

На правах рукописи



Султанова Мадина Рафаиловна

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ И ВИХРЕВЫЕ  
ДВИЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ И В ОБЪЕМЕ  
КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ЖИДКОСТИ

Специальность 1.3.8. –  
физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка — 2023г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Научный руководитель: **Левченко Александр Алексеевич**,  
доктор физико-математических наук, чл.-корр.  
РАН, директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт физики  
твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской  
академии наук

Научный консультанты: **Ремизов Игорь Андреевич**,  
кандидат физических наук, научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт физики твердого тела  
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Карабулин Александр Владимирович**,  
кандидат физико-математических наук, старший  
научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур  
Российской академии наук

**Дьяченко Александр Иванович**,  
доктор физико-математических наук, ведущий  
научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Объединенный институт  
высоких температур Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» декабря 2023 года в \_\_ часов \_\_ минут на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д002.100.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук и на сайте диссертационного совета: <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
24.1.136.01 (Д002.100.02) доктор  
технических наук



Курлов Владимир Николаевич  
Султанова М.Р., 2023  
© ИФТТ РАН, 2023

## **Общая характеристика работы**

### **Объект исследования и актуальность темы**

Турбулентное состояние – это высоковозбужденное состояние некой динамической системы, которая описывается статистически; поскольку движение является хаотическим, проследить за индивидуальным процессом невозможно. Классическая вихревая турбулентность в гидродинамике является сильной турбулентностью, в которой вихри нелинейно взаимодействуют друг с другом. Вихревая турбулентность может наблюдаться как в классической, так и квантовой жидкостях. Другой тип турбулентности – волновая, в которой нелинейно взаимодействуют волны. Если при этом фазы отдельных волн можно считать статистически независимыми и уровень нелинейности мал, следует говорить о слабой волновой турбулентности, в противном случае — о сильной турбулентности.

Волновая и вихревая турбулентность играет значительную роль во многих процессах как на Земле, так и во вселенной. Интерес к изучению турбулентности возродился в 60-х годах прошлого столетия [1] во время работ с атомными реакторами и плазмой. Волновые турбулентные состояния могут возникать в магнитных системах твердых тел [2], в системах фононов в твердых телах [3] или в плазме [4], также могут наблюдаться турбулентные состояния спиновых волн в ферромагнетиках [5].

В данной диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований вихревого течения в нормальной и сверхтекучей компоненте  $^4\text{He}$ , индуцированного слабо нелинейными волнами на поверхности жидкого гелия, а также исследования влияния диссипации на турбулентный спектр в области высоких частот в системе капиллярных волн на поверхности жидкого водорода.

Отдельным направлением является изучение эластической турбулентности неньютоновских жидкостей, представленное в главе четыре. Вязкость таких жидкостей при течении зависит от градиента скорости.

**Целью** данной работы является изучение турбулентных явлений в классической, квантовой, а также в полимерной жидкостях, а именно:

Исследование взаимодействия инжектированных зарядов с вихревым течением в нормальном гелии He-I и сверхтекучем гелии He-II;

Изучение турбулентного распределения в системе радиальных и азимутальных мод капиллярных волн на поверхности жидкого водорода;

Исследование характеристик перехода полимеров coil-stretch transition в случайных потоках.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

Изготовление экспериментальной ячейки и разработка методики регистрации вихревых течений с помощью инжектированных зарядов под поверхностью жидкого гелия в нормальном He-I и сверхтекучем He-II состояниях;

Экспериментальное изучение процесса генерации квантовых вихрей волнами, распространяющимися на поверхности сверхтекучего гелия при  $T=1.5\text{K}$ ;

Исследование взаимодействия инжектированных зарядов с вихревым течением в нормальном и сверхтекучем гелии вблизи  $T_\lambda$ ;

Экспериментальное исследование турбулентного состояния в системе азимутальных волн на поверхности жидкого водорода в ячейке цилиндрической геометрии;

Вычисление энтропийной характеристики перехода полимеров coil-stretch transition в случайных потоках неньютоновских жидкостей.

### **Научная новизна:**

Впервые показано, что при температуре близкой к  $T_\lambda$  генерация перпендикулярных волн на поверхности жидкости ведет к формированию на поверхности вихревых течений – валов, на которых происходит рассеяние зарядов.

Впервые экспериментально показано, что при температурах около  $T=1.5\text{K}$  взаимодействие двух перпендикулярных стоячих капиллярных волн на поверхности сверхтекучего гелия He-II приводит к формированию вблизи поверхности квантовых вихрей, которые эффективно захватывают инжектированные отрицательные заряды.

Впервые показано формирование стационарного локального максимума в турбулентном спектре на поверхности жидкого водорода в системе радиальных мод вблизи высокочастотного края прямого турбулентного каскада.

Предложено использование новой энтропийной характеристики перехода coil-stretch transition из-за сильных флуктуаций молекул вблизи перехода.

## **Практическая значимость**

Исследования турбулентности в различных ее проявлениях, проведенные в рамках данной диссертационной работы, позволяют расширить представления о механизмах переноса энергии в макро-и микросистемах. Понимание механизмов передачи энергии и диссипации энергии в турбулентности, а также взаимодействие разных подсистем (волновой и вихревой) важно для понимания многих как прикладных, так и фундаментальных задач, например, понимание нелинейного переноса энергии на поверхности нейтронных звезд; динамики крупномасштабных планетарных атмосферных вихрей. Экспериментальное изучение волновых и вихревых течений на поверхности жидкого водорода и сверхтекучего гелия позволяет глубже понять процессы переноса энергии в криогенных жидкостях, что может обеспечить безопасную грузоперевозку таких жидкостей. Результаты исследования эластической турбулентности можно использовать при создании систем охлаждения в микросхемах для предотвращения их перегрева, а также при изучении циркуляции жидкости в живых организмах.

## **Основные положения, выносимые на защиту:**

Установлено, что инжектированные в жидкий гелий отрицательные заряды взаимодействуют с вихревыми течениями, которое формируется волнами на поверхности жидкого гелия  $^4\text{He}$  при температурах выше 1.8 К.

Экспериментально установлено, что взаимодействие двух перпендикулярных стоячих капиллярных волн на поверхности сверхтекучего гелия He-II приводит к формированию вблизи поверхности квантовых вихрей, которые при температурах ниже 1.7 К эффективно захватывают инжектированные отрицательные заряды.

Обнаружено формирование стационарного локального максимума в турбулентном спектре в системе радиальных мод на поверхности жидкого водорода вблизи высокочастотного края прямого турбулентного каскада.

Предложено использование новой энтропийной характеристики coil-stretch transition из-за сильных флуктуаций молекул вблизи перехода.

**Достоверность** представленных в работе результатов обеспечивается публикациями в ведущих рецензируемых журналах России и мира. Полученные

результаты согласуются с теоретическими данными и результатами, полученными другими авторами, работающими в данном направлении.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на 14 конференциях:

1. Дискретная волновая турбулентность на поверхности жидкого водорода в условиях цилиндрической геометрии / М.Р. Мусаева, Ф.О. Султанов, А.А. Левченко, И.А. Ремизов // 38-е совещания по физике низких температур: сб. тр. – 2018. – С. 167–169.

2. Султанова, М.Р. Наблюдение локального максимума в стационарном турбулентном спектре капиллярных волн на поверхности жидкого водорода // М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, А.А. Левченко // Международная мультидисциплинарная конференция «Перспективная элементная база микро- и нанoeлектроники с использованием современных достижений электродинамики и статистической физики» («Власовские чтения – МГОУ 2018», Москва, МГОУ): сб. тр. – 2018.

3. Султанова, М.Р. Наблюдение локального максимума в стационарном турбулентном спектре капиллярных волн на поверхности жидкого водорода // М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, А.А. Левченко [и др.] // XXVII Научной сессии Совета РАН по нелинейной динамике: сб. тр. – 2018. – С.48.

4. Султанова, М.Р. Наблюдение локального максимума в стационарном турбулентном спектре капиллярных волн на поверхности жидкого водорода // М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, А.А. Левченко // Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» : сб. тр. – 2019. – С. 443–444.

5. Султанова, М.Р. Регистрация вихревого движения в объеме сверхтекучего гелия инжектированными зарядами // М.Р. Султанова, И.А. Ремизов // Всероссийская конференция молодых учёных-механиков: сб. тр. – 2020. – С. 139.

6. Султанова, М.Р. Регистрация вихревого движения в объеме сверхтекучего гелия по инжектированным зарядам / М.Р. Султанова, А.А. Левченко, И.А. Ремизов // 27-я Научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника» : сб. тр. (14-19 сентября 2020) / Судак. – 2020. – С. 39–43.

7. Султанова, М.Р. Взаимодействие тока инжектированных зарядов с движением жидкости // М.Р. Султанова, И.А. Ремизов // 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ: сб.тр. – 2020.

8. Султанова, М.Р. Взаимодействие инжектированных зарядов с квантовыми вихрями в сверхтекучем гелии-4 / М.Р. Султанова, А.А. Левченко, И.А. Ремизов // 28-я Научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника»: сб. тр. – 2021.

9. Султанова, М.Р. Взаимодействие инжектированных зарядов с вихревым течением в обычном и сверхтекучем гелии вблизи  $T_\lambda$  / М.Р. Султанова, И.А. Ремизов // Международная научная конференция молодых учёных наука на благо человечества: сб. тр. – 2022.

10. Султанова, М. Р. Взаимодействие инжектированных зарядов с квантовыми вихрями в сверхтекучем гелии / М.Р. Султанова, А.А. Левченко, И.А. Ремизов // Международная конференция «XX научная школа "Нелинейные волны – 2022": сб. тр. – 2022. – С.261.

11. Взаимодействие инжектированных зарядов с квантовыми вихрями в сверхтекучем гелии вблизи поверхности/ М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, А.А. Левченко, Л.П. Межов-Деглин // 29-я научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»: сб. тр. – 2022. – С.55-60.

12. Взаимодействие инжектированных зарядов с квантовыми вихрями в сверхтекучем гелии вблизи свободной поверхности/ М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, А.А. Левченко, Л.П. Межов-Деглин // XXXI Научной сессии Совета РАН по нелинейной динамике: сб. тр. – 2022. – С.37.

13. Султанова М.Р. Взаимодействие инжектируемых зарядов с вихревым течением в нормальном и сверхтекучем гелии вблизи  $T_\lambda$ / М.Р. Султанова, И.А. Ремизов // XXXI Научной сессии Совета РАН по нелинейной динамике: сб. тр. – 2022. – С.45.

14. Взаимодействие инжектированных зарядов с квантовыми вихрями в сверхтекучем гелии вблизи свободной поверхности / И.А. Ремизов, М.Р. Султанова, А.А. Левченко, Л.П. Межов-Деглин // 3-я Международная конференция, посвященная 60-летию ИФТТ РАН «Физика конденсированных состояний»: сб. тр. (29 мая – 02 июня 2023) / Черноголовка. – 2023. – С. 30.

### **Личный вклад**

Все экспериментальные данные, представленные в диссертационной работе, были получены при непосредственном участии автора данной работы. Диссертационная работа выполнена в лаборатории квантовых кристаллов ИФТТ РАН в период с 2018 по 2023 г. Основные результаты по теме диссертации изложены в четырех печатных изданиях рекомендованных ВАК, одна статья принята в печать и получено два патента на изобретение.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Полный объем диссертации составляет 83 страницы, включая 31 рисунок. Список литературы состоит из 94 источников.

### **Содержание работы**

**Во введении** дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной тематики, сформулированы цели и задачи. Помимо этого, перечислены положения, выдвигаемые на защиту, и аргументирована научная новизна проведенных исследований. Дополнительно, описывается научная и практическая значимость работы, степень достоверности, апробация работы и публикации по теме диссертации, а также личный вклад автора.

**Первая глава** посвящена введению в предмет исследований, дано краткое описание состояния исследований в данном направлении, описано понятие турбулентности и ее виды. Первой параграф посвящен собственным колебаниям поверхности в ячейках различных форм. Во втором параграфе уделяется внимание волновой турбулентности. Описаны основные процессы нелинейного взаимодействия волн – трех- и четырех волновые процессы с соблюдением законов сохранения энергии волнового импульса. На поверхности жидкости могут возникать и распространяться волны, обусловленные действием сил поверхностного натяжения и гравитационной силы. Закон дисперсии волн для свободной поверхности можно записать:

$$\omega^2 = gk + \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) k^3,$$



где  $\omega$  – круговая частота волны,  $g$  – сила тяжести,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  – плотность жидкости,  $k$  – волновой вектор.

Для нелинейных капиллярных волн теорией слабой волновой турбулентности предсказана возможность формирования прямого турбулентного каскада со степенным распределением энергии по волновым векторам  $E(k) \sim k^{-7/4}$  [6] – спектр Колмогорова-Захарова. В наших исследованиях изучалась турбулентность в системе капиллярных волн на поверхности жидкого водорода.

В третьем параграфе описаны волновые и вихревые движения в нормальном и сверхтекучем гелии. Дано описание сверхтекучей компоненты; ее особенностью является квантование циркуляции скорости движения жидкости [7], определяемое как интеграл  $\oint v_s \cdot dr$  по замкнутому контуру, который квантуется в единицах  $k = 2\pi\hbar/m$ , где  $m$  – масса атома гелия  $^4\text{He}$ . В нормальном жидком гелии He-I при  $T > 2.17\text{K}$  генерируемое волнами вихревое течение является классическим и описывается уравнением Навье-Стокса. При температурах  $T < 2.17\text{K}$  в вихревом движении в He-II участвуют нормальная и сверхтекучая компоненты. Дано описание структуры квантового вихря и отрицательных зарядов, которые использовались для исследования вихревых структур и их взаимодействия.

**Вторая глава** посвящена изучению волновой турбулентности в системе капиллярных волн на поверхности жидкого водорода, описана методика, представлены экспериментальные результаты.

Для исследования волновой турбулентности на поверхности жидкого водорода использовалась низкотемпературная установка с интервалом рабочих температур 10 – 20K. В вакуумной полости гелиевого криостата находилась оптическая камера, в которой располагалась экспериментальная ячейка. Ячейка была установлена на медном холодопроводе, и соединена капилляром с системой набора газообразного водорода. На торцах оптической ячейки смонтированы кварцевые окна для наблюдения. Внутри ячейки установлен медный стакан, в который конденсируется жидкий водород. Поверхность жидкости заряжается с помощью установленного источника зарядов. Над поверхностью жидкости, расположена система электродов для возбуждения колебаний на заряженной поверхности жидкости. Волны возбуждали монохроматической накачкой на частотах, близких к собственным резонансным частотам цилиндрической ячейки. Волны на поверхности жидкого водорода

регистрировали, измеряя переменную составляющую мощности лазерного луча  $P(t)$ , отраженного от поверхности жидкости.

На рис. 1 представлено распределение  $P_{\omega}^2$  по частоте на поверхности жидкого водорода, наблюдаемое при интенсивной монохроматической накачке на частоте  $f_p = 26.0$  Гц, близкой к одной из резонансных мод радиальных колебаний поверхности жидкости в цилиндрическом резонаторе, при амплитуде переменной составляющей напряжения  $U_p = 147$  В.

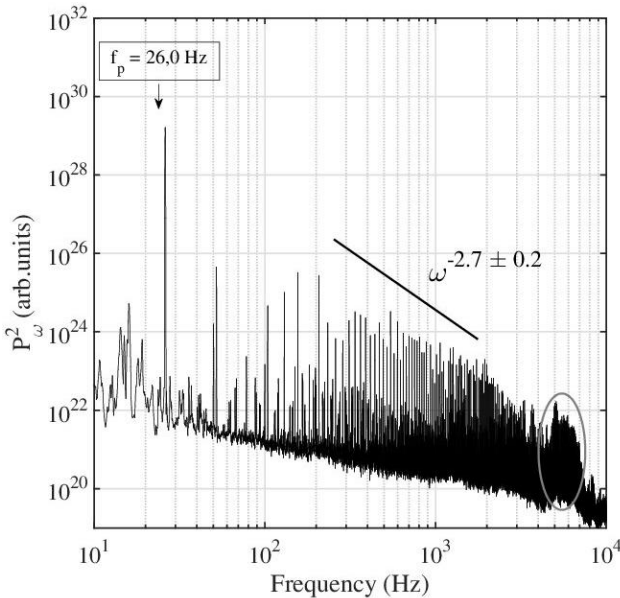


Рис. 1. Распределение  $P_{\omega}^2$  при накачке на частоте  $f_p = 26.0$  Гц и амплитуде  $U_p = 147$  В. Прямая линия, пропорциональная функции  $\omega^{-2.7 \pm 0.2}$ , соответствует прямому волновому турбулентному каскаду. Овалом выделена область локального максимума.

При уменьшении амплитуды накачки от  $U_p=189$  до  $U_p = 161$ В турбулентный спектр претерпевает существенные изменения. В инерционном интервале так же, как и при более интенсивной накачке, в широком интервале частот наблюдается степенное распределение  $P_{\omega}^2$ , которое практически не меняется. Однако в высокочастотной области спектра, на краю инерционного интервала появляется локальный максимум. При дальнейшем уменьшении амплитуды накачки до  $U_p = 147$  В форма локального

максимума на распределении  $P_{\omega}^2$  приобретает более четкие очертания (Рис. 1). В инерционном же интервале зависимость от частоты остается практически неизменной. Эволюцию турбулентных спектров при понижении амплитуды накачки, аналогично показанной на рис.1, мы наблюдали на частотах накачки от 10 Гц до 26 Гц.

Ранее появление локального максимума на краю инерционного интервала каскада капиллярных волн наблюдали в экспериментах по изучению турбулентности на поверхности сверхтекучего He-II [8]. Механизм формирования локального максимума в работе [8] удалось объяснить проявлением дискретности спектра собственных колебаний капиллярных волн на поверхности сверхтекучей жидкости в экспериментальной ячейке (вязкость He-II при температурах 1.5-2К на порядки ниже вязкости жидкого водорода).

Полученные результаты могут быть объяснены в рамках модели, предложенной в работе [9], где теоретически было исследовано и подтверждено численным моделированием влияние диссипации на структуру стационарного спектра волновой турбулентности. Было показано, что учёт конечной скорости диссипации энергии в высокочастотной области инерционного интервала и в области диссипации может приводить к существенному отклонению спектра от колмогоровского, предсказанного ранее в теории слабой волновой турбулентности [6]. В частности, учет диссипации может приводить к накоплению волновой энергии и появлению перегибов на кривых  $P_{\omega}^2$  вблизи высокочастотного края инерционного интервала. Это связано с подавлением амплитуд волн в диссипативной области вследствие нелинейного нарастания затухания колебаний с повышением частоты.

**Третья глава** посвящена исследованию взаимодействия инжектированных зарядов с вихревым течением в нормальном He-I и сверхтекучем гелии He-II. Исследования проводились с помощью низкотемпературной установки с интервалом рабочих температур от 1.5 К—4.2 К, которая представляла собой гелиевый оптический криостат, внутри вакуумной полости которого был установлен оптический контейнер с экспериментальной ячейкой внутри. Контейнер соединен с гелиевой полостью криостата с помощью медного холодопровода. Гелий в экспериментальную ячейку конденсировали из транспортного дьюара через капилляр набора. Экспериментальная ячейка представляла собой прямоугольный параллелепипед с шестью электрически изолированными гранями. Источник зарядов был установлен на одной из вертикальных

граней ячейки, (1 на рис.2). На другой вертикальной грани был размещен 5-сегментный коллектор (3 на рис.2). Каждый сегмент был подключен к независимому усилителю тока. Постоянное электрическое напряжение прикладывали к граням параллелепипеда так, чтобы инжектированные заряды перемещались от источника зарядов к коллектору. Проводился ряд экспериментов с различной конфигурацией электрического поля и с двумя местами расположения источника зарядов относительно приемного коллектора (рис.2а, б).

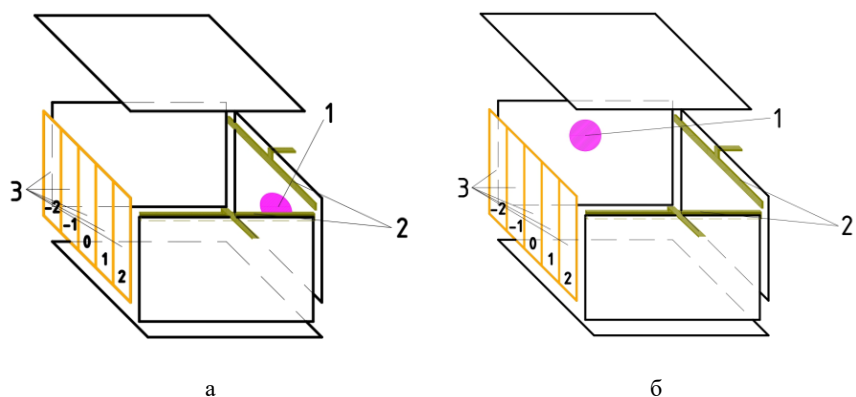


Рис. 2. Общий вид экспериментальной ячейки при двух конфигурациях электрического поля: 1 – источник зарядов, 2 – плунжеры, 3 – пятисекционный коллектор на боковой грани ячейки.

Возбуждение волн производилось с помощью двух плоских плунжеров (2 на рис.2), установленных параллельно двум смежным граням ячейки. Каждый плунжер приводился в движение индивидуальным электромагнитным приводом, который совершал поступательно-возвратное движение. Разность фаз электрических сигналов, подаваемых на приводы, равнялась  $90^\circ$ . На рис.3 и 4 представлены экспериментальные результаты при конфигурации, когда источник зарядов и принимающий коллектор находились на смежных гранях ячейки(рис.2 б).

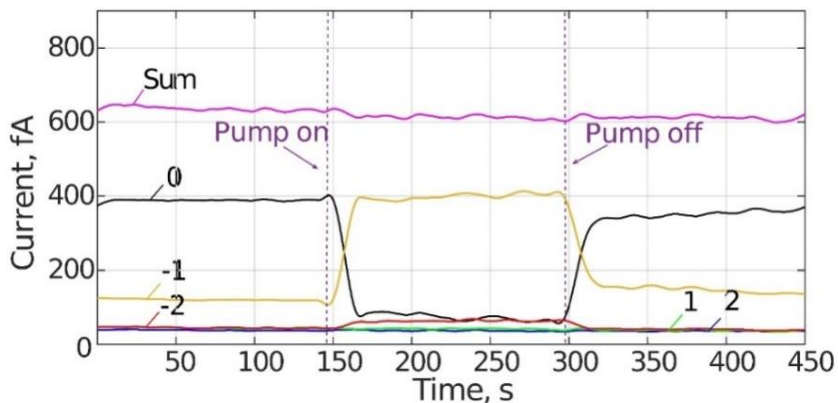


Рис.3. Влияние волновой накачки частотой  $f_g = 49.88$  Гц на распределение токов по секторам принимающего коллектора в He-II при постоянной температуре  $T = 1.5$  К. Пунктирные прямые указывают момент включения и выключения накачки.

На рис. 3 показано, как изменяется распределение токов по секторам принимающего коллектора в He-II при постоянной температуре  $T = 1.5$  К при включении волновой накачки на частоте  $f_g = 49.88$  Гц на 140-й секунде и последующем выключении накачки на 290-й секунде. Моменты включения и выключения переменного напряжения на приводах плунжеров указаны пунктирными вертикальными прямыми.

При включении накачки коллекторный ток перераспределится в основном между тремя сегментами. Ток на **0** сегменте  $I_0(t)$  уменьшился с 390 до  $\approx 50$  fA, на сегменте **-1**  $I_1(t)$  вырос до  $\approx 400$  fA, ток на **-2** сегменте  $I_2(t)$  также слегка вырос. Суммарное значение коллекторного тока  $I_{sum} \approx 640$  fA практически не изменилось. После выключения накачки токи, регистрируемые отдельными сегментами, практически возвращались к исходным значениям.

На рис. 4 показаны зависимости токов от температуры на сегментах коллектора  $I_i(T)$  при включенной накачке на частоте  $f_g = 49.88$  Гц, которые были зарегистрированы при плавном повышении температуры жидкости от 1.5 К до 2.17 К. Время изменения температуры составляло 1850 секунд, т.е. температура повышалась со скоростью  $\approx 16$  мК/мин. Волновая накачка была включена в течение всего эксперимента. Отметим, что в интервале температур  $T = 1.5 - 1.7$  К распределение токов по сегментам на рис. 4 качественно совпадает с распределением, показанным на

рис. 3. При дальнейшем повышении температуры в узком интервале температур  $T = 1.68 - 1.75$  К значения токов  $I_0$  и  $I_{-1}$  резко изменяются: ток  $I_0$  заметно возрастает, а  $I_{-1}$  убывает.

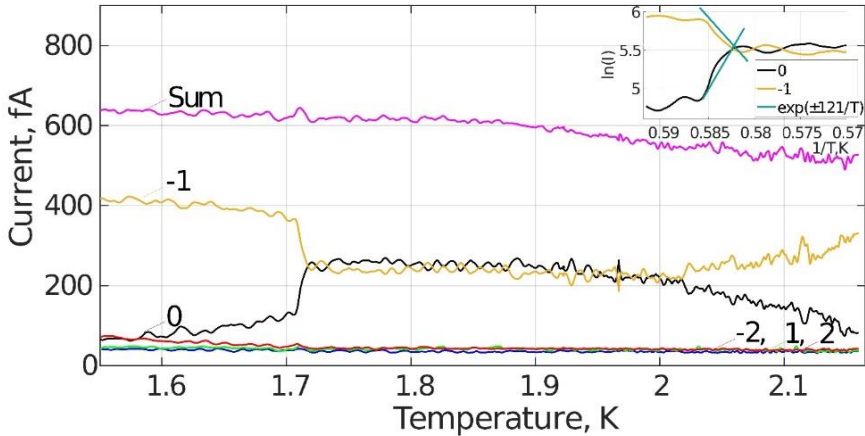


Рис.4. Температурные зависимости токов отрицательных зарядов, регистрируемых сегментами коллектора при включенной волновой накачке при плавном повышении температуры He-II от 1.5К до 2.17К. На вставке показана зависимость токов отрицательных зарядов  $I_0(T)$  и  $I_{-1}(T)$  в полулогарифмическом масштабе от обратной температуры  $1/T$  в интервале температур  $T=1.68 - 1.75$ К. Прямые линии соответствуют зависимости  $I = \exp(\pm 121/T)$ .

Как видно на рис. 4, при температурах выше 2.0 К распределение токов по отдельным сегментам при включенной накачке вновь заметно изменяется по сравнению с распределением токов в отсутствии накачки. Ток на центральном коллекторе  $I_0(T)$  падает до величины 80 fA при  $T=2.17$  К, а ток на сегменте  $-1$   $I_{-1}(T)$  возрастает до величины 330 fA. Плавное уменьшение суммарного тока  $I_{sum}(T)$ , токов  $I_0(T)$  и  $I_{-1}(T)$  с ростом температуры выше 1.9 К может быть связано с возрастанием плотности нормальной компоненты и коэффициента кинетической вязкости жидкого гелия вблизи  $T_\lambda$  [10, 11].

На вставке к рис. 4 показаны зависимости токов  $I_0$  и  $I_{-1}$  в логарифмическом масштабе от обратной температуры  $1/T$  в интервале температур  $T=1.68 - 1.75$  К. Время

прохождения этого температурного интервала составило более 200 секунд. Так как скорость повышения температуры невелика, а время захвата заряда в ловушке при  $T \approx 1.68$  К составляет  $\sim 10$  секунд при сопоставимой плотности квантовых вихрей [12], то можно предположить, что распределение зарядов в ловушках находится в квазиравновесном состоянии. Плотность захваченных зарядов  $\sigma_{tr}$  пропорциональна времени жизни зарядов в ловушке на квантовом вихре  $\tau_{tr}$  и может быть описана экспоненциальной функцией вида  $\sigma_{tr} \sim \exp(-\Delta/T)$ . Резкое изменение токов  $I_i(T)$  при температурах вблизи 1.7К связано с процессами выхода отрицательных зарядов из ловушек на квантовых вихрях. Можно предположить, что отклонения токов  $I_0$  и  $I_{-1}$  от исходных значений  $\Delta I_i$  при изменении температуры вблизи 1.7 К пропорциональны концентрации зарядов на квантовых вихрях  $\sigma_{tr}$ , т.е.  $\Delta I_i \sim \exp(-\Delta/T)$ . На вставке прямыми линиями показаны экспоненциальные зависимости с  $\Delta = 121$  К. Эта оценка глубины ловушки довольно близка к оценке глубины потенциальной ямы  $\Delta = 132$  К, полученной в экспериментах [13], где измеряли среднее время захвата отрицательных зарядов в ловушки на квантовых вихрях в He-II при температурах вблизи 1.7 К. Близость двух оценок энергий активаций и совпадение температурных интервалов подтверждает наше предположение. Поскольку при температурах выше  $T = 1.7$  К вероятность захвата заряда ловушкой мала [12-16] квантовые вихри в He-II оказываются электрически нейтральными. Поэтому при нагреве выше 1.7 К основную роль в рассеянии отрицательных зарядов на вихревых течениях в He-II играет механизм, рассмотренный нами ранее в работе [10] – увлечение подвижных зарядов вихревыми течениями в нормальной компоненте.

На рис. 5 представлены зависимости тока от времени на принимающих сегментах коллектора в сверхтекучем гелии при  $T = 1.8$  К. Источник зарядов и принимающий коллектор находились на противоположных гранях ячейки. Показаны зависимости от времени постоянных токов на сегментах коллектора  $I_i(t)$  до включения возбуждения волн на поверхности жидкого сверхтекучего гелия, во время и после выключения привода плунжеров. Значения токов на сегментах +1 и -1 в первые 60 секунд до включения плунжеров отличаются примерно в 2 раза. Полное время возбуждения волн составило 280 секунд. После включения накачки на 60 секунде измерений происходит возрастание тока на сегменте -1  $I_{-1}(t)$  примерно на  $90 \pm 10$  fA и уменьшение тока на  $90 \pm 10$  fA до нуля на сегменте +1  $I_{+1}(t)$ . Как видно, ток на сегментах

«0», +2 и -2 не реагирует на включение и выключение накачки. Причем ток на сегментах +2 и -2 близок к нулю. Обратим внимание, что характерное время установления тока на сегментах +1 и -1 после включения и выключения накачки составляет приблизительно 50 секунд.

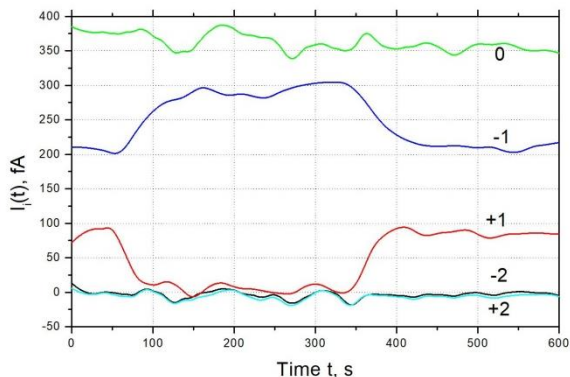


Рис. 5. Зависимость тока от времени на принимающих коллекторах в сверхтекучем гелии при  $T=1.8$  К.

На Рис. 6 представлены экспериментальные зависимости  $I_i(t)$ , полученные при температуре  $T=2.3$  К в нормальном гелии. Ток на сегментах +1, 0, -1 до включения накачки находился на уровне  $110 \pm 10$  fA,  $250 \pm 50$  fA,  $90 \pm 10$  fA. После включения накачки на 60-й секунде ток на сегменте -1 увеличился на  $115 \pm 20$  fA, на сегменте уменьшился на  $60 \pm 20$  fA. Отметим, что в отличие от сверхтекучего гелия, в нормальном гелии генерация вихревого движения поверхностными волнами влияет также на ток сегмента -2, он вырос приблизительно на  $40 \pm 10$  fA. Суммарный ток всех сегментов коллектора после включения накачки вырос с  $450 \pm 20$  fA до  $550 \pm 50$  fA, а после выключения вернулся к исходному значению.

Следует отметить, что как в сверхтекучем, так и в нормальном гелии амплитуды вариаций на зависимостях  $I_i(t)$  во время возбуждения поверхностных волн существенно превосходят аналогичные отклонения после выключения работы приводов плунжеров.



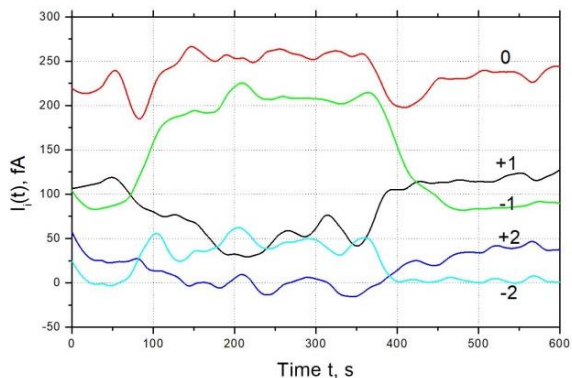


Рис. 6. Зависимость тока от времени на сегментах коллектора в нормальном гелии при температуре  $T=2.3\text{K}$ .

Поскольку при температуре  $1.8\text{ K}$  отрицательные заряды не захватываются квантовыми нитями, можно предположить, что заряды рассеиваются только на вихревых структурах нормальной составляющей, образованных нелинейными поверхностными волнами. Заряды до включения накачки двигались в условном конусе от источника зарядов к приемному коллектору так, что степень перекрытия сегмента пропорциональна току, приходящему на этот сегмент. После включения накачки ток перераспределился и основание условного конуса сместилось. Максимальное отклонение заряда от прямолинейного движения при случайном блуждании по вихревой решетке (диффузии) могло составлять  $3\text{ мм}$ .

На поверхности жидкого гелия при накачке устанавливается система валов с противоположной завихренностью с периодом  $\lambda$ . Отрицательные заряды движутся от источника заряда к коллектору, пересекая валы под углом примерно  $45^\circ$ . При пересечении валов направление увлечения зарядов определяется начальными направлениями векторов скорости дрейфа и скорости вихревого потока  $V_{\text{vor}}$ , и не зависит от знака заряда. Полное смещение заряда при этом движении можно оценить отношением  $V_{\text{vor}}/V_{\text{ch}} \cdot L$ , где  $V_{\text{ch}}$  — средняя скорость движения заряда в сверхтекучем или нормальном гелии,  $L$  — расстояние до сегментов. Оценка дает величину смещения  $1.5\text{ мм}$  в сверхтекучем гелии и  $4\text{ мм}$  в нормальном гелии. Как видно, эти значения оказались очень близкими к смещениям конусных лучей, которые оценивались по изменению токов на сегментах коллектора. Отметим, что основной дрейф зарядов

происходит вблизи коллектора, где скорость  $V_{\text{vor}}$  в семь раз меньше соответствующих значений около источника зарядов.

**Четвертая глава** посвящена развитию энтропийной характеристики перехода полимеров coil-stretch transition (от клубка в растянутое состояние) в случайных потоках.

Экспериментальные данные были получены на установке, аналогичной описанной в [17], которая представляла собой неподвижный цилиндрический стакан с плоским дном, над стаканом была установлена верхняя пластина. Полимерный раствор находился между дном стакана и верхней пластиной. Верхняя пластина вращалась с разными скоростями. Регистрация производилась камерой через дно стакана, снималось видео, которое разбивалось на кадры. Подготовка экспериментальной части исследования эластической турбулентности включала в себя несколько этапов. На первом этапе изготавливался исходный полимерный раствор, на втором этапе готовился сахарный растворитель, затем полимерный и сахарный растворы смешивали. Для регистрации в раствор добавляли флуоресцентно меченые молекулы. Флуоресцентный краситель возбуждался аргоновым ионным лазером. На рис. 7 показаны кадры из эксперимента, где молекула находится в свернутом состоянии при скорости вращения верхней пластины 10 об./мин. (рис. 7 а) и вытянутая молекула под действием потока при скорости в 90 об./мин. (рис. 7 б).

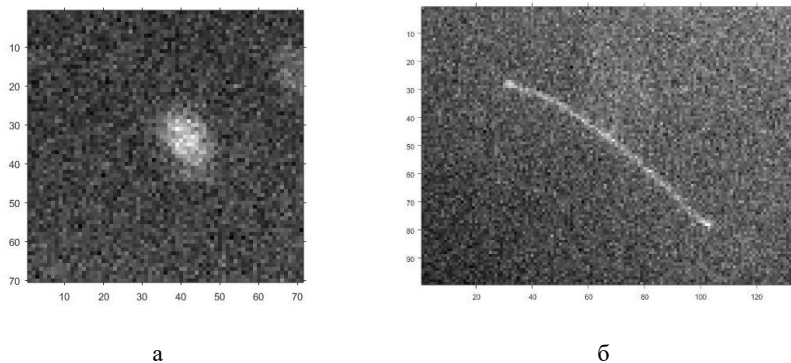


Рис. 7. Произвольные кадры из эксперимента: (а) свернутая молекула при скорости 10 об./мин., (б) вытянутая молекула при скорости в 90 об./мин.

На рис. 8 представлены распределения длин молекул по номерам кадров при разных скоростях потока. Можно увидеть, что увеличение скорости потока  $V_\theta$  приводит к значительному растяжению молекул.

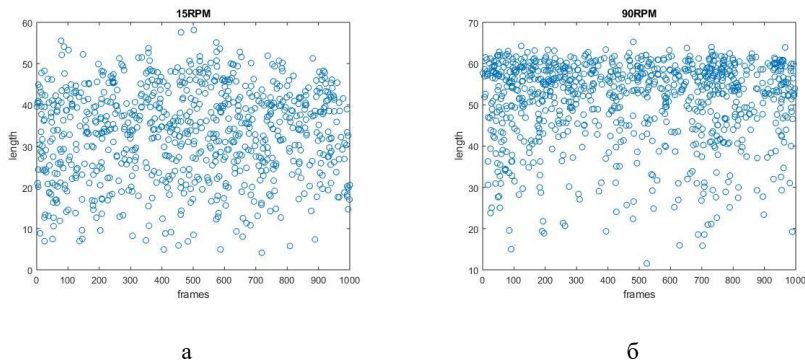


Рис. 8. Распределение длин молекул по номерам кадров при скорости потока: (а) 15 об/мин, (б) 90 об/мин.

Исследуемое эластическое течение является турбулентным [18-20], где флуктуации полимера, генерируемые потоком, далеки от теплового равновесия и сильно превышают тепловые шумы. Растянутые потоком полимерные цепи делают жидкость эластичной. Когда упругая энергия преодолевает диссипацию из-за релаксации полимера, для течений возникает упругая неустойчивость [21,22]. Дальнейшее увеличение  $Wi = t_r(\partial V_\theta / \partial r)$ , где  $t_r$  – время релаксации полимера,  $V_\theta$  – азимутальная скорость течения,  $r$  – радиальная координата, приводит к пространственно гладкому и случайному во времени течению эластической турбулентности [18-20], что позволяет исследовать динамику и форму одиночной полимерной молекулы в случайном течении при числе Рейнольдса  $Re \ll 1$  [23]. Наиболее важным и эффектным статистическим явлением эластической турбулентности является coil-stretch transition: когда число Вайсенберга  $Wi$  превышает определенное значение, наиболее вероятны изменения формы клубка в сильно вытянутую молекулу.

Главной целью этого исследования являлось предложение нового способа характеристики перехода, заключающегося в расчете энтропии полимерных молекул

как функции локального числа Вайсенберга  $Wi_{loc}$  (результаты расчетов приведены на рис. 9) и сравнение нового способа с ранее применяемым, представленным на рис. 10, основанном на определении начала coil-stretch transition с использованием показателей  $\alpha$  степенного хвоста функции плотности вероятности (PDF) удлинения полимера.

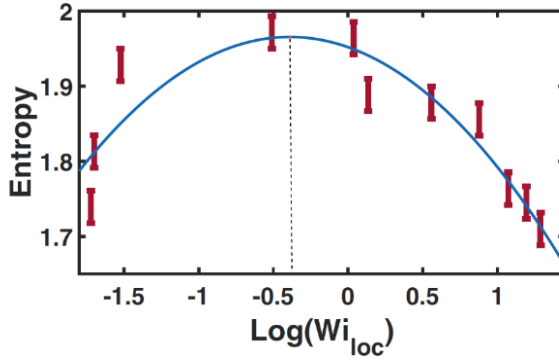


Рис. 9. Зависимость энтропии удлинения полимерных молекул от локального числа Вайсенберга  $Wi_{loc} = \tau_f(\partial V_\theta/\partial r)^{rms}$  в эластической турбулентности. Максимум энтропии  $S = 1.97 \pm 0.042$  при  $\log(Wi_{loc}) = -0.39 \pm 0.48$  интерпретируется как coil-stretch transition в интервале  $0.13 < Wi_{loc} < 1.23$ .

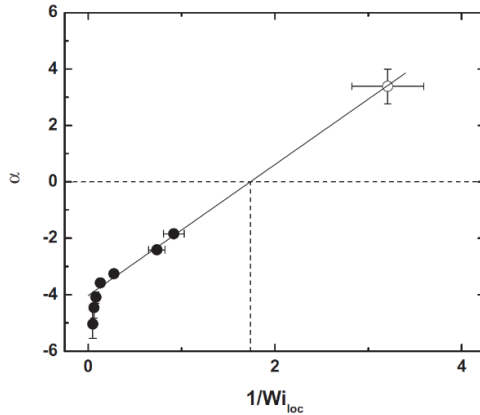


Рис.10. Определение начала coil-stretch transition  $Wi$  с использованием показателей  $\alpha$  степенного хвоста PDF удлинения полимерных молекул:  $Wi_{loc} = 0.58 \pm 0.20$ .

На рис. 9 представлен новый подход, основанный на энтропийной характеристике функции плотности вероятности удлинения молекул, которая, как ожидается, будет иметь максимум при переходе, и будет являться подходящей мерой для гауссовых распределений.

Энтропия молекул рассчитывалась по следующей процедуре. Для каждой скорости потока интервал возможных длин разделили на  $M = 8$  равных отрезков, и вычисляли вероятность попадания длины молекулы  $P_i$  в  $i$ -й интервал, с нормализацией  $\sum_i P_i = 1$ . На рис. 11 показаны распределения вероятности обнаружения молекул в  $i$ -м интервале длин длины, PDF распределение. Для каждой скорости потока длина  $x$  нормирована на максимальную наблюдаемую длину  $L$ .

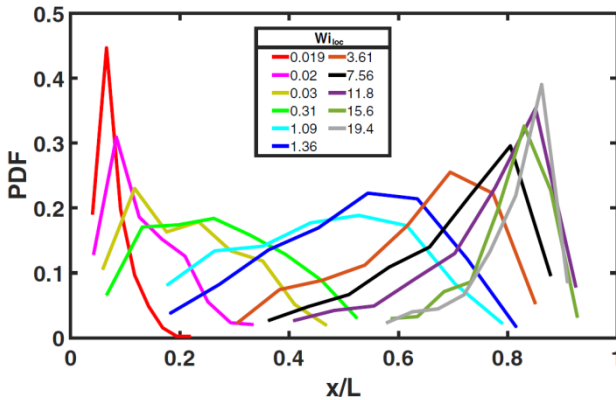


Рис. 11. PDF длины полимера, рассчитанные по примерно 900 молекул для каждого  $W_{i,loc}$ .

Затем вычисляли энтропию  $S$  молекул по формуле  $S = -\sum_i P_i \log_2 P_i$ . Погрешность в нахождении значений энтропии связана с конечным объемом выборки, так что вероятности  $P_i$  имеют статистические ошибки. Однако в энтропии также имеется систематическая ошибка, поскольку она является нелинейной функцией вероятности. Эту ошибку можно оценить как количество интервалов  $M$ , деленное на общее количество точек  $N \approx 900$ . Выбор  $M=8$  в данных исследованиях гарантирует, что эта ошибка меньше 1%. С другой стороны, количество интервалов не может быть слишком маленьким, чтобы можно было различить разные распределения. Число  $M = 8$  было выбрано, чтобы обеспечить максимальную вариацию энтропии и минимальную

систематическую ошибку для этого интервала  $W_i$ . Помимо систематической ошибки в значениях энтропии имеется также статистическая ошибка. Чтобы определить ее и найти положение максимума, производилась аппроксимация зависимости  $W_i$  от энтропии параболой и вычислялась дисперсия данных относительно этой кривой. Среднеквадратичная ошибка значений энтропии  $S$  составляет примерно 0.042. Из-за параболической зависимости погрешности нахождения положения максимума в  $\log W_i$  значительно больше и равна 0.48. Положение максимума в  $S(W_i)$  с такой точностью равно  $\log_2(W_{i\text{loc}}) = -0.39 \pm 0.48$ , критическая точка находится в интервале  $0.13 < W_{i\text{loc}} < 1.23$ . Энтропия характеризует уровень флуктуаций удлинения молекул при переходе в режим coil-stretch для восьми интервального распределения в диапазоне значений энтропии от  $S = 1.75 \pm 0.042$  до перехода и до  $S = 1.97 \pm 0.042$  после перехода.

**В Заключение** сформулированы основные результаты проделанной работы:

Представлены результаты экспериментального исследования турбулентных явлений в системе капиллярных волн на поверхности жидкого водорода в цилиндрической ячейке при монохроматической радиально-симметричной накачке. Наблюдено возникновение локального максимума в высокочастотной области инерционного интервала стационарного турбулентного спектра, на краю прямого волнового каскада.

Описаны результаты изучения взаимодействия зарядов с квантовыми вихрями. Экспериментально установлено, что инжектированные в жидкий гелий отрицательные заряды (электронные пузырьки) взаимодействуют с вихревыми течениями, порождаемыми волнами, распространяющимися перпендикулярно друг к другу по поверхности раздела пар-жидкость.

Впервые экспериментально установлено, что взаимодействие двух взаимно ортогональных стоячих волн на поверхности сверхтекучего He-II приводит к формированию вблизи поверхности не только классических вихрей в объеме нормальной компоненты He-II, но и квантовых вихрей, которые могут захватывать инжектированные отрицательные заряды, прижимаемые к поверхности жидкости внешним электрическим полем.

Представлен новый экспериментальный метод для определения количественной оценки coil-stretch transition. Энтропийный метод сравнили с традиционным подходом. Методы сходятся в определении перехода в пределах своих

статистических ошибок. Энтропийный метод позволяет определить coil-stretch transition, при этом энтропия увеличивается с 1.75 до 1.97, что существенно для определения области перехода.

### **Публикации по теме диссертации**

1. Observation of a local maximum in the stationary turbulent spectrum of capillary waves on the surface of liquid hydrogen / I.A. Remizov, M.R. Musaeva, A.V. Orlov [et al.] // *Low Temperature Physics*. – 2019. – Vol. 45, Iss. 4. – P. 363–366.
2. Sultanova, M.R. Registration of vortex motion in the bulk of superfluid helium by injected charges / M.R. Sultanova, I.A. Remizov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1560, Iss. 1. – P. 12046.
3. The interaction between injected charges and a vortex flow in normal and superfluid helium near  $T_\lambda$  / I.A. Remizov, M.R. Sultanova, A.A. Levchenko, L.P. Mezhev-Deglin // *Low Temperature Physics*. – 2021. – Vol. 47, Iss. 5. – P. 378–382.
4. Entropic characterization of the coil-stretch transition of polymers in random flows / F. Sultanov, M. Sultanova, G. Falkovich [et al.] // *Physical Review E*. – 2021. – Vol. 103, Iss. 3. – P. 33107.
5. Генерация квантовых вихрей волнами на поверхности сверхтекучего гелия / М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, Л.П. Межев-Деглин, А.А. Левченко // *Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. – 2023. – Vol. 118, Iss. 8.

### **Патент на изобретение:**

1. «Пат. 2754201 Российская Федерация, МПК G 01 R 19/00. Устройство для измерения малых токов инжектированных зарядов в конденсированных средах / Ремизов И.А., Межев-Деглин Л.П., Султанова М.Р.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН). – № 2020142392 ; заявл. 22.12.2020 ; опубл. 30.08.2021, Бюл. № 25. – 7 с. : 1 ил.
2. «Пат. 2783476 Российская Федерация, МПК G 05 F 1/02. Высоковольтный программируемый стабилизатор напряжения постоянного тока с изменяемой полярностью / Ремизов И.А., Межев-Деглин Л.П., Султанова М.Р. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук

(ИФТТ РАН). – № 2021139037 ; заявл. 27.12.2021 ; опубл. 14.11.2022, Бюл. № 32.– 7 с. : ил. 1.

### Список литературы

1. Захаров, В.Е. О спектре слабой турбулентности в плазме без магнитного поля / В.Е. Захаров // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 1966. — № 51. — С. 688.
2. L'vov, V.S. Wave turbulence under parametric excitation (applications to magnets) / V.S. L'vov — Berlin: Springer Link, 1994 — 332 с. V. S. Tsoi, Central Eur. J. Phys. 1, 72 (2003) .
3. Dyachenko, A.I. Five-wave interaction on the surface of deep fluid / A.I. Dyachenko, Y.V. Lvov, V.E. Zakharov // Physica D. — 1995. — № 87(1-4). — С. 233-261.
4. Bisnovaty-Kogan, G.S. Shock-wave propagation in the nonuniform interstellar medium / G.S. Bisnovaty-Kogan, S.A. Silich // Reviews of modern physics. — 1995. — № 67. — С. 667.
5. Захаров, В.Е. Турбулентность спиновых волн за порогом их параметрического возбуждения / В.Е. Захаров, В.С. Львов, С.С. Старобинец // Успехи Физических Наук. — 1974. — № 114 (4). — С. 609-654.
6. Zakharov, V.E. Kolmogorov spectra of turbulence I / V.E. Zakharov, V.S. L'vov, G. Falkovich, — Berlin: Springer Link, 1992 — 265 с.
7. Vinen, W.F. The detection of single quanta of circulation in liquid helium II / Vinen W.F. — London: Proceedings of the Royal Society, 1961 — 218 с.
8. Observation of wave energy accumulation in the turbulent spectrum of capillary waves on the He-II surface under harmonic pumping / L.V. Abdurakhimov, M.Yu. Brazhnikov, I.A. Remizov, A.A. Levchenko // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2010. – Т. 91, Вып. 6. – С. 291–296.
9. Ryzhenkova, I. Effect of dissipation on the structure of a stationary wave turbulence spectrum / I. Ryzhenkova, G. Fal'kovich // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 1990. — № 71 (6). — С. 1085.
10. Remizov, I.A. The interaction between injected charges and a vortex flow in normal and superfluid helium near  $T_\lambda$  / I.A. Remizov, M.R. Sultanova, A.A. Levchenko, L.P. Mezhov-Deglin // Low Temperature Physics. – 2021. – Vol. 47, Iss. 5. – P. 378–382.



11. Donnelly, R.J. The observed properties of liquid helium at the saturated vapor pressure / R.J. Donnelly, C.F. Barenghi // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. — 1998. — № 27. — C. 1217-1274.
12. Pratt, Jr.W.P. Trapping lifetime of negative ions in rotating superfluid helium under pressure / Jr.W.P. Pratt, W. Zimmermann // *Physical Review*. — 1969. — № 177. — C. 412.
13. Douglass, R.L. Ion trapping in rotating Helium II / R.L. Douglass // *Physical Review Letters*. — 1964. — № 13. — C. 791.
14. Donnelly, R.J. Phase coherence and stability of Helium II in narrow channels / R.J. Donnelly // *Physical Review Letters*. — 1965. — № 14. — C. 939.
15. Douglass, R.L. Ion trapping in rotating Helium II / R.L. Douglass // *Physical Review Letters*. — 1964. — № 13. — C. 791.
16. Mateo, D. Interaction of ions, atoms, and small molecules with quantized vortex lines in superfluid 4He / D. Mateo, J. Eloranta, G.A. Williams // *The Journal of Chemical Physics*. — 2015. — № 142. — C. 064510.
17. Geraschenko, S. Single-polymer dynamics: Coil-stretch transition in a random flow / S. Geraschenko, C. Chevillard, V. Steinberg // *Europhysics Letters*. — 2005. — № 71 (2). — C. 221.
18. Groisman, A. Efficient mixing at low Reynolds numbers using polymer additives / A. Groisman, V. Steinberg // *Nature*. — 2001. — № 410. — C. 905-908.
19. Groisman, A. Elastic turbulence in a polymer solution flow / A. Groisman, V. Steinberg // *Nature*. — 2000. — № 405. — C. 53-55.
20. Groisman, A. Elastic turbulence in curvilinear flows of polymer solutions / A. Groisman, V. Steinberg // *New Journal of Physics*. — 2004. — № 6. — C. 29.
21. Larson, R.G. Instabilities in viscoelastic flows / R.G. Larson // *Rheologica Acta*. — 1992. — № 31. — C. 213-263.
22. Shaqfeh, E.S.G. Purely elastic instabilities in viscometric flows / E.S.G. Shaqfeh // *Annual Review of Fluid Mechanics*. — 1996. — № 28. — C. 129-185.
23. Groisman, A. Stretching of polymers in a random three-dimensional flow / A. Groisman, V. Steinberg // *Physical Review Letters*. — 2001. — № 86. — C. 934.