

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Механико-математический факультет
Кафедра газовой и волновой динамики



УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
/Нигматулин Р.И./
« 10 » июня 2019г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины (модуля):

Неравновесная термодинамика

наименование дисциплины (модуля)

Уровень высшего образования:

специалитет

Направление подготовки (специальность):

01.05.01 Фундаментальные математика и механика

(код и название направления/специальности)

Направленность (профиль) ОПОП В-ПД

Фундаментальная механика

(если дисциплина (модуль) относится к вариативной части программы)

Форма обучения:

очная

очная, очно-заочная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
на заседании кафедры газовой и волновой динамики
(протокол № 15, « 10 » июня 2019 года)

Москва 2019

На обратной стороне титула:

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки / специальности *«Фундаментальные математика и механика»* (программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки; *программы специалитета; программы магистратуры*) в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

Год (годы) приема на обучение 2015_____

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО *относится к базовой части.*
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть): _____

освоение следующих дисциплин:

Математический анализ

Алгебра

Дифференциальные уравнения

Уравнения с частными производными

Основы механики сплошной среды

Механика сплошной среды

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с компетенциями
СПК-1	владение специальными разделами фундаментальной механики, методами анализа и решения задач специализации
СПК-2	способность к проведению самостоятельных научных и прикладных исследований в специальных областях механики
СПК-3	способность к применению знаний специализации в будущей профессиональной деятельности

4. Формат обучения **очный. Стандартный**

5. Объем дисциплины (модуля) составляет 3 з.е., в том числе 36 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 72 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы	Самостоятельная работа обучающегося, часы

					<i>(виды самостоятельной работы – эссе, реферат, контрольная работа и пр. – указываются при необходимости)</i>
		Занятия лекционного типа*	Занятия семинарского типа*	Всего	
Тема 1. Исходные положения термодинамики. Термодинамическая система, состояние, процессы. Общее и нулевое начало термодинамики. Эмпирическая температура. Энергия системы, работа и теплота.	6	2	0	2	4
Тема 2. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Уравнение притока тепла.	6	2	0	2	4
Тема 3. Основные термодинамические процессы. Термические и калорические уравнения состояния, теплоемкость. Цикл Карно для совершенного газа.	6	2	0	2	4
Тема 4. Второе начало термодинамики. Принцип адиабатической недостижимости. Существование энтропии и термодинамической температуры. Термодинамическая шкала температур.	8	4	0	4	4
Тема 5. Основное уравнение и основное неравенство термодинамики. Связь между термическим и калорическим уравнением состояния. Вычисление энтропии. Теорема Гиббса. Парадокс Гиббса. Третье начало термодинамики.	6	2	0	2	4
Тема 6. Метод циклов и метод термодинамических потенциалов. Основные термодинамические	6	2	0	2	4

потенциалы: внутренняя энергия, свободная энергия, потенциал Гиббса, энтальпия. Термодинамические потенциалы сложных систем и систем с переменным числом частиц.					
Тема 7. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем. Принцип виртуальных перемещений. Равновесие изолированной системы, системы в термостате при постоянном объеме, система в термостате при постоянном давлении, система с переменным числом частиц в термостате при постоянных химических потенциалах.	6	2	0	2	4
Коллоквиум по темам 1–7	2				2
Тема 8. Исходные положения неравновесной термодинамики. Локальное равновесие. Основное уравнение термодинамики неравновесных процессов. Термодинамические силы и термодинамические потоки. Уравнения баланса и законы сохранения экстенсивных параметров. Термодинамика линейных необратимых процессов. Линейный закон и соотношения взаимности Онсагера. Принцип Кюри.	8	4	0	4	4
Тема 9. Закон сохранения массы для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Диффузия, диффузионные потоки. Гомогенные химические реакции. Закон сохранения массы в реакциях, закон действующих масс, закон Арениуса. Уравнение неразрывности для смеси и уравнения диффузии для компонент.	6	2	0	2	4
Тема 10. Закон сохранения количества движения для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Уравнение движения смеси в субстанциональной и локальной форме. Теорема живых сил.	6	2	0	2	4

Тема 11. Закон сохранения энергии для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Вектор потока тепла. Дифференциальное уравнение баланса энергии в субстанциональной и локальной форме. Уравнение притока тепла.	6	2	0	2	4
Тема 12. Уравнение баланса энтропии для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Производство энтропии и вектор потока энтропии.	6	2	0	2	4
Коллоквиум по темам 8–12	2				2
Тема 13. Уравнения переноса. Феноменологический и кинетический подходы. Ограничения на коэффициенты переноса для изотропной среды. Связь с уравнениями переноса, полученными в кинетической теории газов.	6	2	0	2	4
Тема 14. Условия на поверхности разрыва в многокомпонентной химически реагирующей смеси. Граничные условия на неразрушающейся поверхности с гетерогенными реакциями. Граничные условия на термически разрушающейся поверхности.	6	2	0	2	4
Тема 15. Химические реакции на поверхности твердого тела. Адсорбция, десорбция, поверхностная диффузия, рекомбинация. Гетерогенный катализ. Теория идеального адсорбированного слоя Ленгмюра.	6	2	0	2	4
Тема 16. Вариационные принципы термодинамики необратимых процессов и основы нелинейной термодинамики. Принцип минимального рассеяния энергии Онсагера, принцип минимума производства энтропии Пригожина. Стационарные состояния k -го порядка. Универсальный закон	6	2	0	2	4

эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Примеры диссипативных структур.					
Промежуточная аттестация: экзамен	4				4
Итого	108			36	72

**Внимание! В таблице должно быть зафиксировано проведение текущего контроля успеваемости, который может быть реализован, например, в рамках занятий семинарского типа.*

*** Часы, отводимые на проведение промежуточной аттестации, выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося*

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

1. Коллоквиум по темам 1–7:

- 1.1. Сформулировать основные положения равновесной термодинамики (понятия, общее начало, 0-е начало, I-е начало).
- 1.2. Термические и калорические уравнения состояния. Что такое модель совершенного газа?
- 1.3. Понятие теплоемкости. Зависит ли теплоемкость от процесса? Формула Майера.
- 1.4. Цикл Карно для совершенного газа. КПД.
- 1.5. II начало термодинамики. Существование энтропии и термодинамической температуры.
- 1.6. В чем состоит метод циклов и метод потенциалов?
- 1.7. Вычисление энтропии для совершенного газа. В чем состоит парадокс Гиббса?

2. Коллоквиум по темам 8-12:

- 2.1. Записать любое из уравнений системы (или всю систему целиком) для описания течения многокомпонентной вязкой теплопроводной смеси реагирующих газов:
 - уравнение неразрывности для смеси
 - уравнения диффузии для компонент
 - уравнение движения
 - уравнение притока тепла
 - уравнение баланса энтропии
- 2.2. Знание определений и выражений для всех величин, входящих в упомянутую выше систему уравнений.

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

1. Список билетов к экзамену:

1. Исходные положения термодинамики. Термодинамическая система, состояние, процессы. Общее и нулевое начало термодинамики. Эмпирическая температура. Энергия системы, работа и теплота.
2. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Уравнение притока тепла. Вектор потока тепла.
3. Основные термодинамические процессы. Термические и калорические уравнения состояния, теплоемкость. Цикл Карно для совершенного газа.
4. Второе начало термодинамики. Принцип адиабатической недостижимости. Существование энтропии и термодинамической температуры. Термодинамическая шкала температур.
5. Основное уравнение и основное неравенство термодинамики. Связь между термическим и калорическим уравнением состояния. Вычисление энтропии. Теорема Гиббса. Парадокс Гиббса. Третье начало термодинамики.

6. Метод циклов и метод термодинамических потенциалов. Основные термодинамические потенциалы: внутренняя энергия, свободная энергия, потенциал Гиббса, энтальпия. Термодинамические потенциалы сложных систем и систем с переменным числом частиц.
7. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем. Принцип виртуальных перемещений. Равновесие изолированной системы, системы в термостате при постоянном объеме, система в термостате при постоянном давлении, система с переменным числом частиц в термостате при постоянных химических потенциалах.
8. Исходные положения неравновесной термодинамики. Локальное равновесие. Основное уравнение термодинамики неравновесных процессов. Термодинамические силы и термодинамические потоки. Уравнения баланса и законы сохранения экстенсивных параметров.
9. Термодинамика линейных необратимых процессов. Линейный закон и соотношения взаимности Онсагера. Принцип Кюри.
10. Закон сохранения массы для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Диффузия, диффузионные потоки. Гомогенные химические реакции. Закон сохранения массы в реакциях, закон действующих масс, закон Арениуса. Уравнение неразрывности для смеси и уравнения диффузии для компонент.
11. Закон сохранения количества движения для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Уравнение движения смеси в субстанциональной и локальной форме. Уравнение живых сил.
12. Закон сохранения энергии для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Вектор потока тепла. Дифференциальное уравнение баланса энергии в субстанциональной и локальной форме. Уравнение притока тепла.
13. Уравнение баланса энтропии для многокомпонентной химически реагирующей смеси. Производство энтропии и вектор потока энтропии.
14. Уравнения переноса. Феноменологический и кинетический подходы. Ограничения на коэффициенты переноса для изотропной среды. Связь с уравнениями переноса, полученными в кинетической теории газов.
15. Условия на поверхности разрыва в многокомпонентной химически реагирующей смеси. Граничные условия на неразрушающейся поверхности с гетерогенными реакциями. Граничные условия на термически разрушающейся поверхности.
16. Вариационные принципы термодинамики необратимых процессов и основы нелинейной термодинамики. Принцип минимального рассеяния энергии Онсагера, принцип минимума производства энтропии Пригожина. Стационарные состояния k -го порядка. Универсальный закон эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Примеры диссипативных структур.

2. Список дополнительных вопросов:

2.1. Список вопросов двух коллоквиумов (см. выше)

2.2. Дополнительные вопросы по темам 13–16:

- Записать вид уравнения переноса в рамках линейной теории для: тензора напряжений, вектора потока тепла, диффузионного потока.

- Записать выражение для скорости химической реакции (закон действующих масс), выражения для коэффициентов (закон Арениуса)
- Показать, что упомянутая выше система уравнений для многокомпонентной вязкой теплопроводной смеси реагирующих газов замыкается с помощью введенных уравнений переноса и уравнений состояния.
- Привести пример корректных граничных условий для упомянутой выше системы уравнений.
- Привести примеры гетерогенных химических реакций. В каких случаях и почему их необходимо учитывать?
- Привести примеры диссипативных структур. Показать, почему они не могут быть описаны в рамках линейной теории.

ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)				
Оценка	2	3	4	5
РО и соответствующие виды оценочных средств				
Знания (виды оценочных средств: устные и письменные опросы и контрольные работы, тесты, и т.п.)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения (виды оценочных средств: практические контрольные задания, написание и защита рефератов на заданную тему и т.п.)	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности не принципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения, опыт деятельности)	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

<i>(виды оценочных средств: выполнение и защита курсовой работы, отчет по практике, отчет по НИР и т.п.)</i>			используемые не в активной форме	
--	--	--	----------------------------------	--

8. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и дополнительной литературы:

Основная:

1. Р.И. Нигматулин, Механика сплошной среды. М.:ГЭОТАР-Медиа. 2014. 640с.
2. И.П. Базаров, Термодинамика. М.: Высшая школа. 1991г. 376с.

Дополнительная:

1. И. Дьярмати, Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. М.: МИР, 1974г.
2. А. Зоммерфельд, Термодинамика и статистическая физика. М.: Изд. иностранной литературы. 1955г.
3. С. Де Грот, П. Мазур. Неравновесная термодинамика. М.: МИР. 1964г.

- Описание материально-технического обеспечения:

- Аудитория
- Доска
- Мел

9. Язык преподавания:

Русский

10. Преподаватель (преподаватели):

Доцент, к.ф.-м.н. Якунчиков Артем Николаевич

11. Автор (авторы) программы:

Профессор, д.ф.-м.н. Ковалев Валерий Леонидович,
Доцент, к.ф.-м.н. Якунчиков Артем Николаевич