

Российская академия наук  
Физический институт им. П.Н. Лебедева

На правах рукописи

Успенский Сергей Германович

Динамика вихрей в джозефсоновском переходе,  
магнитосвязанном с волноводами.

Специальность 01.04.02 – «Теоретическая физика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

Работа выполнена в Секторе теории плазменных явлений Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Урюпин С. А.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **Попков А. Ф.**

доктор физико-математических наук  
**Лыков А.Н.**

Ведущая организация: НИИ ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына МГУ

Защита состоится « 29 » января 2007 года в 12:00 на заседании  
Диссертационного совета Д002.023.02 при Физическом институте им. П.Н.  
Лебедева РАН по адресу: 119991 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им.  
П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан «    » декабря 2006 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.023.02  
доктор физико-математических наук

**Истомин Я. Н.**

## **Общая характеристика работы.**

### **Актуальность темы.**

С момента своего открытия в 1962 году эффект Джозефсона привлекает значительный интерес. Его изучению посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ. Целый ряд свойств джозефсоновских переходов нашел применение в создании уникальных физических приборов (см., например, [1,2]).

Значительная часть исследований в области джозефсоновской электродинамики посвящена изучению слоистых джозефсоновских структур, таких как, два и более джозефсоновских перехода, расположенных настолько близко друг к другу, что создаваемое каждым переходом магнитное поле влияет на движение вихрей в соседних переходах (см., например, [3,4]). Это влияние приводит к появлению новых свойств, таких как, например, расщепление скорости Свихарта слоистой структуры [5,6], или возможность цепочек вихрей двигаться в слоистой структуре когерентно [7], что открывает новые возможности для использования магнитосвязанных джозефсоновских переходов в качестве генераторов электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [8]. В [8], в частности, показано, что когерентность движения вихрей позволяет получить мощность излучения в четыре раза больше мощности излучения от одного джозефсоновского перехода.

Важной причиной изучения слоистых джозефсоновских структур является представление о ВТСП как о совокупности большого числа магнитосвязанных друг с другом джозефсоновских переходов [9]. Джозефсоновским свойствам ВТСП посвящено большое количество как экспериментальных (см., например, [10]), так и теоретических работ (см., например, [11]).

Не менее интересным классом слоистых джозефсоновских структур являются джозефсоновские переходы, магнитосвязанные с волноводами. Подобные структуры рассматривались ранее (см., например, [12,13]), и именно

их изучению посвящена настоящая диссертация.

В джозефсоновских структурах имеет место интересное явление черенковского излучения. Тогда, когда вихрь в джозефсоновском переходе движется со скоростью  $v$ , превышающей фазовую скорость волн Свихарта, он является источником волн Свихарта [4]. Обычный джозефсоновский вихрь в изолированном переходе не может быть источником черенковского излучения волн Свихарта, поскольку он движется со скоростями меньшими скорости Свихарта перехода  $V_s$ , в то время как фазовая скорость волн Свихарта больше  $V_s$ . Но последнее утверждение справедливо только в одиночном джозефсоновском переходе. В слоистой структуре из нескольких магнитосвязанных джозефсоновских переходов законы дисперсии волн Свихарта отличаются от законов дисперсии в одном переходе. При этом в слоистой структуре оказывается возможным движение вихрей со скоростями, превышающими фазовую скорость волн Свихарта, что позволяет реализоваться эффекту Черенкова (см., например, [4,6,12]). Авторы некоторых работ указывают на экспериментальное обнаружение эффекта Черенкова как в структуре из двух переходов [14], так и в слоистой структуре из нескольких джозефсоновских переходов [15], а также и в ВТСП [16].

Основы изучения динамики вихрей в джозефсоновском переходе с диссипацией, связанной с наличием в переходе конечной проводимости, были заложены в работе [17], где показано, что такая диссипация приводит к наличию силы трения, тормозящей вихрь. Это влияние может быть скомпенсировано посредством пропускания через джозефсоновский переход транспортного тока, который создает силу Лоренца, противодействующую силе трения и приводящую к вынужденному движению вихря.

В течение длительного времени большинство исследователей, использовали для описания свойств джозефсоновских переходов подход, основанный на применении уравнения синус-Гордона. Сравнительно недавно стало ясно, что такой подход, в случае джозефсоновского перехода, образованного массивными сверхпроводниками, описывает только вихревые

структуры с характерным пространственным масштабом много большим лондоновской длины [18]. Структуры же с масштабом, значительно меньшим лондоновской длины, описываются с помощью нелокальной джозефсоновской электродинамики, в которой уравнение для разности фаз является интегральным [18-27].

В работах [28,29] предложен выход за рамки локального описания динамики элементарного джозефсоновского вихря ( $2\pi$ -кинка) в изолированном переходе. В [28,29] показано, что для рассмотрения структур с масштабом меньшим лондоновской длины необходимо дополнить уравнение синус-Гордона малым по отношению лондоновской длины к пространственному масштабу разности фаз поправочным слагаемым. В [28] показано, что это поправочное слагаемое отвечает за дополнительную диссипацию энергии вихря. Вследствие этого, возникает тормозящая вихрь сила, которой не было при описании перехода с помощью уравнения синус-Гордона. Причина возникновения этой силы – черенковское излучение движущимся вихрем электромагнитных волн Свихарта [28]. В [28] найдена сила радиационного трения, действующая на  $2\pi$ -кинк, движущийся в переходе, а также величина транспортного тока, необходимого для компенсации этой силы трения. В работе [29] потери вихря на черенковское излучение рассматривались не по теории возмущений. Это удалось благодаря использованию авторами [29] модели Сакаи-Татено-Педерсена [30]. Подход работы [29] был использован в [31] для изучения слоистой структуры из плоского джозефсоновского перехода, магнитосвязанного с волноводом.

Все вышеизложенное показывает актуальность исследования динамики вихрей в джозефсоновских структурах, в том числе и содержащих волноводы.

### **Цели работы:**

1. Изучить поля вихрей, равномерно движущихся в слоистой структуре, представляющей собой джозефсоновский переход, магнитосвязанный с одним или двумя волноводами.

2. Установить закономерности движения  $2\pi$ -кинка в таких слоистых структурах. Исследовать возможность его вынужденного движения при наличии диссипации энергии в джозефсоновском переходе и волноводах.
3. Исследовать возможность вынужденного движения  $2\pi$ -кинка в слоистой структуре из джозефсоновского перехода и волновода при наличии омической диссипации энергии в сверхпроводниках.
4. Исследовать влияние радиационных потерь энергии на черенковское излучение волн Свихарта на вынужденное движение  $2\pi$ -кинка в переходе, связанном с волноводом.

Для достижения этих целей ставились **задачи**:

1. Для магнитосвязанного с волноводом джозефсоновского перехода, получить аналитическое описание вихревых структур, движущихся с постоянной скоростью.
2. Для слоистых структур, представляющих собой джозефсоновский переход магнитосвязанный с одним или двумя волноводами, найти области скоростей, в которых возможно движение  $2\pi$ -кинка.
3. Вычислить действующую на  $2\pi$ -кинк силу трения, обусловленную омической диссипацией в джозефсоновском переходе, связанном с одним или двумя волноводами.
4. Для джозефсоновского перехода, связанного с одним волноводом, вычислить действующую на  $2\pi$ -кинк силу трения, из-за омической диссипации в сверхпроводниках.
5. Вычислить величину транспортного тока, создающего силу Лоренца, компенсирующую силы трения из-за радиационных и омических потерь.

Положения, определяющие научную новизну работы и **выносимые на защиту**:

1. Изучено движение  $2\pi$ -кинка в слоистой структуре, представляющей собой джозефсоновский переход, магнитосвязанный с волноводом. Найдены потери энергии  $2\pi$ -кинка, вследствие омической диссипации как в несверхпроводящих слоях, так и в сверхпроводниках. Определена плотность транспортного тока,

необходимого для поддержания движения вихря с заданной скоростью.

2. Для слоистой структуры джозефсоновский переход – волновод описаны вихревые состояния поля, представляющие собой единичный вихрь ( $2\pi$ -кинк), цепочку единичных вихрей и кноидальные волны, реализующиеся в разных областях скоростей.

3. Предсказан эффект обратного тока, который состоит в том, что магнитное поле вихря видоизменяется волноводом столь существенно, что вихрь фактически превращается в антивихрь, для поддержания движения которого в направлении движения элементарного вихря необходимо изменить направление транспортного тока.

4. Для слоистой структуры джозефсоновский переход – волновод, в модели Сакаи-Татено-Педерсена изучено обусловленное черенковским излучением волн Свихарта влияние потерь энергии на движение  $2\pi$ -кинка. Без предположения о слабости связи перехода с волноводом найдена зависимость от скорости плотности транспортного тока, необходимого для компенсации черенковских потерь. Выявлены условия, при которых черенковские потери доминируют над омическими потерями в слоистой структуре.

5. Впервые изучено движение  $2\pi$ -кинка в слоистой структуре представляющей собой джозефсоновский переход, расположенный между двумя волноводами. Установлено, что свободное движение такого вихря возможно только со скоростями, лежащими в трех конечных интервалах скоростей. Вычислены потери энергии  $2\pi$ -кинка вследствие омической диссипации в системе, и вычислена плотность транспортного тока, необходимого для поддержания равномерного движения вихря.

**Научная и практическая ценность.** Полученные в Главах 1 и 2 зависимости плотности транспортного тока от скорости джозефсоновских вихрей в рассмотренных слоистых структурах представляют интерес для разработки сверхпроводящих излучателей на основе слоистых джозефсоновских структур.

В Главе 2 предсказан эффект обратного тока, показывающий насколько сильно может искажаться волноводом магнитное поле  $2\pi$ -кинка. Этот эффект необходимо иметь в виду при интерпретации результатов экспериментальных исследований слоистых джозефсоновских структур, содержащих волноводы.

В Главе 3 изучено влияние черенковских потерь на зависимость плотности транспортного тока от скорости вихря, движущегося в слоистой структуре, содержащей волновод. Показано, что влияние волновода может существенно усилить проявление черенковского эффекта, что позволяет говорить о возможности использования слоистых структур содержащих волноводы для облегчения его экспериментального изучения.

Установленная в Приложении зависимость плотности транспортного тока от скорости вихря, учитывающая влияние черенковских потерь, может быть использована при экспериментальном исследовании черенковского излучения джозефсоновского вихря, движущегося в изолированном джозефсоновском переходе.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на научных семинарах Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, первой международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС'04)» (Звенигород, 2004), международной школе – конференции «Quantum dots and arrays of Josephson junctions» (Kitten, Bulgaria, 2005), конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», (Москва, 2006), второй международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС'06)» (Звенигород, 2006), международном совещании «XXXIV Совещание по физике низких температур (НТ-34)» (Ростов-на-Дону, 2006).

**Публикации.** Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в работах [А1-А7] и в тезисах конференций [А8-А11].

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 122 стр.,



включая 33 рисунка. Список литературы состоит из 116 наименований.

## Основное содержание диссертации

Во **введении** дан обзор литературы, посвященной, джозефсоновским структурам, приведены наиболее важные результаты, используемые в диссертации. Сформулированы цели исследования и задачи, которые ставились и решались для достижения этих целей. Перечислены положения, определяющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту. Указана научная и практическая ценность работы. Кратко охарактеризовано содержание глав диссертации, приложения и заключения.

**Глава 1** диссертации посвящена рассмотрению динамики вихрей в слоистой структуре, представляющей собой плоский джозефсоновский переход, связанный с плоским волноводом [A2, A3, A6]. В **разд. 1.1** дан вывод уравнения для разности фаз волновых функций сверхпроводников, разделенных джозефсоновским переходом. Указана область применимости этого уравнения и найдены выражения для магнитных полей в слоистой структуре. Эти выражения использованы для вычисления потерь энергии вихря, движущегося в слоистой структуре. В **разд. 1.2** приведены равномерно движущиеся в такой слоистой структуре вихревые состояния поля, отвечающие  $2\pi$ -кинку, цепочке  $2\pi$ -кинков, кноидальным волнам. Указаны области скоростей в которых возможно движение данного вихревого состояния. Показано, что каждому вихревому состоянию отвечают две области скоростей свободного движения. Так, например, скорость  $2\pi$ -кинка может лежать в двух конечных областях скоростей. Если скорость Свихарта джозефсоновского перехода  $V_s$ , меньше скорости Свихарта волновода  $V_{sw}$ , то эти области таковы: первая из них – область скоростей так называемого медленного вихря, простирающаяся от нуля до граничной скорости  $v_0 < V_s$ , вторая – область скоростей быстрого вихря, простирающаяся от  $V_{sw}$  до граничной скорости  $v_1 > V_{sw}$ . Отметим, что значения граничных скоростей зависят как от величин

скоростей Свихарта перехода и волновода, так и от константы связи между переходом и волноводом.

В **разд. 1.3** рассмотрено свободное движение  $2\pi$ -кинка. Вычислены потери энергии  $2\pi$ -кинка вследствие омической диссипации энергии как в несверхпроводящих слоях, так и в сверхпроводниках. Последние возникают из-за наличия в сверхпроводниках нормальных электронов. Показано, что омические потери энергии могут быть компенсированы посредством пропускания через слоистую структуру однородного транспортного тока. Найдена сила Лоренца, действующая на вихрь при пропускании транспортного тока. В **разд. 1.4** и **1.5** для медленного и быстрого вихрей, соответственно, вычислена плотность транспортного тока, необходимого чтобы компенсировать омические потери энергии и поддержать равномерное движение. Показано как изменяется динамика медленного и быстрого вихря по мере приближения волновода к джозефсоновскому переходу.

В **главе 2** рассматривается слоистая структура, состоящая из джозефсоновского перехода, магнитосвязанного с двумя волноводами, расположенными по обе стороны от него [A1,A8]. В **разд. 2.1** получено уравнение для разности фаз волновых функций, разделенных джозефсоновским переходом. В **разд. 2.2** изучено свободное равномерное движение  $2\pi$ -кинка в рассматриваемой структуре. Показано, что такое движение возможно тогда когда скорость  $2\pi$ -кинка лежит в одной из трех областей конечной ширины. В этом проявляется отличие слоистой структуры с двумя волноводами от структуры с одним волноводом, рассмотренной в первой главе. В **разд. 2.3** изучено пространственное распределение магнитного поля  $2\pi$ -кинка. Показано, что наличие в слоистой структуре волноводов существенно искажает пространственное распределение магнитного поля. Структура магнитного поля существенно изменяется в зависимости от соотношения скоростей Свихарта джозефсоновского перехода и волновода и скорости движения вихря. Например, на рис. 1 представлена структура магнитного поля медленного вихря. График построен для случая, когда скорость движения вихря  $v$  меньше

скорости Свихарта джозефсоновского перехода, которая в свою очередь меньше скоростей Свихарта волноводов. Вихрь на рис. 1 движется вдоль оси  $Oz$ , джозефсоновский переход находится в плоскости  $x = 0$ , а волноводы – по обе стороны от него, в плоскостях  $x = \pm \lambda$ , где  $\lambda$  – лондоновская длина сверхпроводников. Можно видеть, что магнитное поле медленного вихря локализовано в основном около джозефсоновского перехода. На рис. 2 представлено распределение магнитного поля быстрого вихря, скорость которого находится вблизи скорости Свихарта волновода, который на рисунке находится в плоскости  $x = -\lambda$ . Можно видеть, что поле быстрого вихря в основном локализовано вблизи этого волновода.

Опираясь на сведения о распределении магнитного поля, в **разд. 2.4** изучена возможность вынужденного движения вихря. Показано, что потери энергии вследствие омической диссипации в несверхпроводящих слоях могут быть компенсированы посредством пропускания транспортного тока через слоистую структуру. Найдена плотность этого тока. Предсказан эффект обратного тока. Этот эффект иллюстрирует рис. 3, из которого видно, что на графике зависимости плотности транспортного тока, необходимого для поддержания равномерного движения вихря, от скорости вихря появился участок, где ток отрицателен. График построен для случая, когда скорость Свихарта перехода  $V_s$  больше скорости Свихарта первого волновода  $V_{s1}$ , но меньше соответствующей скорости второго волновода  $V_{s2}$ . Это означает, что для поддержания равномерного движения вихря в обычном направлении, со скоростью несколько меньшей  $V_{s1}$ , необходимо изменить направление протекания транспортного тока. Причину данного эффекта можно понять из рис. 4, где представлена структура магнитного поля вихря, движущегося со скоростью при которой на рис. 3 происходит изменение знака тока. Согласно рис. 3, эта область скоростей вплотную примыкает к скорости Свихарта первого волновода. Из рис. 4 видно, что большая часть магнитного поля под влиянием расположенного в плоскости  $x = -\lambda$  волновода изменила свой знак на противоположный, что привело к изменению знака силы Лоренца,

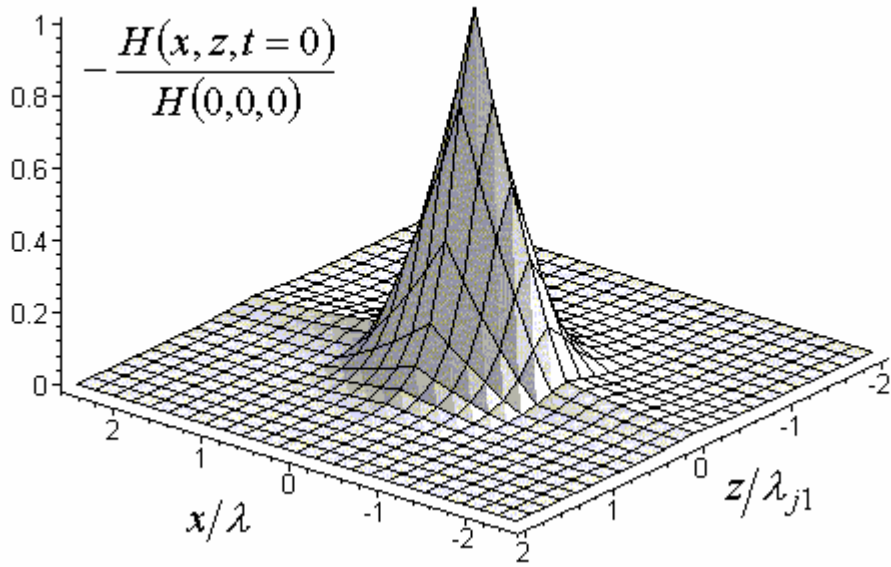


Рис. 1. Структура магнитного поля медленного вихря.  $\lambda_{j1} = V_{s1}/\omega_j$ , где  $V_{s1}$  – скорость Свихарта первого волновода, а  $\omega_j$  – джозефсоновская частота.

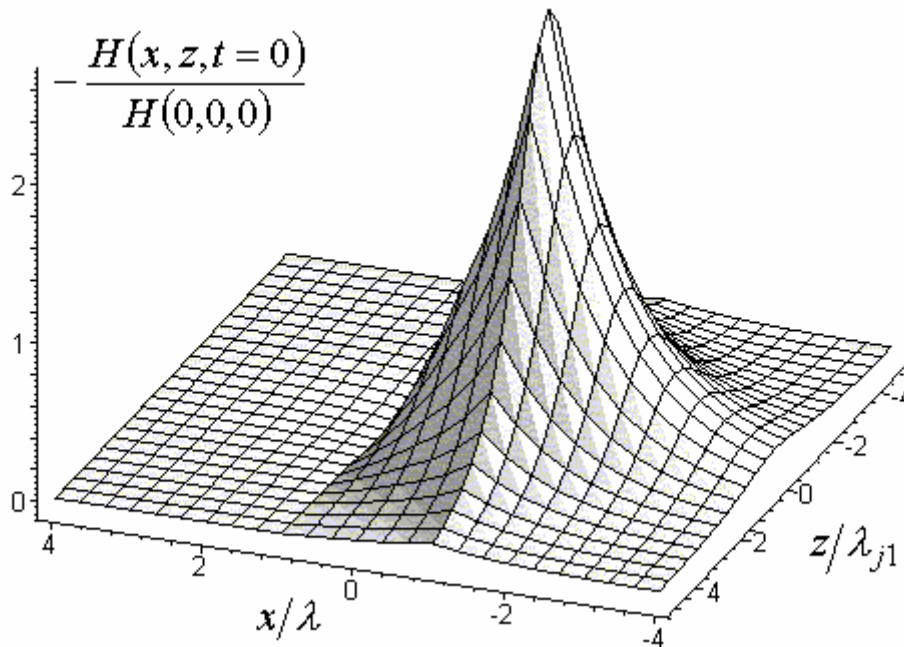


Рис. 2. Структура магнитного поля быстрого вихря.

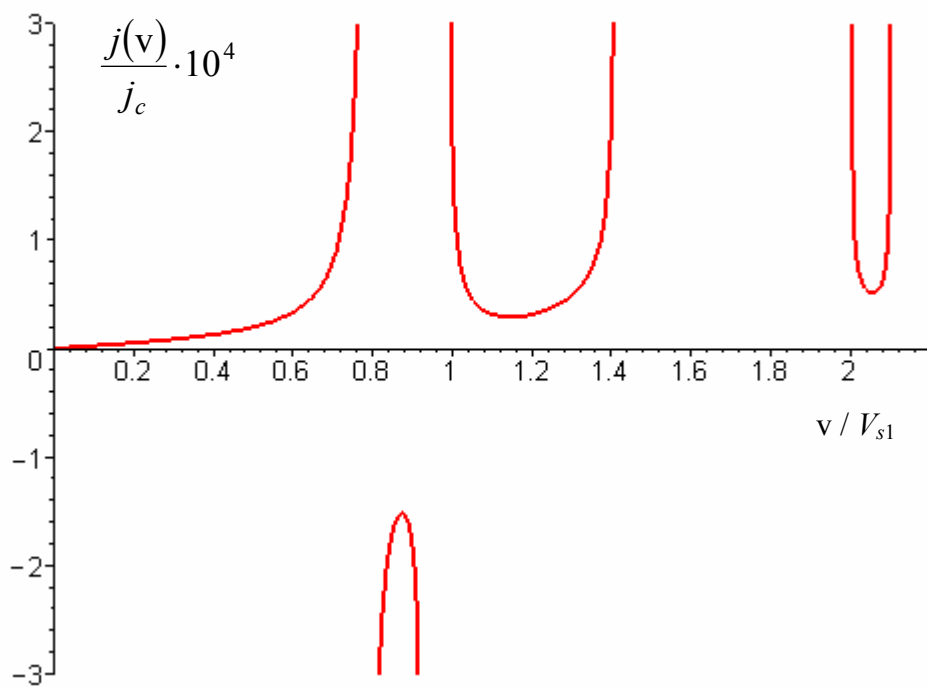


Рис. 3. Зависимость плотности транспортного тока от скорости вихря в случае, когда  $V_s = 3V_{s1} / 2$ ,  $V_{s2} = 2V_{s1}$ .

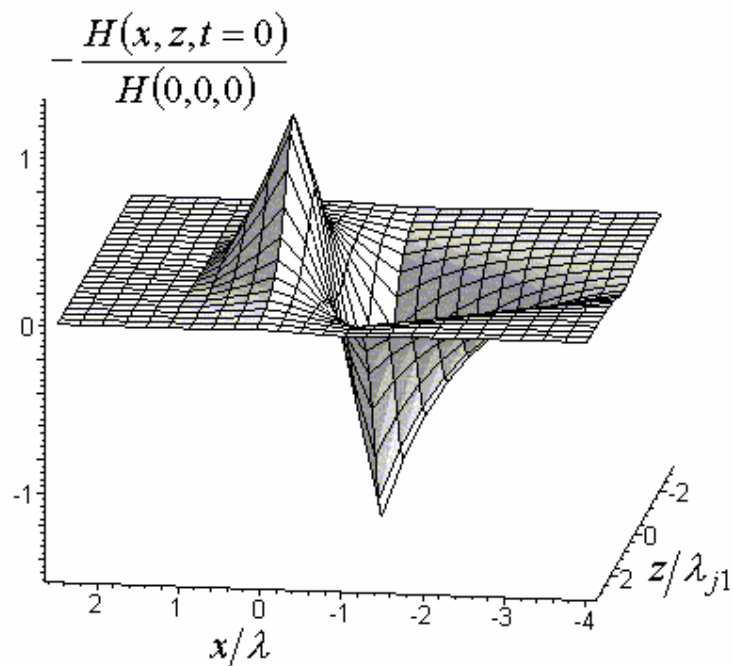


Рис. 4. Структура магнитного поля вихря, приводящего к эффекту обратного тока.

действующей на вихрь.

В главе 3 рассмотрены потери энергии при движении  $2\pi$ -кинка в слоистой структуре джозефсоновский переход – волновод, вследствие черенковского излучения им волн Свихарта [A4,A7,A10,A11]. В разд. 3.1 представлена модель Сакаи-Татено-Педерсена, в рамках которой проводится изучение черенковских потерь. В разд. 3.2 в модели Сакаи-Татено-Педерсена рассмотрено вынужденное движение  $2\pi$ -кинка и найдены потери энергии вихря вследствие омической диссипации в несверхпроводящих слоях и сверхпроводниках. В разд. 3.3 без предположения о слабой связи джозефсоновского перехода и волновода, получено приближенное аналитическое выражение для зависимости от скорости вихря плотности транспортного тока, позволяющего компенсировать потери на черенковское излучение. Проведено сравнение омических и черенковских потерь. Показано, что сильная связь джозефсоновского перехода и волновода приводит к тому, что осцилляции тока, обусловленные черенковскими потерями быстрого вихря, можно сравнительно легко различить на фоне вкладов в ток, связанных с омическими потерями в несверхпроводящих слоях и в сверхпроводящих электродах. Влияние сильной связи описано и для медленного вихря. Оно приводит к смещению пиков на кривой  $j(v)$  в область скоростей меньших скорости Свихарта джозефсоновского перехода. Полученные как для медленного, так и для быстрого вихрей выражения указывают на значительный рост черенковских потерь по мере увеличения скорости вихря. Вместе с тем, используемое в этом разделе приближение не позволяет достаточно приблизиться к максимально возможным скоростям движения медленного и быстрого вихрей. В разд. 3.4 реализован выход за рамки приближенного аналитического описания черенковских потерь и численно получена зависимость плотности транспортного тока от скорости вихря при скоростях, сколь угодно близких к максимально возможным скоростям как для медленного, так и для быстрого вихрей [A7]. Это позволило изучить движение вихрей со скоростями, при которых черенковские потери

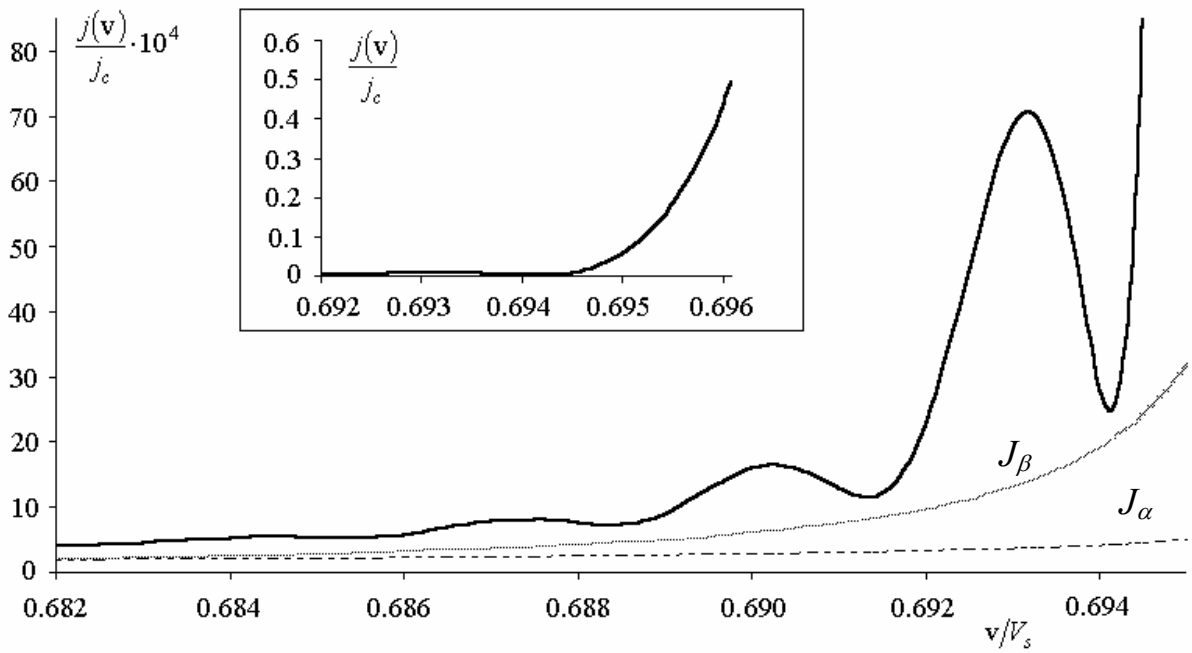


Рис. 5. Зависимость плотности транспортного тока от скорости медленного вихря Толстая кривая описывает суммарный ток, кривая  $J_\alpha$  – омические потери в сверхпроводниках, а кривая  $J_\beta$  – омические потери в несверхпроводящих слоях. При этом  $L = \lambda / 3$ ,  $V_{sw} = 5 V_s$ .

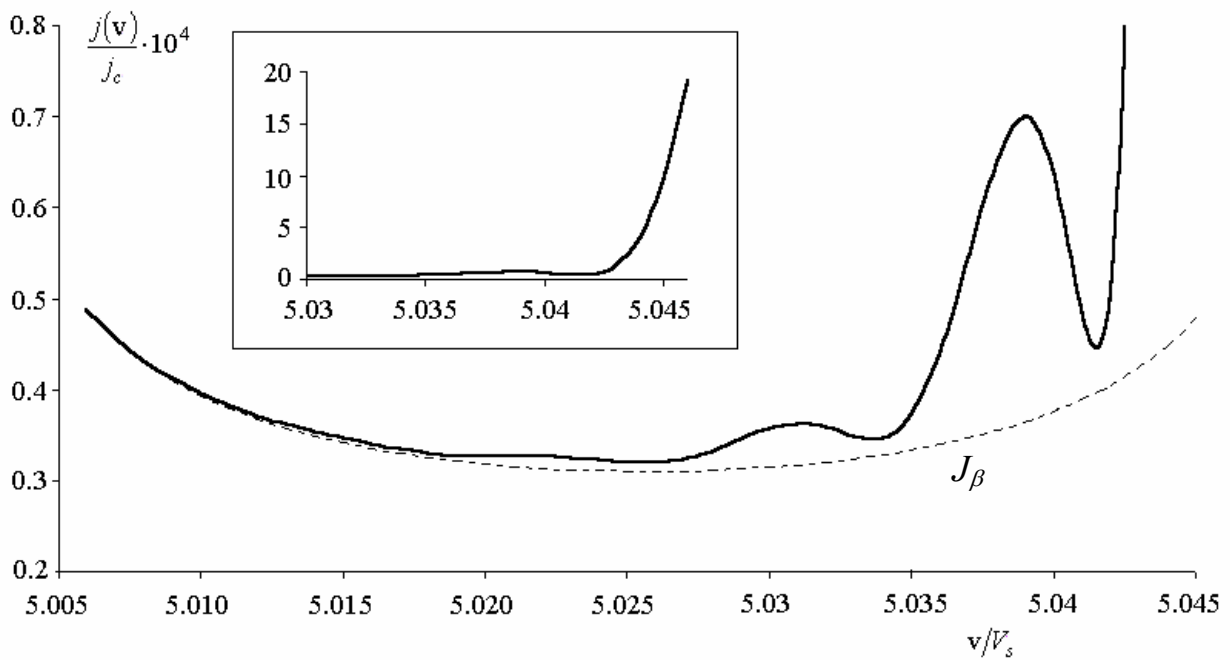


Рис. 6. Та же функция, что и на рис. 5, но для быстрого вихря. Кривая  $J_\beta$  описывает потери вследствие омической диссипации в несверхпроводящих слоях.

существенно превышают омические. На рис. 5 представлен график зависимости плотности транспортного тока от скорости медленного вихря для сравнительно сильной связи перехода с волноводом – расстояние от волновода до перехода  $L = \lambda / 3$ . Толстая линия описывает суммарный ток, аддитивно учитывающий как омическую, так и черенковскую диссипацию. На рис. 5 можно видеть осцилляции суммарного тока, обусловленные черенковскими потерями. На вставке показана область скоростей вблизи скорости, предельной для медленного вихря. Можно видеть значительный рост черенковских потерь в этой области скоростей. На рис. 6 представлен график зависимости плотности транспортного тока от скорости быстрого вихря, также для  $L = \lambda / 3$ , что отвечает сравнительно сильной связи волновода с переходом. На рис. 6 также можно видеть черенковские осцилляции и значительный рост черенковских потерь в области скоростей вблизи предельной. Таким образом, как для медленного, так и для быстрого вихря, роль черенковских потерь становится определяющей в том случае, когда скорость движения вихря близка к предельной. Показано, что усиление связи между волноводом и джозефсоновским переходом позволяет облегчить наблюдение черенковских осцилляций тока.

**В Приложении** рассмотрено влияние черенковских потерь на связь тока со скоростью  $2\pi$ -кинка в изолированном джозефсоновском переходе [A5,A9]. Показано, что для одиночного джозефсоновского перехода, как и в слоистой структуре с волноводом, черенковские потери играют существенную роль в области скоростей вблизи предельной и могут наблюдаться в условиях современного эксперимента.

**В Заключение** изложены основные результаты диссертации:

1. Для слоистой структуры, представляющей собой джозефсоновский переход, магнитосвязанный с плоским волноводом, описаны вихревые состояния поля, представляющие собой единичный вихрь, цепочку единичных вихрей и кноидальные волны, реализующиеся в разных областях скоростей.
2. Для слоистой структуры, представляющей собой джозефсоновский переход,



магнитосвязанный с плоским волноводом, изучено свободное и вынужденное движение  $2\pi$ -кинка. Найдены потери энергии вихря из-за омической диссипации. Установлена зависимость от скорости вихря плотности транспортного тока, необходимого для компенсации омических потерь и поддержания равномерного движения вихря.

3. Предсказан эффект обратного тока, заключающийся в том, что при наличии в слоистой структуре волновода, со скоростью Свихарта меньшей скорости Свихарта джозефсоновского перехода, вихрь под действием транспортного тока, протекающего через джозефсоновский переход и волновод, будет двигаться в направлении, противоположном обычному.

4. Впервые исследована динамика  $2\pi$ -кинка в слоистой структуре, представляющей собой джозефсоновский переход, расположенный между двумя волноводами. Найдены области скоростей, в которых возможно свободное движение вихря. Показано, что в такой слоистой структуре могут существовать две области скоростей так называемого быстрого вихря. Получено выражение для плотности протекающего через слоистую структуру транспортного тока, необходимого для поддержания равномерного движения вихря.

5. В модели Сакаи-Татено-Педерсена изучено влияние радиационных потерь из-за черенковского излучения волн Свихарта вихрем, движущимся в слоистой структуре из джозефсоновского перехода, магнитосвязанного с волноводом. Получено выражение для плотности транспортного тока, необходимого для компенсации радиационных потерь. Показано, что при определенных условиях, вклад черенковских потерь в действующую на вихрь силу трения может быть определяющим. Установлено, что влияние черенковского эффекта в слоистой структуре тем сильнее, чем сильнее связь между волноводом и джозефсоновским переходом.

## Литература

1. A. Barone. Radiation interaction with matter in the superconducting state. *Journal of Superconductivity: Incorporating novel magnetism*, v. 13, N. 5, P. 809 – 815 (2000).
2. А.Н. ЛЫКОВ. *Генерация электромагнитного излучения сверхпроводящими структурами. Проблемы и перспективы*. Препринт ФИАН № 71. М. 1984, 20 с.
3. M.B. Mineev, G.S. Mkrtchyan, V.V. Shmidt. On some effects in a system of two interacting Josephson junctions. *Journal of Low Temperature Physics*, v. 45, N. 5 – 6, P. 497 – 505 (1981).
4. Yu. S. Kivshar and B.A. Malomed. Dynamics of fluxons in a system of coupled Josephson junctions. *Physical Review B*, v. 37, N.16, P.9325 – 9330 (1988).
5. K.L. Ngai. Interaction of ac Josephson currents with surface plasmons in thin superconducting films. *Physical Review*, v. 182, N. 2, P. 555 – 568 (1969).
6. S. Sakai, P. Bodin, N.F. Pedersen. Fluxons in thin-film superconductor-insulator superlattices. *Journal of Applied Physics*, v. 73, N. 5, P. 2411 – 2418 (1993).
7. A.V. Ustinov, T. Doderer, H. Kohlstedt, S.G. Lachenmann, D. Quenter. Observation of a spatially-coherent resonance mode in stacked Josephson junctions. *Physics Letters A*, v. 201, P. 375 – 380 (1995).
8. A. Wallraff, E. Goldobin, A.V. Ustinov. Numerical analysis of the coherent radiation emission of two stacked Josephson flux-flow oscillators. *Journal of Applied Physics*, v. 80, N. 11, P. 6523 – 6535 (1996).
9. R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, P. Müller. Intrinsic Josephson effects in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ . *Physical Review Letters*, v. 68, N. 15, P. 2394 – 2397 (1992).
10. Yu. I. Latyshev, J.E. Nevelskaya, P. Monceau. Dimensional crossover for intrinsic dc Josephson effect in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  2212 single crystal whiskers. *Physical Review Letters*, v. 77, N. 5, P. 932 – 935 (1996).
11. L.N. Bulaevskii, D. Domingues, M.P. Maley, A.R. Bishop, O.K.C. Tsui, N.P. Ong. Linewidth of *c*-axis plasma resonance in Josephson-coupled superconductors. *Physical Review B*, v. 54, N. 10, P. 7521 – 7535 (1996).
12. V.V. Kurin, A.V. Yulin. Radiation of linear waves by solitons in a Josephson

- transmission line with dispersion. *Physical Review B*, v. 55, N. 17, P. 11659 – 11669 (1997).
13. A.S. Malishevskii, V.P. Silin, S.A. Uryupin. Fast Josephson vortex. *Physics Letters A*, v. 306, N. 2-3, 153 (2002).
14. E. Goldobin, A. Wallraff, N. Thyssen, A.V. Ustinov. Cherenkov radiation in coupled long Josephson junctions. *Physical Review B*, v. 57, N. 1, P. 130 – 133 (1998).
15. J. Zitzmann, A.V. Ustinov, M. Levitchev, S. Sakai. Super-relativistic fluxon in a Josephson multilayer: Experiment and simulation. *Physical Review B*, v. 66, N. 6, P. 064527 (2002).
16. G. Hechtfischer, R. Kleiner, A.V. Ustinov, P. Müller. Non-Josephson emission from intrinsic junctions in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ : Cherenkov radiation by Josephson vortices. *Physical Review Letters*, v. 79, N. 7, P. 1365 – 1368 (1997).
17. D.W. McLaughlin, A.C. Scott. Perturbation analysis of fluxon dynamics. *Physical Review A*, v.18, N.4, P.1652 – 1679 (1978).
18. Ю.М. Алиев, В.П. Силин, С.А. Урюпин. К теории нелинейных диспергирующих волн в джозефсоновских контактах. *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*, т. 5, вып. 2, с. 228 – 235 (1992).
19. Yu. M. Ivanchenko, T.K. Soboleva. Nonlocal interaction in Josephson junctions. *Physics Letters A*, v. 147, N. 1, P. 65 – 69 (1990).
20. Г.М. Лапир, К.К. Лихарев, Л.А. Маслова, В.К. Семенов. Критические токи сверхпроводящих мостиков переменной толщины. *Физика низких температур*, т. 1, вып.10, с. 1235 – 1243 (1975).
21. М.Ю. Куприянов, К.К. Лихарев, В.К. Семенов. Джозефсоновские вихри в мостиках переменной толщины. *Физика низких температур*, т. 2, вып.6, с. 706 – 718 (1976).
22. G.L. Alfimov, A.F. Popkov. Magnetic vortices in a distributed Josephson junction with electrodes of finite thickness. *Physical Review B*, v. 52, N. 6, P. 4503 – 4510 (1995).
23. G.L. Alfimov, A.F. Popkov. Nonlocal electrodynamics of fluxons and nonlinear

plasma oscillations in a distributed Josephson junction with electrodes of arbitrary thickness. *Physical Review B*, v. 73, N. 21, P. 214512 (2006).

24. A. Gurevich. Nonlocal Josephson electrostatics and pinning in superconductors. *Physical Review B*, v. 46, N. 5, P. 3187 – 3190 (1992).

25. Ю.М. Алиев, В.П. Силин. О нелокальной джозефсоновской электродинамике. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, т. 104, вып. 1, с. 2526 – 2537 (1993).

26. Г.Л. Алфимов, В.П. Силин. Мелкомасштабные пространственно-периодические джозефсоновские структуры. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, т. 106, вып. 2, с. 671 – 684 (1994).

27. В.П. Силин, С.А. Урюпин. Вихри Абрикосова-Джозефсона в слоистой туннельной структуре. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, т. 108, вып. 6, с. 2163 – 2185 (1995).

28. R.G. Mintz, I.B. Snapiro. Josephson-vortex Cherenkov radiation. *Physical Review B*, v. 52, N. 13, P. 9691 – 9695 (1995).

29. В.П. Силин, А.В. Студенов. О квантованности движения и черенковской структуре джозефсоновского вихря. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, т. 117, вып. 6, с. 1230 – 1241 (2000)

30. S. Sakai, N.F. Pedersen. Analytic solution for fluxon in a long Josephson junction with surface losses. *Physical Review B*, v. 34, N. 5, P. 3506 – 3509 (1986).

31. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин. Свойства быстрого джозефсоновского вихря. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, т. 125, вып. 3, с. 673 – 683 (2004).

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

A1. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин, С.Г. Успенский. Свойства вихрей джозефсоновского перехода, окруженного двумя сверхпроводящими волноводами. *Физика твердого тела*, т. 46, вып. 9, с. 1544 – 1556 (2004).

A2. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин, С.Г. Успенский. Вихревые структуры джозефсоновского перехода и магнитосвязанного с ним волновода.

Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, с. 21 – 25, 2005.

A3. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин, С.Г. Успенский. О влиянии черенковских потерь на связь тока со скоростью вихря в джозефсоновском переходе, связанном с волноводом. Физика твердого тела, т. 47, вып. 10, с. 1737 – 1744 (2005).

A4. A.S. Malishevskii, V.P. Silin, S.A. Uryupin, S.G. Uspenskii. On the possibility of experimental observation of Cherenkov losses effect on the Josephson vortex induced motion. Physics Letters A, v. 348, P. 361 – 364 (2006).

A5. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин, С.Г. Успенский. Черенковские потери в джозефсоновском переходе. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, с. 35 – 41, (2006).

A6. A.S. Malishevskii, V.P. Silin, S.A. Uryupin, S.G. Uspenskii. Fast Josephson vortex: free and induced motion. Bulgarian Journal of Physics, (2006) in press.

A7. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин, С.Г. Успенский. О резком увеличении черенковских потерь джозефсоновских вихрей, движущихся под действием транспортного тока. Физика твердого тела, (2007) в печати.

A8. С.Г. Успенский, А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин. Вынужденное движение вихрей в джозефсоновском переходе, расположенном между двумя волноводами. Сборник расширенных тезисов первой международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС'04)», стр. 331 – 332, Москва – Звенигород (2004).

A9. С.Г. Успенский, А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин. О возможности экспериментального обнаружения черенковских потерь джозефсоновского вихря. Сборник тезисов докладов конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», стр. 283 – 284, Москва (2006).

A10. С.Г. Успенский, А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин. О резком увеличении черенковских потерь вихрей, движущихся под действием транспортного тока. Сборник трудов второй международной конференции

«Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС'06)», с.370 – 371. М. ФИАН (2006).

A11. А.С. Малишевский, В.П. Силин, С.А. Урюпин, С.Г. Успенский. Черенковские потери джозефсоновского вихря. Труды 34 совещания по физике низких температур (НТ – 34), т.2, с. 232. Ростов-на-Дону; изд-во РГПУ (2006).