

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского



**Программа дисциплины**

Турбулентность и теплопередача М2.ДВ.1

Направление подготовки: 010800.68 - Механика и математическое моделирование

Профиль подготовки: Механика жидкости, газа и плазмы

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Мазо А.Б.

**Рецензент(ы):**

-

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Егоров А. Г.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_ от "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского :

Протокол заседания УМК No \_\_\_ от "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No 81724014

Казань  
2014

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) профессор, д.н. (доцент) Мазо А.Б. Кафедра аэрогидромеханики отделение механики, Alexander.Mazo@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины "Турбулентность и теплопередача" является изучение методов математического описания теплопередачи в технологических устройствах с турбулентным режимом течения теплоносителя. Излагаются основные положения теории изотропной однородной турбулентности А.Н. Колмогорова и их следствия, используемые в современных полуэмпирических моделях. Рассматриваются алгебраические и дифференциальные методы замыкания уравнений Рейнольдса, а также модель крупных вихрей (LES) с замыканием Смагоринского-Лилли. Во всех моделях присутствуют соответствующие уравнения турбулентной теплопроводности.

Изучаются основные механизмы передачи тепла: теплопроводность, конвекция, излучение. Даются формулировки граничных условий и примеры постановок задач теплообмена. Выводятся критерии подобия в теории теплопроводности и формулировки задач в безразмерных переменных. Разбираются модельные задачи теплопроводности, их точные, автомодельные и численные решения. Значительная часть курса посвящена проблемам нелинейного теплообмена с фазовыми превращениями (плавление-кристаллизация, испарение-конденсация).

Лекционный курс сопровождается лабораторными и самостоятельными занятиями, где студенты самостоятельно изучают отдельные главы курса, докладывают результаты, закрепляют полученные теоретические знания, решая конкретные задачи конвективного теплообмена с помощью аналитических и численных методов.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел "М2.ДВ.1 Профессиональный" основной образовательной программы 010800.68 Механика и математическое моделирование и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 1 курсе, 1, 2 семестры.

Дисциплина входит в специальную часть профессионального цикла. Для ее освоения нужны знания из курсов дифференциальных уравнений, механики сплошной среды, вычислительной гидродинамики. Получаемые знания, умения и навыки необходимы для математического моделирования процессов конвективной теплопроводности и решения инженерных задач в соответствующей области. Приобретаемые компетенции нужны для выполнения магистерских диссертаций по направлению "механика и математическое моделирование".

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-5 (общекультурные компетенции)	способностью порождать новые идеи
ОК-8 (общекультурные компетенции)	способностью к проявлению инициативы и лидерских качеств
ПК-13	способностью к самостоятельному построению целостной картины дисциплины
ПК-19	умением извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, реферативных журналов

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-2	владением методами математического и алгоритмического моделирования при анализе проблем техники и естествознания
ПК-3	способностью к интенсивной научно-исследовательской и научно-изыскательской деятельности
ПК-6	способностью к нахождению из определяющих экспериментов материальных функций (функционалов, постоянных) в моделях реальных тел и сред
ПК-9	умением ориентироваться в современных алгоритмах компьютерной математики, совершенствовать, углублять и развивать математическую теорию и физико-механические модели, лежащие в их основе

В результате освоения дисциплины студент:

4. должен демонстрировать способность и готовность:

Различать ламинарные и турбулентные режимы течения жидкости. Иметь представление о теории турбулентности А.Н. Колмогорова, знать ее гипотезы и основные следствия.

Понимать смысл уравнений Рейнольдса как осредненных уравнений Навье-Стокса. Владеть основными приемами замыкания этих уравнений для создания полуэмпирических моделей. Уметь осознанно выбрать модель турбулентности для решения конкретной задачи, в том числе при использовании CFD-пакетов.

Познакомиться с методом крупных вихрей, усвоить понятия пространственных фильтров и подсеточных напряжений.

Различать основные механизмы передачи тепла: теплопроводность, конвекцию, излучение. Понимать физические основы фазовых превращений вещества в тепловых процессах.

Знать основные уравнения конвективного теплообмена в ламинарных и турбулентных течениях. Освоить методы подобия и размерности, знать основные критерии подобия.

Овладеть методами построения автомодельных решений уравнений теплообмена, численными методами решения тепловых задач.

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет зачетных(ые) единиц(ы) 144 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины отсутствует в 1 семестре; экзамен во 2 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Ламинарные и турбулентные течения. Опыт Рейнольдса. Решение Хагена-Пуазейля и его неустойчивость. Критическое число Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса и турбулентной конвективной теплопроводности. Статистические характеристики пульсаций.	1	1-2	2	4	0	устный опрос
2.	Тема 2. Теория А.Н. Колмогорова. Интервалы масштабов турбулентности. Гипотезы Колмогорова и их следствия.	1	3-4	2	4	0	устный опрос
3.	Тема 3. Дифференциальные уравнения для турбулентных пульсаций. Цепочка уравнений Фридмана-Келлера. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. Уравнения для пульсаций турбулентного потока тепла.	1	5-8	1	2	0	устный опрос
4.	Тема 4. Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса. Модели k-ε, k-ω, SST.	1	9-11	1	2	0	устный опрос

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
5.	Тема 5. Модели турбулентной вязкости. Модель пути смешения Прандтля. Модели переноса вихревой вязкости.	1	12-14	1	2	0	устный опрос
6.	Тема 6. Моделирование крупных вихрей. Фильтрованные уравнения Навье-Стокса и подсеточные напряжения. Динамическая модель Германо.	1	15-16	1	2	0	контрольная работа
7.	Тема 7. Теплопроводность. Закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Энтальпия. Фазовые превращения. Критерии подобия. Стационарная теплопередача через стенку. Автомодельные решения. Численное решение задач теплопроводности.	2	1-4	4	4	0	устный опрос
8.	Тема 8. Тепловые процессы при фазовых превращениях. Классическая и обобщенная двухфазная задача Стефана. Автомодельные решения. Методы численного решения. Теплообмен при испарении и конденсации жидкости. Критерии подобия.	2	5-8	2	4	0	устный опрос

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
9.	Тема 9. Уравнения конвективной теплопроводности. Критерии подобия. Тепловой пограничный слой. Методы расчета. Естественная конвекция.	2	9-12	4	6	0	устный опрос
10.	Тема 10. Теплообмен излучением. Закон Стефана-Больцмана. Нелинейные граничные условия излучения. Радиационный теплообмен между телами.	2	13-14	2	4	0	контрольная работа
	Тема . Итоговая форма контроля	1		0	0	0	экзамен
	Тема . Итоговая форма контроля	2		0	0	0	экзамен
	Итого			20	34	0	

#### 4.2 Содержание дисциплины

**Тема 1. Ламинарные и турбулентные течения. Опыт Рейнольдса. Решение Хагена-Пуазейля и его неустойчивость. Критическое число Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса и турбулентной конвективной теплопроводности. Статистические характеристики пульсаций.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Ламинарные и турбулентные течения: описание феномена. Опыт Рейнольдса. Решение Хагена-Пуазейля и его неустойчивость. Критическое число Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса. Среднее и пульсация. Тензор турбулентных напряжений. Осредненное уравнение конвективной теплопроводности. Турбулентные вязкость, теплопроводность, число Прандтля. Физический смысл напряжений Рейнольдса. Статистические характеристики пульсаций.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Решение Хагена-Пуазейля для течения вязкой жидкости в трубе. Формулы для профиля скорости и коэффициента сопротивления при ламинарном течении в зависимости от числа Рейнольдса. Вывод уравнений URANS.

**Тема 2. Теория А.Н. Колмогорова. Интервалы масштабов турбулентности. Гипотезы Колмогорова и их следствия.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Теория А.Н. Колмогорова. Однородная изотропная турбулентность. Каскадный перенос энергии в турбулентном потоке. Интервалы масштабов турбулентности: энергосодержащий, инерционный, диссипативный. Гипотезы Колмогорова и их следствия.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**



Интервалы масштабов турбулентности: энергосодержащий, инерционный, диссипативный. Три гипотезы Колмогорова и их следствия. Применение теории подобия для вывода закона Колмогорова "5/3", закона Обухова, оценки масштаба диссипативных вихрей вихрей и частоты пульсаций скорости. Оценка вычислительных ресурсов для прямого численного моделирования мелкомасштабной турбулентности.

**Тема 3. Дифференциальные уравнения для турбулентных пульсаций. Цепочка уравнений Фрийдмана-Келлера. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. Уравнения для пульсаций турбулентного потока тепла.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Дифференциальные уравнения для турбулентных пульсаций. Цепочка уравнений Фрийдмана-Келлера. Физическая интерпретация уравнений эволюции турбулентности. Члены генерации, диссипации, перераспределения. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. Уравнения для пульсаций турбулентного потока тепла.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Вывод дифференциальных уравнений для турбулентных пульсаций. Вывод уравнений Фрийдмана-Келлера. Моменты высших порядков, их вычисление и моделирование. Физическая интерпретация уравнений эволюции турбулентности. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. Вывод уравнений для пульсаций турбулентного потока тепла.

**Тема 4. Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса. Модели k- $\epsilon$ , k- $\omega$ , SST.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса. Модель Колмогорова-Прандтля; семейство моделей (стандартная Лаундера-Сполдинга, RNG, realizable). Семейство моделей (стандартная Вилкокса, SST зональная Ментера).

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Формула Буссинеска для замыкания уравнений Рейнольдса. Вихревая вязкость и турбулентная теплопроводность. Семейство двухпараметрических моделей k- $\epsilon$ : 1) стандартная Лаундера-Сполдинга, 2) ренормализованная RNG, 3) реализуемая (realizable). Семейство моделей k- $\omega$ : 1) стандартная Вилкокса, 2) SST зональная Ментера.

**Тема 5. Модели турбулентной вязкости. Модель пути смещения Прандтля. Модели переноса вихревой вязкости.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Модели турбулентной вязкости. Модель пути смещения Прандтля. Логарифмический профиль скорости. Модели переноса вихревой вязкости Ни-Коважного, Секундова, Спаларта-Аллмараса.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Модели турбулентной вязкости. Модель пути смещения Прандтля. Логарифмический профиль скорости, программа расчета эпюры универсального профиля в составном турбулентном пограничном слое. Модели переноса вихревой вязкости Ни-Коважного, Секундова, Спаларта-Аллмараса.

**Тема 6. Моделирование крупных вихрей. Фильтрованные уравнения Навье-Стокса и подсеточные напряжения. Динамическая модель Германо.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Моделирование крупных вихрей (LES). Пространственные фильтры и их свойства. Фильтрованные уравнения Навье-Стокса. Тензор подсеточных напряжений. Связь ширины фильтра и шага сетки. Модель Смагоринского-Лилли для подсеточных напряжений. Внутренняя непротиворечивость модели LES. Повторная фильтрация. Динамическая модель Германо.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**



Моделирование крупных вихрей LES. Написание программы для различных пространственных фильтров. Вывод фильтрованных уравнений Навье-Стокса. Замыкание LES: модель Смагоринского-Лилли для подсеточных напряжений.

**Тема 7. Теплопроводность. Закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Энтальпия. Фазовые превращения. Критерии подобия. Стационарная теплопередача через стенку. Автомодельные решения. Численное решение задач теплопроводности.**

**лекционное занятие (4 часа(ов)):**

Теплопроводность. Теплоемкость, температуропроводность. Закон Фурье. Теплопроводность газов, жидкостей и твердых тел. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Энтальпия. Фазовые превращения: плавление-кристаллизация, испарение-конденсация. Скрытая теплота плавления и испарения. Граничные условия. Примеры постановок задач. Критерии подобия в теории теплопроводности. Решение модельных задач теплопроводности. Стационарная теплопередача через плоскую, цилиндрическую, однородную и композитную стенку. Оптимальная теплоизоляция. Автомодельные решения нестационарного уравнения теплопроводности при различных граничных условиях. Численное решение задач теплопроводности.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Вывод классического дифференциального уравнения теплопроводности. Вывод обобщенного уравнения теплопроводности в энтальпийной форме. Решение инженерных задач о теплопередаче через плоскую, цилиндрическую, однородную и композитную стенку. Построение автомодельных решений одномерных уравнений. Численное решение задач теплопроводности, их тестирование на автомодельных решениях.

**Тема 8. Тепловые процессы при фазовых превращениях. Классическая и обобщенная двухфазная задача Стефана. Автомодельные решения. Методы численного решения. Теплообмен при испарении и конденсации жидкости. Критерии подобия.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Формулировка классической двухфазной задача Стефана. Построение автомодельного решения. Энтальпийная постановка задачи Стефана. Методы численного решения. Теплообмен при испарении и конденсации жидкости. Граничные условия на поверхности раздела фаз. Критерии подобия. Задача Нуссельта о конденсации пара на вертикальной пленке.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Построение автомодельных решений классической двухфазной задача Стефана. Численное решение задачи Стефана в энтальпийной постановке. Аналитическое решение задачи Нуссельта о конденсации пара на вертикальной пленке.

**Тема 9. Уравнения конвективной теплопроводности. Критерии подобия. Тепловой пограничный слой. Методы расчета. Естественная конвекция.**

**лекционное занятие (4 часа(ов)):**

Уравнения конвективной теплопроводности. Безразмерные переменные и критерии подобия. Числа  $Re$ ,  $Pe$ ,  $Nu$ ,  $Bi$ ,  $Pr$ ,  $Gr$ ,  $Ri$ . Точные решения. Тепловой пограничный слой. Методы расчета. Приближение Буссинеска для учета сжимаемости. Естественная и смешанная конвекция.

**практическое занятие (6 часа(ов)):**

Численное решение системы уравнений Навье-Стокса и конвективной теплопроводности.

**Тема 10. Теплообмен излучением. Закон Стефана-Больцмана. Нелинейные граничные условия излучения. Радиационный теплообмен между телами.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Теплообмен излучением. Излучение нагретого тела. Закон Стефана-Больцмана. Нелинейные граничные условия излучения и их линеаризация. Радиационный теплообмен между телами. Угловые коэффициенты.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Численное решение задачи теплопроводности с нелинейным граничным условием Стефана-Больцмана.

#### 4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Ламинарные и турбулентные течения. Опыт Рейнольдса. Решение Хагена-Пуазейля и его неустойчивость. Критическое число Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса и турбулентной конвективной теплопроводности. Статистические характеристики пульсаций.	1	1-2	подготовка к устному опросу	6	устный опрос
2.	Тема 2. Теория А.Н. Колмогорова. Интервалы масштабов турбулентности. Гипотезы Колмогорова и их следствия.	1	3-4	подготовка к устному опросу	6	устный опрос
3.	Тема 3. Дифференциальные уравнения для турбулентных пульсаций. Цепочка уравнений Фридмана-Келлера. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. Уравнения для пульсаций турбулентного потока тепла.	1	5-8	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
4.	Тема 4. Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса. Модели k-ε, k-ω, SST.	1	9-11	подготовка к устному опросу	6	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
5.	Тема 5. Модели турбулентной вязкости. Модель пути смешения Прандтля. Модели переноса вихревой вязкости.	1	12-14	подготовка к устному опросу	6	устный опрос
6.	Тема 6. Моделирование крупных вихрей. Фильтрованные уравнения Навье-Стокса и подсеточные напряжения. Динамическая модель Германо.	1	15-16	подготовка к контрольной работе	6	контрольная работа
7.	Тема 7. Теплопроводность. Закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Энтальпия. Фазовые превращения. Критерии подобия. Стационарная теплопередача через стенку. Автомодельные решения. Численное решение задач теплопроводности.	2	1-4	подготовка к устному опросу	6	устный опрос
8.	Тема 8. Тепловые процессы при фазовых превращениях. Классическая и обобщенная двухфазная задача Стефана. Автомодельные решения. Методы численного решения. Теплообмен при испарении и конденсации жидкости. Критерии подобия.	2	5-8	подготовка к устному опросу	6	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
9.	Тема 9. Уравнения конвективной теплопроводности. Критерии подобия. Тепловой пограничный слой. Методы расчета. Естественная конвекция.	2	9-12	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
10.	Тема 10. Теплообмен излучением. Закон Стефана-Больцмана. Нелинейные граничные условия излучения. Радиационный теплообмен между телами.	2	13-14	подготовка к контрольной работе	4	контрольная работа
	Итого				54	

### 5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

лекции с применением средств мультимедиа, самостоятельная работа (изучение отдельных глав курса, решение задач, программирование) с использованием учебного пособия и электронного курса лекций по курсу ТИТ, лабораторные занятия, контрольные работы, зачет. В течение семестра студенты решают набор задач ВГ, указанных преподавателем, к каждому лабораторному занятию. В каждом семестре проводятся контрольные работы (на лабораторных занятиях). К экзамену допускаются студенты, сдавшие все задачи и показавшие положительные результаты по текущей работе в течение семестра.

### 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

**Тема 1. Ламинарные и турбулентные течения. Опыт Рейнольдса. Решение Хагена-Пуазейля и его неустойчивость. Критическое число Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса и турбулентной конвективной теплопроводности. Статистические характеристики пульсаций.**

устный опрос, примерные вопросы:

В чем причина появления пульсаций при росте числа  $Re$ ? Что такое тензор турбулентных напряжений? Какова природа турбулентной теплопроводности? Чем отличаются уравнения Рейнольдса от уравнений Навье-Стокса? Назовите статистические характеристики пульсаций.

**Тема 2. Теория А.Н. Колмогорова. Интервалы масштабов турбулентности. Гипотезы Колмогорова и их следствия.**

устный опрос, примерные вопросы:

Что такое изотропная и однородная турбулентность? Какие процессы происходят в энергетическом, инерционном и диссипативном интервале турбулентности и чем они определяются? Как выражаются параметры турбулентного течения в диссипативном интервале через число Рейнольдса?

### **Тема 3. Дифференциальные уравнения для турбулентных пульсаций. Цепочка уравнений Фридмана-Келлера. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. Уравнения для пульсаций турбулентного потока тепла.**

устный опрос , примерные вопросы:

Как выводятся дифференциальные уравнения для турбулентных пульсаций? Что такое цепочка уравнений Фридмана-Келлера? Какова структура эволюционного уравнения? Что такое энергия турбулентных пульсаций  $k$  и ее изотропная диссипация  $\epsilon$ ? Как выводятся уравнения для этих величин?

### **Тема 4. Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса. Модели $k-\epsilon$ , $k-\omega$ , SST.**

устный опрос , примерные вопросы:

Что значит замыкание уравнений Рейнольдса? К определению какой величины сводится замыкание? Дайте характеристику моделям семейства  $k-\epsilon$ . Напишите формулу для турбулентной вязкости в этих моделях. Дайте характеристику моделям семейства  $k-\omega$ . Напишите формулу для турбулентной вязкости в этих моделях.

### **Тема 5. Модели турбулентной вязкости. Модель пути смешения Прандтля. Модели переноса вихревой вязкости.**

устный опрос , примерные вопросы:

Чем модели турбулентной вязкости отличаются от дифференциальных моделей замыкания? Что такое путь смешения в модели Прандтля? Что такое универсальный профиль скорости? Какую форму он имеет в вязком подслое, турбулентном пограничном слое и слое следа? Дайте общую характеристику модели Спаларта-Аллмараса.

### **Тема 6. Моделирование крупных вихрей. Фильтрованные уравнения Навье-Стокса и подсеточные напряжения. Динамическая модель Германо.**

контрольная работа , примерные вопросы:

Темы контрольных работ: - Уравнения Рейнольдса и турбулентной теплопроводности. - Цепочка уравнений Фридмана-Келлера. - Структура эволюционного уравнения турбулентности и физическая интерпретация его членов. - Семейство моделей  $k-\epsilon$ . - Семейство моделей  $k-\omega$ . - Модель пути смешения Прандтля и универсальный профиль скорости. - Модели Секундова, Ни-Коважного и Спаларта-Аллмараса. - Фильтрованные уравнения Навье-Стокса и подсеточные напряжения в методе LES. - Замыкание Смагоринского-Лилли для метода LES.

### **Тема 7. Теплопроводность. Закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Энтальпия. Фазовые превращения. Критерии подобия. Стационарная теплопередача через стенку. Автомодельные решения. Численное решение задач теплопроводности.**

устный опрос , примерные вопросы:

Сформулируйте закон Фурье. Как понимать компоненты тензора теплопроводности? Что такое энтальпия, ее связь с теплоемкостью, температурой и энергией фазовых превращений. Как строятся автомодельные решения задач теплопроводности? Какие численные методы решения задач теплопроводности Вам известны?

### **Тема 8. Тепловые процессы при фазовых превращениях. Классическая и обобщенная двухфазная задача Стефана. Автомодельные решения. Методы численного решения. Теплообмен при испарении и конденсации жидкости. Критерии подобия.**

устный опрос , примерные вопросы:

Дайте формулировку классической двухфазной задачи Стефана. Что такое условие Стефана? Как ставится обобщенная двухфазная задача Стефана? Как строятся автомодельные решения. Какие методы численного решения задачи Стефана в энтальпийной форме Вам известны? Как ставится граничное условие на контакте пара и жидкости при испарении и конденсации.

### **Тема 9. Уравнения конвективной теплопроводности. Критерии подобия. Тепловой пограничный слой. Методы расчета. Естественная конвекция.**

устный опрос , примерные вопросы:

Какова структура уравнения конвективной теплопроводности? Назовите критерии подобия конвективной теплопроводности и их смысл. Что такое тепловой пограничный слой? Как моделируется естественная конвекция в приближении Буссинеска?

**Тема 10. Теплообмен излучением. Закон Стефана-Больцмана. Нелинейные граничные условия излучения. Радиационный теплообмен между телами.**

контрольная работа , примерные вопросы:

Темы контрольных работ: - Классическое дифференциальное уравнение теплопроводности. - Дифференциальное уравнение теплопроводности в энтальпийной форме. - Расчет теплопередачи через стенку. - Автомодельные решения задач теплопроводности. - Автомодельное решения задачи Стефана. - Моделирование теплообмена при испарении и конденсации жидкости. Задача Нуссельта. - Уравнения динамического и теплового и пограничного слоя. Число Прандтля. - Основные понятия теории радиационного теплообмена.

**Тема . Итоговая форма контроля**

**Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к экзамену:

Проверка теоретических знаний и практических навыков осуществляется по 100-балльной рейтинговой системе, принятой к КФУ. 40 баллов отводится для оценки текущей успеваемости, 60 - для оценки на экзамене. Проводятся две контрольные работы в конце каждого семестра; на лабораторных работах проверяются результаты самостоятельной работы (конспекты, решение задач) и зачитываются компьютерные программы, составленные каждым студентом для решения задач ТИТ.

Экзамен в конце семестра А оценивается переводом набранных по дисциплине баллов в оценки: неудовлетворительно, посредственно, удовлетворительно, хорошо, очень хорошо, отлично.

**ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ**

1. Примеры, классы и режимы ламинарных и турбулентных течений.
2. Опыт Рейнольдса.
3. Решение Хагена- Пуазейля и его неустойчивость.
4. Критическое число Рейнольдса.
5. Механизм турбулентного течения: каскадный перенос энергии вихрей
6. Уравнения движения вязкой жидкости.
7. Уравнение энергии
8. Динамический пограничный слой.
9. Тепловой пограничный слой.
10. Уравнения Рейнольдса.
11. Осредненное уравнение конвективной теплопроводности.
12. Физический смысл напряжений Рейнольдса. Замеры пульсаций скорости.
13. Статистические характеристики пульсаций.
14. Однородная изотропная турбулентность. Каскадный перенос энергии в турбулентном потоке.
15. Интервалы масштабов турбулентности: энергосодержащий, инерционный, диссипативный.
16. Гипотезы Колмогорова и их следствия. Законы "5/3", закон Обухова.
17. Размер диссипативных вихрей и другие характеристики мелкомасштабной турбулентности.
18. Цепочка уравнений Фридмана - Келлера.
19. Физическая интерпретация уравнений эволюции турбулентности.
20. Уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации.
21. Уравнения для пульсаций турбулентного потока тепла.
22. Модель Колмогорова - Прандтля.
23. Стандартная модель Лаундера-Сполдинга.



24. RNG модель.
25. Realizable модель.
26. Стандартная модель Вилкокса.
27. SST или зональная модель Ментера.
28. Модель пути смешения Прандтля. Универсальный профиль скорости в ТПС.
29. Модели переноса вихревой вязкости Секундова.
30. Однопараметрическая модель Спаларта-Аллмараса.
31. Пространственные фильтры и их свойства.
32. Идея метода LES. Фильтрованные уравнения Навье-Стокса.
33. Модель Смагоринского-Лилли для подсеточных напряжений.
34. Динамическая модель Германо.
35. Сравнение моделей RANSE, LES, DES, DNS.

### 7.1. Основная литература:

Особенности численной реализации методов решения прямых и обратных краевых задач аэрогидродинамики, Марданов, Ренат Фаритович, 2013г.

Механика сплошной среды, Нигматулин, Роберт Искандерович, 2014г.

1. Бухгольц, Н.Н. Основы курса теоретической механики. Ч. 1: Кинематика, статика, динамика материальной точки : учебник Издательство: Лань, 2009. - 480 с. //

<http://e.lanbook.com/view/book/32/>

2. Бухгольц, Н.Н. Основы курса теоретической механики. Ч. 2: Динамика системы материальных точек : учебник Издательство: Лань, 2009. - 336 с. //

<http://e.lanbook.com/view/book/33/>

3. Мещерский И.В. Сборник задач по теоретической механике: учебник Издательство: Лань, 2012. - 448 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/2786/>

4. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Том 1: Статика и кинематика: учебник Издательство: Лань, 2013. - 672 с.

<http://e.lanbook.com/view/book/4551/>

5. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. 2: Динамика: учебник Издательство: Лань, 2013. - 640 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/4552/>

### 7.2. Дополнительная литература:

Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости, Мазо, Александр Бенцианович, 2007г.

Гидродинамика, Мазо, Александр Бенцианович; Поташев, Константин Андреевич, 2008г.

1. Мазо А.Б. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости. Учебное пособие. - Казань: КГУ. 2007. - 209 с.

2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Изд-во иностранной литературы. 1956. - 528 с.

3. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. - М.: Мир. 1987. 592 с.

4. Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. - М.: Высшая школа. 1991. - 480 с.

5. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. - М.: Мир. 1986. - 182 с.

6. Фриш У. Турбулентность. Наследие А.Н. Колмогорова. М.: Фазис. 1998. - 346 с.

7. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. - Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. - 292 с.

8. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. - М.: Мир. 1988. - 544 с.



### **7.3. Интернет-ресурсы:**

А.Б. Мазо, К.А. Поташев. Гидродинамика: учеб. пособие. ? Казань: Казан. ун-т, 2013. ? 2-е изд. ? 128 с - [http://www.kpfu.ru/docs/F532287718/Mazo\\_Potashev\\_Gidrodinamika.pdf](http://www.kpfu.ru/docs/F532287718/Mazo_Potashev_Gidrodinamika.pdf)

А.Б. Мазо. Основы теории и методы расчета теплопередачи: учебное пособие ? Казань: Казан. ун-т, 2013. - 144 с. - [http://www.kpfu.ru/docs/F139730217/Mazo\\_Teploperedacha.pdf](http://www.kpfu.ru/docs/F139730217/Mazo_Teploperedacha.pdf)

Научная электронная библиотека - <http://elibrary.ru/>

Реферативная база научной информации - <http://www.scopus.com/home.url>

Электронные ресурсы издательства - <http://link.springer.com/>

### **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)**

Освоение дисциплины "Турбулентность и теплопередача" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

учебные аудитории для проведения лекционных и семинарских занятий, компьютерный класс с набором базового программного обеспечения разработчика - системы программирования на языках C++ и Delphi с возможностью многопользовательской работы и централизованного администрирования.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 010800.68 "Механика и математическое моделирование" и магистерской программе Механика жидкости, газа и плазмы .

Автор(ы):

Мазо А.Б. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.