

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)

Принято на Ученом совете
ОИВТ РАН
Протокол № 5 от 21.06.2022

«Утверждаю»

Директор ОИВТ РАН


академик Петров О.Ф.

« 21 » 2022 год



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины «Теория однофазных и двухфазных турбулентных течений»

направление подготовки: **13.06.01 Электро- и теплоэнергетика**
(специальность – 2.4.5 Энергетические системы и комплексы)

Квалификация
Исследователь. Преподаватель- исследователь

Москва- 2022

ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ.

Вариативная часть, в т.ч.:	6 зач. ед.
Лекции	66 часов
Практические занятия	Нет
Лабораторные работы	Нет
Индивидуальные занятия с преподавателем	Нет
Самостоятельные занятия	150 часов
Итоговая аттестация	экзамен 2 курс
ВСЕГО	6 зач. ед., 216 часов

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель дисциплины – Целью освоения дисциплины «Теория однофазных и двухфазных турбулентных течений» является ознакомление обучающихся с современным состоянием теории однофазных и многофазных турбулентных потоков; освоение классических методов и моделей турбулентных течений; ознакомление с результатами классических экспериментальных исследований и данными по характеристикам однофазных и двухфазных турбулентных течений на пластине, в трубах (каналах), в окрестности обтекаемых тел различной формы; особенностями и задачами математического и физического моделирования многофазных потоков; основами классификации двухфазных турбулентных потоков; стратегией построения обобщенной компьютерной модели многофазных потоков.

Задачами данного курса являются:

- изучение основ теории однофазных турбулентных потоков;
- ознакомление с основными представлениями современной теории турбулентности;
- использование уравнений турбулентных течений для решения практических задач;
- изучение основ моделирования турбулентных течений;
- изучение основ теории многофазных турбулентных потоков;
- исследование возможности использования первичных характеристик многофазных течений для их классификации;
- изучение представлений о методах расчета характеристик двухфазных турбулентных течений;
- изучение методологии физического моделирования однофазных и многофазных турбулентных течений;
- изучение процессов переноса в однофазных и многофазных турбулентных течениях;

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Теория однофазных и двухфазных турбулентных течений» базируется на дисциплинах: гидродинамика, газодинамика, введение в статистическую физику. Также указанная дисциплина существенно опирается на навыки математического анализа и линейной алгебры, дифференциальной геометрии, аппарата уравнений математической физики.

3. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

4. ГОД И СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

Второй год, третий и четвертый семестр обучения.

5. ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ

Вариативная часть, в т.ч.:	<u>6</u> зач. ед.
Лекции	<u>66</u> часов
Практические занятия	<u>нет</u>
Лабораторные работы	<u>нет</u>
Индивидуальные занятия с преподавателем	<u>нет</u>
Самостоятельные занятия	<u>150</u> часов
Итоговая аттестация	экзамен 2 курс
ВСЕГО	6 зач. ед., 216 часов

6. КОНКРЕТНЫЕ ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ И НАВЫКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины «*Теория однофазных и двухфазных турбулентных течений*» обучающийся должен:

1. Знать:

- основные методы математического моделирования однофазных и двухфазных турбулентных течений;
- основные методы физического моделирования однофазных и двухфазных турбулентных течений;
- основные характеристики однофазных турбулентных течений;
- основные характеристики двухфазных турбулентных течений;
- основы классификации двухфазных турбулентных течений;

2. Уметь:

- ставить задачи о турбулентных течениях газов и жидкостей;
- использовать различные приближения при анализе турбулентных течений;
- анализировать различные факторы, влияющие на течение газов и жидкостей;
- анализировать различные факторы, влияющие на энергию турбулентности однофазного и двухфазного потока;
- анализировать данные оригинальных работ по турбулентности газов и жидкостей;

3. Владеть:

- навыками оценки пространственных и временных масштабов турбулентных течений;
- классификацией двухфазных течений;
- навыками оценки диссипации и генерации энергии турбулентности в двухфазном потоке;

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Структура дисциплины

Перечень разделов дисциплины и распределение времени по темам

№ темы и название	Количество часов
1. Турбулентные течения	100

2. Теория однофазных и двухфазных турбулентных течений	116
ВСЕГО (часов)	216

Вид занятий

Лекции:

№ п.п.	Темы	Трудоём- кость в зач. ед. (количество часов)
1	Понятие о турбулентных течениях	8
2	Основы математического моделирования турбулентных течений	8
3	Модели турбулентных течений	10
4	Основы физического моделирования турбулентных течений	6
5	Понятие о многофазных турбулентных течениях	5
6	Классификация гетерогенных турбулентных течений	5
7	Основы математического моделирования двухфазных турбулентных течений	5
8	Двухфазные течения в трубах (каналах)	5
9	Обтекание тел потоками с частицами	5
10	Основы физического моделирования двухфазных турбулентных течений	9
ВСЕГО (часов)		66 часов

Лабораторные занятия: нет

Самостоятельная работа:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	- изучение теоретического курса – выполняется самостоятельно каждым студентом по итогам каждой из лекций, результаты контролируются преподавателем на лекционных занятиях, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, методические пособия.	40 часов
2	- решение задач по заданию преподавателя– решаются задачи, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий и сдаются в конце семестра, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, а также сборники задач, включая электронные, учебно-методические пособия.	86 часов
3	-подготовка к экзамену	24 часа
ВСЕГО (часов)		150 часов

Содержание дисциплины

№ п/п	Название модулей	Разделы и темы лек- ционных занятий	Содержание	Объем	
				Ауди- торная работа (зачет- ные еди- ницы/ч асы)	Само- стоя- тельная работа (зачет- ные еди- ницы/ча сы)
1	I Турбу- лентные течения	Понятие о турбулент- ных тече- ниях	Что такое турбулентность. Методы описания структуры турбулентных тече- ний. Уравнение Навье – Стокса. Диссипа- ция энергии в вязкой жидкости. Каче- ственная схема развития турбулентности. Масштабная инвариантность. Спектр турбулентных пульсаций. Оценка мас- штабов турбулентности. Механизм растя- жения вихревых структур.	8	17
2		Основы ма- тематиче- ского моде- лирования турбулент- ных тече- ний	Методы моделирования турбулент- ных течений. Прямое численное модели- рование. Метод с выделением крупных вихрей. Методы статистических момен- тов. Статистические моменты и куму- лянты.	8	17
3		Модели турбулент- ных тече- ний	Уравнение Рейнольдса. Уравнения для моментов. Обменный механизм. Тензор скорости диссипации. Турбулентная диф- фузия. Стратегия замыкания высших мо- ментов. Алгебраические модели тройных корреляций. Модель турбулентности Рей- нольдсовых напряжений. К – модель тур- булентности. К – L модель турбулентно- сти. Модель пути смешения Прандтля. Условия реализуемости. Модели турбу- лентности третьего порядка. Уравнения для кумулянтов четвертого порядка. Связь между переносом тепла и перено- сом импульса. Математическое описание процессов тепломассопереноса. Модель турбулентного переноса скаляра. Модели замыкания.	10	20
4		Основы фи- зического моделиро- вания тур- булентных течений	Методы экспериментального иссле- дования структуры турбулентных тече- ний. Термоанемометрия. Лазерная доплер- овская анемометрия. Статистическая об- работка экспериментальных данных	6	14
5	II	Понятие о многофаз-	Что такое многофазные течения? Многофазные течения в природе и тех- нике. Специфические особенности мате-	5	9

	Теория одно-фазных и двухфазных турбулентных течений	ных турбулентных течений	матического и физического моделирования гетерогенных потоков. Два основных класса задач изучения гетерогенных течений. Основные характеристики гетерогенных потоков.		
6	Теория одно-фазных и двухфазных турбулентных течений	Классификация гетерогенных турбулентных течений	Времена динамической и тепловой релаксации частиц. Массовая, объемная и счетная концентрации частиц. Столкновения частиц между собой. Столкновения частиц со стенками канала. Числа Стокса в осредненном, крупномасштабном и мелкомасштабном пульсационных движениях. Столкновительные числа Стокса. Классификация гетерогенных турбулентных потоков.	5	9
7		Основы математического моделирования двухфазных турбулентных течений	Математическое моделирование турбулентных течений газа с частицами. Лагранжев подход: преимущества и ограничения. Эйлеров подход: преимущества и ограничения. Стратегия построения обобщенной компьютерной модели двухфазных потоков.	5	9
8		Двухфазные течения в трубах (каналах)	Течения газа с частицами в каналах. Распределения осредненных и пульсационных скоростей газа и частиц. Диссипация энергии турбулентности мелкими частицами. Генерация энергии турбулентности крупными частицами. Моделирование влияния частиц на турбулентную энергию газа.	5	9
9		Обтекание тел потоками с частицами	Обтекание тел потоками с частицами. Течение с частицами в области критической точки тела. Течение с частицами в пограничном слое обтекаемого тела. Аэродинамическое сопротивление тел в потоках с частицами.	5	9
10		Основы физического моделирования двухфазных турбулентных течений	Физическое моделирование течений газа с частицами. Особенности и задачи экспериментального изучения гетерогенных потоков. Методы цифровой трассерной визуализации и лазерной анемометрии. Особенности изучения поведения частиц в турбулентном потоке. Особенности изучения обратного влияния частиц на характеристики течения несущего газа	9	13
11		Электрохимический источник тока (аккумулятор)	Химические реакции при заряде и разряде. Предельные возможности при импульсном съеме энергии.	3	5

12		Обобщенные энергетические характеристики импульсных генераторов	Введение в импульсную энергетику. Общие понятия. Диапазон параметров. История развития, современные тенденции. Уникальные установки для применения в научных исследованиях и технических приложениях.	3	5
----	--	---	---	---	---

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

№ п/п	Вид занятия	Форма проведения занятий	Цель
1	лекция	Изложение теоретического материала	получение теоретических знаний по дисциплине
2	интерактивная лекция	Изложение теоретического материала с помощью презентаций	повышение степени понимания материала
3	лекция	решение задач по заданию (индивидуально где требуется) преподавателя – решаются задачи, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий и сдаются в конце изучения темы, используются учебники, рекомендуемые данной программой	осознание связей между теорией и практикой, а также взаимозависимостей разных дисциплин
4	самостоятельная работа студента	Подготовка к применению полученных знаний в НИР студента, подготовка к экзамену	повышение степени понимания материала

9. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ

Контрольно-измерительные материалы

Перечень контрольных вопросов для сдачи зачета и экзамена.

1. Что такое турбулентность?
2. Методы описания структуры турбулентных течений.
3. Уравнение Навье – Стокса.
4. Диссипация энергии в вязкой жидкости.
5. Качественная схема развития турбулентности.
6. Масштабная инвариантность.
7. Спектр турбулентных пульсаций.
8. Оценка масштабов турбулентности.
9. Механизм растяжения вихревых структур.
10. Предельные токи и напряжения в природе и в экспериментах.
11. Методы моделирования турбулентных течений.
12. Прямое численное моделирование.
13. Метод с выделением крупных вихрей.
14. Методы статистических моментов.
15. Статистические моменты и кумулянты.
16. Уравнение Рейнольдса.
17. Уравнения для моментов.

18. Обменный механизм.
19. Тензор скорости диссипации.
20. Турбулентная диффузия.
21. Стратегия замыкания высших моментов.
22. Алгебраические модели тройных корреляций.
23. Модель турбулентности
24. Рейнольдсовых напряжений.
25. $K - \epsilon$ модель турбулентности.
26. $K - L$ модель турбулентности.
27. Модель пути смешения Прандтля.
28. Условия реализуемости.
29. Модели турбулентности третьего порядка.
30. Уравнения для кумулянтов четвертого порядка.
31. Связь между переносом тепла и переносом импульса.
32. Математическое описание процессов тепломассопереноса.
33. Модель турбулентного переноса скаляра.
34. Модели замыкания.
35. Методы экспериментального исследования структуры турбулентных течений.
36. Термоанемометрия.
37. Лазерная доплеровская анемометрия.
38. Статистическая обработка экспериментальных данных.
39. Что такое многофазные течения?
40. Многофазные течения в природе и технике.
41. Специфические особенности математического и физического моделирования гетерогенных потоков.
42. Два основных класса задач изучения гетерогенных течений.
43. Основные характеристики гетерогенных потоков.
44. Времена динамической и тепловой релаксации частиц.
45. Массовая, объемная и счетная концентрации частиц.
46. Столкновения частиц между собой.
47. Столкновения частиц со стенками канала.
48. Числа Стокса в осредненном, крупномасштабном и мелкомасштабном пульсационных движениях.
49. Столкновительные числа Стокса.
50. Классификация гетерогенных турбулентных потоков.
51. Математическое моделирование турбулентных течений газа с частицами.
52. Лагранжев подход: преимущества и ограничения.
53. Эйлеров подход: преимущества и ограничения.
54. Стратегия построения обобщенной компьютерной модели двухфазных потоков.
55. Течения газа с частицами в каналах.
56. Распределения осредненных и пульсационных скоростей газа и частиц.
57. Диссипация энергии турбулентности мелкими частицами.
58. Генерация энергии турбулентности крупными частицами.
59. Моделирование влияния частиц на турбулентную энергию газа.

60. Обтекание тел потоками с частицами.
61. Течение с частицами в области критической точки тела.
62. Течение с частицами в пограничном слое обтекаемого тела.
63. Аэродинамическое сопротивление тел в потоках с частицами.
64. Физическое моделирование течений газа с частицами.
65. Особенности и задачи экспериментального изучения гетерогенных потоков.
66. Методы цифровой трассерной визуализации и лазерной анемометрии.
67. Особенности изучения поведения частиц в турбулентном потоке.
68. Особенности изучения обратного влияния частиц на характеристики течения несущего газа.

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система)

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература.

1. Моделирование процессов переноса в турбулентных течениях. Учебное пособие / Б.Б.Илюшин; Новосиб. гос. ун-т. Часть I. 1999.
2. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций / П.Г.Фрик; Перм. гос. техн. ун-т. Часть I. 1998. 108 с.
3. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций / П.Г.Фрик; Перм. гос. техн. ун-т. Часть II. 1999. 136 с.
4. Вараксин А.Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. – М.: Физматлит. 2008. 312 с..
5. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / Под общей ред. А.Ю.Вараксина. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2017. 680 с.
6. Попель О.С., Фортов В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: МЭИ. 2018. 450 с.

Дополнительная литература.

1. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Физматлит, 2002.
2. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1987. Ч.1. 464 с.; Ч.2. 360 с.
3. Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П. Турбулентные течения газовзвеси. – Киев: Наукова думка. 1987. 239 с.
4. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. – М.: Наука. 1994. 320 с.
5. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Ионов М.С. Потребности электроэнергетики России в газовых турбинах: текущее состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2017. № 11. С. 53–65.
6. Фаворский О.Н., Филиппов С.П., Полишук В.Л. Актуальные проблемы обеспечения энергетики страны конкурентоспособным оборудованием // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 8. С. 679–688.
7. Ведешкин Г.К., Пузич А.А., Назаренко Ю.Б., Филиппов С.П., Дильман М.Д. Технологическое обновление ТЭЦ России на базе авиапроизводных ГТУ // Газотурбинные технологии. 2020. № 6(173). С. 2–5.

8. **Фаворский О.Н., Батенин В.М., Филипов С.П.** Развитие энергетики: выбор стратегических решений и их реализация // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 5. С. 415–424.
9. **Филиппов С.П., Кейко А.В.** Газификация угля: на перепутье. Технологические факторы // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 45–48.
10. **Филиппов С.П., Кейко А.В.** Газификация угля: на перепутье. Экономический взгляд // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 16–31.

12. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

русский

Программу составил

 член-корр. РАН, профессор, д.ф-м.н. А.Ю. Вара́ксин,

«14» июня 2022 г.