

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное 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 «19» мая 2020 г.

Пермь, 2020

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

#### 4. Объем и содержание дисциплины

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

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

<b>Компетенция (индикатор)</b>	<b>Планируемые результаты обучения</b>	<b>Критерии оценивания результатов обучения</b>
<b>ПК.1</b> способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	Знает теоретические основы дисциплины. Умеет использовать полученные знания при изучении других разделов механики, жидкости и газа. Владеет навыками обработки экспериментальных данных при изучении турбулентных течений.	<p style="text-align: center;"><b>Неудовлетворител</b></p> Не знает основных уравнений, используемых в теории турбулентности; не умеет применять на практике методы исследования турбулентных течений. <p style="text-align: center;"><b>Удовлетворительн</b></p> Знает основные уравнения, имеет представление об сценариях перехода гидродинамической системы в состояние хаоса. <p style="text-align: center;"><b>Хорошо</b></p> Знает основные уравнения, способен описать сценарии перехода гидродинамической системы в состояние хаоса, имеет представление о способах исследования турбулентных течений. <p style="text-align: center;"><b>Отлично</b></p> Знает основные уравнения, способен описать сценарии перехода гидродинамической системы в состояние хаоса, умеет применять на практике методы исследования турбулентных течений.

## 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

<b>Компетенция (индикатор)</b>	<b>Мероприятие текущего контроля</b>	<b>Контролируемые элементы результатов обучения</b>
<b>Входной контроль ПК.1</b> способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	Введение <b>Входное тестирование</b>	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><b>ПК.1</b> способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</p>	<p>Подход Колмогорова и теория однородной и изотропной турбулентности <b>Письменное контрольное мероприятие</b></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. Длинапути смешения Прандтля.13) Модели переноса турбулентной вязкости и двухпараметрические модели ( типа <math>\\$k - \epsilon\\$</math>). 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><b>ПК.1</b> способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</p>	<p>Каскадные модели турбулентности <b>Итоговое контрольное мероприятие</b></p>	<p>1) Законы сохранения в трехмерной гидродинамике 2) Законы сохранения в двумерной гидродинамике 3) 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-турбулентности 1) Иерархические базисы для описания турбулентности 2) Иерархические модели турбулентности 3) вейвлет описание турбулентных полей. 4) Принципы построения каскадных моделей турбулентности. Системы гидродинамического типа. 15) Модель Новикова-Деснянского. 16). Модель GOY. 17) Скейлинг и перемежаемость в каскадных моделях 18) Каскадная модель МГД-турбулентности 9) Каскадно-сеточные методы и комбинированные модели сложных турбулентных систем.</p>
<p><b>ПК.1</b> способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</p>	<p>лабораторная работа " измерение анизотропии турбулентных пульсаций" <b>Защищаемое контрольное мероприятие</b></p>	<p>Однородная и изотропная турбулентность, оптический метод фокального пятна, пассивные и активные примеси. Спектральный анализ одномерных сигналов и двумерных полей</p>

## 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, выставляемый 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, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **15**

<b>Показатели оценивания</b>	<b>Баллы</b>
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