

194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Диссертационный совет ФТИ 34.01.02

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Алексева Павла Сергеевича “Гидродинамические явления в наноструктурах”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 1.3.3 - теоретическая физика).

Актуальность. Бурное развитие экспериментальных технологий и появление новых двумерных материалов и наноструктур привело к возвращению интереса в область изучения гидродинамических эффектов в электронных системах. Эта область исследований является во многом классической — основные теоретические результаты и концепции были разработаны Р.Н. Гуржи и сотрудниками в 60-тые годы прошлого века, но для трёхмерных систем. Как оказывается, двумерные системы имеют свою специфику и буквальный перенос результатов, полученных для трёхмерных систем, не возможен. Диссертационная работа посвящена исследованию гидродинамических явлений именно в двумерных системах и поэтому актуальность исследований не вызывает сомнений. Дополнительную актуальность диссертационной работе придает тот факт, что параллельно с П.С. Алексеевым над тематикой гидродинамического описания двумерных электронных систем работают еще несколько зарубежных теоретических групп.

Структура диссертации и основные результаты. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и нескольких приложений. Во введении обсуждается актуальность работы и ее цель, приводится список основных результатов. В первой главе обсуждаются гидродинамические эффекты в двумерной электронной системе, в том числе проявление гидродинамического режима в магнитосопротивлении, вязкоупругий резонанс и поперечные магнитозвуковые волны. Во второй главе развивается микроскопическая теория гидродинамического транспорта с использованием кинетического уравнения для двумерной ферми-жидкости. В третьей главе диссертации приведены результаты для гидродинамических эффектов в двух-компонентной системе (электроны и дырки). В четвертой главе обсуждается переход от баллистического к гидродинамическому режиму для двумерных электронных систем в магнитном поле. Технические детали вынесены из основной части в приложения, что позволяет не отвлекаться на них при чтении диссертационной работы. Среди основных результатов диссертации (они приведены во введении к диссертации) я бы выделил три наиболее интересных на мой взгляд:

- 1) предсказание существования поперечных магнитозвуковых волн в двумерной электронной системе с достаточно сильным межэлектронным взаимодействием;
- 2) предсказание циклотронного резонанса в продольной и холловской вязкости для двумерной ферми-жидкости на частоте близкой (но не в точности равной) удвоенной циклотронной частоте;

3) предсказание перехода от баллистического к гидродинамическому режиму транспорта с ростом магнитного поля в чистых длинных образцах двумерного электронного газа.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе впервые подробно изучен ряд принципиально важных гидродинамических эффектов в двумерных системах и получены новые оригинальные результаты, имеющих как фундаментальное, так и возможно в будущем прикладное значение. Все результаты диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые. Этим определяется **научная новизна** работы. Автор проводит аналитические расчеты, используя проверенные методы теоретической физики, такие как уравнение Навье-Стокса, кинетическое уравнение, уравнения непрерывности для сохраняющихся величин и др. Ряд результатов автора был воспроизведен независимо конкурирующими теоретическими группами. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались автором на российских и международных конференциях. Они хорошо известны научному сообществу. Поэтому не возникает сомнений в **достоверности** полученных результатов.

Научная и практическая значимость. В диссертации содержится большое количество новых теоретических результатов для электронной гидродинамики в двумерных системах. На мой взгляд, перечисленных выше трёх результатов уже достаточно, чтобы с уверенностью констатировать **высокую и несомненную научную значимость** диссертационной работы. Дополнительно хочется отметить, что при чтении диссертации все время видна практическая направленность проводимых теоретических исследований. П.С. Алексеев не просто хочет получить фундаментальные теоретические результаты, но и объяснить с их помощью имеющиеся “загадки” в экспериментальных исследованиях двумерных электронных систем. Это позволяет с уверенностью сказать, что и **практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.**

Результаты диссертации П.С. Алексеева могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих теоретические и экспериментальные исследования в области физики двумерных систем и наноструктур (ИРЭ РАН, ИС РАН, НЦ КИ ПИЯФ, МГУ, ФИАН, ИФП СО РАН, ИФТТ РАН, и др.).

Диссертация П.С. Алексеева написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты.

Замечания. По диссертации следует высказать несколько общих замечаний и частных вопросов, не имеющих принципиального характера:

1. Под формулой (1.30) в диссертационной работе обсуждается объемная вязкость. При этом написана формула $\zeta \sim T^2 \eta$, что дает независимую от температуры объемную вязкость. Было бы полезно прокомментировать соответствие этой формулы с формулой 112 из работы J. Sykes, G. A. Brooker, Ann. Phys. 56, 1 (1970), где получалось $\zeta \sim T^2$.

2. В разделе 1.3.3 подразумевается, что тензор проводимости выражается через тензор вязкости. Этот факт кажется почти тривиальным, если работать с уравнением Навье-Стокса с добавленным членом $-v/t$, ответственным за релаксацию импульса. Однако, однозначная связь между тензором проводимости и тензором вязкости имеет место только в системах с галилеевской инвариантностью. Это было бы полезно подчеркнуть в диссертации.
3. Что фиксирует одинаковость коэффициентов диффузии в уравнениях 1.67-1.69?
4. Какую роль в гидродинамических эффектах, рассматриваемых в диссертационной работе, будет играть наличие градиентов концентрации носителей, которые присутствуют в реальных образцах? Диссертация выиграла бы от обсуждения этого вопроса.
5. В раздел 3.4.4 обсуждается много различных режимов, контролируемых различными параметрами. Чтение данного раздела было бы сильно легче при наличии соответствующих картинок: условных фазовых диаграмм, на которых было бы сразу видно где какой режим реализуется.
6. Технику, развитую в разделе 3.4., на мой взгляд, интересно было бы применить к задаче о нормальном канале, граничащим со сверхпроводником. Тогда появился бы новый элемент — андреевское рассеяние на границе, в результате которого налетающий электрон, превращается в отраженную дырку.
7. В разделе 4 используются слова про фазовый переход. Из представленного там изложения не ясно, являются ли эти слова “фигурой речи”, или автор действительно считает, что в задаче имеется настоящий фазовый переход. Если последнее, то было бы полезно указать какой параметр порядка и какого рода этот фазовый переход. Так как речь идет о движущейся электронной жидкости, то не надо ли думать, что речь идет про динамический фазовый переход (переход в неравновесной системе)?
8. В разделе 4.2.1 обсуждается излом в сопротивлении. Будет ли учет квантовых эффектов, например, возможность туннелирования с одной циклотронной орбиты на другую, размывать этот излом?
9. Имеет ли отношение обсуждаемый в разделе 4.2.1 эффект появления особенности в сопротивлении при выполнении резонансного условия $W=2R_c$ к хорошо известным с 60-х годов нерезонансным размерным эффектам? Можно ли как-то качественно изложить полученные результаты на языке концепции неэффективности?

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на научном уровне, соответствующем уровню доктора наук.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 16-ти научных работах в отечественных (ФТП) и зарубежных журналах (Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. B), доложены на

российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа П.С. Алексева является законченным и оригинальным исследованием, содержит принципиально важные новые теоретические результаты. На основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней" утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к докторским диссертациям. П.С. Алексеев безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **1.3.3 - теоретическая физика**.

доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.02 - теоретическая физика
заместитель директора
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау
Российской академии наук
Бурмистров Игорь Сергеевич
18 февраля 2022 г.
142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
тел. 8 495 7029317, e-mail: burmi@itp.ac.ru

Согласен на обработку персональных данных
И.С. Бурмистров

Подпись И.С. Бурмистрова заверяю
ученый секретарь
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
канд. хим. наук С.А. Крашаков