

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

Сультимов Дашижаб Болотович

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Авторотация магнита над сверхпроводником как демонстрация электромагнитных и  
термодинамических процессов

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

Д.Б.Сультимов

16.05.2024

(дата, подпись)

Дата защиты

20 июня 2024

Оценка

отлично

(прописью)

Красноярск 2024

**Отзыв научного руководителя  
выпускной квалификационной работы**

*Институт математики, физики, информатики*

*Кафедра: Физики и методики обучения физике*

*Студент: Сультимов Дашижаб Болотович*

*Руководитель: Гохфельд Денис Михайлович, доктор физ.-мат. наук,  
профессор кафедры физики и методики обучения физике*

*Тема ВКР: Авторотация магнита над сверхпроводником как  
демонстрация электромагнитных и термодинамических процессов.*

Содержание ВКР и уровень её выполнения студентом говорят о соответствии уровня подготовки студента требованиям ФГОС ВО.

Перед Сультимовым Д.Б. были поставлены задачи экспериментального исследования явления спонтанного вращения цилиндрического магнита, левитирующего над высокотемпературным сверхпроводником, установления физических основ и закономерностей этого явления и дать рекомендации по использованию данных разработок в ознакомлении учащихся старших классов с электромагнитными и термодинамическими процессами. С поставленными задачами Сультимов Д.Б. справился в полном объеме.

В результате выполнения ВКР получены данные по частотам вращения различных неодимовых магнитов и по способам влияния на частоту вращения. Результаты исследования имеют практическую значимость. Методические разработки для ознакомления учащихся старших классов с явлением магнитной левитации и спонтанного вращения магнита готовы к дальнейшему развитию и внедрению в образовательный процесс. По теме данного исследования вышла публикация в журнале «Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования».

При выполнении выпускной квалификационной работы Сультимов Д.Б. проявил высокий уровень самостоятельности и способности к проведению экспериментов и анализу полученных данных.

Считаю, что выпускная квалификационная работа студента Сультимова Д.Б. соответствует требованиям к ВКР по направлению подготовки 44.03.01 – «Педагогическое образование» и заслуживает оценки «отлично».

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук, профессор  
кафедры физики и методики  
обучения физике



Д.М. Гохфельд

« 16 » 05 2024 г.

**Отзыв научного руководителя  
выпускной квалификационной работы**

*Институт математики, физики, информатики*

*Кафедра: Физики и методики обучения физике*

*Студент: Сультимов Дашижаб Болотович*

*Руководитель: Гохфельд Денис Михайлович, доктор физ.-мат. наук,  
профессор кафедры физики и методики обучения физике*

*Тема ВКР: Авторотация магнита над сверхпроводником как  
демонстрация электромагнитных и термодинамических процессов.*

Содержание ВКР и уровень её выполнения студентом говорят о соответствии уровня подготовки студента требованиям ФГОС ВО.

Перед Сультимовым Д.Б. были поставлены задачи экспериментального исследования явления спонтанного вращения цилиндрического магнита, левитирующего над высокотемпературным сверхпроводником, установления физических основ и закономерностей этого явления и дать рекомендации по использованию данных разработок в ознакомлении учащихся старших классов с электромагнитными и термодинамическими процессами. С поставленными задачами Сультимов Д.Б. справился в полном объеме.

В результате выполнения ВКР получены данные по частотам вращения различных неодимовых магнитов и по способам влияния на частоту вращения. Результаты исследования имеют практическую значимость. Методические разработки для ознакомления учащихся старших классов с явлением магнитной левитации и спонтанного вращения магнита готовы к дальнейшему развитию и внедрению в образовательный процесс. По теме данного исследования вышла публикация в журнале «Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования».

При выполнении выпускной квалификационной работы Сультимов Д.Б. проявил высокий уровень самостоятельности и способности к проведению экспериментов и анализу полученных данных.

Считаю, что выпускная квалификационная работа студента Сультимова Д.Б. соответствует требованиям к ВКР по направлению подготовки 44.03.01 – «Педагогическое образование» и заслуживает оценки «отлично».

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук, профессор  
кафедры физики и методики  
обучения физике



Д.М. Гохфельд

« 16 » 05 2024 г.



## СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа  
на наличие заимствований

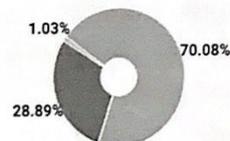
Красноярский государственный  
педагогический университет им.  
В.П.Астафьева

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ ANTIPLAGIAT.VUZ

Автор работы: Сультимов Дашижаб Болотович  
Самоцитирование  
рассчитано для: Сультимов Дашижаб Болотович  
Название работы: Диплом Сультимов (5)  
Тип работы: Выпускная квалификационная работа  
Подразделение: Институт математики, физики и информатики

### РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ	28.89%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	70.08%
ЦИТИРОВАНИЯ	1.03%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%



ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2024

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.4-43  
Модули поиска: СМИ России и СНГ; Публикации РГБ; Шаблонные фразы; Публикации eLIBRARY; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования\*; Цитирование; ИПС Адилет; Диссертации НББ; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Библиография; IEEE; Издательство Wiley; Патенты СССР, РФ, СНГ; Кольцо вузов; Коллекция НБУ; Перефразирования по Интернету (EN); Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Медицина; Перефразирования по коллекции издательства Wiley; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Переводные заимствования издательства Wiley; Переводные заимствования IEEE; СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразированные заимствования

Заключение о  
работе (оценка):

Работу проверил: Гохфельд Денис Михайлович

ФИО проверяющего

Дата подписи: 17.06.2024

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться  
в подлинности справки, используйте QR-код,  
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование  
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.  
Предоставленная информация не подлежит использованию  
в коммерческих целях.

**Приложение А**  
к Регламенту размещения выпускных квалификационных работ обучающихся, научных докладов об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы по основным профессиональным образовательным программам высшего образования в электронно-библиотечной системе КГПУ им. В.П. Астафьева

**Согласие**  
на размещение текста выпускной квалификационной работы, научного доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы в ЭБС КГПУ им. В.П. АСТАФЬЕВА

Я, Гюльчелов Дамир Абдулович  
(фамилия, имя, отчество)

разрешаю КГПУ ИМ. В.П. Астафьева безвозмездно воспроизводить и размещать (доводить до всеобщего сведения) в полном объеме и по частям написанную мною в рамках выполнения основной профессиональной образовательной программы выпускную квалификационную работу, научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (далее ВКР/НКР)  
(нужное подчеркнуть)

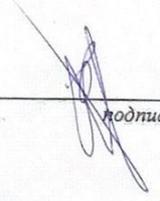
на тему: Авторотация метода нечеткого логического вывода как демонстрация электромагнитных и термодинамических процессов  
(название работы)

(далее – работа) в ЭБС КГПУ им. В.П.АСТАФЬЕВА, расположенном по адресу <http://elib.kspu.ru>, таким образом, чтобы любое лицо могло получить доступ к ВКР/НКР из любого места и в любое время по собственному выбору, в течение всего срока действия исключительного права на работу.

Я подтверждаю, что работа написана мною лично, в соответствии с правилами академической этики и не нарушает интеллектуальных прав иных лиц.

16.05.24.

дата

  
подпись

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>8</b>
<b>Глава 1. Обзор теоретических основ явления авторотации. ....</b>	<b>10</b>
1.1 История открытия сверхпроводимости. ....	10
1.2 Эффект Мейснера. ....	14
1.3 Термодинамика сверхпроводников. ....	15
1.4 Электромагнитные свойства сверхпроводников. ....	16
1.5 Явление авторотации.....	18
1.6 Практическое значение авторотации.....	20
<b>Глава 2. Практическая часть. Описание экспериментов. Результаты .....</b>	<b>23</b>
2.1 Экспериментальная установка .....	23
2.2 Проведение эксперимента. ....	25
2.3 Полученные результаты.....	27
<b>2.3.1 Влияние параметров магнитов на частоту вращения. ....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2 Влияние уровня азота на частоту вращения магнита. ....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.3 Влияние нагрева на частоту вращения магнита. ....</b>	<b>30</b>
2.4 Обсуждение полученных результатов.....	30
2.5 Выводы.....	32
<b>Глава 3. Организация научно-исследовательской деятельности старших школьников по теме «Авторотация магнита над сверхпроводником» ....</b>	<b>34</b>
3.1 Основные теоретические характеристики организации научно-исследовательской деятельности старших школьников. ....	34
3.2 Методические рекомендации по организации исследовательской деятельности старших классов по теме «Авторотация магнита над сверхпроводником» .....	36

3.3 Методические материалы .....	38
3.4 Техника безопасности при проведения исследовательской деятельности	43
3.5 Результаты исследования учащегося старшей школы. ....	47
<b>Заключение.....</b>	<b>48</b>
<b>Список использованных источников. ....</b>	<b>50</b>

## **Введение**

В современном мире наука и технологии развиваются стремительными темпами, открывая новые горизонты для исследований и инноваций. Одной из наиболее интересных и перспективных областей науки является физика сверхпроводников, которая изучает уникальные свойства материалов, способных проводить электрический ток без сопротивления. Одним из самых удивительных явлений, связанных со сверхпроводниками, является эффект Мейснера, который заключается в выталкивании магнитного поля из объёма сверхпроводника при его переходе в сверхпроводящее состояние.

Авторотация магнита над сверхпроводником является наглядной демонстрацией этого эффекта и представляет собой уникальное явление, которое привлекает внимание учёных и инженеров со всего мира. Это явление позволяет лучше понять сложные электромагнитные и термодинамические процессы, происходящие в сверхпроводниках, и открывает новые возможности для разработки инновационных технологий.

**Проблема исследования:** Явление авторотации магнита над сверхпроводником и его влияния на понимание электромагнитных и термодинамических процессов в сверхпроводниках.

**Объект исследования:** Неодимовый магнит и сверхпроводящая композитная лента.

**Предмет исследования:** Физические основы и закономерности явления авторотации, его влияние на электромагнитные и термодинамические процессы в сверхпроводниках.

**Целью** данной дипломной работы является изучение явления авторотации магнита над сверхпроводником, анализ его физических основ и определение его практического значения, а также разработку методики ознакомления учащихся старших классов с явлениями магнитной левитации и

спонтанного вращения магнита. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы явления авторотации магнита над сверхпроводником.
2. Провести экспериментальное исследование явления авторотации различных магнитов над сверхпроводником.
3. Разработать методику ознакомления учащихся старших классов явлениями магнитной левитации и спонтанного вращения магнита.
4. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы о физических основах явления авторотации.
5. Определить возможные области применения явления авторотации в науке и технике.

#### **Апробация.**

В ходе написания данной работы была выпущена научная статья в журнале «Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования» №1, 2024, стр. 34-40. По теме «Самопроизвольное вращение магнитов, левитирующих над высокотемпературным сверхпроводником».[1]

Так же материалы исследования были презентованы на конференции «Образование и наука в XXI веке: математика, физика, информатика и технологии в смарт-мире», которая прошла в КГПУ им. В. П. Астафьева в мае 2024 года.

Данная дипломная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованных источников. В первой главе будут рассмотрены теоретические основы явления авторотации магнита над сверхпроводником, во второй главе будет представлено экспериментальное исследование этого явления, а в третьей главе будут проанализированы полученные результаты и определены возможные области применения.

## Глава 1. Обзор теоретических основ явления авторотации.

### 1.1 История открытия сверхпроводимости.

В 1911 году голландский физик Хайке Камерлинг-Оннес открыл сверхпроводимость, исследуя поведение ртути при очень низких температурах. Это открытие стало возможным благодаря развитию технологий охлаждения материалов до сверхнизких температур [2].

До этого, в 1877 году, французский инженер Луи Кайете и швейцарский физик Рауль Пикте независимо друг от друга смогли охладить кислород до жидкого состояния. В 1883 году Зигмунт Врублевски и Кароль Ольшевски добились сжижения азота. А в 1898 году Джеймс Дьюар получил жидкий водород. В честь которого был назван сосуд для длительного хранения веществ при повышенной или пониженной температуре (Рис.1).



Рис.1 Сосуд Дьюара.

Хайке Камерлинг-Оннес создал лучшую в мире криогенную лабораторию, где получил жидкий гелий с температурой около 1 кельвина. Он использовал жидкий гелий для изучения свойств металлов, в том числе их электросопротивления в зависимости от температуры [3].

По тогдашним представлениям, сопротивление должно было постепенно снижаться при охлаждении, пока материал не переставал

проводить ток. Но Камерлинг-Оннес обнаружил, что при температуре 4,15 кельвина сопротивление практически исчезало. Это было совершенно неожиданно и не соответствовало существующим теориям.

В начале XX века учёные обнаружили, что свинец и олово становятся сверхпроводниками при низких температурах. В 1914 году стало известно, что сильное магнитное поле разрушает сверхпроводимость. В 1919 году выяснилось, что таллий и уран тоже могут становиться сверхпроводниками. После этого сверхпроводимость нашли более чем у 20 металлов, а также у множества соединений и сплавов.

Сверхпроводники отличаются от обычных проводников не только нулевым сопротивлением. Одно из главных различий — эффект Мейснера, который открыли Вальтер Мейснер и Роберт Оксенфельд в 1933 году.

В 1935 году братья Фриц и Хайнц Лондон предложили первое теоретическое объяснение сверхпроводимости. В 1950 году Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбург разработали более общую теорию, известную как теория Гинзбурга — Ландау. Но эти теории описывали сверхпроводимость лишь поверхностно, не объясняя её механизмы подробно.

В 1950-х годах были открыты сверхпроводники, которые могли выдерживать сильные магнитные поля и пропускать большие токи. Одним из таких материалов стал  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , открытый в 1960 году под руководством Дж. Кюнцлера. Проволока из этого материала при температуре 4,2 К и в магнитном поле 8,8 Тл могла пропускать ток плотностью до 100 кА/см<sup>2</sup>.

В 1957 году американские физики Джон Бардин, Леон Купер и Джон Шриффер представили работу, в которой впервые объяснили сверхпроводимость на микроскопическом уровне. Их теория, известная как теория БКШ, основана на идее куперовских пар электронов.

Сверхпроводники бывают двух типов: I и II. К первому типу относится, например, ртуть. Важный вклад в открытие сверхпроводимости II типа внесли работы Л. В. Шубникова в 1930-е годы и А. А. Абрикосова в 1950-е.

Каждый проводник имеет свою критическую температуру ( $T_{кр}$ ), при которой он становится сверхпроводником. Большинство металлов и сплавов переходят в это состояние при температуре не выше 23,2 К. С 1911 по 1986 год было изучено множество сверхпроводящих материалов с критической температурой не выше этого значения. Чтобы достичь такой низкой температуры, требуется дорогостоящий жидкий гелий, поэтому использование этих сверхпроводников ограничивалось лабораторными экспериментами, где гелия нужно немного.

В 1986 году учёные Карл Мюллер и Йоханнес Беднорц открыли новый тип сверхпроводников, которые назвали высокотемпературными. У них есть особенность — они могут работать при относительно высоких температурах.

Например, соединение лантана, стронция, меди и кислорода имеет критическую температуру 36 К, а соединение иттрия, бария, меди и кислорода — 92 К, то есть выше температуры кипения азота 77,4 К.

В 2006 году был установлен новый рекорд сверхпроводимости для керамического соединения ртути, бария, кальция, меди и кислорода. Его критическая температура составила 138 К. А при давлении  $4 \cdot 10^7$  Па критическое состояние у этого соединения наступает при температуре 166 К.

Во все эти материалы обязательно входят ионы меди, которые играют важную роль в возникновении сверхпроводимости. Но их точный механизм действия пока не ясен.

Вскоре после этого открытия исследовательские группы в разных странах создали керамические сверхпроводники с критическими температурами от 90 до 100 К.

Высокотемпературные сверхпроводники имеют ряд недостатков, например, хрупкость и нестабильность свойств, поэтому в технике до сих пор используются сверхпроводники на основе ниобия.

Керамические сверхпроводники перспективны, так как их можно исследовать и применять, используя сравнительно недорогой жидкий азот для охлаждения.

В 2015 году было обнаружено, что сероводород ( $H_2S$ ) становится сверхпроводником при давлении 100 ГПа и критической температуре 203 К [4].

Развитие сверхпроводников началось с металлической ртути, имеющей критическую температуру 4,15 К, и привело к созданию ртутьсодержащих высокотемпературных сверхпроводников с критической температурой 164 К.

Сверхпроводимость нашла широкое применение в области генерации, передачи и использования электроэнергии. По сверхпроводящему кабелю диаметром всего несколько сантиметров можно передавать столько же энергии, сколько и по огромной сети ЛЭП, но с гораздо меньшими потерями или вообще без них.

В современном мире остро стоит вопрос энергетики. Необходимо искать экологически чистые источники энергии и разрабатывать более мощные электростанции, поскольку потребление электроэнергии растёт с каждым годом.

Однако при передаче электроэнергии на большие расстояния происходят потери. Поэтому актуален вопрос о том, как передавать электроэнергию без потерь. Одним из возможных решений этой проблемы может стать использование сверхпроводников с нулевым сопротивлением, которые могут переносить ток без потерь энергии.

## 1.2 Эффект Мейснера.

Эффект Мейснера был открыт в 1933 году [5]. Он заключается в том, что проводник переходит в сверхпроводящее состояние, и магнитное поле вытесняется из его объёма (Рис.1). Эффект Мейснера — это явление, при котором магнитное поле вытесняется из объёма сверхпроводника. Это происходит потому, что внутри сверхпроводника магнитное поле отсутствует, а значит, в соответствии с теоремой о циркуляции магнитного поля, плотность тока тоже равна нулю.

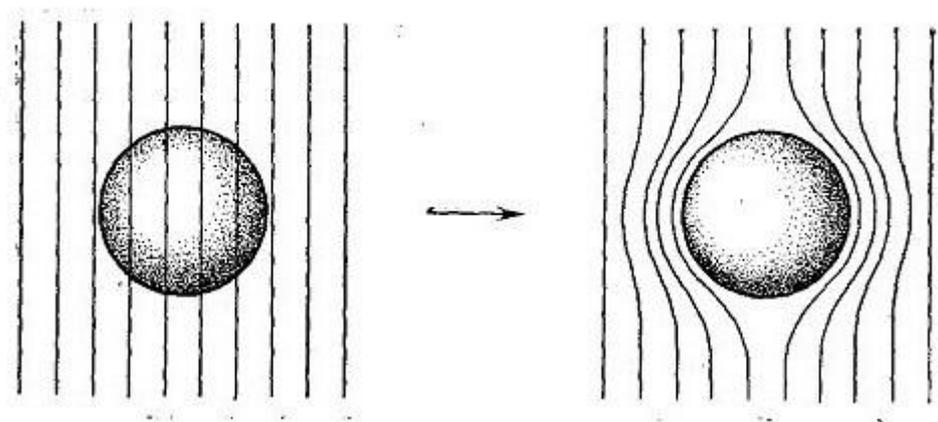


Рис.1

Однако токи всё же существуют, но только на поверхности сверхпроводника. Эти поверхностные токи создают магнитное поле, которое компенсирует внешнее магнитное поле внутри сверхпроводника.

Эффект Мейснера можно продемонстрировать с помощью неодимового магнита и сверхпроводника, охлаждённого жидким азотом. Если положить магнит на поверхность сверхпроводника, он начнёт парить над ним. Это явление называется магнитной левитацией.

Магнитная левитация находит применение в транспортной технике. На этом эффекте построен скоростной поезд Maglev, который использует магнитную левитацию для движения.

Кроме того, эффект Мейснера используется для создания защиты от внешних магнитных полей. Это необходимо для защиты персонала, работающего с ядерными установками и ускорителями частиц.

Несмотря на все преимущества, эффект Мейснера пока не получил широкого применения. Это связано с тем, что существующие сверхпроводники работают только при очень низких температурах, близких к абсолютному нулю. Кроме того, сверхпроводящие материалы трудно обрабатывать, что затрудняет их использование в производстве.

### 1.3 Термодинамика сверхпроводников.

Термодинамика сверхпроводников изучает поведение материалов в условиях сверхпроводимости, включая их критическую температуру ( $T_c$ ) и критическое магнитное поле ( $H_c$ ).

Критическая температура определяет порог, ниже которого материал переходит в сверхпроводящее состояние, теряя электрическое сопротивление. Разные материалы имеют различные значения  $T_c$ , причём некоторые требуют экстремально низких температур для перехода в сверхпроводящее состояние, в то время как другие становятся сверхпроводниками при более высоких температурах, что делает их особенно привлекательными для практических применений (Рис.2).

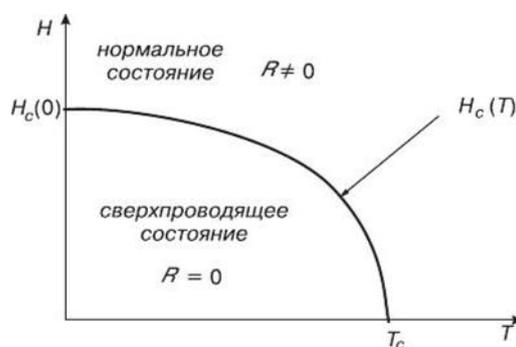


Рис.2 Схематическая фазовая диаграмма, иллюстрирующая нормальное и сверхпроводящее состояние сверхпроводника [18].

Критическое магнитное поле,  $H_c$ , указывает на максимальную напряжённость магнитного поля, которую может выдержать сверхпроводник без потери своих сверхпроводящих свойств. Сверхпроводники типа I могут выдерживать только слабые магнитные поля, в то время как сверхпроводники типа II способны выдерживать гораздо более сильные поля благодаря эффекту

Мейснера, который позволяет им вытеснять магнитное поле из своего объёма (Рис.3).

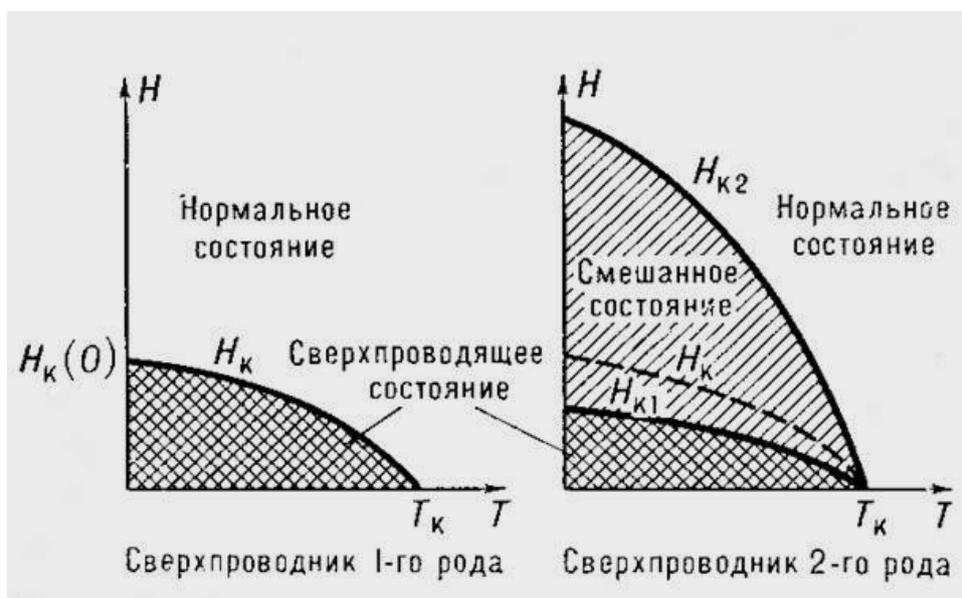


Рис.3

Термодинамика сверхпроводников играет ключевую роль в понимании и применении этого явления. Исследования в этой области направлены на разработку новых материалов с более высокими значениями  $T_c$  и  $H_c$ , что позволит расширить область применения сверхпроводников в электронике, энергетике и других отраслях.

Одной из главных задач является разработка сверхпроводников, способных работать при комнатной температуре. Это позволило бы значительно упростить и удешевить их использование. Также необходимо улучшить технологию производства сверхпроводящих материалов, чтобы сделать их более доступными и дешёвыми.

Исследования в области термодинамики сверхпроводников продолжаются, и учёные надеются, что в будущем удастся создать новые материалы с ещё более высокими значениями  $T_c$  и  $H_c$ . Это откроет новые возможности для применения сверхпроводников и приведёт к дальнейшему развитию технологий.

#### 1.4 Электромагнитные свойства сверхпроводников.

Когда были открыты высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с критической температурой  $T_c$  выше температуры кипения азота, это привело к тому, что сверхпроводящие устройства стали чаще использовать в электротехнике и энергетике.

Благодаря этому открытию стало возможным демонстрировать экранирование магнитного поля сверхпроводником и магнитную левитацию не только в лабораториях [6], но и в учебных аудиториях [7, 8].

Сверхпроводники обладают уникальными электромагнитными свойствами, которые делают их крайне полезными в различных областях науки и техники. Одним из ключевых свойств является способность проводить ток без сопротивления (Рис.4). Это означает, что, если постоянный ток индуцируется в замкнутом сверхпроводнике, он будет протекать без затухания. Этот эффект был продемонстрирован в эксперименте, где ток протекал без изменений в течение 2,5 лет, пока эксперимент не был прерван из-за забастовки рабочих, доставляющих криогенные жидкости.

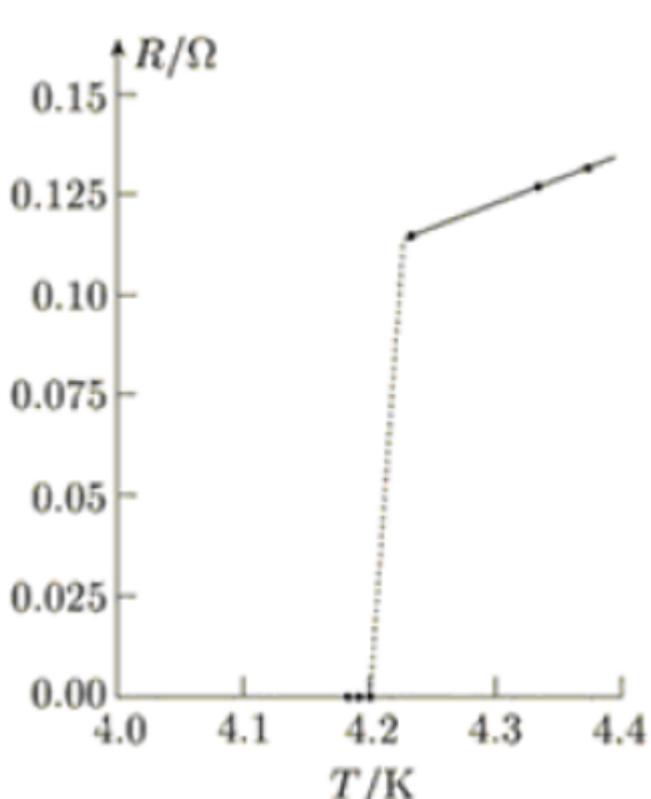


Рис.4

Однако утверждение о нулевом сопротивлении справедливо только для постоянного электрического тока. В переменном электрическом поле сопротивление сверхпроводника отлично от нуля и растёт с увеличением частоты поля. Это связано с тем, что в переменном поле часть электронов становится нормальной, что приводит к конечному сопротивлению и джоулевым тепловым потерям.

Сверхпроводники также демонстрируют эффект Мейснера, который заключается в полном вытеснении магнитного поля из объёма сверхпроводника. Это свойство имеет важное практическое применение, например, в создании сверхпроводящих магнитов, используемых в медицинских исследованиях и научных экспериментах.

Сверхпроводники находят применение в различных областях, таких как медицина (МРТ), транспорт (поезда на магнитной подушке), энергетика (линии электропередачи без потерь) и научные исследования (ускорители частиц). Однако для широкого внедрения сверхпроводников необходимо решить ряд проблем, связанных с их производством, стоимостью и сложностью обработки.

Одной из главных задач является разработка сверхпроводников, способных работать при комнатной температуре. Это позволило бы значительно упростить и удешевить их использование. Также необходимо улучшить технологию производства сверхпроводящих материалов, чтобы сделать их более доступными и дешёвыми.

Исследования в области сверхпроводников продолжаются, и учёные надеются, что в будущем удастся создать новые материалы с ещё более высокими значениями критической температуры и критического магнитного поля. Это откроет новые возможности для применения сверхпроводников и приведёт к дальнейшему развитию технологий.

### **1.5 Явление авторотации.**

Авторотация магнита над сверхпроводником – это явление, при котором магнит левитирует над поверхностью сверхпроводника без прямого контакта

при этом начиная самопроизвольно раскачиваться и вращаться вокруг своей оси. Это происходит благодаря эффекту Мейснера, когда магнитное поле полностью вытесняется из объёма сверхпроводника, находящегося в сверхпроводящем состоянии.

Физические основы авторотации заключаются в следующем:

**Эффект Мейснера:** когда сверхпроводник охлаждается ниже критической температуры, магнитное поле вытесняется из его объёма. Это создаёт область вокруг сверхпроводника, свободную от магнитного поля.

**Взаимодействие магнитных полей:** Магнит, помещённый над сверхпроводником, стремится занять положение, в котором его собственное магнитное поле будет скомпенсировано магнитным полем, создаваемым поверхностным током сверхпроводника.

**Левитация:** в результате взаимодействия магнитных полей магнит оказывается в состоянии равновесия, когда сила притяжения между магнитом и сверхпроводником уравновешивается силой отталкивания, возникающей из-за эффекта Мейснера.

**Поддержание сверхпроводящего состояния:** необходимо поддерживать сверхпроводящее состояние сверхпроводника, чтобы эффект Мейснера продолжал действовать. Когда были открыты высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с критической температурой  $T_c$  выше температуры кипения азота, это привело к тому, что сверхпроводящие устройства стали чаще использовать в электротехнике и энергетике.

Благодаря этому открытию стало возможным демонстрировать экранирование магнитного поля сверхпроводником и магнитную левитацию не только в лабораториях [6], но и в учебных аудиториях [7, 8].

В конце 80-х годов было обнаружено, что левитирующие цилиндрические магниты (в основном Nd-Fe-B) при определённых условиях начинают спонтанно колебаться и вращаться [9]. Исследования этого явления показали, что частота вращения зависит от градиента температур вдоль

вертикального диаметра магнита [10-12]. Если есть неоднородности азимутального намагничивания или отклонение магнитной оси от центра масс, это замедляет вращение. Также было отмечено, что чем меньше расстояние от магнита до поверхности жидкого азота, тем реже он вращается. А если нагреть магнит инфракрасным излучением, скорость вращения увеличится [12].

Авторы работ [10-12] объяснили наблюдения, используя следующие экспериментальные данные:

1.Магнитный момент материала магнита зависит от температуры.

2.Вдоль вертикальной оси существует градиент температур.

3.Если намагниченность холодной части магнита выше, чем тёплой, то усреднённая точка действия сил электромагнитного отталкивания (ТЭО) оказывается ниже центра масс магнита.

Превышение центра масс над ТЭО приводит к самопроизвольной раскачке и вращению. Частота вращения зависит от теплопроводности материала магнита и динамической разницы температур между верхней и нижней половинами магнита. Таким образом, реализуется тепловая машина, совершающая работу за счёт разницы температур между жидким азотом и помещением.

Для практического применения данного явления необходимо изучить способы увеличения и уменьшения частоты вращения магнита.

### **1.6 Практическое значение авторотации**

Одним из самых перспективных и уникальных направлений в использовании авторотации магнита над сверхпроводником является разработка и создание новых типов энергетических систем. Авторотация магнита над сверхпроводником позволяет эффективно генерировать электроэнергию, не требуя для этого дополнительных затрат.

Перспективы развития данной технологии связаны с возможностью применения её в различных сферах жизни. Например, в энергетике авторотация магнита над сверхпроводником может быть использована для создания бесперебойного источника энергии. Благодаря особенностям сверхпроводников, генерируемая энергия может храниться в них в течение длительного времени без затраты энергии на поддержание сверхпроводимости.

Также в перспективе возможно использование авторотации магнита над сверхпроводником в авиационной и космической промышленности. Одно из направлений — создание бесшумных и экологически чистых дронов и космических аппаратов, снабжённых энергией, получаемой от авторотации магнита над сверхпроводником. Это позволит существенно снизить энергопотребление и повысить эффективность таких систем.

Кроме того, авторотация магнита над сверхпроводником может найти применение в медицине. Специалисты исследуют возможность создания магнитно-резонансных томографов, работающих на основе авторотации магнита над сверхпроводником. Это позволит значительно повысить точность диагностики и уменьшить затраты на энергию.

Коммерческий сектор также не остаётся в стороне от развития данной технологии. Авторотация магнита над сверхпроводником может быть использована в промышленности для улучшения производительности и экономии энергии. Например, в автомобильной промышленности авторотация магнита над сверхпроводником может быть применена для создания электромагнитных двигателей с высоким КПД и низкими техническими потерями.

Таким образом, перспективы развития и дальнейшего использования авторотации магнита над сверхпроводником весьма широки и предоставляют множество возможностей в различных отраслях. Как технология, основанная

на принципах квантовой физики, авторотация магнита над сверхпроводником является новой и перспективной концепцией, способной революционизировать энергетическую отрасль и многие другие сферы применения.

## Глава 2. Практическая часть. Описание экспериментов.

### Результаты

#### 2.1 Экспериментальная установка

Для изучения использовались цилиндрические магниты ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) (Рис.5) из двух разных наборов (I и II), неодимовые магниты состоят из трёх основных элементов: неодима, железа и бора.



Рис5. Левитирующий магнит.

Неодим обеспечивает магнитную силу, необходимую для общей производительности изделия. Железо способствует структурной целостности и улучшает магнитные свойства. Бор формирует кристаллическую структуру и усиливает её стабильность.

Уникальная мощность неодимовых магнитов обусловлена их кристаллической структурой — тетрагональной. В этой структуре атомы распределены таким образом, что это улучшает выравнивание магнитных доменов в материале.

Все магниты намагничены вдоль главной оси вращения. Левитация магнитов достигалась при помощи самодельной сверхпроводящей платформы (рис. 6). Платформа собрана из девяти двенадцатимиллиметровых композитных сверхпроводящих лент второго рода (Рис.7)  $GdBa_2Cu_3O_x$  (REBCO), произведенных компанией SuperOx [16]. Ленты скреплены между собой в три слоя по три в ряд.



Рис. 6 Платформа из композитных сверхпроводящих лент.

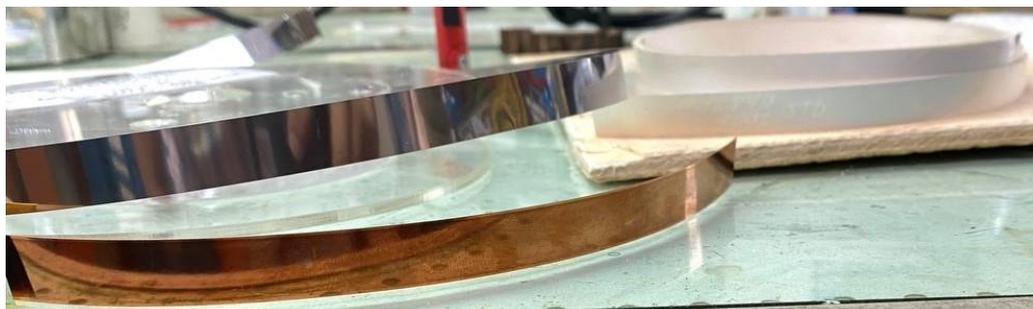


Рис.7



Рис. 8 Схема сверхпроводящей ленты

В пенопластовую ванну помещалась сверхпроводящая платформа, и для достижения критической температуры сверхпроводника в ванну заливался жидкий азот таким образом чтобы уровень азота покрывал всю пластину

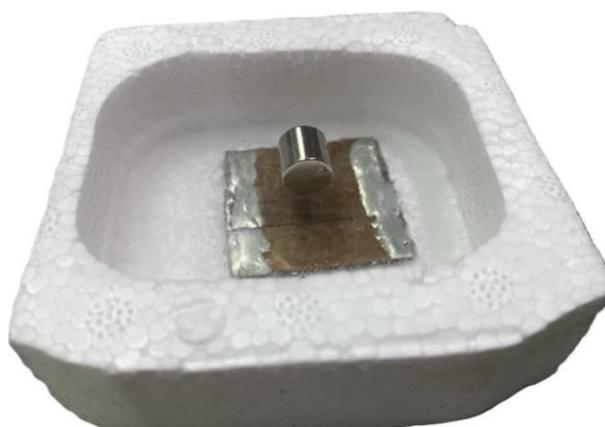


Рис.9 Установка для исследования явления авторотации.

## 2.2 Проведение эксперимента.

Собрав экспериментальную установку, мы начали проводить замеры частот различных магнитов. Магниты располагаются на высоте примерно 5 мм над сверхпроводящей платформой, которая охлаждена жидким азотом. Примерно через 1–10 секунд после этого начинается спонтанное колебание магнита: он начинает поворачиваться вокруг своей горизонтальной оси на несколько градусов как по часовой стрелке, так и против неё. Угол поворота

постепенно увеличивается, пока не превысит 180 градусов, после чего магнит начинает вращаться. Процесс раскачивания до начала вращения занимает меньше минуты. Затем вращение ускоряется, и его частота стабилизируется примерно через минуту. Для всех магнитов проводилась видеозапись их левитации и вращения. После установления постоянной скорости вращения, подсчитывалось число оборотов магнита за промежуток времени и определялась частота вращения. Полученные данные занесены в таблицу 1.

Таблица 1. Размеры, массы и частота вращения магнитов Nd-Fe-B.

	№	Диаметр, мм	Толщина, мм	Масса, г	Частота, сек <sup>-1</sup>
I	1	5.0	1.8	0.25	0
	2	10.0	10.0	6.1	2.2
	3	12.0	2.8	2.3	2.1
	4	20.0	3.0	7.5	1.8
II	5	11.9	10.0	8.3	1.6
	6	15.0	5.0	6.7	1.5
	7	20.0	5.0	11.8	1.1
	8	20.1*	3.0	5.3	1.1
	9	25.0	2.9	10.7	0.6

Далее проверялись способы изменения частоты вращения магнита путем изменения двух параметров уровня азота и температуры магнита.

Для изменения температуры магнита использовался технический фен Lukey 702 (Рис. 11). Устанавливался слабый напор, чтобы не сдвигать магнит. Температура выпускаемой струи воздуха 150 °С. Температура над поверхностью жидкого азота измерялась с помощью термодатчика Senproх RTD CX-1050 (Рис10). Широкая струя горячего воздуха, направленная в центр магнита (вдоль оси вращения). Записав результаты замеров, мы предположили, что локальный нагрев в разных точках магнита может регулировать частоту вращения. Далее проводился локальный нагрев в верхней или нижней половинах вращающегося магнита с помощью узкой насадки на фен.

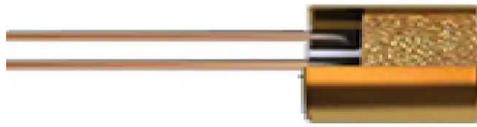


Рис.10



Рис.11

## 2.3 Полученные результаты

### 2.3.1 Влияние параметров магнитов на частоту вращения.

Спонтанное вращение наблюдалось у всех магнитов, кроме самого маленького, диаметром 5 мм, который продолжал колебаться, но не переходил во вращение. Направление вращения магнита, согласно наблюдениям, каждый раз определяется случайным образом. Тем не менее, направление вращения можно задать, придав магниту вращательное движение в процессе раскачки.

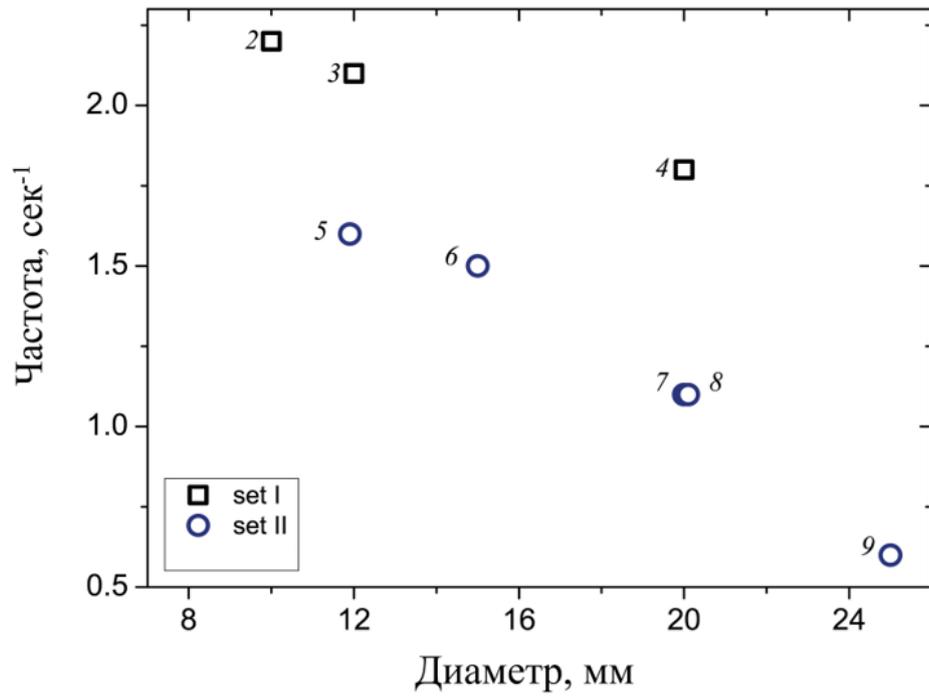


Рис.12а. Зависимость частоты вращения от диаметра магнита.

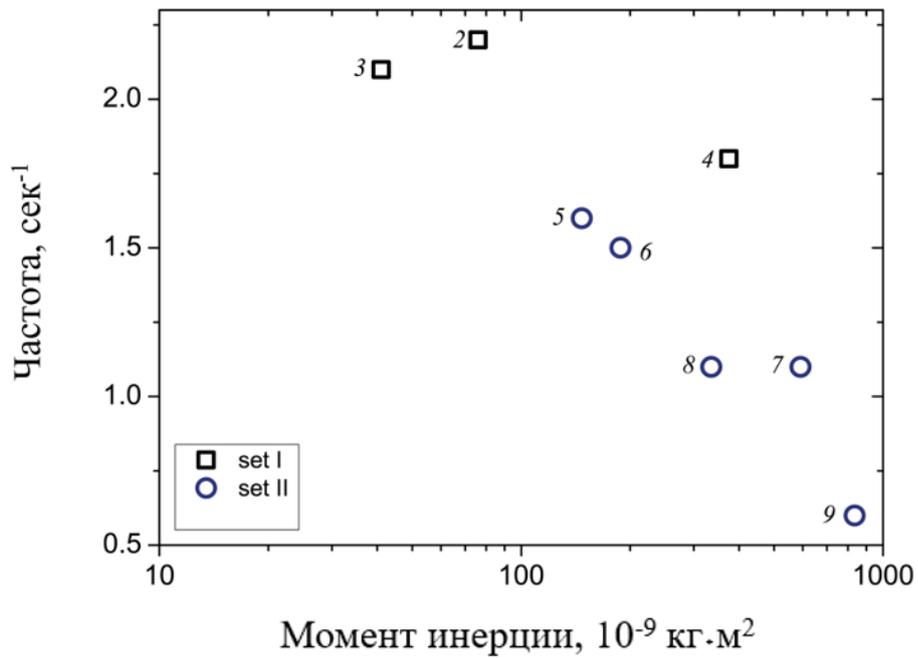


Рис.12б. Зависимость частоты вращения от момента инерции магнита.

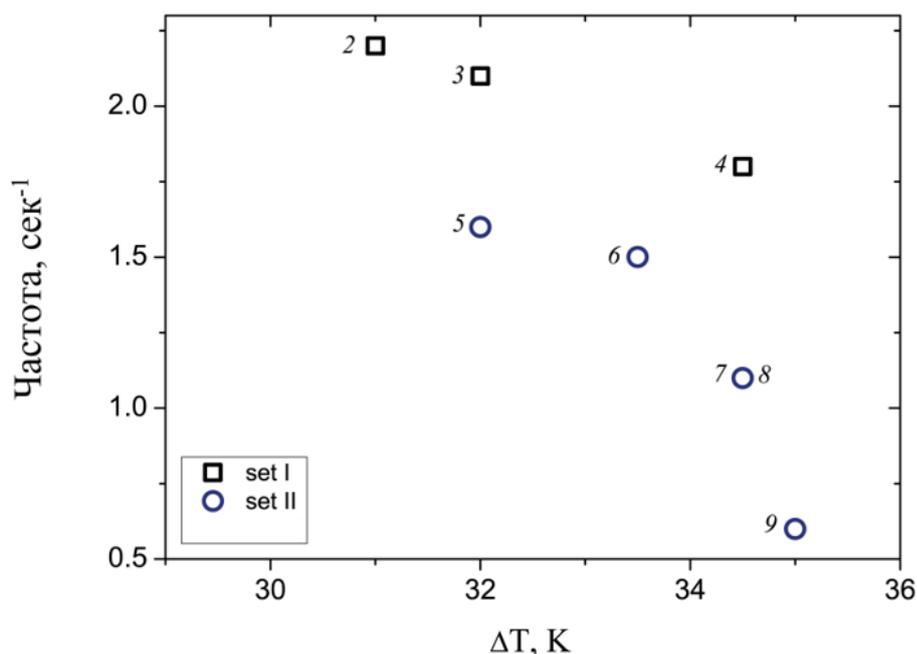


Рис.12в. Зависимость частоты вращения от температуры магнита.

Между размерами, массой магнитов и частотой их вращения общей закономерности не обнаружено. Однако в наборах I и II частота вращения уменьшается с увеличением диаметра магнитов (Рис.12а). Для магнитов из набора II также замечено уменьшение частоты вращения с ростом момента инерции (Рис.12б). Кроме того, в наборах I и II частота вращения монотонно уменьшается с увеличением разницы температур между верхней и нижней точками магнитов  $\Delta T$  (Рис.12в).

### 2.3.2 Влияние уровня азота на частоту вращения магнита.

Исследовали, как меняется частота вращения левитирующих магнитов при изменении уровня жидкого азота. В начале измерений уровень азота был немного выше платформы, а нижняя точка магнита находилась в 5 мм от уровня азота. Это обычный режим, для которого в таблице 1 приведены значения частоты вращения. Когда уровень азота повышали, вращение магнита замедлялось, и он останавливался, когда нижняя часть погружалась в жидкий азот. Если уровень азота продолжали повышать, вращение и

раскачивание магнита прекращались. Магнит помещали над платформой, когда уровень азота был выше верхней точки магнита. В этом случае магнит не начинал раскачиваться и вращаться. Затем наблюдали за поведением магнита, когда азот испарялся и уровень постепенно понижался. Колебания магнита не начинались, даже когда уровень азота опускался до того, при котором раньше наблюдалось вращение магнита. Чтобы колебания и вращение начались, магнит должен был несколько минут находиться над поверхностью азота и нагреться.

### **2.3.3 Влияние нагрева на частоту вращения магнита.**

Нагрев приводил к увеличению частоты вращения более чем в 2 раза по сравнению с первоначальными данными. При локальном нагреве в верхней области, частота вращения также увеличивалась в 2–2.5 раза. Однако, при локальном нагреве магнита в нижней области, частота вращения уменьшалась вплоть до полной остановки вращения. При прекращении нагрева, вращение возобновлялось.

## **2.4 Обсуждение полученных результатов.**

Вращение магнита зависит от разницы намагниченностей его нижней и верхней половин  $\Delta M = M_{down} - M_{up}$ . Чем больше эта разница, тем сильнее вращательный момент. Однако величина этой разницы не всегда прямо пропорциональна температурному градиенту. Исследования в работах [10-11] показали, что намагниченность материала Nd-Fe-B меняется с температурой немонотонно (Рис.13а). Для магнитов, используемых в работе, зависимости  $M(T)$  могут немного отличаться от стандартной кривой, представленной в рис. 13а, но общая тенденция сохраняется. На рисунке 13б показана температура, измеренная на разной высоте от поверхности жидкого азота. В обычном режиме, когда магнит находится на высоте около 5 мм над уровнем жидкого азота, разница температур между верхней и нижней точками магнитов составляет 30–35 К. При этом температуры в верхней и нижней точках магнита

находятся в диапазоне 160–300 К, где намагниченность Nd-Fe-B уменьшается с ростом температуры. Поэтому, если магнит достаточно далеко от уровня жидкого азота, намагниченность холодной нижней половины магнита выше, чем намагниченность более тёплой верхней половины. Локальный нагрев нижней области уменьшает разницу намагниченностей и замедляет вращение. Локальный нагрев верхней области увеличивает разницу намагниченностей и ускоряет вращение.

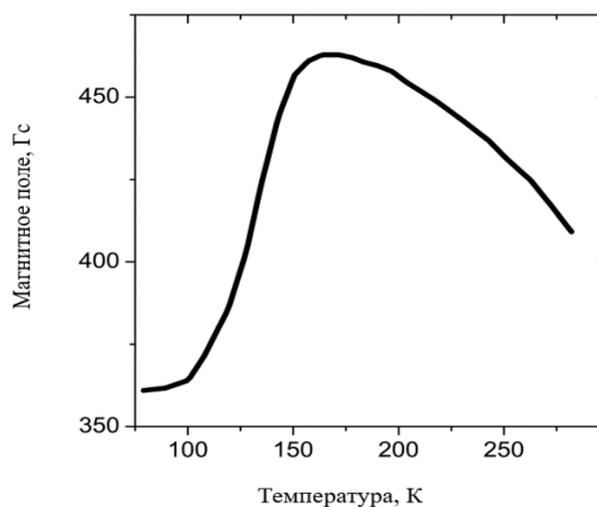


Рис.13а

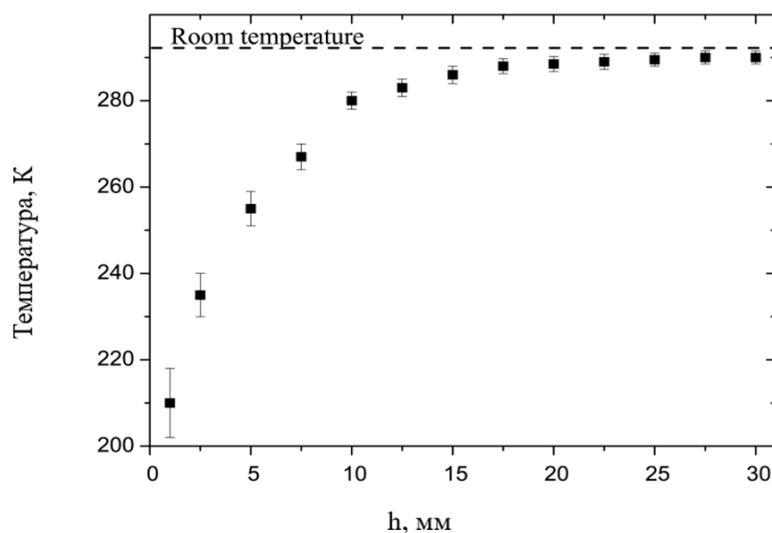


Рис.13.б

При повышении уровня азота нижняя часть магнита охлаждается, а её намагниченность  $M_{down}$  уменьшается, так как в диапазоне ниже 160 К намагниченность материала Nd-Fe-B уменьшается с понижением температуры (рис. 13а). Когда  $M_{down}$  сравнивается с  $M_{up}$  или становится меньше, вращение магнита прекращается. Отсутствие вращения при левитации цилиндрического магнита диаметром 5 мм, вероятно, связано с малым градиентом температур вдоль вертикального диаметра и быстрым теплообменом в магните. Мы также наблюдали уменьшение частоты вращения магнитов при наклоне их оси вращения. Это замедление может быть объяснено тем, что при наклоне уменьшается разница температур между верхней и нижней половинами магнита [12]. Длительное время раскачивания указывает на неоднородность образцов [12] или неоднородность их азимутального намагничивания [11]. Действительно, мы наблюдали увеличение времени раскачивания для образцов с небольшими сколами на краях. Из проведённых экспериментов следует, что скорость вращения связана с пространственным распределением намагниченности цилиндрического магнита. Это распределение устанавливается благодаря градиенту температур и теплопроводности материала магнита. Можно было бы ожидать, что увеличение градиента температур вдоль вертикальной оси магнита приведёт к увеличению частоты вращения из-за увеличения  $\Delta M$ . Однако частота вращения уменьшалась с увеличением диаметра магнитов и величины  $\Delta T$  (рис. 12а, в). Необходимо отметить, что величина  $\Delta T$ , а соответственно и  $\Delta M$ , растёт медленно с увеличением диаметра магнитов (рис. 13б). В то же время момент инерции растёт быстро с увеличением диаметра образцов. Следовательно, эффект замедления вращения из-за роста момента инерции значительнее, чем влияние увеличения градиента температур.

## **2.5 Выводы.**

Исследовано, как цилиндрические магниты из сплава неодима, железа и бора (Nd-Fe-B) вращаются сами по себе, когда парят над композитными

сверхпроводящими лентами. Это явление наглядно показывает, насколько сильно сверхпроводник проявляет диамагнетизм, и демонстрирует работу тепловой машины. Наши наблюдения подтверждают, что вращение возникает из-за разницы температур и того, что она создаёт неоднородное намагничивание магнита. Мы выяснили, что частоту вращения магнита можно изменять, меняя уровень азота или нагревая магнит в определённых местах. Если нагреть верхнюю половину магнита, его вращение ускорится, а если нижнюю — замедлится.

## **Глава 3. Организация научно-исследовательской деятельности старших школьников по теме «Авторотация магнита над сверхпроводником»**

### **3.1 Основные теоретические характеристики организации научно-исследовательской деятельности старших школьников.**

Научно-исследовательская деятельность в старших классах помогает развить критическое мышление, лидерские и коммуникативные навыки, также повышает аналитические навыки учащихся, к тому же школьники получают важный опыт, который поможет им как в высшем учебном заведении, так и в повседневной жизни.

Существует множество определений и вариаций понятия научно-исследовательская деятельность рассмотрим вариант Алексеевнина А.К., Булова Н.С. в своих работах [17] описывают что исследования — это получение новых знаний на основе анализа, систематизации материала и проведения эксперимента (если это необходимо). Для меня данное определение является крайне близкой.

Организация научно-исследовательской деятельности старших школьников требует учета ряда теоретических характеристик, которые могут включать в себя следующие аспекты:

**Мотивация:** важным аспектом организации научно-исследовательской деятельности старших школьников является стимулирование их интереса к науке и исследованиям. Мотивация может быть внутренней (интерес к теме исследования, желание узнать что-то новое) и внешней (получение награды, участие в конкурсах).

**Научное руководство:** важным элементом организации научно-исследовательской деятельности старших школьников является наличие квалифицированных научных руководителей, которые могут помочь им в выборе темы исследования, разработке методологии и анализе результатов.

Планирование и организация работы: необходимо разработать план работы, определить цели и задачи исследования, распределить обязанности между участниками команды и следить за соблюдением сроков выполнения задач.

Исследовательский процесс: старшеклассники должны овладеть методами научного исследования, включая сбор и анализ данных, формулирование гипотез, проведение экспериментов и выводы на основе полученных результатов.

Коммуникация и презентация результатов: старшеклассники должны уметь четко и ясно излагать результаты своих исследований, как устно, так и письменно, а также участвовать в научных конференциях и конкурсах.

Этика и безопасность: при проведении научных исследований необходимо соблюдать принципы научной этики, а также обеспечить безопасность участников и окружающих.

Таким образом, организация научно-исследовательской деятельности старших школьников требует комплексного подхода, учитывающего различные теоретические аспекты, чтобы обеспечить успешное выполнение исследовательских проектов.

### **Цели научно-исследовательской деятельности**

1. Повышение мотивации учащихся
2. Поддержка индивидуальных потребностей учащихся
3. Улучшение коммуникационных навыков детей

Исследовательская работа играет важную роль в образовательном процессе, поскольку она способствует развитию мотивации к изучению физики и формированию творческих и исследовательских способностей учащихся. Для того чтобы эффективно развивать эти качества у учеников, учитель сам должен быть творческим и увлечённым человеком, хорошо знающим свой предмет.

Одним из ключевых факторов успешного развития творческих и исследовательских способностей учащихся является постоянное повышение квалификации учителей. Педагоги должны регулярно обновлять свои знания и навыки, чтобы быть в курсе последних достижений в области физики и методики её преподавания. Это позволит им разрабатывать и внедрять новые подходы к обучению, которые будут стимулировать интерес учащихся к предмету и способствовать развитию их творческих способностей.

Кроме того, учителям необходимо формировать исследовательские умения и навыки у учащихся. Это можно делать через различные виды деятельности, такие как лабораторные работы, проектная деятельность, решение задач повышенной сложности и участие в олимпиадах и конкурсах. Важно, чтобы учащиеся понимали, что физика — это не просто набор фактов и формул, а увлекательный мир, полный загадок и открытий.

Для организации исследовательской работы в школе можно создавать специальные подразделения, такие как научные кружки, лаборатории или клубы. Это позволит учащимся заниматься исследованиями под руководством опытных педагогов и получать поддержку и консультации на всех этапах работы.

Создание специальных подразделений для организации исследовательской работы стирает грань между учителем и учеником, способствует профессиональному росту педагога и позволяет ему лучше узнать своих учеников. В результате такой деятельности обучающиеся формируют исследовательский стиль мышления и научное мировоззрение. Они учатся анализировать информацию, выдвигать гипотезы, проводить эксперименты и делать выводы на основе полученных данных. Это помогает им стать самостоятельными и уверенными в себе людьми, способными решать сложные задачи и достигать поставленных целей.

### **3.2 Методические рекомендации по организации исследовательской деятельности старших классов по теме «Авторотация магнита над сверхпроводником»**

Чтобы организовать научно-исследовательскую работу по физике для старшеклассников на тему «Авторотация магнита над сверхпроводником», следует сначала обсудить этапы проведения исследования. Это поможет учащимся лучше понять процесс научной работы и успешно выполнить проект.

Схема научного следования:

1. Актуальность (Зачем исследуем? отражает значимость, важность чего-либо для настоящего момента времени).
2. Гипотеза (Что предполагаем? предположение или догадка, которое требует доказательства).
3. Цель (желаемый результат, который вы хотите достичь в конце проекта или исследования)
4. Задачи (конкретные шаги, которые необходимо предпринять для достижения цели)
5. Объект (область, явление, сфера знаний, процесс, в рамках которых осуществляется исследование).
6. Предмет исследования (аспект объекта исследования, который непосредственно изучается).
7. Методы исследования (совокупность способов и приемов, применяемых для достижения целей и задач исследования.).
8. Описание процесса исследования (согласно задачам).
9. Обобщение результатов исследования (Выводы, оценка полученных результатов).
10. Представление результатов.

Для успешной реализации исследовательской работы необходимо тщательно спланировать свою деятельность, распределив время и выбрав оптимальные формы контроля для промежуточной оценки. Одним из ключевых аспектов является соблюдение правильной структуры работы, что

не только облегчает процесс оценивания, но и способствует формированию у учащихся навыков систематизации и оформления научных материалов.

Структура исследовательской работы включает в себя несколько обязательных элементов:

- Титульный лист - содержит информацию об авторе работы, учебном заведении, руководителе, а также тему исследования.
- Оглавление - перечень разделов работы с указанием страниц.
- Введение - знакомит читателя с сутью исследования, включает актуальность, проблему, цель, задачи, гипотезу, объект и предмет исследования, методы и практическую значимость.
- Основная часть - делится на главы, где проводится теоретическое и практическое исследование проблемы.
- Заключение - подводит итоги исследования, отражает степень достижения цели, результаты проверки гипотезы и перспективы дальнейшего изучения вопроса.
- Список использованной литературы - перечень источников, использованных в работе.
- Приложения (при необходимости) - дополнительные материалы, иллюстрации, таблицы, графики и т.д.

Соблюдение этой структуры позволяет учащимся грамотно организовать свою работу, структурировать материал и представить результаты исследования в логичной и понятной форме. Это также способствует развитию навыков критического мышления, анализа и синтеза информации, что является важным элементом образовательного процесса.

### **3.3 Методические материалы**

Для эффективной организации научно-исследовательской деятельности учащихся старших классов физико-математической школы Сибирского федерального университета в рамках нашей темы были разработаны

специальные методические материалы. Они включают:

- Примерный тематический перечень занятий, который поможет учащимся структурировать свою работу и сосредоточиться на ключевых аспектах исследования.

- Вопросы для обсуждения по теме «Авторотация магнита над сверхпроводником», направленные на стимулирование критического мышления и глубокого понимания материала.

- Задания для учащихся в рамках исследовательской работы, способствующие практическому применению теоретических знаний и развитию навыков самостоятельного исследования.

- Критерии оценивания докладов на конференции, которые помогут учащимся понять, какие аспекты их работы будут оцениваться, и мотивируют их к более качественной подготовке своих выступлений.

Эти материалы призваны обеспечить всестороннюю поддержку учащихся в процессе их научно-исследовательской деятельности, способствовать развитию их научного потенциала и повышению интереса к изучению физики и математики.

### **Примерный перечень занятий в рамках исследовательской работы для учащихся старших классов**

	<b>Тема</b>	<b>Виды деятельности</b>	<b>Часы</b>
1	Изучение неодимовый магнитов и сверхпроводников	Лекция, объяснение	2
2	Рефлексия по изучению высокотемпературных сверхпроводников	Беседа	2
3	Исследовательская работа по теме «Взаимодействие	Исследовательская работа по группам	4

	постоянного магнита и сверхпроводника»		
4	Подготовка групповых исследовательских проектов	Самостоятельная работа, индивидуальные и групповые консультации	10
5	Заслушивание групповых докладов	Урок-конференция	2
<b>Итого</b>			<b>20</b>

**Вопросы для обсуждения в рамках темы «авторотация магнита над сверхпроводником»:**

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 магнит может левитировать над сверхпроводником?
6. Почему эффект Мейснера частично наблюдается у сверхпроводников второго рода?
7. Опишите явление авторотации.
8. Какие условия необходимы для возникновения авторотации магнита над сверхпроводником?
9. Какие факторы влияют на стабильность авторотации магнита над сверхпроводником?
10. Что такое постоянный магнит? Какие магниты более эффективные и долговечней?
11. 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. Влияние уровня азота на частоту вращения магнита
2. Влияние нагрева на частоту вращения магнита
3. Влияние параметров магнитов на частоту вращения

### **Задание 2. Формулируем цели, задачи, выводы исследования**

Продумайте и составьте для вашего исследования следующие важнейшие компоненты:

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**

Исследуйте особенности взаимодействия неодимового магнита и высокотемпературного сверхпроводника. Определите, как изменится это взаимодействие после перфорации сверхпроводника. Проведите экспериментальное измерение силы притяжения до и после перфорации. Сравните полученные результаты с вашей гипотезой.

#### **Критерии оценивания докладов на конференции**

<b>Критерии оценивания</b>	<b>Баллы</b>
1. Раскрыта тема доклада (0-1)	
- Нет	<b>0</b>

- Да	<b>1</b>
<b>2. Исследование проблемы (0-2)</b>	
- Нет	<b>0</b>
- Личный вклад незначителен	<b>1</b>
- Самостоятельное исследование	<b>2</b>
<b>3.Свободное владение содержанием (0-3)</b>	
- Не владеет материалом	<b>0</b>
- Необходимость подглядывания в текст	<b>1</b>
- Владеет материалом	<b>2</b>
<b>4.Качество оформления работы (0-4)</b>	
- Соответствует требованиям к оформлению работы	<b>1</b>
- Стилистически текст построен грамотно	<b>1</b>
- Орфографические ошибки отсутствуют	<b>1</b>
- Использован единый текст оформления	<b>1</b>
<b>5.Структура представления работы (0-7)</b>	
- Соответствия работы и ее содержанию	<b>1</b>
- Цель поставлена	<b>1</b>
- Задачи и ход исследования понятны	<b>1</b>
- Эксперимент проведен	<b>1</b>
- Результат получен	<b>1</b>
- Выводы сделаны	<b>1</b>
Результаты и выводы соответствуют цели	<b>1</b>
<b>5.Стиль и качество публичной защиты (0-3)</b>	
- Логика изложения доклада	<b>1</b>

- Грамотность	<b>1</b>
- Убедительность рассуждений	<b>1</b>
<b>6. Ответы на вопросы (0-2)</b>	
- Не может объяснить суть работы	<b>0</b>
- Доказывает самостоятельно, но не отвечает на вопросы	<b>1</b>
- Доказывает самостоятельно и отвечает на вопросы	<b>2</b>
<b>7.Содержание презентации (0-4)</b>	
- По показаниям можно увидеть само исследование	<b>1</b>
- Текст не содержит грамматических ошибок и хорошо читается с экрана	<b>1</b>
- Проведен и представлен обзор исследования	<b>1</b>
- Присутствие оригинальных изображений/рисунков	<b>1</b>
- Максимальный балл	<b>26</b>

Докладчик получает следующую оценку, если:

“5”- набрано 23-26 баллов;

“4”- набрано 20-22 баллов;

“3”- набрано 17-19 баллов;

“2”- набрано 13-16 баллов.

### **3.4 Техника безопасности при проведения исследовательской деятельности**

#### **Работа с жидким азотом:**

В ходе проведения исследований с применением жидкого азота следует неукоснительно соблюдать правила техники безопасности, поскольку работа с этим веществом без использования соответствующих средств защиты может

привести к обморожению открытых участков кожи из-за его экстремально низкой температуры.

Жидкий азот широко используется в различных областях науки и промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Однако работа с ним требует особой осторожности и соблюдения мер безопасности.

При контакте с кожей жидкий азот может вызвать её обморожение, поэтому необходимо использовать защитные перчатки и одежду. Также следует избегать попадания жидкого азота в глаза и на слизистые оболочки. В случае попадания необходимо немедленно обратиться к врачу.

Кроме того, при работе с жидким азотом необходимо соблюдать следующие меры предосторожности

1. Проверка оборудования: перед началом работы с жидким азотом необходимо тщательно осмотреть криостат (сосуд Дьюара) на предмет повреждений или неисправностей.
2. Специальная одежда и перчатки: обязательно использовать защитную одежду и рабочие перчатки, чтобы предотвратить обморожение и другие травмы.
3. Убранные волосы: во время работы с жидким азотом волосы должны быть убраны, чтобы избежать их попадания в оборудование.
4. Избегание избыточного давления: запрещается плотно закрывать крышку сосуда, так как это может привести к избыточному давлению из-за испарения жидкого азота.
5. Запрет на заглядывание в сосуд: нельзя заглядывать внутрь сосуда для определения уровня жидкости, так как это может привести к обморожению.
6. Использование специального переливного устройства: для заливки жидкого азота необходимо использовать специальное переливное устройство (металлорукав), чтобы избежать разлива вещества.

## **Техника безопасности при использовании электроприборов**

При работе с электроприборами важно соблюдать правила техники безопасности, чтобы предотвратить возможные травмы и повреждения оборудования.

Работа с электроприборами требует особой осторожности и внимания к деталям. Неправильное обращение с ними может привести к поражению электрическим током, возгоранию или другим опасным ситуациям. Поэтому перед началом работы необходимо убедиться в том, что вы понимаете, как правильно обращаться с прибором, и принять все необходимые меры предосторожности.

1. Никогда не касайтесь оголённых проводов. Это может привести к поражению электрическим током.
2. Не проверяйте наличие электрического тока в приборах или проводах пальцами.
3. Не заземляйте провода дверями, оконными рамами. Это может привести к повреждению изоляции и коротким замыканиям.
4. Следите за тем, чтобы электрические провода не соприкасались с батареями отопления, трубами водопровода, с телефонными и радиотрансляционными проводами. Это может вызвать короткое замыкание.
5. Включать и выключать любой электробытовой прибор нужно одной рукой, желательно правой, не касаясь при этом водопроводных, газовых и отопительных труб.
6. Чтобы избежать пожара, бытовые электроприборы нужно устанавливать на специальных подставках (керамических, металлических или из асбеста) и на безопасном расстоянии от легко загорающих предметов (занавесей, портьер, скатертей).
7. Нельзя оставлять включенные электроприборы без надзора. Это может привести к пожару

## **Техника безопасности работы с электрофеном**

При работе с электрофеном важно соблюдать правила техники безопасности, чтобы предотвратить возможные травмы и повреждения оборудования.

Работа с электрофеном требует особой осторожности и внимания к деталям. Неправильное обращение с ним может привести к ожогам, поражению электрическим током или возгоранию. Поэтому перед началом работы необходимо убедиться в том, что вы понимаете, как правильно пользоваться феном, и принять все необходимые меры предосторожности.

1. Необходимо следить за тем, чтобы внутрь фена не попадали посторонние предметы. Это может привести к остановке двигателя и преждевременному выходу из строя прибора, а также к поражению электрическим током.

2. Нельзя накрывать работающий фен. Необходимо следить за тем, чтобы воздушный фильтр был не закрыт и чист. Это может привести к перегреву и выводу из строя оборудования.

3. Следует всегда выключать фен перед тем, как отложить его даже на короткое время.

4. Нужно избегать прямого контакта насадок фена с кожей. Это может привести к ожогам и другим травмам.

5. Не следует использовать фен вблизи раковины или других источников воды. Это может привести к короткому замыканию.

6. Если электрический шнур фена повреждён, то прибором пользоваться нельзя.

7. При работе с феном необходимо использовать средства индивидуальной защиты, такие как перчатки и защитные очки. Это поможет предотвратить травмы и повреждения кожи и глаз.

8. Следует соблюдать дистанцию с обрабатываемой поверхностью.

Это позволит избежать ожогов и других травм.

9. Нельзя направлять включённый фен на легковоспламеняющиеся материалы. Это может привести к пожару.

### **3.5 Результаты исследования учащегося старшей школы.**

Ученик десятого класса физико-математической школы Сибирского федерального университета провёл исследование. Его целью было установить изменение частоты вращения от нагрева магнита.

Он экспериментально измерил частоту вращения четырёх неодимовых магнитов над охлаждённым сверхпроводником, чтобы проверить уже имеющиеся данные. Учащийся использовал магниты из первого набора. Характеристики магнитов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Размеры и массы магнитов

Диаметр, мм	Толщина, мм	Масса, г
5.0	1.8	0.25
10.0	10.0	6.1
12.0	2.8	2.3
20.0	3.0	7.5

Для проведения эксперимента учащийся подготовил всё необходимое оборудование и материалы. Он также изучил теоретические основы процесса, чтобы лучше понимать, что происходит во время эксперимента.

Эксперимент проводился в несколько этапов. Сначала учащийся охладил сверхпроводник до нужной температуры. Затем он поместил неодимовые магниты над сверхпроводником. После этого учащийся начал нагревать магниты, измеряя при этом их частоту вращения.

Результаты эксперимента показали, что частота вращения магнитов действительно меняется при их нагреве. Это подтвердило гипотезу учащегося и уже имеющиеся данные.

## Заключение

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

1. Изучено, что вращение магнита вызывается разницей намагниченностей в нижней и верхней половинах магнита,  $M_{down}$  и  $M_{up}$ , вызванной разницей градиента температур. Чем больше эта разница  $\Delta M = M_{down} - M_{up}$ , тем больше вращательный момент

2. Изучены изменения частот вращения магнита над сверхпроводником при изменении

А) Массы объем магнита - общей закономерности между размерами или массой всех магнитов и частотой их вращения не выявлено

Б) Уровень азота – При повышении уровня азота вращение магнита постепенно замедлялось. Остановка вращения происходила, когда нижняя часть магнита погружалась в жидкий азот.

В) Изменение температуры – при общем нагреве магнита частота вращения увеличивается. При локальном нагреве верхних части магнита также увеличивает свою частоту. При нагреве нижней части магнита происходит уменьшение частоты вращения вплоть до полной остановки.

3. Разработана методика ознакомления учащихся старших классов с явлением магнитной левитации и спонтанного вращения магнита.

Мы успешно завершили все этапы исследования и достигли поставленной цели. В будущем, при изучении данной темы, рекомендуется провести апробацию результатов исследования, чтобы оценить, насколько эффективна исследовательская деятельность по физике для старшеклассников. Это позволит нам определить, какие аспекты требуют доработки, а также выявить потенциальные возможности для улучшения образовательного процесса.

Апробация результатов исследования даст возможность усовершенствовать методы обучения физике, повысить качество образования

и развить интерес учащихся к изучению этого предмета.

## Список использованных источников.

1. Д. М. Гохфельд, С. Ю. Шаломов, Д. Б. Сультимов, М. И. Петров - Самопроизвольное вращение магнитов, левитирующих над высокотемпературным сверхпроводником. // Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. –2024. – №. 1. – С. 34-40.
2. Николаева Т. И., Лукьянченко Н. Н. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ //НАУЧНОЕ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО СТУДЕНЧЕСКОЙ МОЛОДЕЖИ: СТУПЕНИ ПОЗНАНИЯ. – 2017. – С. 23-26.
3. Буккель В. – «Сверхпроводимость», М.: Мир, 1975.-366с.
4. В. Л. Гинзбург, Е. А. Андрияшин – «Сверхпроводимость», М.: Альфа-М, 2006.-112с.
5. Чарикова Т. Б. Внутренний эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках //XXXIII Зимняя школа по химии твердого тела. —Екатеринбург, 2024. – 2024. – С. 24-26.
6. V. Arkadiev, Nature 160, 330 (1947). DOI: 10.1038/160330a0
7. C. P. Strehlow and M. C. Sullivan, Am. J. Phys. 77, 847 (2009). DOI: 10.1119/1.3095809
8. S. Miryala and M. R. Koblichka, Eur. J. Phys. Educ. 5, 1 (2014).
9. F. Moon, Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation (WILEY-VCH, 1994).
10. G. Martini, A. Rivetti, and F. Pavese, Adv. Cryog. Eng. 35, 639 (1990). DOI: 10.1007/978-1- 4613-0639-9\_75
11. K. B. Ma, J. R.Liu, C. McMichael, R. Bruce, D. Mims, and W. K. Chu, J. Appl. Phys. 70, 3961 (1991). DOI: 10.1063/1.349158
12. J. E. Hirsch and D. J. Hirsch, Phys. C Supercond. 398, 8 (2003). DOI:10.1016/S0921- 4534(03)01204-8
13. M. Schreiner, Rev. Matemática Complut. 16, 495 (2003). DOI:10.5209/rev\_REMA. 2003.v16.n2.16826
14. M. Schreiner and C. Palmy, Am. J. Phys. 72, 243 (2004). DOI: 10.1119/1.1604385
15. M. Schreiner, Appl. Math. Model. 31, 854 (2007). DOI: 10.1016/j.apm.2006.02.006
16. S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Kaul, A.Vavilov, V. Vysotsky, and S. Fetisov, Supercond. Sci. Technol. 27, 044022 (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
17. Алексеевнина А. К., Буслова Н. С. Особенности организации совместной научно-исследовательской деятельности будущих учителей и школьников //Современные наукоемкие технологии. – 2017. – №. 6. – С. 108-112.

18. Grosso G. Solid state physics/ G. Grosso, P.G. Pastori. — London: Academic Press, 2003. — 727 p.