

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

на правах рукописи

Безотосный Павел Игоревич

**ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА И НЕОДНОРОДНОСТИ НА
КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТОНКИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
ПЛЕНОК И СЛОИСТЫХ СТРУКТУР**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2021

**Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук**

Научный руководитель: Лыков Александр Николаевич,
д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник,
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Официальные оппоненты:

Чулкова Галина Меркурьевна,
д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова

Красноперов Евгений Павлович,
д.ф.-м.н., профессор, начальник лаборатории,
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Григорьев Павел Дмитриевич,
д.ф.-м.н., старший научный сотрудник,
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН

Защита состоится «16» марта 2022 года в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.01.02 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета


_____ Руднев И.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Тонкие пленки из сверхпроводящих материалов представляют большой интерес ввиду широкого спектра их применения. В настоящее время они активно используются при создании детекторов различного типа [1,2]. В перспективе тонкие сверхпроводящие пленки могут быть использованы для формирования элементной базы для сверхпроводниковой электроники [3] и отказоустойчивой сверхпроводниковой топологической электроники [4,5]. Поэтому исследование критических параметров сверхпроводящих пленок (критическая температура, критический ток и магнитные поля) не теряет своей актуальности.

Из измерений макроскопических параметров сверхпроводника (например, проводимости, намагниченности и т.д.) можно получить информацию о микроскопической природе материала. Сегодня тонкие пленки также нашли свое применение при исследовании фундаментальных сверхпроводящих свойств [6]. Однако стоит учитывать, что свойства пленок сильно зависят от их границ, и поэтому могут сильно отличаться от наблюдаемых для объемного материала. Чтобы нивелировать в расчетах данные отличия, ведется разработка моделей, которые позволят описывать фундаментальные свойства сверхпроводника независимо от его формы.

При использовании большинства современных технологий напыления пленки получаются неоднородными по толщине. Например, из-за различия периодов решеток подложки и напыляемого сверхпроводника на границе их соприкосновения образуется слой со свойствами, отличающимися как от свойств подложки, так и напыляемого материала. Хотя элементный состав данного слоя может быть схожим с элементным составом сверхпроводника, атомы в нем могут быть разупорядочены [7]. Также похожее разупорядочение наблюдается на поверхности пленки, которая контактирует с внешней средой. Исходя из этого для корректного теоретического описания свойств реальных сверхпроводящих пленок необходимо учитывать изменение их параметров по толщине.

Теория Гинзбурга-Ландау (далее ГЛ) [8] как и прежде не теряет своей значимости и актуальности. Она позволяет учитывать как особенности электродинамики сверхпроводников, так и квантовую природу самого явления сверхпроводимости. Многолетнее использование данной теории показало ее применимость к сверхпроводникам и позволило спрогнозировать ряд их особенностей.

Стоит заметить, что аналитическое решение уравнений ГЛ возможно в очень ограниченном числе случаев, как правило, при использовании дополнительных допущений. Одним из таких допущений является то, что параметр порядка не изменяется внутри сверхпроводника. При рассмотрении сверхпроводящих пленок такое допущение справедливо только при их толщинах много меньше длины когерентности ξ , поскольку эта длина является характерным размером, на котором изменяется параметр порядка. Реальные сверхпроводящие пленки, как правило, имеют толщину порядка ξ и больше. В таких пленках необходимо учитывать изменение параметра порядка по толщине. Это, в свою очередь, усложняет решение системы уравнений ГЛ, и требуется применение численных методов. В случае пленок толщиной во много раз больше ξ их можно считать объемным материалом, где влияние границ на сверхпроводящие свойства несущественно. Поэтому описание пленок толщиной несколько ξ востребовано с практической точки зрения, при этом в них наиболее ощутимо проявляются эффекты, связанные с влиянием границ и неоднородности по толщине. Кроме того, в таких пленках реализуется ряд эффектов, характерных только для них, например, вихри Абрикосова, выстроенные в цепочку [9].

Сверхпроводящие объекты с размерами порядка ξ активно изучаются в настоящее время [10–13]. В данной диссертации в рамках теории ГЛ проведено численное моделирование свойств сверхпроводящих пленок толщиной порядка ξ . При этом были предложены методы расчета критических параметров тонких пленок, учитывающие как влияние внешней среды и подложки, на которой они выращены, так и неоднородное распределение свойств по их толщине, связанное с особенностями технологии напыления пленок. Расчеты были проведены как в одномерном случае, соответствующему мейснеровскому состоянию сверхпроводника, так и в квазидвумерном, описывающему вихревое состояние. Было проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Дополнительно было проведено теоретическое исследование слоистых сверхпроводящих структур, состоящих из слоев толщиной порядка ξ . Было показано, как границы раздела между слоями и неоднородность слоев по толщине влияют на критические параметры слоистых структур.

Целью работы является исследование влияния граничащих несверхпроводящих слоев, а также неоднородности распределения свойств по толщине на критическое состояние тонких сверхпроводящих пленок и слоистых структур из таких пленок. Для этого были решены следующие задачи:

1) В рамках теории ГЛ исследовано влияние подложки и других граничащих слоев (например, окислов на поверхности пленки) на критические параметры пленок толщиной порядка ξ . Установлено, как данные параметры ведут себя при изменении температуры и толщины пленки с учетом влияния подложки и других внешних граничащих с пленкой слоев и без него. Определены эффекты, связанные с влиянием внешних граничащих слоев и подложки на сверхпроводящие свойства пленки.

2) С помощью численных расчетов с использованием теории ГЛ изучено влияние неоднородности свойств по толщине сверхпроводящей пленки толщиной порядка ξ на ее критические параметры. Проанализированы температурные зависимости критических параметров неоднородных пленок.

3) Проведено сравнение результатов расчетов критических параметров тонких неоднородных сверхпроводящих пленок, учитывающих влияние подложки и граничащих с пленкой слоев, с доступными экспериментальными данными.

4) Исследовано критическое состояние слоистых сверхпроводящих структур. Исследование проведено в рамках теории ГЛ, при этом учтено влияние границ раздела между слоями и их неоднородности на сверхпроводящие свойства слоистых структур.

Научная новизна

1) Впервые в рамках теории ГЛ проведено теоретическое исследование влияния подложки и других граничащих слоев (например, окислов на поверхности пленки) на сверхпроводящие свойства пластин толщиной порядка ξ . Влияние границ задается через обобщенные граничные условия на параметр порядка [14]. Проведено теоретическое и экспериментальное исследования сверхпроводящего состояния пленки с различными границами.

2) Впервые разработан метод моделирования критических параметров неоднородных по толщине сверхпроводящих пленок. С использованием предложенного метода проанализировано, как себя ведут критические параметры пластин с различной степенью неоднородности.

3) Впервые разработан метод исследования слоистых сверхпроводящих структур, учитывающий влияние границ между слоями и неоднородность слоев по толщине на сверхпроводящие свойства структур. Впервые с использованием разработанного метода проведено исследование критического состояния слоистых сверхпроводящих структур.

Практическая значимость работы

Теория ГЛ широко используется для анализа свойств сверхпроводящих кабелей, магнитов на их основе и других устройств. Поэтому развитие численных методов решений уравнений ГЛ для разных задач имеет важное практическое значение. Кроме того, тонкие сверхпроводящие пленки являются базовым компонентом при создании датчиков различного вида. В частности, датчиков для фиксации отдельных фотонов [1,2]. Теория ГЛ успешно используется для моделирования их работы.

Еще одной важной областью приложения результатов данной работы является аналитическая база бесконтактных методов исследования сверхпроводников. В основе большинства методов такого рода лежит теория Лондонов [15,16]. Стоит отметить, что данная теория [17] не предназначена для описания вихревого состояния сверхпроводников, в то время как зачастую исследуются сверхпроводники второго рода. Для такой аналитической базы хорошо подходят именно уравнения теории ГЛ.

Результаты диссертационной работы востребованы при проектировании устройств из сверхпроводящих пленок, т.к. улучшают оценки их параметров. Кроме того, разработанные методы могут быть востребованы для корректного определения микроскопических параметров сверхпроводящих материалов, из которых произведена пленка, в том числе, если такие параметры определены бесконтактными методами.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Метод моделирования критического состояния сверхпроводящих пленок и слоистых структур, учитывающий влияние границ пленки/сверхпроводящих слоев в структуре на их сверхпроводящее состояние.
- 2) Результаты расчетов критических параметров, проведенных с учетом влияния границ пленки на ее свойства, а также границ между слоями на сверхпроводящее состояние всей слоистой структуры, показывающие подавление сверхпроводящего состояния пленок/слоистых структур граничащими/буферными слоями.
- 3) Метод моделирования сверхпроводящего состояния неоднородной пленки, базирующийся на обобщенных уравнениях Гинзбурга-Ландау.
- 4) Результаты моделирования сверхпроводящего состояния неоднородных пленок, показывающие улучшение оценки критического тока по сравнению с током распаривания, полученным в классической теории ГЛ.
- 5) Разработанный метод моделирования критических параметров сверхпроводящих пленок, учитывающий толщину и свойства приповерхностного слоя с отличающимися сверхпроводящими свойствами.

6) Метод моделирования сверхпроводящего состояния слоистых структур с учетом влияния границ слоев и их неоднородности.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается их воспроизводимостью, согласием с полученными ранее результатами аналитических и численных расчетов, а также согласием с экспериментальными данными.

Корректность моделирования в рамках созданных программ для ЭВМ проверялась расчетами для описанных в литературе предельных случаев:

- для широко представленного в статьях и учебниках случая ультратонких пленок, допускающего постоянство параметра порядка по толщине пластины;
- для описанного ранее численными методами случая однородной пленки, не учитывающего влияние граничных слоев на ее сверхпроводящее состояние.

В обоих случаях созданные программы для ЭВМ получили результаты, полностью совпадающие с результатами других авторов.

Апробация работы

По итогам данной работы было представлено 22 доклада на международных и всероссийских конференциях: на III Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (Россия, г. Звенигород, 2008 г.); V Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (Россия, п. Малаховка, Московская область, 2015 год); Научной сессии НИЯУ МИФИ-2008, 2009, 2015 (Россия, г. Москва); III, IV, V, VI, VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2017, 2018, 2019, 2020, 2021» (НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия); XII, XIII, XV, XVII Конференции «Сильно-коррелированные электронные системы и квантовые критические явления» (ИФВД, г. Троицк, Россия, 2014, 2015, 2017, 2019 гг.); IV, VI Международной молодежной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, 2015, 2017 гг.); XIV, XV Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе (НИЦ Курчатовский институт, г. Москва, Россия, 2016, 2017 гг.); Международной научной конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017» (МГУ, г. Москва, Россия, 2017 г.); V Всероссийской конференции молодых ученых (ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия, 2008 г.); 7-ой Всероссийской конференции молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение» имени Ю. В. Дубровского (ИПТМ РАН, г. Черноголовка, Россия, 2017 г.);

конференции по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению, посвященной 50-летию исследовательского реактора ИРТ (НИЦ Курчатовский институт, г. Москва, Россия, 2007 г.).

Личный вклад автора

Все результаты, описанные в диссертационной работе, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 11 статей в журналах, индексируемых в международных системах цитирования WoS и/или Scopus и соответствующих ее специальности. Полный список публикаций приведен в конце автореферата (ссылки A1-A11).

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 114 наименования. Объем диссертации 104 страницы, в том числе 71 рисунок и 3 таблицы.

Краткое содержание диссертации

В первой главе рассмотрены основные работы в выбранной для диссертации области науки. Акцент сделан на трудах, описывающих различные объекты и структуры в рамках теории ГЛ. При этом отмечены как работы, в которых расчеты проведены аналитически, так и работы, где решение уравнений ГЛ осуществляется численными методами. Отражены основные современные достижения в описании сверхпроводящих структур в рамках теории ГЛ.

Кроме того, в главе рассмотрен вопрос о применяемых в настоящее время методах обработки экспериментальных данных при использовании бесконтактных и других методов определения параметров сверхпроводящих структур, в том числе в виде пленок.

Во второй главе рассмотрен вопрос о роли в теории ГЛ граничных условий общего вида на параметр порядка, описывающих влияние границ (граничащих слоев) на сверхпроводящие структуры. Граничное условие общего вида на параметр порядка было получено в работе [14] исходя из принципа минимума свободной энергии, и оно имеет вид:

$$\vec{n} \left(-\nabla + \frac{2ei}{c\hbar} A \right) \Psi \Big|_s = \frac{1}{\Lambda} \Psi_s, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, c – скорость света в вакууме, $\hbar$ – постоянная Планка, $\vec{n}$ – вектор нормали к поверхности сверхпроводника, Λ – феноменологический коэффициент размерности длины, называемый длиной экстраполяции (коэффициент Λ определяется свойствами материала, с которым граничит сверхпроводник), Ψ – параметр порядка. Стоит отметить, что значение длины экстраполяции $\Lambda = \infty$ отвечает обычно используемым граничным условиям, не учитывающим влияние границ на сверхпроводящие свойства структуры.

Роль граничного условия общего вида была исследована на примере задачи описания критического состояния тонкой сверхпроводящей пленки толщиной порядка длины когерентности ξ . Рассматривалась длинная и широкая сверхпроводящая пластина толщиной D в магнитном поле H . Вводилась декартова система координат (x, y, z) с осями y и z , направленными параллельно плоскости поверхности пластины, причем ось z направлена параллельно внешнему магнитному полю, а транспортный ток течет вдоль оси y . В качестве транспортного тока I_t использовалось произведение его плотности на толщину пластины, т. е. ток, приходящийся на единицу ширины пластины. Геометрия задачи представлена на рисунке 1. Границы пластины соответствуют $x=0$ и $x=D$.

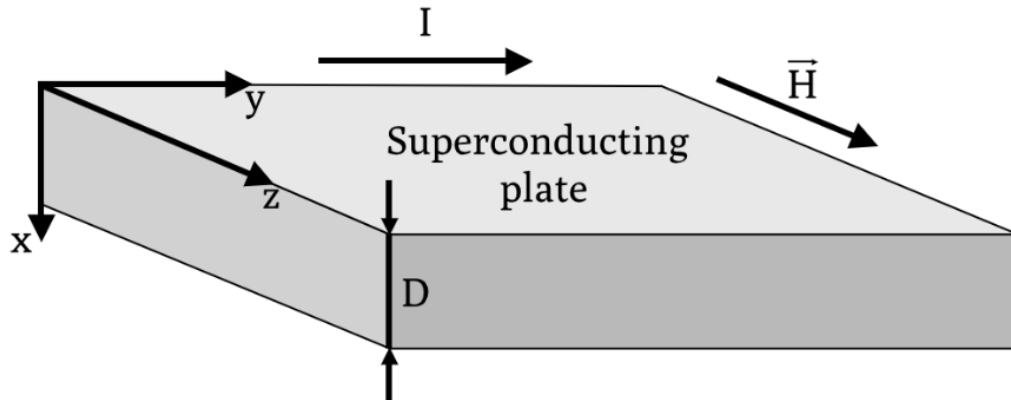


Рис.1. Геометрия задачи (сверхпроводящая пленка).

Для заданной геометрии были записаны уравнения ГЛ. Для параметра Ψ в системе уравнений ГЛ были выбраны обобщенные граничные условия в виде (1), позволяющие моделировать влияние границы на сверхпроводящие свойства пленки.

Поскольку транспортный ток I_t в пластине создает магнитное поле

$$H_I = \frac{2\pi}{c} I_t, \quad (2)$$

то полное поле вблизи одной поверхности пластины равно $H + H_I$, а вблизи другой поверхности $H - H_I$. Данные выражения задают граничные условия на вектор-потенциал в системе уравнений ГЛ.

Глубина проникновения магнитного поля λ и длина когерентности ξ зависят от температуры. Поэтому используемые для расчетов уравнения являются неявными функциями температуры и формально справедливы при любой температуре T . Однако сами уравнения Гинзбурга-Ландау применимы лишь в пределе $T \rightarrow T_c$. Как правило, при расчетах в рамках теории ГЛ используются следующие температурные зависимости, применимые вблизи критической температуры T_c :

$$\xi = \frac{\xi(0)}{\sqrt{1 - T/T_c}}, \quad \lambda = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - T/T_c}}, \quad (3)$$

где $\xi(0)$ и $\lambda(0)$ – длина когерентности и глубина проникновения магнитного поля при $T=0$.

Стоит отметить, что поставленная в данном разделе задача рассматривается как «одномерная» и должна описывать безвихривое мейснеровское состояние пластины. Однако, как было показано в [9] даже в рамках одномерной задачи возможно получение решений соответствующих наличию вихрей в пленке, поэтому в работе, в частности, были рассмотрены случаи, когда пленка находится в смешанном состоянии («квазидвумерный» случай).

Система уравнений ГЛ решалась численными методами, процедура решения подробно описана в работе [A7].

В разделе 2.2. представлены результаты расчетов зависимостей плотности критического тока от толщины пленки, полученные с использованием описанной выше модели. Расчеты были проведены для некоторой фиксированной температуре T , близкой к критической T_c .

На рис. 2 приведен график зависимости плотности критического тока от толщины пластины. Как правило, считается, что плотность критического тока не изменяется при уменьшении толщины пленки [17]. Однако для достаточно тонких пленок на эксперименте неоднократно наблюдалось уменьшение плотности критического тока. Это связывалось исключительно с ухудшением структуры образцов: сверхтонкие пленки перестают быть однородными и приобретают островковый характер. Тем не менее, результаты численного решения системы уравнений Гинзбурга-Ландау с граничными условиями общего вида с конечными L обнаруживают аналогичную зависимость плотности критического тока от толщины пластины, а для случая $L=\infty$ получается известный результат постоянства плотности критического тока с изменением толщины

пленки. Уменьшение плотности критического тока с уменьшением толщины пленки подтверждается экспериментально на пленках из ниобия [A11].

Дополнительно в разделе описаны полученные в результате моделирования распределения параметра порядка $\Psi(x)$, магнитного поля и плотности тока по толщине пленки при различных значениях транспортного тока, пропускаемого через сверхпроводящую пластину, и параллельного магнитного поля H , в котором она находится. Обсуждены расчётные зависимости критического тока сверхпроводящих пластин от величины внешнего магнитного поля.

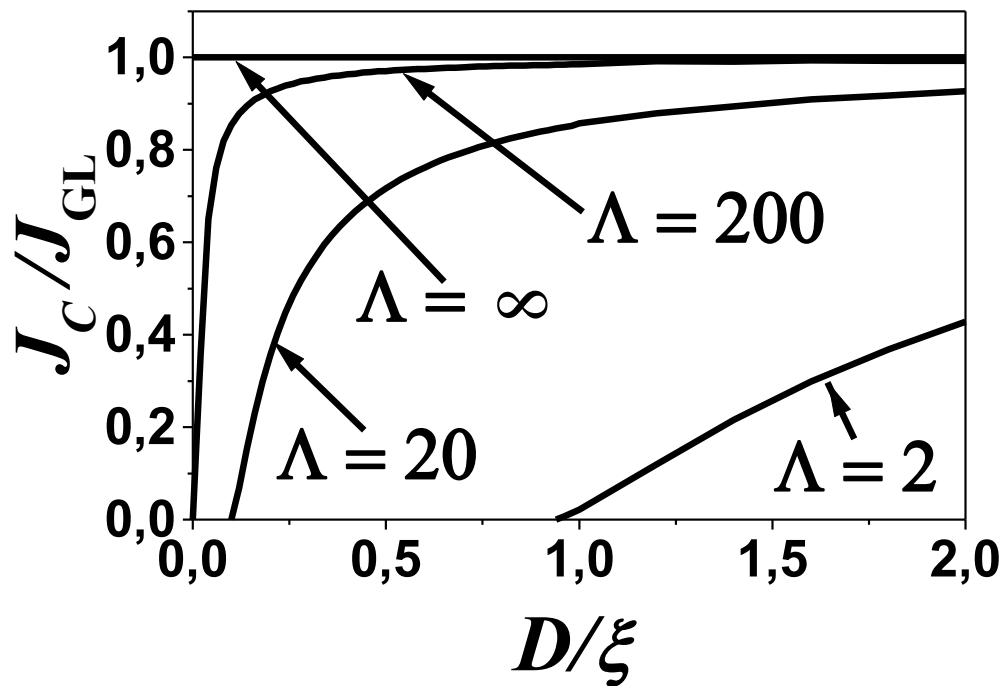


Рис.2. Зависимость плотности критического тока, нормированной на плотность тока распаривания Гинзбурга-Ландау (J_{GL}), от отношения D/ξ при различных значениях параметра границы Λ . В этом случае параметр ГЛ $\kappa = 10$, внешнее магнитное поле отсутствует.

Дополнительно по итогам расчетов были получены следующие результаты:

- установлены границы для безвихревого предела в случае пластины находящейся в параллельном поверхности магнитном поле, проанализировано влияние граничных условий на данные границы;
- установлено, что значения критического тока, полученные в результате решения системы уравнений ГЛ в случае конечных значений Λ , ближе к экспериментальным данным(см., например, [18]), чем для случая $\Lambda = \infty$;

- обнаружено наличие особенностей поведения зависимости параллельного поверхности пластины критического магнитного поля от толщины пластины, не описываемых стандартной формулой для тонких пленок [17].

Раздел 2.3. посвящен моделированию температурных зависимостей плотности критического тока и критического магнитного поля. Анализ расчетных кривых температурных зависимостей подтверждает подавление сверхпроводящего состояния (что выражается в уменьшении критических температуры, тока и магнитного поля) в пластине при учете влияния границ на ее сверхпроводящее состояние. По итогам расчетов отмечено, что характер температурных зависимостей плотности критического тока и параллельного поверхности пластины критического магнитного поля не изменяется при учете влияния границ пластины, несмотря на изменение ее критической температуры. Установлено, что для сверхпроводников второго рода на расчетной температурной зависимости критического поля, параллельного поверхности пластины, при некоторой температуре (зависящей, в том числе, и от применяемых граничных условий) наблюдается изменение вида зависимости. Данная особенность связана с началом зарождения вихрей в пленке. Такая особенность наблюдается на эксперименте [19] и может быть использована для оценки длины когерентности ξ образца.

Асимметрия зависимостей критического тока и объемной силы пиннинга от внешнего магнитного поля для пластин с различными границами исследована в **разделе 2.3**. Для целей моделирования вводится аналог объемной силы пиннинга: $F_p = I_c * h$. В рамках модели допускается, что пиннинг создается только границей пластины. Для сверхпроводников с сильной модуляцией параметра порядка такое приближение близко к реальной ситуации, так как взаимодействие вихрей с границей формирует наиболее сильные центры пиннинга. Результаты моделирования показывают, что если «поменять» границы пленки местами или, что эквивалентно, обратить транспортный ток, то значение F_p также изменится при каждом конкретном значении внешнего магнитного поля.

Описанный выше эффект связан с неравнозначностью граничных условий на магнитное поле на разных границах пластины. На одной границе поле увеличивается на величину H_I (см. (2)), а на другой уменьшается. При обращении транспортного тока знак перед H_I изменяется и границы при этом «меняются» местами. Если с точки зрения влияния на сверхпроводящие свойства пластины границы различны, то с математической точки зрения задача меняется, и должно измениться и значение критического тока и объемной силы пиннинга. Реальные сверхпроводящие пленки имеют различные границы: одна граница контактирует с подложкой, а другая с несверхпроводящим слоем (например, с окислом на поверхности пленки). Исходя из этого, стоит ожидать, что измерение

критического тока при различных направлениях транспортного тока должны дать разный результат.

Была проведена экспериментальная проверка полученного эффекта на пленках из ниобия и было получено согласие экспериментальных и теоретических данных [A11].

В третьей главе рассмотрено критическое состояние неоднородной сверхпроводящей пленки. Геометрия рассматриваемой в главе задачи аналогична представленной на рис. 1.

В разделе 3.1. обсуждается возможный вид распределений длины когерентности ξ и лондоновской глубины проникновения магнитного поля λ по толщине сверхпроводящей пластины. В диссертационной работе допускается, что длина когерентности ξ сверхпроводящей пластины уменьшается при приближении к ее границам, а глубина проникновения λ наоборот увеличивается при приближении к границам. Изменение глубины проникновения магнитного поля λ обусловлено требованием постоянства произведения $\lambda\xi$ по толщине пленки в рамках «грязного» предела. Подобное поведение лондоновской глубины проникновения согласуется с экспериментальными данными [20].

Метод моделирования сверхпроводящего состояния неоднородной пленки описывается **в разделах 3.2.-3.4.** В случае неоднородной сверхпроводящей пластины параметры сверхпроводящего состояния отличаются в различных ее частях. Рассматривается изменение параметров сверхпроводящего состояния только по толщине пленки (вдоль оси x). Считается, что в центре сверхпроводящей пленки ее параметры соответствуют материалу, из которого она сделана. При приближении к ее границам полагается, что длина свободного пробега электронов уменьшается, и это, в свою очередь, приводит в соответствии с «грязным» пределом к описанному выше изменению параметров λ и ξ . Описанное поведение длины свободного пробега электронов согласуется с результатами элементного и структурного анализа сверхпроводящих пленок [7].

Делается допущение, что зависимость длины свободного пробега от координаты x имеет вид:

$$l(x) = l_0 \left(1 - 2^{n-2} \eta \left(\frac{x}{D} - \frac{1}{2} \right)^n \right), \quad (4)$$

где l_0 - l в центре пленки, η - параметр, характеризующий степень неоднородности сверхпроводящей пластины, а n - параметр, определяющий резкость изменения сверхпроводящих свойств. Если $\eta = 0$, то $l(x) = l_0$, что соответствует случаю однородной пленки.

Будем рассматривать случаи $n = 2$ и 8. Область однородности в середине пленки (где длина свободного пробега электрона практически не изменяется) становится больше, и l изменяется более резко вблизи границ пластины с ростом n (см. Рис.3).

С использованием сделанного допущения о распределении длины свободного пробега по толщине пленки из минимизации функционала свободной энергии выведены обобщенные уравнения ГЛ, позволяющие описывать сверхпроводящее состояние неоднородной пленки. При этом учитывалась взаимосвязь коэффициентов в разложении свободной энергии и длины свободного пробега электронов.

Для исследования температурной зависимости критических параметров сверхпроводящих пленок температура может быть учтена в модели через ее связь с длиной когерентности и лондоновской глубиной аналогично описанному во второй главе диссертационной работы.

Итерационная процедура решения обобщенных уравнений ГЛ аналогична применяемой при решении уравнений, сформулированных во второй главе.

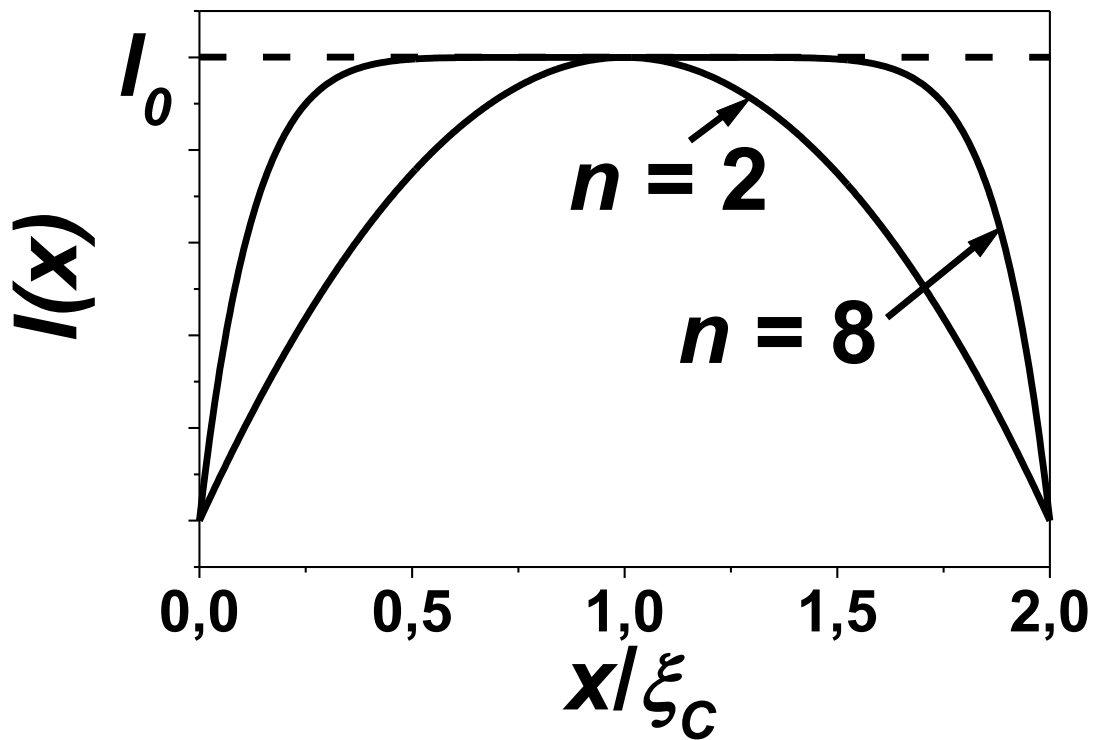


Рис.3. Модельные распределения длины свободного пробега электрона $l(x)$ по толщине сверхпроводящей пластины. Рассматривается пластина толщиной $D = 2\xi_c$, где ξ_c - длина когерентности в ее центре.

Стоит отметить, что изменение параметра n в выражении (3) позволяет учитывать в рамках предложенной модели различные толщины переходного слоя с отличными от присущим материалу в центре пленки свойствами (сравните случаи $n = 2$ и 8 на рисунке 3). Это может быть полезно, в частности, для оценки толщин переходных слоев у границ

реальных пленок путем сравнения расчетных (полученных для различных толщин переходных слоев) и экспериментальных значений критических параметров.

Проведенные численные расчеты с использованием обобщенных уравнений ГЛ для неоднородной сверхпроводящей пленки показывают, что:

- с увеличением неоднородности пленки их критическое магнитное поле значительно увеличивается, и критический ток уменьшается. Уменьшение критического тока с усилением неоднородности пленки хорошо согласуется с экспериментальными данными;

- параметр сверхпроводящего порядка в неоднородных пластинах больше, чем параметр однородной, в результате сверхпроводимость в неоднородных пластинах более стабильна в магнитном поле, что приводит к увеличению критического поля;

- критическое магнитное поле как для однородных, так и для неоднородных пленок увеличивается с уменьшением их толщины;

- объемная сила пиннинга увеличивается, и ее максимум смещается в область более сильных полей с увеличением неоднородности пленки;

- характер температурных зависимостей плотности критического тока и критического магнитного поля, параллельного поверхности пластины, вблизи критической температуры для однородной и неоднородной пластин, в целом, совпадают. При этом вид рассчитанных температурных зависимостей, полученных как для неоднородной, так и для однородной пленок, согласуется с наблюдаемым на эксперименте [19];

- критический ток пленки в отсутствии внешнего магнитного поля ощутимо возрастает при уменьшении толщины переходного слоя у ее поверхности и стремится к току однородной пластины. В свою очередь критическое магнитное поле уменьшается, но незначительно. Величина критического магнитного поля неоднородных сверхпроводящих пленок с различной толщиной переходного слоя у их границ ощутимо больше критического поля однородной пленки;

- сила пиннинга неоднородных пленок значительно уменьшается при уменьшении толщины переходного слоя у границ и стремится к силе пиннинга однородной пластины;

- критическое магнитное поле однородной пластины изменяется медленнее с увеличением ее толщины D , чем критическое поле неоднородных пластин с различной толщиной переходного слоя у их поверхностей.

В четвертой главе рассмотрено критическое состояние слоистых сверхпроводящих структур, представляющих собой набор из N сверхпроводящих пластин, разделенных несверхпроводящими слоями. Исследовано, как границы раздела между сверхпроводящими слоями (несверхпроводящие буферные слои) и неоднородность сверхпроводящих слоев по толщине влияют на критические параметры таких структур.

Геометрия задачи представлена на рис.4. Задача нахождения критического тока слоистой структуры состоит из двух этапов. Сначала на основе самосогласованного решения системы уравнений ГЛ (обобщенных для неоднородной пленки или с общими граничными условиями) находится зависимость критического тока I_c от величины внешнего магнитного поля H для отдельной пластины. Во второй части работы определяется критический ток слоистой структуры. При этом предполагается, что джозефсоновским взаимодействием между слоями можно пренебречь. Целью поиска является такое распределение транспортного тока по слоям, при котором все слои переходят в нормальное состояние одновременно.

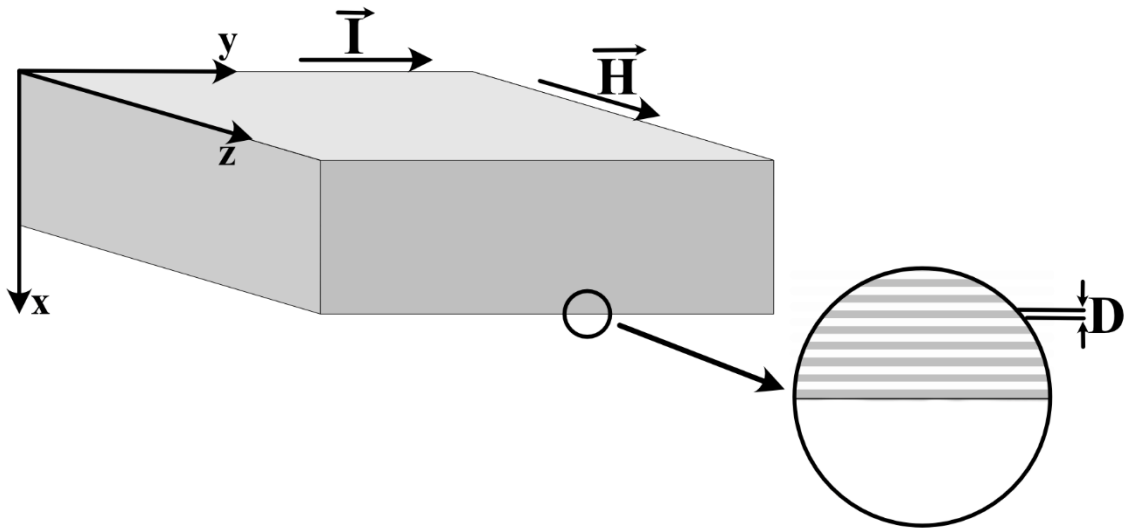


Рис.4. Геометрия задачи (слоистая структура).

Результаты моделирования с использованием разработанного метода показывают, что учет влияния границ слоев (задается граничными условиями общего вида (1) на параметр порядка в системе уравнений ГЛ) приводит к ослаблению сверхпроводящего состояния и критический ток как отдельных слоев, так и всей структуры уменьшается. Сила пиннинга также уменьшается. В случае учета неоднородности слоев величина критического тока структур зависит от внешнего магнитного поля и количества слоев. Если количество слоев и величина внешнего магнитного поля относительно небольшие, то критический ток слоистых структур с однородными слоями может превосходить критический ток структур с неоднородными слоями. С увеличением количества слоев и/или величины внешнего магнитного поля критический ток слоистых структур с неоднородными слоями начинает превышать критический ток структур с однородными слоями. Сила пиннинга в структурах с неоднородными слоями выше, чем с однородными.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1) Разработан метод, позволяющий учитывать влияние границ пленки (граничащих слоев) на ее сверхпроводящее состояние, а также границ между слоями на сверхпроводящее состояние всей слоистой структуры.

2) Показано, что влияние граничащих/буферных несверхпроводящих слоев на сверхпроводящее состояние пленки/слоистой структуры приводит к его подавлению, что выражается в уменьшении величины критического тока, магнитного поля и температуры упомянутых структур. При этом полученная в диссертации оценка критического тока дает более близкий к эксперименту результат, чем оценка, полученная из классической теории Гинзбурга-Ландау.

3) Продемонстрировано, что наблюдаемые на эксперименте для тонких сверхпроводящих пленок зависимости плотности критического тока и критической температуры от их толщины, а также асимметрия зависимостей критического тока и объемной силы пиннинга от величины внешнего магнитного поля при обращении транспортного тока объясняются влиянием граничащих слоев (подложки, окислов на поверхности) на сверхпроводящее состояние пленок.

4) Установлено, что для пленок толщиной не менее двух длин когерентности на зависимостях критического магнитного поля от температуры наблюдается особенность, связанная с проникновением вихрей в пленку. Данная особенность позволяет оценить параметры сверхпроводящего состояния пленки (в частности, длину когерентности).

5) Разработан метод моделирования критических параметров неоднородной сверхпроводящей пленки, базирующийся на решении обобщенных уравнений ГЛ, полученных из минимизации функционала свободной энергии.

6) Установлено, что критический ток неоднородной пластины соответствует наблюдаемому на эксперименте, в отличие от критического тока однородной. При этом, оценки критического магнитного поля неоднородной пленки соответствуют наблюдаемым на эксперименте для пленок с введенными дефектами.

7) Описан метод моделирования критических параметров сверхпроводящих пленок, учитывающий толщину и свойства приповерхностного слоя с отличающимися сверхпроводящими свойствами, позволяющий оценить толщину приповерхностного слоя по измеренным критическим параметрам пластины.

8) Разработан метод моделирования сверхпроводящего состояния слоистых структур, учитывающий влияние границ слоев и их неоднородности. Он позволяет получать корректные оценки критического тока реальных слоистых структур.

Список публикаций по теме диссертационной работы

[A1]. П.И. Безотосный, К.А. Дмитриева. «Моделирование критического состояния слоистых сверхпроводящих структур с неоднородными слоями» ФТТ **63**, 1471 (2021) (выставлена онлайн 9 июля 2021 г.).

Bezotosnyi P. I., Dmitrieva K. A. «Modeling of the Critical State of Layered Superconducting Structures with Inhomogeneous Layers» PHYSICS OF THE SOLID STATE **63**, 10, 1651 (2021).

[A2]. П.И. Безотосный, К.А. Дмитриева. «Температурные зависимости критических параметров неоднородных сверхпроводящих пленок» ФТТ **63**, 1035 (2021) (выставлена онлайн 13 мая 2021 г.).

Bezotosnyi P. I., Dmitrieva K. A. «Temperature Dependences of Critical Parameters of Inhomogeneous Superconducting Films» PHYSICS OF THE SOLID STATE **63**, 8, 1179 (2021).

[A3]. Bezotosnyi P. I., Dmitrieva K. A. et al. «Ginzburg–Landau Calculations for Inhomogeneous Superconducting Films» IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY **31**, № 3, 7500107 (2021).

[A4]. П.И. Безотосный, С.Ю. Гаврилкин, К.А. Дмитриева, А.Н. Лыков, А.Ю. Цветков. «Некоторые особенности расчета критических параметров неоднородных сверхпроводящих пленок в рамках теории Гинзбурга-Ландау» КСФ ФИАН № 2, 20 (2020).

Bezotosnyi P. I., Dmitrieva K. A., et al. «Some Features of Critical Parameters Calculations of Nonhomogeneous Superconducting Films Using the Ginzburg-Landau Theory» BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE **47**, № 2, 48 (2020).

[A5]. П.И. Безотосный, С.Ю. Гаврилкин, К.А. Дмитриева, А.Н. Лыков, А.Ю. Цветков. «Метод расчета критического тока неоднородных сверхпроводящих пленок» ФТТ **61**, 234 (2019).

Bezotosnyi P. I., Gavrilkin S. Yu., Dmitrieva K. A., et al. «Technique for Calculating the Critical Current of Inhomogeneous Superconducting Films» PHYSICS OF THE SOLID STATE **61**, 2, 94 (2019).

[A6]. П.И. Безотосный, С.Ю. Гаврилкин, А.Н. Лыков, А.Ю. Цветков. «О влиянии граничных условий в теории Гинзбурга-Ландау на результаты расчета критического состояния слоистых структур» КСФ ФИАН №2, 29 (2018).

Bezotosnyi P. I., Gavrilkin S. Yu., Lykov A. N., Tsvetkov A. Yu. «On the Effect of Boundary Conditions in the Ginzburg-Landau Theory on the Results of Calculations of the Critical State of Layered Structures» BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE **45**, № 2, 51 (2018).

[A7]. П.И. Безотосный, С.Ю. Гаврилкин, А.Н. Лыков, А.Ю. Цветков. «Исследование свойств сверхпроводящих пластин толщиной порядка длины когерентности ξ в рамках теории Гинзбурга-Ландау» ФТТ **57**, 1277 (2015).

Bezotosnyi P. I., Gavrilkin S. Yu., Lykov A. N., et al. «Investigation of the properties of superconducting plates with a thickness of the order of the coherence length ξ in the framework of the Ginzburg-Landau theory» PHYSICS OF THE SOLID STATE **57**, 7, 1300 (2015).

[A8]. Bezotosnyi P. I., Gavrilkin S. Yu., Lykov A. N., Tsvetkov A. Yu. «Calculation of the parameters for a superconducting thin plate within Ginzburg-Landau theory» Physics Procedia **71**, 389 (2015).

[A9]. П.И. Безотосный, С.Ю. Гаврилкин, А.Н. Лыков, А.Ю. Цветков. «Расчет температурных зависимостей критического поля и плотности критического тока для сверхпроводящей пластины в рамках теории Гинзбурга-Ландау» КСФ ФИАН №12, 26 (2014).

Bezotosnyi P. I., Gavrilkin S. Yu., Lykov A. N., Tsvetkov A. Yu. «Calculation of the temperature dependences of the critical field and the density of critical current for a superconducting plate within the Ginzburg-Landau theory» BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE **42**, № 1, 1 (2015).

[A10]. П.И. Безотосный, С.Ю. Гаврилкин, А.Н. Лыков, А.Ю. Цветков. «О роли граничных условий в теории Гинзбурга-Ландау» КСФ ФИАН №6, 3 (2014).

Bezotosnyi P. I., Gavrilkin S. Yu., Lykov A. N., Tsvetkov A. Yu. «On the role of the boundary conditions in the Ginzburg-Landau theory» BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE **41**, № 6, 153 (2014).

[A11]. Bezotosny P. I., Gavrilkin S. Yu., Lykov A.N., Attanasio C., Cirillo C., Prischepa S. L. «Asymmetry of the Pinning Force in Thin Nb Films in Parallel Magnetic Field» J Supercond Nov Magn. **24**, 1553 (2011).

Список цитируемой литературы

1. Vodolazov D.Y. и др. Vortex-assisted mechanism of photon counting in a superconducting nanowire single-photon detector revealed by external magnetic field // Phys. Rev. B. American Physical Society, 2015. Т. 92, № 10. С. 104503.
2. Korneeva Y.P. и др. Optical Single-Photon Detection in Micrometer-Scale NbN Bridges // Phys. Rev. Appl. American Physical Society, 2018. Т. 9, № 6. С. 64037.
3. Kaplan S.B., Engseth H. A high-speed superconducting digital autocorrelator operating at 20.48 GHz // Supercond. Sci. Technol. 2007. Т. 20, № 11. С. S310–S314.
4. Sarma S. Das, Freedman M., Nayak C. Majorana zero modes and topological quantum computation // npj Quantum Inf. 2015. Т. 1, № 1. С. 15001.
5. Frolov S.M., Manfra M.J., Sau J.D. Topological superconductivity in hybrid devices // Nat. Phys. 2020. Т. 16, № 7. С. 718–724.
6. Yong J. и др. Superfluid density measurements of $\text{Ba}(\text{Co}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{As}_2$ films near optimal doping // Phys. Rev. B. American Physical Society, 2011. Т. 83, № 10. С. 104510.
7. Richter S. и др. Superconductivity in Ni-Doped Ba–Fe–As Thin Films Prepared From Single-Crystal Targets Using PLD // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017. Т. 27, № 4. С. 1–4.
8. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. К теории сверхпроводимости // ЖЭТФ. 1950. Т. 20. С. 1064.
9. Tinkham M. Introduction to Superconductivity. Dover Publications, 1996.
10. Askerzade I. N. Numerical simulation of vortex nucleation in the two-band Ginzburg-Landau model // Tech. Phys. 2010. Т. 55, № 6. С. 896–899.
11. Grishakov K. S. и др. Modeling of superconductors based on the time-dependent Ginzburg-Landau equations // Russ. Phys. J. 2009. Т. 52, № 11. С. 1212–1223.
12. Zharkov G. F., Zharkov V. G., Zvetkov A. Yu. Ginzburg-Landau calculations for a

- superconducting cylinder in a magnetic field // Phys. Rev.~B. 2000. Т. 61, № 18. С. 12293–12301.
13. Berdiyrov G. R. и др. Finite-size effect on the resistive state in a mesoscopic type-II superconducting stripe // Phys. Rev.~B. 2009. Т. 79, № 17. С. 174506.
 14. Андрюшин Е.А., Гинзбург В.Л., Силин А.П. О граничных условиях в макроскопической теории сверхпроводимости // Усп. физ. наук. Успехи физических наук, 1993. Т. 163, № 9. С. 105–108.
 15. Aurino M. и др. Discrete model analysis of the critical current-density measurements in superconducting thin films by a single-coil inductive method // J. Appl. Phys. 2005. Т. 98, № 12.
 16. Zhang X. и др. A new model analysis of the third harmonic voltage in inductive measurement for critical current density of superconducting films // Chinese Phys. B. {IOP} Publishing, 2011. Т. 20, № 2. С. 27401.
 17. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. МЦНМО, 2000. 402 с.
 18. Gubankov V.N., Likharev K.K., Pavlov N.B. Nonlinear superhigh frequency properties of narrow superconducting films // Phys. Solid State. 1972. Т. 14, № 11. С. 3186–3191.
 19. Шабанова Н.П. и др. Критическое магнитное поле безвихревого состояния тонких пленок NbC и перспективы его наблюдения в MgB 2 // ФТТ. 2007. Т. 6. С. 990.
 20. Gubin A.I. и др. Dependence of magnetic penetration depth on the thickness of superconducting Nb thin films // Phys. Rev. B. American Physical Society, 2005. Т. 72, № 6. С. 64503.

Безотосный Павел Игоревич

**Влияние границ раздела и неоднородности на критические параметры тонких
сверхпроводящих пленок и слоистых структур**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать: 27.12.2021

Заказ №18669. Тираж - 75 экз.

Бумага офсетная. Формат 60х90/16. Объем: 1 усл.п.л.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(977) 518-13-77 (499) 788-78-56

www.avtoreferat.ru riso@mail.ru

