

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования "Пермский
государственный национальный исследовательский
университет"**

Кафедра общей физики

Авторы-составители: **Бабушкин Игорь Аркадьевич
Полудницин Анатолий Николаевич
Фрик Петр Готлобович**

Рабочая программа дисциплины

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Код УМК 94095

Утверждено
Протокол №9
от «25» мая 2021 г.

Пермь, 2021

1. Наименование дисциплины

Турбулентность

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина входит в обязательную часть Блока « Б.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление: **03.03.02** Физика

направленность Фундаментальная физика

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины **Турбулентность** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

03.03.02 Физика (направленность : Фундаментальная физика)

ПК.1 Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин

Индикаторы

ПК.1.1 Осваивает новые теоретические и экспериментальные методы исследования

ПК.1.2 Использует теоретические знания для построения модельных задач физических процессов и явлений

4. Объем и содержание дисциплины

Направления подготовки	03.03.02 Физика (направленность: Фундаментальная физика)
форма обучения	очная
№№ триместров, выделенных для изучения дисциплины	10
Объем дисциплины (з.е.)	5
Объем дисциплины (ак.час.)	180
Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе:	70
Проведение лекционных занятий	42
Проведение лабораторных работ, занятий по иностранному языку	28
Самостоятельная работа (ак.час.)	110
Формы текущего контроля	Входное тестирование (1) Защищаемое контрольное мероприятие (1) Итоговое контрольное мероприятие (1) Письменное контрольное мероприятие (1)
Формы промежуточной аттестации	Экзамен (10 триместр)

5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины

Турбулентность.

Научиться проводить спектральный анализ временных рядов, регистрируемых в экспериментах с турбулентными потоками. Получить навык вычислений корреляционных функций и спектров

Введение

Вводные замечания. Содержание курса, требования, форма отчетности.
Уравнение Навье-Стокса и проблема описания турбулентных течений.

Хаос в динамических системах

Фазовое пространство, аттракторы, бифуркации. Консервативные и диссипативные системы. Методы исследования поведения систем: корфункции, спектры, сечения Пуанкаре, показатели Ляпунова. Фракталы. Фрактальная размерность. Обобщенная размерность. Странные аттракторы. Определение размерности аттракторов реальных систем.
Понятие сценария перехода. Сценарий Ландау. Сценарий Рюэля-Таккенса. Субгармонический каскад. Примеры гидродинамических систем низкого порядка, характеризующихся хаотическим поведением.

Подход Рейнольдса и полуэмпирические модели турбулентности

Подход Рейнольдса. Уравнение Рейнольдса. Статистические моменты случайных полей.
Цепочка уравнений Фрийдмана-Келлера. Проблема замыкания.
Гипотеза Буссинеска для тензора Рейнольдса. Турбулентная вязкость. Путь смешения Прандтля.
Модели переноса турбулентной вязкости.
Двухпараметрические модели.
Проблема генерации магнитных полей потоками проводящей жидкости. МГД-динамо. Уравнение индукции магнитного поля для осредненных полей в движущейся турбулентной среде. Альфа и бета эффекты.

Подход Колмогорова и теория однородной и изотропной турбулентности

Однородная изотропная турбулентность. Баланс энергии по масштабам. Инерционный интервал. Каскад энергии. Скорость диссипации энергии. Закон Колмогорова-Обухова, как результат анализа размерностей. Структурные функции высших порядков. Двухточечные корреляционные функции. Уравнения Кармана-Ховарда. Закон Колмогорова для структурной функции третьего порядка - точный результат уравнений К-Х. Перемежаемость. Локально-однородная турбулентность. Теория Колмогорова (1962): Гипотеза подобия. Логнормальное распределение.
Бета-модель - простая монофрактальная модель турбулентности. Бифрактальная модель. Мультифрактальные модели. Мультифрактальный спектр и его связь с обобщенной размерностью. Модель Ше-Левека (три гипотезы и результат).
Расширенная автомодельность (ESS). Обобщенная модель Ше-Левека-Дюбрюль. Лог-Пуассоновское распределение.

Двумерная турбулентность

Законы сохранения в трехмерной и двумерной гидродинамике.
Каскадные процессы в двумерной турбулентности. Инерционные интервалы переноса энергии и энтропии. Спектральные законы Крейчнана-Колмогорова.
Квазидвумерные течения. Лабораторные эксперименты. Численные эксперименты. Перемежаемость в двумерной турбулентности. Когерентные структуры. Проверка моделей перемежаемости.

Пассивные и активные примеси

Перемешивание пассивных примесей турбулентным потоком. Спектральные свойства пульсаций

примеси при различных числах Прандтля.

Турбулентность, вызванная неоднородностью температуры. Спектральные свойства конвективной турбулентности. Интервал Обухова. Масштаб Болджиано. Особенности двумерной конвективной турбулентности.

Иерархические модели

Конечномерные представления уравнений Навье-Стокса. Спектральные и сеточные методы (преимущества и недостатки). Принципы построения специального базиса для описания турбулентности. Одномерный иерархический базис (функции Литлвуда-Пелли). Двух и трехмерные базисы.

Иерархические модели. Иерархические функции и вейвлеты. Численное решение уравнений гидродинамики с помощью вейвлет-базисов. Иерархическая модель двумерной турбулентности.

Каскадные модели турбулентности

Принципы построения каскадных (оболочечных) моделей развитой турбулентности. Коллективные переменные. Системы гидродинамического типа. Модели, допускающие один интеграл движения. Модели типа Новикова-Деснянского.

Модели с двумя интегралами движения. Модель GOY. Решения и законы сохранения.

Временная перемежаемость, ее сходство и различия с пространственной перемежаемостью турбулентности. Каскадные модели МГД-турбулентность и турбулентной конвекции.

лабораторная работа "измерение спектральных характеристик пульсаций температуры в турбулентном факеле"

корреляционные функции, Фурье анализ, структурные функции

лабораторная работа "спектральный анализ двухмерных полей"

спектральный анализ двухмерных полей, структурные функции, пространственные спектры Фурье, изменения спектров, вейвлет анализ.

лабораторная работа "измерение анизотропии турбулентных пульсаций"

пульсации градиента температуры при развитой турбулентной конвекции в кубической полости, метод фокального пятна;

6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная:

1. Маслов, А. А. Динамика вязкого газа, турбулентность и струи : учебное пособие / А. А. Маслов, С. Г. Миронов. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 214 с. — ISBN 978-5-7782-1434-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/45366>
2. Пергамент М. И. Методы исследований в экспериментальной физике: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Прикладные математика и физика"/М. И. Пергамент.- Долгопрудный:Издательский дом "Интеллект",2010, ISBN 978-5-91559-026-6.-300.-Библиогр. в конце гл.

Дополнительная:

1. Фрик П. Г. Турбулентность : подходы и модели/П. Г. Фрик.-М.- Ижевск:Ин-т компьютерных исслед.,2003, ISBN 5-93972-269-5.-292.-Библиогр.: с. 286-291
2. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели/П. Г. Фрик.-Москва:Регулярная и хаотическая динамика,2010, ISBN 978-5-93972-818-8.-330.-Библиогр.: с. 322-330 и в конце гл.

9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

<https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/papers/books/> Моделирование турбулентности

<http://www.iprbookshop.ru/45366.html> Маслов А.А. Динамика вязкого газа, турбулентность и струи
[Электронный ресурс] : учебное пособие /

10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Образовательный процесс по дисциплине **Турбулентность** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем:

- презентационные материалы (слайды по темам лекционных и практических занятий);
- доступ в режиме on-line в Электронную библиотечную систему (ЭБС);
- доступ в электронную информационно-образовательную среду университета;
- интернет-сервисы и электронные ресурсы (поисковые системы, электронная почта, профессиональные тематические чаты и форумы, системы аудио и видео конференций, онлайн энциклопедии и т.д.).

Программное обеспечение:

- Пакет Microsoft Windows Professional Rus + Service Pack 2 OEM software;
- Microsoft Office Pro 2003 Win32 Rus + Service Pack 2 OEM software;
- Исполняемые модули программ для ЛАД-05;
- Пакет Actual Flow.

При освоении материала и выполнения заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ (student.psu.ru).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).

система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.

система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

1. Лекционные занятия.

Аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран для проектора, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

2. Лабораторные занятия.

Лаборатория «Оптические методы в гидродинамике», оснащенная специализированным оборудованием. Состав оборудования определен в Паспорте лаборатории.

3. Групповые (индивидуальные) консультации.

Аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

4. Текущий контроль.

Аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

5. Самостоятельная работа.

Аудитория для самостоятельной работы, оснащенный компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», обеспеченный доступом в электронную информационно-образовательную среду университета. Помещения Научной библиотеки ПГНИУ.

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютера с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине
Турбулентность**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции.
Индикаторы и критерии их оценивания**

ПК.1

**Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения
профильных физических дисциплин**

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p>ПК.1.1 Осваивает новые теоретические и экспериментальные методы исследования</p>	<p>Знает теоретические основы дисциплины "Турбулентность" и может применять их в экспериментальных исследованиях.</p>	<p align="center">Неудовлетворител Не знает теоретических основ турбулентности и не может применять эти знания в экспериментальных исследованиях.</p> <p align="center">Удовлетворительн Показывает частичное знание теоретических основ турбулентности. Может применять эти знания в экспериментальных исследованиях, но допускает ошибки.</p> <p align="center">Хорошо Показывает знание теоретических основ турбулентности. Может применять эти знания в экспериментальных исследованиях, но допускает не значительные ошибки.</p> <p align="center">Отлично Знает теоретические основы турбулентности и может применять эти знания в экспериментальных исследованиях.</p>
<p>ПК.1.2 Использует теоретические знания для построения модельных задач физических процессов и явлений</p>	<p>Обладает базовыми знаниями теории турбулентности и может выполнить постановку исследовательской задачи.</p>	<p align="center">Неудовлетворител Не обладает базовыми знаниями теории турбулентности и не может выполнить постановку исследовательской задачи.</p> <p align="center">Удовлетворительн Обладает частичными знаниями теории турбулентности. Может выполнить постановку исследовательской задачи при внешнем руководстве.</p> <p align="center">Хорошо Обладает базовыми знаниями теории турбулентности и может выполнить постановку исследовательской задачи, но допускает при этом несущественные ошибки.</p> <p align="center">Отлично Обладает базовыми знаниями теории</p>

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
		Отлично турбулентности и может выполнить постановку исследовательской задачи.

Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : СУОС +

Вид мероприятия промежуточной аттестации : Экзамен

Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации : Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

Максимальное количество баллов : 100

Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 50 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 50 балла

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
Входной контроль	Введение Входное тестирование	уравнение непрерывности, уравнение Эйлера, закон подобия, приближение Буссенеска, условия устойчивости гидродинамических течений, основные уравнения магнитной гидродинамики

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
<p>ПК.1.2 Использует теоретические знания для построения модельных задач физических процессов и явлений</p> <p>ПК.1.1 Осваивает новые теоретические и экспериментальные методы исследования</p>	<p>Подход Колмогорова и теория однородной и изотропной турбулентности</p> <p>Письменное контрольное мероприятие</p>	<p>1) Уравнения Навье-Стокса и турбулентность.2) Консервативные и диссипативные системы (примеры фазовых портретов).3) Бифуркации. Основные виды. Нормальные и обратные.4) Переход к хаосу по сценарию Ландау.5) Фракталы. Обобщенная размерность.6) Аттракторы. Странный аттрактор. Сценарий Рюэля-Таккенса.7) Измерение размерности аттрактора.8) Субгармонический каскад.9) Методы исследования перехода к хаосу (показатели Ляпунова, сечения Пуанкаре, спектры и т.д.).10) Система Лоренца.11) Уравнение Рейнольдса для средних полей скорости и температуры.12) Простые способы замыкания. Турбулентная вязкость. Длина пути смешения Прандтля.13) Модели переноса турбулентной вязкости и двухпараметрические модели (типа $\mathcal{S}_k - \epsilon$). 14) Магнитное поле в турбулентной среде (альфа и бета эффекты)15) Ур.Навье-Стокса в Фурье-пространстве и уравнение баланса энергии по масштабам16) Теория Колмогорова однородной и изотропной турбулентности (К41) - оценки (спектры, структурные функции, дисс.масштаб, законы вырождения)</p>

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
<p>ПК.1.2 Использует теоретические знания для построения модельных задач физических процессов и явлений</p> <p>ПК.1.1 Осваивает новые теоретические и экспериментальные методы исследования</p>	<p>Каскадные модели турбулентности</p> <p>Итоговое контрольное мероприятие</p>	<p>1) Законы сохранения в трехмерной гидродинамике2) Законы сохранения в двумерной гидродинамике3) Каскадные процессы в двумерной турбулентности. Инерционные интервалы.4) Лабораторные эксперименты по двумерной турбулентности.5) Численные исследования двумерной турбулентности.6) Перемежаемость в двумерной турбулентности..7) Перемешивание пассивной примеси 2D и 3D турб.8) Перемешивание пассивной примеси при малых и больших числах Прандтля.9) Конвективная турбулентность. Интервал Обухова. Масштаб Болджиано.10) МГД-турбулентности1) Иерархические базисы для описания турбулентности12) Иерархические модели турбулентности13) вейвлет описание турбулентных полей. 14) Принципы построения каскадных моделей турбулентности. Системы гидродинамического типа.15) Модель Новикова-Деснянского.16). Модель GOY. 17) Скейлинг и перемежаемость в каскадных моделях18) Каскадная модель МГД-турбулентности19) Каскадно-сеточные методы и комбинированные модели сложных турбулентных систем.</p>

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
ПК.1.2 Использует теоретические знания для построения модельных задач физических процессов и явлений ПК.1.1 Осваивает новые теоретические и экспериментальные методы исследования	лабораторная работа "измерение анизотропии турбулентных пульсаций" Защищаемое контрольное мероприятие	Однородная и изотропная турбулентность, оптический метод фокального пятна, пассивные и активные примеси. Спектральный анализ одномерных сигналов и двумерных полей

Спецификация мероприятий текущего контроля

Введение

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **0**

Проходной балл: **0**

Показатели оценивания	Баллы
законы подобия и безразмерные числа	5
основы теории движения проводящей жидкости	5
основные допущения при выводе уравнений движения реальной жидкости	5
основные допущения при выводе уравнений движения идеальной жидкости	5

Подход Колмогорова и теория однородной и изотропной турбулентности

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **15**

Показатели оценивания	Баллы
Знает основные уравнения, имеет представление о сценариях перехода гидродинамической системы в состояние хаоса,	10
Знает основные уравнения, способен описать сценарии перехода гидродинамической системы в состояние хаоса, умеет применять на практике методы исследования турбулентных течений.	8
Знает основные уравнения, способен описать сценарии перехода гидродинамической системы в состояние хаоса, имеет представление о способах исследования турбулентных течений.	7
Имеет понятие об основных уравнениях, используемых в теории турбулентности	5

Каскадные модели турбулентности

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставяемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**

Проходной балл: **20**

Показатели оценивания	Баллы
Знает основные уравнения, способен описать сценарии перехода гидродинамической системы в состояние хаоса, умеет применять на практике методы исследования турбулентных течений.	13
Знает основные уравнения, способен описать сценарии перехода гидродинамической системы в состояние хаоса, имеет представление о способах исследования турбулентных течений.	12
Знает основные уравнения, имеет представление об сценариях перехода гидродинамической системы в состояние хаоса,	10
умеет обрабатывать экспериментальные данные из реальных турбулентных течений	5
Имеет понятие об основных уравнениях, используемых в теории турбулентности	5

лабораторная работа " измерение анизотропии турбулентных пульсаций"

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставяемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **15**

Показатели оценивания	Баллы
Умеет провести обработку двумерных сигналов, получить двумерный спектр фурье	5
Умеет провести обработку одномерных сигналов, получить спектр фурье	5
Умеет обрабатывать экспериментальные данные полученных методом фокального пятна и связать их с градиентом температуры.	5
Умеет собрать и настроить установку по методу фокального пятна регистрации пульсаций градиента показателя преломления.	5
Умеет обрабатывать данные эксперимента по измерению пульсаций скорости	5
Умеет собрать и настроить установку для измерений пульсаций скорости	5