

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 720.001.01  
НА БАЗЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 5.12.2018 № 119

О присуждении Куликову Кириллу Вячеславовичу ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Особенности динамики и вольт-амперных характеристик джозефсоновских наноструктур, обусловленные резонансными, топологическими и неравновесными явлениями» по специальности 01.04.02 – теоретическая физика принята к защите 26.09.2018 г. (протокол № 116) диссертационным советом Д 720.001.01 на базе международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований», 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, приказ Рособнадзора о создании совета № 1484-1047 от 11.07.2008; полномочия совета подтверждены приказом Минобрнауки РФ № 105/НК от 11.04.2012.

Соискатель **Куликов Кирилл Вячеславович** 1989 года рождения.

В 2013 году соискатель окончил магистратуру факультета естественных и инженерных наук Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» с присуждением квалификации магистра по направлению подготовки 011200 «Физика». В настоящее время работает в Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований», в должности младшего научного сотрудника. Диссертация выполнена в Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова международной межправительственной

организации «Объединенный институт ядерных исследований».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, **Шукринов Юрий Маджнунович**, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова, ведущий научный сотрудник.

Научный консультант - кандидат физико-математических наук, **Рахмонов Илхом Рауфович**, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

**Мельников Александр Сергеевич**, доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур Российской академии наук, филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», заведующий лабораторией 122 (Теории мезоскопических систем) отдела физики сверхпроводников (отд. 120);

**Соловьев Игорь Игоревич**, кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», ведущий научный сотрудник Отдела микроэлектроники Лаборатории физики наноструктур дали положительный отзыв на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, в своем положительном заключении, подписанном **Овсянниковым Геннадием Александровичем** (доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физических основ функциональной тонкопленочной оксидной электроники) и утвержденным **Никитовым Сергеем Аполлоновичем** (доктор физико-математических наук, Член-корреспондент РАН, директор), указал, что «*Временные процессы в*

джозефсоновских перехода обладают интересной и очень богатой электродинамикой. Интерес к этим системам возрос в последнее время из-за появления высокотемпературных сверхпроводников, обладающих нетривиальной формой параметра порядка, и возможности существования майорановских фермионов, частиц, которые являются своей собственной античастицей и описываются реальными волновыми функциями. Майорановские фермионы могут быть реализованы как локализованные состояния внутри щели сверхпроводника с триплетным спариванием. Основной целью данной диссертации является всесторонние исследования фазовой динамики одиночных переходов, включенных в резонатор и связанных джозефсоновских переходов с учетом неравновесных и топологических свойств. Диссертация состоит из Введения, 3 глав основного текста, Заключения и списка использованной литературы из 105 наименований. Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту. В **первой главе** диссертации рассматривается система связанных джозефсоновских переходов, включенная в резонансный контур. <...> Во **второй главе** приведены результаты исследования джозефсоновских переходов с топологически нетривиальными барьерами, демонстрирующие 4 $\pi$ -периодический джозефсоновский ток. <...> **Третья глава** диссертации посвящена исследованию неравновесных эффектов, создаваемых инжекцией тока в цепочку внутренних джозефсоновских переходов в высокотемпературных сверхпроводниках. <...> Выводы, приведенные автором в **заключении** диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в диссертационной работе. Заключение завершается списком опубликованных работ. К недостаткам работа можно отнести следующее: 1. В главе 1 обсуждается метод экспериментального обнаружения заряда на сверхпроводящих слоях, основанный на измерении амплитуды осцилляций напряжения в цепочке или на шунтирующем конденсаторе. Вряд ли

предлагаемый метод может быть использован в эксперименте из-за очень высоких (сотни гигагерц) частот колебаний в системе. 2. Топологичность барьера в джозефсоновском переходе типа сэндвич учитывается введением локализованных внутри целевых состояний. Предполагается относительно большая емкость перехода, а сравнение с экспериментальными данными проводится на переходах типа мостик, где емкость мала и реализуется одномерный случай с малой емкостью. 3. Предлагаемая регистрация 4π-периодичности путем анализа лестничной структуры ВАХ основана на расчетах не учитывающих шум перехода. При наличии шумов ситуация может существенно измениться. Это не учтено в работе. К тому же при предполагаемой прозрачности границы  $D=0.6-0.9$  величина емкости перехода (параметр МсКамбера) слабо влияет на свойства переходов. 4. К недостаткам по оформлению автореферата следует отнести большой список публикаций, который занимает более 7 страниц. Приведённые замечания не умаляют научной ценности диссертации, которая по актуальности, объёму выполненных исследований и оригинальности удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения учёных степеней». Материалы диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных изданиях. <...> Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях входящих в список ВАК, а также в 12 статьях в журналах, не входящих в список ВАК, и трудах конференций. В рамках диссертации было опубликовано учебное пособие для студентов старших курсов. Результаты работы представлены на 24 международных и всероссийских конференциях, а также ряде семинаров в России и за рубежом. Таким образом, считаем, что диссертационная работа ««Особенности динамики и вольт-амперных характеристик джозефсоновских наноструктур, обусловленные резонансными, топологическими и неравновесными явлениями» представляет цельный научный труд, соответствует требованиям п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее

автор, Куликов Кирилл Вячеславович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика». Считаем, что Кирилл Вячеславович Куликов заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика». Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании семинара по направлениям «Сверхпроводниковая электроника» и «Физика низкоразмерных структур, микро- и наноэлектроника» 6 ноября 2018 г.»

Соискатель имеет 6 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 5 работ, из которых 5 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Основные работы:

1. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, K. V. Kulikov and P. Seidel / Effects of LC shunting on the Shapiro steps features of Josephson junction // Europhysics Letters – 2015. – Vol. 110. – pp. 47001 (6).
2. M. Maiti, K. V. Kulikov, K. Sengupta, and Y. M. Shukrinov / Josephson junction detectors for Majorana modes and Dirac fermions // Phys. Rev. B – 2015. – Vol. 92. – pp. 224501 (8).
3. Yu. M. Shukrinov, M. Nashaat, K. V. Kulikov, R. Dawood, H. El Samman and Th. M. El Sherbini / Shapiro step at nonequilibrium conditions // Europhysics Letters – 2016. – Vol. 115. – pp. 20003 (5).
4. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, K. V. Kulikov, A. E. Botha, A. Plecenik, P. Seidel, W. Nawrocki / Modelling of LC-shunted intrinsic Josephson junctions in high-T<sub>c</sub> superconductors // Supercond. Sci. Technol. – 2017. – Vol. 30. – pp. 024006 (13).
5. К. В. Куликов, Р. Давуд, Э. П. Нахмедов, Ю. М. Шукринов / Джозефсоновский переход с двумя компонентами сверхпроводящего тока // ЖЭТФ. – 2017. – том 152. – вып. 2. – стр. 391–397.

Общий объем опубликованных работ по материалам диссертации составляет 39 печатных страницы. Работы [1–5] опубликованы в журналах, которые

включены в международные системы цитирования Web of Sciences и Scopus и хорошо известны научному сообществу. Все журналы рецензируемые, опубликованные работы прошли серьезную всестороннюю проверку рецензентами – ведущими специалистами в области теоретической физики.

Отзывы официальных оппонентов и ведущей организации положительные, но содержат следующие основные замечания, не снижающие общей высокой оценки научного уровня диссертации. В отзыве А.С. Мельникова говорится: *«Недостаточно подробно произведен анализ условий при которых в джозефсоновской системе с майорановскими состояниями может возникать  $4\pi$  периодическое джозефсоновское соотношение для сверхтекучего тока. Известно, что необходимым условием для этого является сохранение четности числа электронов в системе, что можно реализовать, например, в условиях кулоновской блокады. В этой связи не ясно, как именно режим с фиксированной четностью может быть реализован в конкретных системах, рассматриваемых автором.»*. В отзыве И.И. Соловьева говорится: *«В тоже время, изложение не лишено некоторых недостатков, которые состоят в следующем: 1. В тексте встречаются ошибки при обозначении графиков, опечатки, использование одних и тех же букв для обозначения разных величин. Еще одним стилистическим недостатком, на мой взгляд, можно считать представление данных расчета с точностью, например, до пятого знака после запятой без обсуждения смысловой нагрузки такой точности. 2. В главах 1 и 3 в решаемых уравнениях присутствует малая флуктуационная добавка. При этом отсутствует обсуждение величины безразмерной интенсивности шума, которая полагается равной  $10^{-8}$ . Для сравнения, типичные значения безразмерной интенсивности шума при решении аналогичных уравнения моделирующих системы с низкотемпературными сверхпроводниками при характерной температуре 4.2 К составляет  $10^{-3}$ . Ввиду этого в контексте исследования высокотемпературных структур интуитивно ожидаются большие значения интенсивности шума. 3. На рисунке 1.8е показано сжатие амплитудной зависимости ширины ступеньки Шапиро на резонансной*

ветви, возникающей на вольт-амперной характеристике шунтированного LC-контуром джозефсоновского перехода. К сожалению, не обсуждается отклонение полученной численной зависимости в районе первого максимума от известного аналитического выражения (1.10), использованного для аппроксимации. Также было бы интересно представить более детальное обсуждение возможности практического использования исследуемого эффекта в функционировании стандарта Вольта на базе цепочек джозефсоновских переходов. 4. В системе уравнений, записанных в главе 3 для связанных джозефсоновских переходов с разбалансом ветвей спектра элементарных возбуждений квазичастиц, среди параметров нет толщины сверхпроводящих прослоек внутри стека, что никак не комментируется в тексте.».

Соискатель ответил на все замечания.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации основан на том, что оба оппонента являются видными специалистами, как в области теоретической физики, так и в области физики конденсированного состояния, а ведущая организация – одним из лидирующих научно-исследовательских институтов в области теоретической физики. Это подтверждается многочисленными публикациями в журналах из списка ВАК, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также высоким индексом цитируемости их работ.

**Диссертационный совет отмечает,** что в рамках проведённых соискателем исследований:

Было показано изменение амплитудной зависимости ширины ступеньки Шапиро, когда она находится на резонансной ветви, возникающей на вольт-амперной характеристике шунтированного LC-контуром джозефсоновского перехода. И предложен метод создания стандарта Вольта, позволяющий существенно уменьшить используемую мощность внешнего электромагнитного излучения.

Обнаружено, что в системе связанных джозефсоновских переходов,

шунтированных LC-контуром временная зависимость напряжения на шунтирующем конденсаторе, также как и полное напряжение стека отражают возникновение электрического заряда на сверхпроводящих слоях, что может служить основой метода его регистрации.

Предложен метод выявления 4л-периодичности сверхпроводящего тока в джозефсоновских наноструктурах, основанный на изменении свойств нечетных ступенек Шапиро и возникновении дополнительной последовательности субгармоник ступенек Шапиро в лестничной структуре, возникающей на вольт-амперной характеристике джозефсоновского перехода.

Показано, что наличие зарядового разбаланса ветвей спектра элементарных возбуждений квазичастиц в связанной системе джозефсоновских переходов может приводить к наклону ступенек Шапиро на вольт-амперной характеристике, который возрастает с увеличением параметра неравновесности, а также продемонстрировано распределение величины наклона вдоль стека, обусловленное наличием связи между джозефсоновскими переходами.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанные эффективные численные алгоритмы применимы для анализа связанных систем джозефсоновских переходов, в том числе в неравновесных условиях вызванных зарядовым разбалансом ветвей спектра элементарных возбуждений квазичастиц. Полученные результаты вносят вклад в лучшее понимание важных проблем влияния резонансных, топологических и неравновесных эффектов на физику джозефсоновских наносистем.

Разработанные методы и полученные результаты представляют практический интерес для специалистов, занимающихся получением стандартов Вольта, исследованиями динамики систем связанных джозефсоновских переходов для использования их в качестве источника излучения в терагерцовой области частот, а также исследования проявления топологических эффектов в джозефсоновских наноструктурах.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила: Достоверность



результатов, изложенных в диссертации, обеспечивается тем, что используемые в работе подходы основаны на классических известных и апробированных методах физики конденсированных сред. Результаты находятся в полном соответствии с результатами, полученными в теоретических работах других авторов в рамках более простых моделей, а также с данными экспериментальных групп.

**Личный вклад** соискателя в результаты и основные положения, выносимые на защиту, является определяющим. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач диссертационной работы, разработке численных алгоритмов и компьютерных программ для их решения, проведении расчетов, в анализе результатов и публикации статей, а также апробации результатов исследования на научных мероприятиях.

На заседании № 119 от 5 декабря 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Куликову К.В. ученую степень кандидата физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 11 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета

Воронов Виктор Васильевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Быстрицкий Юрий Михайлович

5.12.2018 г.

