, I.A. Influence of ultrashort laser drilling on magnetic and transport characteristics of HTS tapes. / Pokrovskii, S.V., Mavritskii, O.B., Egorov, A.N., Mineev, N.A., Timofeev, A.A., Rudnev, I.A. [Электронный ресурс] // Supercond. Sci. Technol. 32, 075008: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab14a3>

24. Байбородова Л. В. Б 18 Проектная деятельность школьников в разновозрастных группах: пособие для учителей общеобразоват. организаций / Л. В. Байбородова, Л. Н. Серебренников. — М.: Просвещение, 2013. —175 с.— ISBN 978-5-09-027011-3.

25. Бойцова, А.А. Проектная деятельность как средство интеграции предметов естественнонаучного цикла в школе / А. А. Бойцова // Человек и образование. - 2013.-№4.

26. Бурлакова, И.В. Семинар-практикум по составлению и использованию организационной модели проектно-исследовательской деятельности обучающихся / И. В. Бурлакова // Методист. - 2016.-№3.

27. Глухарева, О.Г. Влияние проектного обучения на формирование ключевых компетенций у учащихся старшей школы / О. Г. Глухарева // Стандарты и мониторинг в образовании. - 2014.-№1.

28. Пенцев А.Б., Аввакумова И.А. ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УЧАЩИХСЯ СТАРШИХ КЛАССОВ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ МАТЕМАТИКИ, Екатеринбург, 2022.

29. Поташник, М.М. Проектная и исследовательская деятельность учащихся на основе ФГОС (суть, сходство и различие, профанация и грамотная реализация) / М. М. Поташник, М. В. Левит // Завуч. - 2016.-№1.

30. Поташник, М.М. Проекты и исследования на основе ФГОС / М. М. Поташник, М. В. Левит// Народное образование. - 2015.-№9.

31. Поташник, М.М. Школьное исследование и проектирование: требования ФГОС / М. М. Поташник, М. В. Левит// Народное образование. - 2015.-№8.

32. Qi, S.L., Zhang, P., Wang, R.Z., Xu, L.X. Single-phase pressure drop and heat transfer characteristics of turbulent liquid nitrogen flow in micro-tubes. / Qi, S.L., Zhang, P., Wang, R.Z., Xu, L.X. [Электронный ресурс] // Int. J. Heat Mass Transf. 50: [сайт]. — URL: <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2006.09.032>