

Отзыв
официального оппонента о диссертационной работе
Алексеева Павла Сергеевича
«Гидродинамические явления в наноструктурах»,
представленной на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности «1.3.3. Теоретическая физика»

В нормальных металлах, полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах электропроводность обычно обусловлена электронами проводимости, релаксация импульса которых определяется их рассеянием на дефектах и на колебаниях кристаллической решётки. В последние годы были открыты проводники, в которых ключевую роль играет межэлектронное взаимодействие, приводящее к формированию вязкой электронной жидкости. В этих материалах реализуется гидродинамический режим электрического транспорта, в котором перенос электрического заряда осуществляется потоками электронной жидкости, и релаксация импульса происходит в основном на краях образца. Теория такого режима транспорта начала развиваться ещё очень давно, начиная с 1960 годов в работах Р. Н. Гуржи и его коллег. В их работах рассматривались объёмные металлы, в которых за формирование вязкой электронной жидкости отвечает сильное электрон-фононное взаимодействие.

Однако, в 2015-2016 годах появились публикации, сообщающие о реализации гидродинамического режима электронного транспорта в графене, вейлевском полуметалле PdCoO₂ и квантовых ямах GaAs. При этом за формирование вязкой электронной жидкости отвечает непосредственно межэлектронное взаимодействие двумерных и квазидвумерных электронов. Кроме того, в этих экспериментах наблюдались явления, совершенно непонятные, в частности, не объяснённые в работах Р. Н. Гуржи и его соавторов. Таким образом, развитие теории гидродинамического транспорта в электронной жидкости является задачей, развитие которой является важным именно сейчас. Физика таких систем в значительной степени похожа на физику одной из компонент полностью ионизированной плазмы, однако особенностями электронной жидкости в твёрдых телах являются сильное межчастичное взаимодействие, приводящее не только к рассеянию, но и к бездиссипативным ферми-жидкостным эффектам; а также необходимость учёта рассеяния электронов на краях образца и возможность «остаточного» рассеяния электронов на редких дефектах в объёме образца. Начиная с 2015-2016 годов теорией гидродинамического транспорта в электронной жидкости в наноструктурах занимается довольно много теоретических групп, как в сотрудничестве с экспериментаторами, так и независимо. Диссертация Алексеева посвящена объяснению экспериментов по гидродинамическому транспорту и построению последовательной теории такого режима транспорта в реалистичных двумерных электронных системах в наноструктурах. Таким образом, темы диссертации Алексеева является **актуальной**.

Диссертация имеет следующую **структуру**: она состоит из четырех глав и семи приложений.

В Главе 1 изучаются гидродинамические явления в двумерных электронных системах в наноструктурах. Развита теория низкочастотного и высокочастотного режимов транспорта в рамках уравнений динамики жидкости типа уравнений Навье-Стокса. Показано, что

магнетосопротивление двумерных электронов является сильным и отрицательным. Выполненный анализ экспериментальных данных по магнетосопротивлению высокоподвижных квантовых ям GaAs показывает, что в них наблюдалось именно такое магнетосопротивление и это является свидетельством формирования гидродинамического транспорта. Тем самым, в диссертации впервые сделан вывод о том, что в чистых образцах квантовых ям GaAs формируется вязкая электронная жидкость. Показано также, что в двумерных электронных системах с малым числом дефектов и сильным межчастичным взаимодействием могут возбуждаться поперечные магнитозвуковые волны и высокочастотные течения, сформированные этими волнами, имеют резонанс на удвоенной циклотронной частоте. Выполненный анализ экспериментов по фотосопротивлению квантовых ям GaAs рекордного качества показывает, что, по-видимому, в них наблюдался именно такой резонанс, и это также является характеристическим признаком формирования вязкой жидкости из электронов. В первой главе также изучен спиновый резонанс в электронных системах в омических образцах с сильным спин-орбитальным взаимодействием, обусловленный формированием пространственно-неоднородных течений за счёт спинового эффекта Холла.

Во Главе 2 выполнен микроскопический вывод уравнений гидродинамики, использованных в Первой главе. Во-первых, для случая сильно неидеальной электронной жидкости произведён вывод уравнений высокочастотной гидродинамики в рамках теории ферми-жидкости Ландау. Даны критерии на величины параметров Ландау, когда становится возможным гидродинамическое описание течений, в частности, поперечных волн (этот критерий является более жёстким, чем критерий существования таких волн). Во второй части Второй главы изучен интеграл столкновений электронов для случая слабо неидеального электронного ферми-газа. Показано, что основную роль в релаксации сдвиговых напряжений, определяющих эффект вязкости, играют малоугловые встречные столкновения электронов. Показано, что оказывается справедливым тау-приближение для интеграла столкновений, в отличие от трехмерных ферми-газа и ферми-жидкости, где интеграл межчастичных столкновений является интегральным оператором по энергетической переменной функции распределения. Рассчитано время релаксации сдвиговых напряжений (пропорциональных второй угловой гармонике функции распределения) и время релаксации старших гармоник функции распределения. Проведено подробное сравнение первого времени с температурными зависимостями вязкости двумерных электронов в квантовых ямах GaAs (величины вязкости получены из анализа экспериментальных данных по гигантскому отрицательному магнетосопротивлению).

В Главе 3 изучены различные режимы гидродинамического транспорта в электрон-дырочных системах как в омических образцах (в которых основную роль играет рассеяния носителей на дефектах), как и в чистых образцах без дефектов. Показано, что в омических образцах для электрон-дырочных систем в точке электронейтральности (равные концентрации электронов и дырок) в перпендикулярном магнитном поле формируются прикраевые слои с возмущёнными концентрациями и плотностью электрического тока, значительно большей, чем в середине образца. Баланс потоков электронов и дырок в таких слоях определяется эффектами диффузии, рекомбинации и магнитной силой Лоренца. Если вклад таких слоёв в полный ток доминирует, магнетосопротивление образца оказывается сильным, положительным, линейным по магнитному полю. Выполнено сравнение предсказаний теории с данными экспериментов по магнетотранспорту

двухслойного графена в точке электронейтральности и вне её. Получено хорошее согласие данных эксперимента и предсказаний теории. В Главе 3 также исследован магнетотранспорт в двухкомпонентных электрон-дырочных системах с учётом эффектов теплопереноса и эффекта сдвиговой вязкости. В этом случае формируются прикраевые слои с возмущенной температурой и тепловыми потоками или сдвиговыми напряжениями. Магнетосопротивление образца за счёт вкладов от этих прикраевых слоёв имеет немонотонный характер, отражающий физику явлений переноса в прикраевых слоях. В случае, когда важны только сдвиговая вязкость и рекомбинация, в электрон-дырочной жидкости могут формироваться прикраевые слои («противотоки») с направлением электрического тока, противоположным направлению падения напряжения и общего электрического тока через образец. Показано, что такое решение является устойчивым, что является характерным свойством вязкого течения в электрон-дырочных системах.

В Главе 4 изучаются транспортные эффекты в длинных узких образцах при редких межэлектронных столкновениях (баллистический режим электронного транспорта с учётом редких столкновений), а также формирование гидродинамического режима из баллистического в этих системах при приложении перпендикулярного магнитного поля. Показано, что сопротивление, магнетосопротивление и эффект Холла в длинных баллистических образцах могут определяться именно межэлектронными столкновениями в очень слабых магнитных полях и имеют нетривиальный характер, зависящий от конкретных параметров образца: длины, изгиба краёв образца, степени шероховатости краёв и т. п.. Выполнено сравнение полученных результатов по баллистическому магнетосопротивлению с экспериментальными данными по магнетосопротивлению баллистических образцов квантовых ям GaAs. Показано, что полученное в теории отрицательно температурно-независимое магнетосопротивление типично наблюдается в баллистических не очень длинных образцах при очень малых магнитных полях. Изучен также баллистический магнетотранспорт в промежуточных полях, когда реализуется чисто баллистический режим (в котором межчастичные столкновения играют пренебрежимо малую роль). Получены профили распределений плотности тока и холловского поля в первом и втором режимах. Изучен переход от баллистического режима к гидродинамическому в этих системах, происходящий с ростом магнитного поля начиная с поля, при котором диаметр циклотронной траектории электрона становится равным ширине образца. Показано, что характер этого перехода определяется перераспределением электронов между траекториями различных типов за счёт редких межчастичных столкновений. Развита теория среднего поля для этого перехода, основанная на приближённом представлении интеграла столкновений. Выполнено сравнение предсказаний теории с наблюдательными данными по формированию гидродинамического течения Пуазейля электронов в полосках графена и квантовых ям GaAs. Сравнение показывает, что развитая теория хорошо описывает эксперименты, в частности, излом в зависимости сопротивления от магнитного поля, отвечающий переходу от баллистического режима к началу формирования гидродинамического.

В Приложении А обсуждается формирование гидродинамического режима транспорта двумерных электронов в образцах более сложной геометрии, чем рассматриваемые в основном тексте длинные однородные образцы с шероховатыми краями, а именно: в образцах, содержащих макроскопические овальные дефекты. В Приложении В изложен ход расчётов и подробности результатов по высокочастотному отклику вязкой

электронной жидкости в длинном образце на поле падающего излучения с учётом плазмонного и вязкоупругого вкладов.

В приложении С приведён подробный анализ межэлектронного интеграла столкновений в слабо неидеальном ферми-газе. Показано, что для релаксации сдвиговых напряжений наиболее важны встречные столкновения электронов, для них можно пренебречь зависимостью ядра экранированного кулоновского взаимодействия, получаемого в методе случайных фаз, от переданной при столкновении энергии между двумя электронами. Как следствие, интеграл столкновений становится приближенно диагональным по энергии, что отвечает применимости тау-приближения. Как следствие, решение кинетического уравнения резко упрощается по сравнению с задачей о вязкости в трёхмерных ферми-газе и ферми-жидкости, где интеграл межэлектронных столкновений есть оператор по энергетической переменной с нетривиальным ядром. Вычислено время релаксации сдвиговых напряжений и выполнены оценки времён релаксации возмущений функции распределения, пропорциональных угловым гармоникам по скорости порядков старше второго.

В приложениях D и E выполнен вывод из кинетического уравнения балансовых гидродинамических уравнений для электрон-дырочной системы в омических образцах для различных случаев: неквадратичного спектра электронов и дырок, различных концентрациях электронов и дырок и других несимметричных их параметров, наличия возмущения температуры и тепловых потоков. Для последнего случая выполнен подробный анализ интеграла электрон-фононных столкновений, приводящих к теплообмену носителей заряда с фононами и к рекомбинации электронов и дырок.

В приложении F развит качественный подход к описанию баллистического магнетотранспорта в длинных образцах. Подход основан на рассмотрении отдельных траекторий электронов в электрическом и магнитном поле. Использование этого метода приводит к наглядному выводу части результатов, полученных в основном тексте диссертации менее наглядным (но более прямым) методом из решения кинетического уравнения в длинном образце при редких межэлектронных столкновениях.

В приложении G приведены подробности построения теории перехода от баллистического режима электронного транспорта в длинных образцах к гидродинамическому с ростом магнитного поля.

Следующие **результаты** представляются мне особенно интересными и важными:

1) Вывод о формировании вязкой электронной жидкости в современных высокоподвижных квантовых ямах GaAs, сделанный на основе объяснения наблюдавшегося в них гигантского отрицательного магнетосопротивления.

2) Предсказание и теоретическое изучение вязкоупругого резонанса и сдвиговых магнитозвуковых волн в вязкой замагниченной электронной жидкости.

3) Построение теории гидродинамического магнетотранспорта в электрон-дырочных системах в различных случаях и режимах.

4) Обнаружение и теоретическое изучение баллистически-гидродинамического перехода, определяемого межэлектронными столкновениями и баллистическими размерными эффектами.

Все полученные в диссертации результаты являются **новыми**. Это видно из того, что в диссертации подробно описаны предыдущие экспериментальные и теоретические результаты других авторов, имеющие отношения к решённым в диссертации задачам и на

основе этого объяснена мотивация работ диссертации. С другой стороны, в диссертации описано развитие экспериментальных работ по наблюдению гидродинамического режима электронного транспорта в квантовых ямах GaAs, которое последовало за одной из работ по диссертации, в которой, по-видимому, впервые, было сообщено о формировании гидродинамического режима в этих материалах. Многие полученные в диссертации результаты кажутся мне простыми и интересными, что говорит о хорошем качестве работ диссертации. Например, к таким результатам можно отнести обнаружение вязкоупругого резонанса, поперечных магнитозвуковых волн, а также резкого баллистически-гидродинамического перехода в системах со слабым межэлектронным взаимодействием. Полученные в диссертации результаты позволили объяснить (или предложить хороший вариант объяснения) для ряда явлений: гигантское отрицательное магнетосопротивление квантовых ям, аномальный пик в их фотосопротивлении, сильное линейное магнетосопротивление графена и других материалов, резкий излом на отрицательном магнетосопротивлении графеновых полосок, -- которые до работ автора казались загадочными, а после объяснения стали свидетельствами (или возможными свидетельствами) формирования вязкой электронной жидкости. Это всё свидетельствует о **научной новизне результатов и их научной и практической значимости.**

В диссертации используются надежно обоснованные теоретические методы физики конденсированного состояния: балансовые уравнения типа Навье-Стокса для потоков в жидкости, кинетическое уравнение для электронов (или квазичастиц ферми-жидкости), интеграл электрон-электронных столкновений с потенциалом межэлектронного взаимодействия в приближении случайных фаз, теория Ландау ферми-жидкости. Точные расчёты рамках этих моделей иллюстрируются и проверяются качественными оценками. Результаты сравниваются с данными экспериментов, и хорошо с ними согласуются и объясняют их. Как видно из дат публикации статей, некоторые из работ диссертации были начаты для объяснения имевшихся необъяснённых экспериментов, например, экспериментов по гигантскому отрицательному магнетосопротивлению, а некоторые из работ диссертации были сделаны параллельно с экспериментальными работами, с которыми в диссертации проводится сравнение. Это всё свидетельствует о **надёжности и достоверности** результатов.

Диссертация чётко структурирована, написана понятным языком и достаточно легко читается, хотя имеется много опечаток и других погрешностей оформления. Рисунки являются чёткими, яркими и достаточно информативными. Хорошей особенностью диссертации является перенос большинства громоздких и менее важных формул в многочисленные приложения.

Из общих **достоинств** диссертации хочу также отметить:

1) Выбор для изучения гидродинамических явлений в ряде смежных, но всё-таки достаточно сильно различных системах. Например, рассматривались магнетотранспортные явления в электронных и электрон-дырочных системах, а также в узких и широких образцах (по сравнению с длиной межэлектронных столкновений). Это придаёт «горизонтальную связность» полученным результатам;

2) С одной стороны, использование качественных физических рассмотрений и оценок для проверки расчётов в рамках выбранных моделей, а, с другой стороны, выполнение микроскопических выводов и обоснований, используемых макроскопических

гидродинамических уравнений из кинетических уравнений, что даёт «вертикальную связность» полученным результатам;

3) Стремление выбрать для теоретического изучения и сравнения с экспериментами физически яркие и интересные явления, приводящие при этом к существенному расширению общих физических представлений о гидродинамическом транспорте в твёрдых телах, в частности, в наноструктурах.

У меня возникли следующие **вопросы и замечания** по диссертации:

1) Было бы хорошо привести оценки величин поправок к эффекту Холла за счёт прикраевых слоев в течении Пуазейля, наличие которых обсуждается в разделе 1.2.2. В Заключении диссертации написано, что это представляется автору хорошей темой для дальнейших работ, однако о величине этих поправок было бы интересно узнать при чтении диссертации.

2) Было бы интересно получить в рамках кинетического уравнения для квазичастиц электронной ферми-жидкости точные критерии на параметры Ландау, при которых становится возможно возбуждение поперечных магнитозвуковых волн, чтобы была возможность более количественно проанализировать данные по аномальному пику вблизи удвоенной циклотронной частоты в фотосопротивлении квантовых ям GaAs со сверхвысокой подвижностью.

3) Было бы хорошо развить микроскопическую теорию фотосопротивления вязкой электронной жидкости с учётом нелинейных эффектов, чтобы можно было провести количественное сравнение данных по фотосопротивлению высокоподвижных квантовых ям GaAs с предсказаниями такой теории. О возможности её построения также уже говорится в Разделе 1.4.4 и в Заключении, однако в диссертации было бы хорошо привести хотя бы возможные идеи, на которых может быть основана такая теория.

4) В соответствии с логикой диссертации, было бы интересно изучить спиновый резонанс за счёт спинового эффекта Холла в течении электронной жидкости не только для омических образцов (Раздел 1.5), но также и для чистых образцов, в которых пространственный профиль течения определяется сдвиговой вязкостью.

5) Большие величины магнитных полей, в которых наблюдается линейное магнетосопротивление в электрон-дырочных системах в двуслойном графене и квантовых ямах HgTe/CdTe в обсуждаемых в диссертации экспериментах наводят на мысль о том, что в этих экспериментах могут быть важны квантовые эффекты. Хотя структуры являются двумерными и известный механизм А. А. Абрикосова для линейного квантового магнетосопротивления в трёхмерных металлах не может здесь работать, однако возникает вопрос, как квантование влияет на изученные в диссертации прикраевые каналы с высокой плотностью тока, дающие линейное магнетосопротивление. Этот вопрос было бы хорошо хотя бы качественно обсудить в диссертации в Главе 3.

6) При чтении раздела Главы 4 о магнетотранспорте выше критического поля, возникает вопрос, почему холловское сопротивление сразу выше критического поля становится равным своему стандартному значению (отвечающему, балансу магнитной силы Лоренца и электрической силы холловского поля)? Из диссертации неясно: (а) случайно ли это совпадение, (б) насколько оно точно (в диссертации показано, что оно возникает в главном порядке по малому параметру теории -- отношению ширины образца к длине свободного пробега).

7) В диссертации есть места, в которых приводятся полученные результаты для очень большого числа режимов (особенно в Главе 3). Такие результаты, возможно, было бы лучше привести в отдельном приложении, а в основном тексте описать их только кратко, приведя только наиболее яркие формулы и рисунки.

Высказанные вопросы и замечания, а также отмеченные недостатки не подвергают сомнению надёжность результатов диссертации и не снижают общей высокой оценки диссертации. Надеюсь, что эти вопросы и замечания могут стать причиной для дальнейших интересных исследований по начатым в диссертации направлениям.

Считаю, что диссертация является оригинальным и законченным исследованием и что в ней получены новые важные результаты по теоретической физике и физике нового типа проводников: наноструктур, в которых двумерные электроны формируют вязкую жидкость. Результаты достаточно хорошо обоснованы, опубликованы в статьях в авторитетных научных журналах, доложены на семинарах лабораторий ФТИ им. А.Ф.Иоффе и зарубежных научных институтов, доложены на ведущих российских и международных конференциях. Автореферат адекватно излагает все основные идеи и результаты диссертации. Считаю, что система полученных в диссертации результатов представляют собой научное достижение.

Таким образом, диссертация Алексева Павла Сергеевича «Гидродинамические явления в наноструктурах» полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждения учёных степеней» Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности «1.3.3. Теоретическая физика».

9 апреля 2022 года

Официальный оппонет _____
Главный научный сотрудник –
- заведующий сектором ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
докт. физ.-мат. наук,
194021, С.-Петербург, Политехническая 26,
телефон: 8-812-292-73-67,
эл. почта: Zegrya@theory.ioffe.ru

Зегря Георгий Георгиевич

Подпись Г. Г. Зегри заверяю

Учёный секретарь ФТИ им. А.Ф.Иоффе, _____ Патров Михаил Иванович
Канд. физ.-мат. наук