

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Теплофизика и молекулярная физика

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.09.03.02</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>2 семестр - 3;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>108 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>2 семестр - 16 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>2 семестр - 16 часов;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>2 семестр - 75,7 часа;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b> <b>Решение задач</b> <b>Реферат</b> <b>Индивидуальный проект</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Зачет с оценкой</b>	<b>2 семестр - 0,3 часа;</b>

**Москва 2022**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

(должность)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	<b>Сведения о владельце ЦЭП МЭИ</b>	
	Владелец	Беляев И.А.
	Идентификатор	Rb9b3a753-BeliayevIA-393bbdae

(подпись)

И.А. Беляев

(расшифровка подписи)

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель образовательной программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	<b>Сведения о владельце ЦЭП МЭИ</b>	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка подписи)

Заведующий выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	<b>Сведения о владельце ЦЭП МЭИ</b>	
	Владелец	Герасимов Д.Н.
	Идентификатор	Ra5495398-GerasimovDN-6b58615

(подпись)

Д.Н. Герасимов

(расшифровка подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** Целью дисциплины является изучение математического аппарата статистической теории турбулентных течений применительно к задачам энергетики, а также методов оценивания важнейших статистических характеристик турбулентности.

### Задачи дисциплины

- •Получение навыков применения основного математического аппарата статистической теории турбулентности – амплитудного, корреляционного и спектрального анализа;
- изучение важнейших статистических характеристиках, таких как плотность вероятности, моменты различных порядков, временные и пространственные спектры, временные и пространственные масштабы, физического смысла этих величин;
- изучение физики турбулентности путем анализа уравнений баланса для основных статистических характеристик;
- получение навыков оценивания статистических характеристик турбулентности..

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-1 Способен анализировать и моделировать физические процессы, используемые в атомной энергетике	ИД-1 <sub>ПК-1</sub> Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок	знать: - –современные модели описания турбулентности; –современные методы теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;.  уметь: - –использовать современные математические методы для описания сложных задач гидродинамики и теплообмена; -обрабатывать и анализировать случайные гидродинамической природы.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Теплофизика и молекулярная физика (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать •аппарат тензорной алгебры применительно к теории и задачам механики жидкости и газа, основные законы механики жидкости и газа – уравнение неразрывности, уравнение движения; формулировку уравнения движения в различных видах; •методы расчета профилей скорости при ламинарном и турбулентном течении жидкости, методы расчетного и экспериментального исследования коэффициентов сопротивления; •принцип действия и устройство приборов для измерения скорости, температуры потока;

- уметь •Выполнять экспериментальные и численные исследования гидродинамических процессов, проводить обработку и анализ экспериментальных данных; •Проектировать узлы лабораторных экспериментальных установок для изучения теплофизических свойств веществ и характеристик процессов тепло- и массообмена с использованием современных информационных технологий;

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания
				Контактная работа							СР			
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль	
КПР	ГК	ИККП	ТК											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Статистический подход к исследованию турбулентности	22	2	4	-	4	-	-	-	-	-	14	-	<p><b>Подготовка расчетных заданий:</b> Задания ориентированы на решения минизадч по разделу "Статистический подход к исследованию турбулентности". Студентам необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: Определить среднее, дисперсию, эксцесс и асимметрию последовательности данных</p> <p><b>Изучение материалов литературных источников:</b></p> <p>[6], 1-680 [7], 1-50</p>
1.1	Уравнения Навье-Стокса и их устойчивость к малым возмущениям. Определение турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства.	6		1	-	1	-	-	-	-	-	4	-	
1.2	Плотность вероятности. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности. Моменты скалярного случайного поля.	5		1	-	1	-	-	-	-	-	3	-	
1.3	Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса.	5		1	-	1	-	-	-	-	-	3	-	

	Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы.													
1.4	Пространственная корреляционная функция скалярного поля. Моменты случайного векторного поля. Одноточечные моменты поля скорости. Корреляционные функции поля турбулентных пульсаций скорости. Нормальный закон распределения. Коэффициент пространственно-временной корреляции. Гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности.	6	1	-	1	-	-	-	-	-	4	-		
2	Спектральное представление однородных полей и стационарных процессов	22	4	-	4	-	-	-	-	-	14	-	<p><b>Подготовка расчетных заданий:</b> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Статистический подход к исследованию турбулентности". Студентам необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: 1) Заданную функцию разложить на заданное количество гармоник при помощи разложения в ряд Фурье.</p>	
2.1	Понятие о спектральной плотности. Спектральное разложение на конечном временном интервале.	6	1	-	1	-	-	-	-	-	4	-		

2.2	Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале. Интеграл Стильбеса	7	1	-	1	-	-	-	-	-	5	-	Выполнить обратное преобразование Фурье для полученного разложения в ряд гармоник. Построить график коэффициентов разложения по возрастанию частоты гармоники. Построить график исходной функции и результата восстановления её из Фурье образа.
2.3	Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы. Спектры однородного скалярного и векторного полей. Одномерные и трехмерные спектры.	9	2	-	2	-	-	-	-	-	5	-	Рассчитать среднеквадратичное отклонение значений восстановленной функции от исходной. Сделать вывод о достаточности выбранного количества гармоник для описания исходного сигнала. 2) Выполнить дискретное преобразование Фурье для заданного сигнала. Определить амплитуду и частоту основных составляющих гармоник, наличие и характер шума. <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 1-640 [4], 1-720
3	Динамика турбулентности	22.0	4.0	-	4.0	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Подготовка реферата:</u></b> В рамках реферативной части студенту необходимо провести обзор литературных источников по выбранной теме, комплексно осветить вопрос в соответствии с темой реферата. В качестве тем реферата студенту предлагаются следующие варианты: 1) Двумерная турбулентность 2) Структурные функции 3) Спектр развитой турбулентности 4) К-е, k-w модели турбулентности 5) Метод крупных вихрей 6) Прямое численное моделирование 7) Спиральность и турбулентность 8) Экспериментальные работы по исследованию турбулентности 9) Цепочка уравнений Фридмана-Келлера. Проблема замыкания уравнений Навье-Стокса. 10) Своя тема* Минимум 9000 знаков.
3.1	Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов.	4	1	-	1	-	-	-	-	-	2	-	Проблема замыкания уравнений Навье-Стокса. 10) Своя тема* Минимум 9000 знаков.
3.2	Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда.	5	1	-	1	-	-	-	-	-	3	-	<b><u>Изучение материалов литературных</u></b>

	Баланс дисперсии пульсаций температуры. Современные представления о пристенной турбулентности. Явление обновления вязкого подслоя. Когерентные структуры.												<b>источников:</b> [1], 1-154 [2], 1-292
3.3	Динамические уравнения для корреляционных функций и спектров однородной турбулентности. Локальная однородность и локальная изотропия. Спектры изотропной турбулентности.	5	1	-	1	-	-	-	-	-	3	-	
3.4	Перенос энергии по спектру. Каскадная модель Ричардсона. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.	4.0	0.5	-	0.5	-	-	-	-	-	3	-	
3.5	Законы сохранения и инерционные интервалы.	4.0	0.5	-	0.5	-	-	-	-	-	3	-	
4	Методы экспериментального определения характеристик турбулентности	24	4	-	4	-	-	-	-	-	16	-	<b>Проведение исследований:</b> Работа выполняется по индивидуальному заданию. Для заданного сигнала оценить минимально допустимую длину и частоту выборки. Построить спектральную плотность «энергии» сигнала, сгладить оценку спектральной плотности энергии. Описать полученный сигнал и его спектр.
4.1	Общий подход к измерению статистических	12	2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	



	характеристик. Структура измерительной схемы. Оценки и их свойства – смещённость, состоятельность, эффективность. Оценивание математического ожидания.												<u>Изучение материалов литературных источников:</u> [5], 1-336
4.2	Способы сглаживания оценок. Оценивание спектральной плотности: по методу аналоговой фильтрации, по методу периодограммы, по теореме Винера-Хинчина. Смещение и дисперсия оценок спектров.	12	2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>108.0</b>	<b>16.0</b>	-	<b>16.0</b>	-	-	-	-	<b>0.3</b>	<b>58</b>	<b>17.7</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>108.0</b>	<b>16.0</b>	-	<b>16.0</b>	-	-	-	<b>0.3</b>		<b>75.7</b>		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## **3.2 Краткое содержание разделов**

### 1. Статистический подход к исследованию турбулентности

1.1. Уравнения Навье-Стокса и их устойчивость к малым возмущениям. Определение турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства.

1.2. Плотность вероятности. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности. Моменты скалярного случайного поля.

1.3. Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса. Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы.

1.4. Пространственная корреляционная функция скалярного поля. Моменты случайного векторного поля. Одноточечные моменты поля скорости. Корреляционные функции поля турбулентных пульсаций скорости. Нормальный закон распределения. Коэффициент пространственно-временной корреляции. Гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности.

### 2. Спектральное представление однородных полей и стационарных процессов

2.1. Понятие о спектральной плотности. Спектральное разложение на конечном временном интервале.

2.2. Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале. Интеграл Стилтеса

2.3. Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы. Спектры однородного скалярного и векторного полей. Одномерные и трехмерные спектры.

### 3. Динамика турбулентности

3.1. Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов.

3.2. Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда. Баланс дисперсии пульсаций температуры. Современные представления о пристенной турбулентности. Явление обновления вязкого подслоя. Когерентные структуры.

3.3. Динамические уравнения для корреляционных функций и спектров однородной турбулентности. Локальная однородность и локальная изотропия. Спектры изотропной турбулентности.

3.4. Перенос энергии по спектру. Каскадная модель Ричардсона. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.

3.5. Законы сохранения и инерционные интервалы.

#### 4. Методы экспериментального определения характеристик турбулентности

4.1. Общий подход к измерению статистических характеристик. Структура измерительной схемы. Оценки и их свойства – смещённость, состоятельность, эффективность. Оценивание математического ожидания.

4.2. Способы сглаживания оценок. Оценивание спектральной плотности: по методу аналоговой фильтрации, по методу периодограммы, по теореме Винера-Хинчина. Смещение и дисперсия оценок спектров.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. 1 занятие;
2. 2 занятие.

### **3.4. Темы лабораторных работ** не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

### **3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ** Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
<b>Знать:</b>						
–современные модели описания турбулентности; – современные методы теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;	ИД-1ПК-1	+	+	+		Решение задач/КМ-1 - Статистический подход к исследованию турбулентности Решение задач/КМ-2 Спектральное представление случайных процессов Реферат/КМ-3 - Динамика Турбулентности Индивидуальный проект/КМ-4 - Практические методы определения характеристик турбулентных сигналов
<b>Уметь:</b>						
–использовать современные математические методы для описания сложных задач гидродинамики и теплообмена; - обрабатывать и анализировать случайные гидродинамической природы	ИД-1ПК-1			+	+	Индивидуальный проект/КМ-4 - Практические методы определения характеристик турбулентных сигналов

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**2 семестр**

Форма реализации: Обмен электронными документами

1. КМ-1 - Статистический подход к исследованию турбулентности (Решение задач)
2. КМ-2 Спектральное представление случайных процессов (Решение задач)
3. КМ-3 - Динамика Турбулентности (Реферат)
4. КМ-4 - Практические методы определения характеристик турбулентных сигналов (Индивидуальный проект)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

*Зачет с оценкой (Семестр №2)*

В соответствии с системой БАРС

В диплом выставляется оценка за 2 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Генин, Л. Г. Введение в статистическую теорию турбулентности : учебное пособие для вузов по направлению "Техническая физика" / Л. Г. Генин, В. Г. Свиридов . – М. : Издательский дом МЭИ, 2007 . – 154 с. - ISBN 978-5-383-00150-9 .;
2. Фрик, П. Г. Турбулентность: подходы и модели / П. Г. Фрик . – М. : Ин-т компьют. исслед., 2003 . – 292 с. – (Компьютинг в математике, физике, биологии) . - ISBN 5-939722-69-5 .;
3. Монин, А. С. Статистическая гидромеханика: Механика турбулентности. Ч.1 / А. С. Монин, А. М. Яглом . – М. : Наука, 1965 . – 640 с.;
4. Монин, А. С. Статистическая гидромеханика: Механика турбулентности. Ч.2 / А. С. Монин, А. М. Яглом . – М. : Наука, 1967 . – 720 с.;
5. Основы автоматизации теплофизического эксперимента : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. Г. Свиридов, Е. В. Свиридов, Г. Ф. Филаретов, [и др.] ; ред. В. Г. Свиридов, П. Г. Фрик . – 2-е изд. перераб. и доп . – М. : Издательский дом МЭИ, 2019 . – 336 с. - ISBN 978-5-383-01328-1 .;
6. И. О. Хинце- "Турбулентность: ее механизм и теория", Издательство: "Гос. изд-во физико-математической лит.", Москва, 1963 - (680 с.)  
<https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=213691>;
7. Свиридов В.Г.- "Введение в статистическую теорию турбулентности", Издательство: "МЭИ", Москва, 2020  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383014264.html>.

## 5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ.

## 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>

2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" -  
[http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)

3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Помещения для самостоятельной работы	Т-412, Учебная лаборатория вычислительной техники	стол преподавателя, стол учебный, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для консультирования	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-213, Подсобное помещение	

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Основы статистической теории турбулентности

(название дисциплины)

#### 2 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-1 КМ-1 - Статистический подход к исследованию турбулентности (Решение задач)  
 КМ-2 КМ-2 Спектральное представление случайных процессов (Решение задач)  
 КМ-3 КМ-3 - Динамика Турбулентности (Реферат)  
 КМ-4 КМ-4 - Практические методы определения характеристик турбулентных сигналов (Индивидуальный проект)

**Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	3	7	11	14
1	Статистический подход к исследованию турбулентности					
1.1	Уравнения Навье-Стокса и их устойчивость к малым возмущениям. Определение турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства.		+	+	+	+
1.2	Плотность вероятности. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности. Моменты скалярного случайного поля.		+	+	+	+
1.3	Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса. Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы.		+	+	+	+
1.4	Пространственная корреляционная функция скалярного поля. Моменты случайного векторного поля. Одноточечные моменты поля скорости. Корреляционные функции поля турбулентных пульсаций скорости. Нормальный закон распределения. Коэффициент пространственно-временной корреляции. Гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности.		+	+	+	+
2	Спектральное представление однородных полей и стационарных процессов					
2.1	Понятие о спектральной плотности. Спектральное разложение на конечном временном интервале.		+	+	+	+
2.2	Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале. Интеграл Стилтеса		+	+	+	+
2.3	Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы. Спектры однородного скалярного и векторного полей. Одномерные и трехмерные спектры.		+	+	+	+
3	Динамика турбулентности					

3.1	Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов.	+	+	+	+
3.2	Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда. Баланс дисперсии пульсаций температуры. Современные представления о пристенной турбулентности. Явление обновления вязкого подслоя. Когерентные структуры.				+
3.3	Динамические уравнения для корреляционных функций и спектров однородной турбулентности. Локальная однородность и локальная изотропия. Спектры изотропной турбулентности.				+
3.4	Перенос энергии по спектру. Каскадная модель Ричардсона. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.				+
3.5	Законы сохранения и инерционные интервалы.				+
4	Методы экспериментального определения характеристик турбулентности				
4.1	Общий подход к измерению статистических характеристик. Структура измерительной схемы. Оценки и их свойства – смещённость, состоятельность, эффективность. Оценивание математического ожидания.				+
4.2	Способы сглаживания оценок. Оценивание спектральной плотности: по методу аналоговой фильтрации, по методу периодограммы, по теореме Винера-Хинчина. Смещение и дисперсия оценок спектров.				+
Вес КМ, %:		20	20	30	30