

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

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

Москва 2023

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:


Преподаватель

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

И.А. Беляев


СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

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

Г.Г. Яньков

Заведующий выпускающей
кафедрой

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

Д.Н. Герасимов

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 характеристик, 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 _{ПК-1} 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><u>Подготовка расчетных заданий:</u> 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><u>Изучение материалов литературных источников:</u></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	-	Подготовка расчетных заданий: 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.
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 Стильгеса	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. 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.
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	-	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. 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. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [3], 1-640 [4], 1-720
3	Динамика турбулентности	22.0	4.0	-	4.0	-	-	-	-	-	14	-	<u>Подготовка реферата:</u> 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	-	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. 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. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [3], 1-640 [4], 1-720
3.2	Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда.	5	1	-	1	-	-	-	-	-	3	-	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. 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. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [3], 1-640 [4], 1-720

	Баланс дисперсии пульсаций температуры. Современные представления о пристенной турбулентности. Явление обновления вязкого подслоя. Когерентные структуры.												источников: [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	-	Проведение исследований: 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	
	Всего за семестр	108.0	16.0	-	16.0	-	-	-	-	0.3	58	17.7	
	Итого за семестр	108.0	16.0	-	16.0	-	-	-	-	0.3	75.7		

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	
Знать:						
–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
Уметь:						
–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

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