

**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**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Основы статистической теории турбулентности**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

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

(подпись)

И.А. Беляев

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

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

(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

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

(подпись)

Д.Н.

Герасимов

(расшифровка  
подписи)

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Способен анализировать и моделировать физические процессы, используемые в атомной энергетике

ИД-1 Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

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)

### БРС дисциплины

2 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	3	7	11	14
Статистический подход к исследованию турбулентности					
Уравнения Навье-Стокса и их устойчивость к малым возмущениям. Определение турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства.	+	+	+	+	
Плотность вероятности. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности. Моменты скалярного случайного поля.	+	+	+	+	
Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса. Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы.	+	+	+	+	
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.	+	+	+	+	
Спектральное представление однородных полей и стационарных процессов					

Понятие о спектральной плотности. Спектральное разложение на конечном временном интервале.	+	+	+	+
Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале. Интеграл Стилтеса	+	+	+	+
Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы. Спектры однородного скалярного и векторного полей. Одномерные и трехмерные спектры.	+	+	+	+
Динамика турбулентности				
Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов.	+	+	+	+
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.				+
Динамические уравнения для корреляционных функций и спектров однородной турбулентности. Локальная однородность и локальная изотропия. Спектры изотропной турбулентности.				+
Перенос энергии по спектру. Каскадная модель Ричардсона. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.				+
Законы сохранения и инерционные интервалы.				+
Методы экспериментального определения характеристик турбулентности				
Общий подход к измерению статистических характеристик. Структура измерительной схемы. Оценки и их свойства – смещённость, состоятельность, эффективность. Оценивание математического ожидания.				+
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

§Общая часть/Для промежуточной аттестации§

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### *I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций*

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-1	ИД-1 <sub>ПК-1</sub> Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>–современные модели описания турбулентности;</li> <li>–современные методы теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;</li> </ul> <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>–использовать современные математические методы для описания сложных задач гидродинамики и теплообмена; - обрабатывать и анализировать случайные гидродинамической природы</li> </ul>	<p>КМ-1 - Статистический подход к исследованию турбулентности (Решение задач)</p> <p>КМ-2 Спектральное представление случайных процессов (Решение задач)</p> <p>КМ-3 - Динамика Турбулентности (Реферат)</p> <p>КМ-4 - Практические методы определения характеристик турбулентных сигналов (Индивидуальный проект)</p>

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. КМ-1 - Статистический подход к исследованию турбулентности

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Решение задач

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** В качестве задания используются следующие упражнения: Определить среднее, дисперсию, эксцесс и асимметрию последовательности данных

**Краткое содержание задания:**

В качестве задания используются следующие упражнения:

Определить среднее, дисперсию, эксцесс и асимметрию последовательности данных

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: –современные модели описания турбулентности; – современные методы теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;	1.Определить среднее, дисперсию, эксцесс и асимметрию последовательности данных
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:*

### КМ-2. КМ-2 Спектральное представление случайных процессов

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Решение задач

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** 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.

**Краткое содержание задания:**

В качестве задания используются следующие упражнения:

1)Заданную функцию разложить на заданное количество гармоник при помощи разложения в ряд Фурье. 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.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: –современные модели описания турбулентности; – современные методы теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;	1. В качестве задания используются следующие упражнения: 1) Заданную функцию разложить на заданное количество гармоник при помощи разложения в ряд Фурье. 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.
--	--

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:*

**КМ-3. КМ-3 - Динамика Турбулентности**

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Реферат

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** В рамках реферативной части студенту необходимо провести обзор литературных источников по выбранной теме, комплексно осветить вопрос в соответствии с темой реферата. Минимум 9000 знаков.

**Краткое содержание задания:**

В рамках реферативной части студенту необходимо провести обзор литературных источников по выбранной теме, комплексно осветить вопрос в соответствии с темой реферата.

Минимум 9000 знаков.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: –современные модели описания турбулентности; – современные методы	1. В качестве тем реферата студенту предлагаются следующие варианты: 1) Двумерная турбулентность
--	---

теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;	2) Структурные функции 3) Спектр развитой турбулентности 4) К-ε, 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*
---	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:*

**КМ-4. КМ-4 - Практические методы определения характеристик турбулентных сигналов**

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Индивидуальный проект

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** 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.

**Краткое содержание задания:**

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.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: –современные модели описания турбулентности; – современные методы теоретических и экспериментальных теплофизических исследований;	1.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.
Уметь: –использовать современные математические методы для описания сложных задач гидродинамики и теплообмена; -обрабатывать и анализировать случайные гидродинамической природы	1.Вычислить статистические характеристики нерегулярного сигнала



**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:*

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 2 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Зачет с оценкой

### Пример билета

- 1) Каскадная модель Ричардсона. Спектры изотропной турбулентности. Перенос энергии по спектру. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.
- 2) Вычислите асимметрию последовательности : 1,45,40,33,-4,-4,-6,-18,55,54

### Процедура проведения

Сдающий после 30 минут подготовки отвечает на полученный вопрос.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ПК-1</sub> Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

### Вопросы, задания

#### **1. Вопросы к зачету по дисциплине основы статистической теории турбулентности.**

##### **Вопросы:**

##### *1. Статистический подход к исследованию турбулентности.*

- 1) Уравнения Навье-Стокса и их устойчивость к малым возмущениям. Определение турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства.
- 2) Плотность вероятности. Нормальный закон распределения. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности.
- 3) Моменты скалярного случайного поля. Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса. Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы.
- 4) Корреляционные функции поля турбулентных пульсаций скорости. Коэффициент пространственно-временной корреляции. Гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности.

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

- 5) Понятие о спектральной плотности. Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале.
- 6) Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы.

##### *3. Динамика турбулентности*

- 7) Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов.
- 8) Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда. Баланс энергии пульсаций температуры.
- 9) Каскадная модель Ричардсона. Спектры изотропной турбулентности. Перенос энергии по спектру. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.
- 10) Законы сохранения и инерционные интервалы.

##### *4. Методы экспериментального определения характеристик турбулентности*

- 11) Общий подход к измерению статистических характеристик. Оценки и их свойства – смещённость, состоятельность, эффективность.
- 12) Оценивание спектральной плотности: по методу аналоговой фильтрации, по методу периодограммы, по теореме Винера-Хинчина. Смещение и дисперсия оценок спектров.

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

1. Л.Г.Генин, В.Г.Свиридов. Введение в статистическую теорию турбулентности: учебное пособие для ВУЗов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 154 с.  
<http://opac.mpei.ru/OpacUnicode/app/webroot/index.php?url=/notices/index/142482/default/209241>
2. В.Г. Свиридов, Е.В. Свиридов, Г.Ф. Филаретов и др.; под ред. В.Г. Свиридова, П.Г. Фрика. Основы автоматизации теплофизического эксперимента: учебное пособие для вузов / - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательский дом МЭИ, 2019. ISBN 978-5-383-01395  
<http://opac.mpei.ru/OpacUnicode/app/webroot/index.php?url=/notices/index/253432/default/209238>
3. П.Г.Фрик. Турбулентность: подходы и модели. Изд. 2-е, испр. и доп. — М. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. — 332 с.  
<http://opac.mpei.ru/OpacUnicode/app/webroot/index.php?url=/notices/index/71213/default/209239>
4. А.С.Монин, А.М.Яглом. Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. Ч.2. М.: Наука, 1967.  
<http://opac.mpei.ru/OpacUnicode/app/webroot/index.php?url=/notices/index/63705/default/209233>
5. Е.П.Валуева, В.Г.Свиридов. Введение в механику жидкости: учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 212 с.  
<http://opac.mpei.ru/OpacUnicode/app/webroot/index.php?url=/notices/index/138514/default/209242>

#### **Материалы для проверки остаточных знаний**

- 1.1. *Статистический подход к исследованию турбулентности.*
    - 1) Уравнения Навье-Стокса и их устойчивость к малым возмущениям. Определение турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства.
    - 2) Плотность вероятности. Нормальный закон распределения. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности.
    - 3) Моменты скалярного случайного поля. Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса. Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы.
    - 4) Корреляционные функции поля турбулентных пульсаций скорости. Коэффициент пространственно-временной корреляции. Гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности.
  2. *Спектральное представление однородных полей и стационарных процессов*
  - 5) Понятие о спектральной плотности. Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале.
  - 6) Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы.
3. *Динамика турбулентности*

- 7) Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов.
  - 8) Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда. Баланс энергии пульсаций температуры.
  - 9) Каскадная модель Ричардсона. Спектры изотропной турбулентности. Перенос энергии по спектру. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62.
  - 10) Законы сохранения и инерционные интервалы.
- 4. Методы экспериментального определения характеристик турбулентности*
- 11) Общий подход к измерению статистических характеристик. Оценки и их свойства – смещённость, состоятельность, эффективность.
  - 12) Оценивание спектральной плотности: по методу аналоговой фильтрации, по методу периодограммы, по теореме Винера-Хинчина. Смещение и дисперсия оценок спектров.

## ***II. Описание шкалы оценивания***

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 51*

*Описание характеристики выполнения знания:*

## ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

В соответствии с системой БАРС