

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Л. Д. Ландау  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН)**

ПРИНЯТО  
Ученым советом  
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
(протокол от 10 сентября 2021г. № 24 \_\_)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
д.ф.-м.н., И. В. Колоколов  
«10» сентября 2021г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
ДИСЦИПЛИНЫ ПО ВЫБОРУ Б1.В.ДВ.2.3  
«Статистическая нелинейная гидродинамика»**

По направлению подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

По направленности подготовки: 01.04.02 теоретическая физика  
(1.3.3. Теоретическая физика)

Уровень образования: Подготовка кадров высшей квалификации

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения – очная

Рабочая программа дисциплины по выбору «Статистическая нелинейная гидродинамика» (Б1.В.ДВ.2.3) для основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО) подготовки кадров высшей квалификации по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия по направленности подготовки 01.04.02 теоретическая физика (1.3.3. Теоретическая физика) составлена в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования «Подготовка кадров высшей квалификации» по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (ФГОС ВО), утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30.07.2014 №867 с изменениями и дополнениями от 30.04.2015 г.
2. Паспорт научной специальности 01.04.02 Теоретическая физика разработанный экспертами ВАК Минобрнауки РФ в рамках Номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 25.02.2009 г. № 59
3. Программа-минимум кандидатских экзаменов по специальностям 01.04.02 теоретическая физика и 01.04.07 физика конденсированного состояния с учетом особенностей сложившейся в ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН научной школы
4. Приказ Минобрнауки России от 04.02.2021 № 118 "Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093
5. Письмо ВАК от 13.05.2021 № 382-02 ВАК о Применении новой номенклатуры НС
6. Приказ Минобрнауки России от 03.06.2021 № 561 о «О советах по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени докторов наук»

Автор/составитель ФОС по дисциплине:

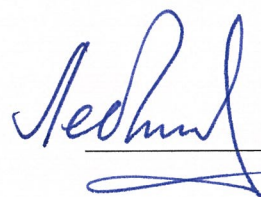
к.ф.-м.н., доцент, н.с.,  
10 сентября 2021 г.



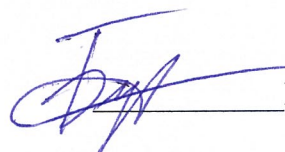
С. С. Вергелес

«Согласовано»:


Г.н.с. ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
Член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

  
В.В. Лебедев

Зам. Директора по научной работе  
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
д.ф.-м.н.

  
И.С. Бурмистров

Декан, профессор Факультета физики НИУ ВШЭ  
д.ф.-м.н.

  
М.Р. Трунин

## Паспорт научной специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика»

Шифр специальности:

01.04.02 Теоретическая физика

Формула специальности:

Теоретическая физика – область физики, занимающаяся математической формулировкой закономерностей физических явлений, наблюдаемых экспериментально. Теоретическая физика является единой наукой, внутренние связи в которой устанавливаются путем аналитических вычислений или численных расчетов и сравнением с экспериментальными данными. Ее фактическое содержание связано со всем историческим развитием физики. Целью исследований в области теоретической физики является наиболее полное описание фундаментальных физических законов.

Области исследований:

1. Теория конденсированного состояния классических и квантовых, макроскопических и микроскопических систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика и кинетическая теория равновесных и неравновесных систем.
2. Общая теория относительности и релятивистская астрофизика. Физические свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация.
3. Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая теория поля. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Разработка математических методов теории поля.
4. Общие вопросы квантовой механики: основы, теория измерений, общая теория рассеяния. Квантовая теория физических явлений в ядрах, атомах и молекулах.
5. Разработка теории мезоскопических систем. Квантовая теория информации и квантовые вычисления.
6. Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей нелинейной динамики сильно неравновесных систем. Разработка теории хаоса и турбулентности.

Отрасль наук:

физико-математические науки (за исследования, поименованные в пунктах 1-6)

## 2. Цель и задачи освоения дисциплины

**Целью** изучения настоящей дисциплины является подготовка квалифицированных научных кадров в области теоретической физики, способных вести научно-исследовательскую работу, самостоятельно ставить и решать актуальные научные и практические задачи.

**Задачи** дисциплины включают формирование у аспирантов системы знаний и основных понятий по квантовой электродинамике и развитие способности к научно-исследовательской работе и выработку потребности к самостоятельному приобретению знаний по теоретической физике.

## 3 Место дисциплины в структуре ОПОП ВО по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Дисциплина «Статистическая нелинейная гидродинамика» (Б1.В.ДВ.2.3) относится к дисциплинам по выбору дисциплины Б1.В.ДВ.2 вариативной части Блока 1 «Дисциплины» основной профессиональной образовательной программы аспирантуры по направлению подготовки 03.06.01 физика и астрономия по направленности (наименование) подготовки 01.04.02 теоретическая физика.

Программа курса предполагает изложение основных разделов механики жидкостей и газов. Анализ нелинейных гидродинамических уравнений в предельных случаях позволяет в итоге дать представление о возможных типах гидродинамических течений и их свойствах. В качестве стационарных течений рассматриваются потенциальные и вязкие ламинарные течения. Рассматривается ряд систем, в которых течения представляют собой волны. Нестационарные случайные течения анализируются на примерах турбулентности несжимаемой жидкости и слабой турбулентности поверхностных волн. Основной текст существенно дополняется упражнениями и задачами, приведенными в конце каждой лекции.

## 4. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Общепрофессиональные компетенции:	
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
Универсальные компетенции:	

УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК-А	способностью самостоятельно выделять различные физические механизмы в физическом феномене, подбирать адекватные модели для описания этих механизмов (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-В	способностью применять на практике базовые общепрофессиональные знания теории и методов теоретической физики, в том числе микроскопическое и феноменологическое описание, теорию возмущений и диаграммный методы (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Г	способность применять различные математические методы, такие как ТФКП, решение дифференциальных уравнений, применение теории групп, диаграммная техника, при исследовании математических уравнений
ПК-Д	готовность сотрудничать с экспериментальными группами по планированию физических экспериментов и анализу полученных экспериментальных данных, способностью выделять в экспериментальной ситуации отдельные физические феномены и составлять адекватную математическую модель, описывающую эти феномены (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Е	готовность к дальнейшему самообразованию и расширению компетенции, способностью локализовать общие принципы теоретической физики для нового физического феномена (в соответствии с профилем подготовки)

**В результате освоения дисциплины обучающиеся должны**

**знать:**

- основополагающие сведения по современной гидродинамике, а именно:
- гидродинамические уравнения и их упрощение в предельных случаях;
- теорию потенциальных течений;
- теорию течений при низких числах Рейнольдса;
- теорию поверхностных и объёмных волн;
- теорию турбулентных течений несжимаемой жидкости;
- теорию слабой волновой турбулентности;

- теорию магнито-гидродинамических уравнений
- теорию ударных волн и квази-одномерных течений

**уметь:**

- использовать свои знания для решения фундаментальных и прикладных задач;
- анализировать данные эксперимента и сопоставлять теоретические предсказания и экспериментальные результаты;
- делать качественные выводы при анализе асимптотических режимов в изучаемых проблемах;
- осваивать новые предметные области и теоретические модели;
- пользоваться адекватным математическим аппаратом при решении практических задач;
- эффективно использовать IT-технологии и компьютерную технику;
- конструировать физические подходы, способные описывать физические явления.

**владеть:**

- навыками построения минимальной модели, описывающей интересные аспекты изучаемого физического явления;
- свободно основными понятиями механики жидкостей и газов и статистическими моделями нелинейных гидродинамических уравнений, что позволяет решать необходимые задачи на современном уровне.

### 5. Объем дисциплины, виды учебной работы и форма отчетности

Вид учебной работы	Часов	ЗЕТ
Общая трудоемкость дисциплины	144	4
Аудиторные занятия:	56	1.55
лекции	56	1.55
Самостоятельная работа	81	2.25
Контроль	7	0.2

Форма отчетности: зачет с оценкой

### 6. Содержание и структура дисциплины

#### 6.1. Учебный план по дисциплине

№	Название тем	Количество часов				Всего
		лек.	семинары	СР	К	

1.	Потенциальные, ламинарные и волновые течения	20	-	31	3	54
2.	Неустойчивые и хаотические течения	36	-	50	4	90
	Итого часов:	56	-	81	7	144

Самостоятельная работа заключается в разборе задач и упражнений по курсу.

## **6.2. Содержание лекционного курса**

### **I. Потенциальные, ламинарные и волновые течения**

Тема 1. Идеальная жидкость и потенциальные течения.

Уравнение непрерывности. Идеальная жидкость, уравнение Эйлера. Поток энергии в идеальной жидкости. Потенциальное течение, уравнение Бернулли. Изэнтропийные течения. Несжимаемая жидкость. Обтекание тела потенциальным течением, квазиимпульс и присоединённая масса. Завихренность, вихревые нити, теорема Гельгольца-Кельвина.

Тема 2. Вязкая жидкость.

Уравнение Навье-Стокса, вязкость. Ламинарный пограничный слой, сдвиговое течение. Течение Пуазейля, течение Куэтта. Обтекание твёрдого шара и жидкой сферы: течение в ближней и дальней зонах. Ламинарный след. Вязкость суспензии твёрдых шариков. Плавание при малых числах Рейнольдса.

Тема 3. Звуковые и ударные волны.

Звуковые волны малой амплитуды. Распространение звука в неоднородных и неоднородно движущихся средах. Число Маха. Поверхности разрыва типа ударные волны. Ударная адиабата. Ударные волны слабой интенсивности.

Тема 4. Полные гидродинамические уравнения.

Гидродинамические уравнения с учетом диссипативных членов. Сдвиговая и объемная вязкости, теплопроводность. Затухание звука. Конвекция, диффузия и перенос примесей. Ширина ударных волн в диссипативных средах.

Тема 5. Гравитационно-капиллярные волны.

Гравитационно-капиллярные волны на глубокой воде. Гамильтонова форма уравнений волнового движения. Затухание гравитационно-капиллярных волн. Дрейф Стокса. Слабо нелинейные волны, распространяющиеся в одном направлении. Нелинейное уравнение Шредингера: модуляционная неустойчивость. Волна Стокса. Волны на жидкости конечной глубины: мелкая вода, уравнение Кортевега-де Фриза.

Тема 6. Одномерное течение сжимаемого газа.

Истечение газа из сопла. Одномерные бегущие волны. Образование ударных волн в слабо нелинейных звуковых волнах. Произвольное одномерное движение газа: характери-



стики, инварианты Римана. Уравнение Бюргерса.

Тема 7. Вращающиеся жидкости.

Сила Кориолиса. Инерционные волны. Теорема Прудмана-Тейлора.

Тема 8. Уравнения магнитной гидродинамики.

Закон Ома и поток импульса в проводящей движущейся жидкости. Волны Альфвена. Магнито-инерционные волны во вращающейся жидкости на фоне однородного магнитного поля. Магнитное число Прандтля. Динамо-эффект в стационарном потоке. Ударные волны и разрывы.

Тема 9. Гидродинамика сверхтекучей жидкости.

Уравнения гидродинамики сверхтекучей жидкости, нормальная и сверхтекучая компоненты. Первый и второй звук в сверхтекучей жидкости. Сверхтекучая жидкость при нулевой температуре. Квантовые вихри, уравнение движения вихревой линии. Первая и вторая вязкость. Гидродинамика сверхтекучей жидкости вблизи температуры перехода в сверхтекучее состояние.

Тема 10. Динамика жидких кристаллов.

Основные жидкокристаллические фазы; нематики, смектики, столбчатые фазы. Уравнения гидродинамики нематиков, смектиков и столбчатых фаз. Звуковые явления в жидких кристаллах и релаксационные моды. Электродинамическая неустойчивость в нематиках и смектиках С. Крупномасштабная динамика холестериков.

Тема.11. Динамика неньютоновских жидкостей.

Упругий вклад в тензор напряжений, связанный с полимерами, в слабых полимерных растворах. Динамика полимерной степени свободы, переход из свернутого в развернутое состояние полимеров, различные модели полимерной динамики. Уравнения гидродинамики при наличии активных пловцов.

Тема 12. Двумерные течения.

Стационарные простые волны. Уравнение Чаплыгина. Закон сохранения энтропии и высшие интегралы движения в несжимаемой бездиссипативной жидкости.

Тема 13. Взаимодействие волн с вихревым течением

Нелинейное взаимодействие поверхностных волн с вихревым течением: виртуальное волновое касательное напряжение и вихревая сила. Ленгмюровская неустойчивость и циркуляция. Рассеяние волн на вихревом течении. Нелинейное взаимодействие акустических волн с течением: акустические течения. Возбуждение и рассеяние акустических волн турбулентным течением.

## **II. Неустойчивые и хаотические течения.**

Тема 14. Турбулентность несжимаемой трёхмерной жидкости.

Турбулентное состояние, переход из ламинарного в турбулентное состояние. Изотропизация турбулентного течения на малых масштабах. Свойства корреляционных функций второго и третьего порядка в изотропном хаотическом потоке. Каскад энергии в трёхмерном течении, инерционный интервал. Размерный анализ, закон Колмогорова. Закон Ричардсона. Аномальный скейлинг, перемежаемость.

Тема 15. Неустойчивые течения и развитие неустойчивостей.

Неустойчивость Релея-Тейлора. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Конвективная неустойчивость неподвижной жидкости, ячейки Релея-Бенара. Законы подобия, числа Прандтля, Релея, Нуссельта.

Тема 16. Двумерная турбулентность.

Турбулентное статистически изотропное течение: обратный каскад энергии и прямой каскад энтропии. Двумерные вихревые когерентные течения. Тензор напряжений Рейнольдса, его расчёт в квази-линейном режиме. Энергетический баланс.

Тема 17. Обтекание тела при больших числах Рейнольдса.

Турбулентный пограничный слой. Логарифмический профиль скоростей. Явление отрыва. Кризис сопротивления. Турбулентный след, хорошо обтекаемые тела. Теорема Жуковского, подъёмная сила тонкого крыла.

Тема 18. Слабая волновая турбулентность.

Слабо нелинейные волны, трехволновое и четырехволновое взаимодействия. Физические примеры. Скейлинг закона дисперсии и констант взаимодействия. Законы сохранения в волновой системе. Кинетическое уравнение для слабо взаимодействующих волн. Стационарные потоковые решения кинетического уравнения.

Тема 19. Пассивный скаляр в хаотических потоках.

Уравнение переноса пассивного скаляра в хаотических потоках, турбулентная диффузия. Модель Крайчнана, парная корреляционная функция, аномальный скейлинг. Пассивный скаляр в гладком хаотическом потоке. Кинематическое динамо.

Тема 20. Сверхтекучая турбулентность.

Условия возникновения сверхтекучей турбулентности. Уравнение Холла-Вайнена. Взаимное трение нормальной и сверхтекучей компонент.

## **7. Самостоятельная работа аспирантов**

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах, на рабочих местах с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется собеседованием. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

## **8. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоя-**

## **тельной работы аспирантов**

Контрольные вопросы для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины совпадают с пунктами содержания лекционного курса.

### **8.1. Пример экзаменационного билета**

1. Волновое движение в мелкой воде. Уравнение Кортевега–да Фриза.
2. Турбулентный след при обтекании тела. Сила сопротивления и подъемная сила. Хорошо обтекаемые тела.

После окончания курса аспирантам дается набор вопросов для зачета.

## **9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### **9.1. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

- [1] Ландау Л., Лифшиц Е. Теоретическая физика. В десяти томах. Том VI. Гидродинамика. Издательство Физматлит, 2017. 728 стр. ISBN 978-5-9221-1625-1
- [2] Ламб. Гидродинамика. Москва: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947
- [3] Г.Фалькович. Современная гидродинамика. Изд. 2-е, испр. и доп. Издательство «ИКИ», 2018 г. 240 стр. ISBN 978-5-4344-0518-8
- [4] Nazarenko, Sergey. Wave turbulence. Vol. 825. Springer Science & Business Media, 2011.
- [5] Guyon, E., Hulin, J. P., Petit, L., & Mitescu, C. D. (2015). Physical hydrodynamics. Second edition. Oxford University Press. ISBN 978-0-19-870244-3
- [6] Хаппель, Д., Бреннер, Г. (1976). Гидродинамика при малых числах Рейнольдса: Перевод с англ. Мир.
- [7] Zakharov, V.E., L'vov, V.S. and Falkovich, G., (1992) Kolmogorov spectra of turbulence I: Wave turbulence. Springer-Verlag
- [8] Фриш, У. Турбулентность. Наследие Колмогорова. Москва: Фазис 2 (1998).
- [9] Günther Rüdiger and Rainer Hollerbach. The Magnetic Universe: Geophysical and Astrophysical Dynamo Theory. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2004

### **8.3. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)**

См. список литературы

### **8.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

On-line доступ к журналам «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Письма в ЖЭТФ», к журналам: Physical Review Journals Published by the American Phys-

ical Society, к некоторым публикациям издательств Elsevier и Springer/Nature Publishing Group (из подписки ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН).

#### **8.5. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

#### **9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

аудиторный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН;  
ноутбук, мультимедиа-проектор, экран;  
рабочее место с выходом в Интернет;  
библиотечный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН