

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
филиал МГУ в г. Севастополе  
факультет естественных наук  
кафедра физики и геофизики

УТВЕРЖДАЮ



Директор  
Филиала МГУ в г. Севастополе  
О.А. Шпырко  
20\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**  
**Наименование дисциплины (модуля)**

**Теория турбулентности**

*код и наименование дисциплины (модуля)*

**Уровень высшего образования:**  
*специалитет*

**Направление подготовки:**  
**03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика**

*(код и название направления/специальности)*

**Направленность (профиль) ОПОП:**  
**общий**

*(если дисциплина (модуль) относится к вариативной части программы)*

**Форма обучения:**  
**очная**

*очная, очно-заочная*

Рабочая программа рассмотрена  
на заседании кафедры физики и геофизики  
протокол №4 от «21» июня 2023 г.  
Заведующий кафедрой

(подпись)

(К.В. Показеев)

Рабочая программа одобрена  
Методическим советом  
Филиала МГУ в г. Севастополе  
Протокол №6 от «28» июня 2023 г.

(подпись)

(Л.И. Теплова)

Севастополь, 2023

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.05.02 «Фундаментальная и прикладная физика» в редакции приказа МГУ №1780 от 29 декабря 2018 г.

Год (годы) приема на обучение: с 2020



курс – 4

семестры – 7

зачетных единиц – 3

академических часов – 54, в т.ч.

лекций – 18 часов

практических занятий – 36 часов

Форма промежуточной аттестации:

экзамен в 7 семестре

## **1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО.**

Курс «Теория турбулентности» является логическим продолжением курсов «Механика сплошных сред», модуль «Теоретическая физика».

Для освоения курса «Теория турбулентности» требуются практические умения дифференцирования, интегрирования, а также использования векторов и комплексных чисел.

## **2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть).**

Успешное освоение дисциплин «Механика сплошных сред», «Гидромеханика».

## **3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.**

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

Знать:

- основные механизмы генерации турбулентности в природных средах и в технологических процессах;
- основные теоретические подходы, используемые для описания турбулентности.

Уметь:

- производить расчеты турбулентных движений в природной среде и технологических процессах;
- владеть методами теории размерности и подобия для описания турбулентности;
- владеть элементами теории динамических систем.

Владеть:

- подходами, применяемыми к анализу устойчивости течений, динамических систем.

Иметь опыт:

- решения задач механики сплошной среды, используя элементы динамических систем.

## **4. Формат обучения – контактный.**

**5. Объем дисциплины (модуля)** составляет 3 з. е., в том числе 54 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (аудиторная нагрузка), 54 академических часа на самостоятельную работу обучающихся.

**6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий.**

**6.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий.**

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Номинальные трудозатраты обучающегося			Всего академических часов	Форма текущего контроля успеваемости (наименование)
	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы		Самостоятельная работа обучающегося, академические часы		
	Занятия лекционного типа*	Занятия семинарского типа*			
Введение.	Консультации, 2	-	2	4	-
Случайные величины.	Консультации, 3	-	3	6	-
Сдвиговая неустойчивость.	Консультации, 3	-	2	5	-
Устойчивость течений.	Консультации, 3	-	2	5	-
Устойчивость течения Пуазейля.	Консультации, 3	-	2	5	-
Термогравитационная конвекция в несжимаемой жидкости.	Консультации, 3	-	2	5	Контрольная работа
Задача Релея.	Консультации, 2	-	2	4	-
Динамические системы.	Консультации, 3	-	3	6	-
Предельные циклы. Бифуркация.	Консультации, 3	-	2	5	-
Свойства системы Лоренца.	Консультации, 2	-	2	4	-
Уравнения Рейнольдса.	Консультации, 3	-	2	5	-
Полуэмпирические теории турбулентности.	Консультации, 3	-	3	6	Контрольная работа
Применение теории размерностей и подобия к развитой турбулентности.	Консультации, 3	-	3	6	-

Другие виды самостоятельной работы (при наличии): например, курсовая работа, творческая работа (эссе)	-	-	-	-	-
	18	36	48	102	
Промежуточная аттестация (экзамен)			6		
<b>Итого</b>				108	

## 6.2. Содержание разделов (тем) дисциплины.

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	<b>Введение.</b>	Турбулентные и ламинарные течения. Роль турбулентности в динамике океана и атмосферы. Экспериментальные методы исследования океанической турбулентности. Общефизическое понятие турбулентности хаоса. Гидродинамическая турбулентность. Гидродинамические неустойчивости.
2.	<b>Случайные величины.</b>	Случайные величины. Законы распределения случайных величин. Спектр мощности случайного процесса. Спектральные окна. Доверительные интервалы для спектра. Частотно-временной анализ. Принцип неопределенности. Вейвлеты. Одномерная и многомерная плотности вероятности. Свойства многомерной функции плотности вероятности. Статистический ансамбль. Пространственно-временное и теоретико-вероятностное среднее. Эргодическая гипотеза. Применение статистических методов для анализа турбулентности.
3.	<b>Сдвиговая неустойчивость.</b>	Сдвиговая (тангенциальных разрывов или Кельвина-Гельмгольца) неустойчивость. Число Рейнольдса. Конвективная (Рэлея-Бенара) неустойчивость. Число Рэлея. Стабилизирующее влияние молекулярной вязкости и температуропроводности на развитие конвекции.
4.	<b>Устойчивость течений.</b>	Устойчивость течения по отношению к бесконечно малым и конечным возмущениям. Теорема о линейной

		устойчивости. Линейный анализ устойчивости стационарного течения с тангенциальным разрывом скорости. Инкремент неустойчивости.
5.	<b>Устойчивость течения Пуазейля.</b>	Устойчивость течения Пуазейля. Теорема Скваера. Уравнение Орра-Зоммерфельда. Уравнение Рэлея. Теорема Рэлея о точке перегиба. Теория Гейзенберга-Линя. Нейтральная кривая для течения Пуазейля.
6.	<b>Термогравитационная конвекция в несжимаемой жидкости.</b>	Термогравитационная конвекция в несжимаемой жидкости. Уравнения Буссинеска. Числа Грассгофа, Прандтля и Рэлея.
7.	<b>Задача Рэлея.</b>	Теоретический анализ плоской задачи о конвективной устойчивости (задача Рэлея). Нейтральные кривые для конвекции Рэлея. Критическое число Рэлея.
8.	<b>Динамические системы.</b>	Динамические системы. Фазовое пространство. неподвижные (особые) и регулярные точки фазового пространства. Фазовые траектории. Фазовый портрет. Инвариантные множества. Классификация особых точек. Теорема единственности решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений и фазовые траектории.
9.	<b>Предельные циклы. Бифуркация.</b>	Предельные циклы. Периодический аттрактор. Размерность фазового пространства и типы фазовых траекторий. Бифуркации. Бифуркация удвоения периода.
10.	<b>Свойства системы Лоренца.</b>	Свойства системы Лоренца (устойчивость особых точек, бифуркации). Странный аттрактор. Размерность Хаусдорфа-Безиковича. Фрактальная размерность странного аттрактора в системе Лоренца.
11.	<b>Уравнения Рейнольдса.</b>	Условия осреднения Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса для переноса импульса и консервативной примеси. Тензор напряжений Рейнольдса. Проблема замыкания уравнений Рейнольдса. Метод Фридмана-Келлера. Уравнение для плотности кинетической энергии в потоке несжимаемой жидкости. Уравнение для компонент тензора

		Рейнольдса. Уравнение баланса турбулентной энергии, физический смысл членов уравнения. Модель переноса турбулентной вязкости Ни и Коважного. Модели переноса турбулентной кинетической энергии. $k$ - $\epsilon$ модели турбулентности.
12.	<b>Полуэмпирические теории турбулентности.</b>	Полуэмпирические теории турбулентности. Гипотеза о коэффициенте турбулентного обмена Буссинеска. Теория переноса импульса Прандтля. Путь смещения. Теория переноса вихря Тейлора. Числа Прандтля и Шмидта. Гипотеза о локальном кинематическом подобии Кармана.
13.	<b>Применение теории размерностей и подобия к развитой турбулентности.</b>	Применение теории размерностей к развитой турбулентности. Расхождение частиц в турбулентном потоке. Область энергии, инерционный интервал, область диссипации. Теория Колмогорова-Обухова. Гипотезы Колмогорова. Универсальный закон турбулентности вблизи стенки. Динамическая скорость. Вязкий подслои. Логарифмический пограничный слой вблизи гладкой и шероховатой поверхности. Диссипация энергии в логарифмическом пограничном слое.

## **7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).**

### **7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.**

Система контроля знаний состоит из текущей аттестации и промежуточный – зачета. Зачет включает решение задач и ответы на вопросы преподавателя. Текущая аттестация проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях – рейтинг.

### **7.2 Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

- для экзамена

Вопросы экзаменационных билетов:

1. Понятие о ламинарном и турбулентном движении.
2. Важнейшие черты турбулентного движения.
3. Условия подобия гидродинамических явлений.
4. Пи-теорема и ее применение.
5. Неустойчивость тангенциальных разрывов.
6. Конвективная неустойчивость.
7. Устойчивость течения Пуазейля.
8. Теорема Релея о точке перегиба.
9. Свободная термогравитационная конвекция.

10. Задача Релея о конвективной устойчивости.
12. Модель конвекции Лоренца.
13. Развитие турбулентности по Ландау.
14. Фазовый портрет. Анализ устойчивости неподвижной точки.
15. Теорема о линейной устойчивости.
16. Понятие фрактала.
17. Странный аттрактор.
18. Эргодическая теорема. Теорема Винера-Хинчина. Теорема Котельникова.
19. Уравнения Рейнольдса.
20. Цепочка уравнений Фридмана-Келлера. Проблема замыкания.
21. Уравнение баланса турбулентной энергии.
22. Полуэмпирические законы турбулентности. Коэффициент турбулентного обмена.
23. Закон «двух третей».
24. Однородная турбулентность.
25. Баланс энергии по масштабам. Каскад.
26. Теория Колмогорова.
27. Пристеночная турбулентность.
28. Модели переноса турбулентной вязкости и кинетической энергии,  $k$ - $\epsilon$  модель.

<b>ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)</b>				
Оценка РО и соответствующие виды оценочных средств	Не зачтено	Зачтено		
		<b>Знания</b> (домашние задания)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания
<b>Умения</b> (контрольные работы)	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности не принципиального характера)	Успешное и систематическое умение
<b>Навыки</b> (владения, опыт деятельности) (зачет)	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

## 8. Ресурсное обеспечение:

### – Перечень основной и дополнительной литературы.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика в 10 т. Т 6 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 5-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2001. – 736 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. Т 7 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 5-е изд. стер. – М.: Физматлит, 2007. – 264 с.

### – Описание материально-технического обеспечения.

- Учебный кабинет №174, (33,21 м<sup>2</sup>)
- Учебных столов – 9 шт., стульев – 19 шт.,
- 3-х створчатая доска для мела – 1 шт.,
- Стол для преподавателя – 1 шт.
- Стационарный экран для проектора – 1 шт.



- Мультимедийный проектор – Персональный компьютер в комплекте Стол для преподавателя  
Возможность подключения ноутбука и мультимедийного оборудования, беспроводной доступ в интернет  
Список ПО на ноутбуках: Microsoft Windows 10, Microsoft Office 2016, Google Chrome, Mozilla Firefox, Adobe Reader DC, VLC Media Player.

**9. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в общей характеристике ОПОП.**

**10. Язык преподавания русский.**

**11. Преподаватель (преподаватели).**

Заведующий кафедрой физики и геофизики, доктор физико-математических наук, профессор Константин Васильевич Показеев.

**12. Автор (авторы) программы.**

Старший преподаватель кафедры физики и геофизики» Андрей Валерьевич Сулимов.