

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Механика многофазных сред
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: С.Е. Якуш, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физической и химической механики 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Механика многофазных сред" предусматривает изучение теоретических основ механики многофазных сред, основанных на теории взаимопроникающих взаимодействующих континуумов.

Задачи курса:

- освоение студентами базовых знаний в области механики многофазных сред;
- приобретение теоретических знаний в области механики многофазных систем;
- изучение подходов к описанию сложных систем при наличии границ раздела фаз и фазовых переходов;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области механики многофазных сред;
- освоение студентами базовых знаний для дальнейшего изучения методов и подходов механики многофазных сред.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- фундаментальные законы и основные принципы описания гетерогенных систем;
- основные подходы и расчетные методики описания процессов в гетерогенных системах;
- базовые принципы математического моделирования многофазных систем;
- математический аппарат теории многофазных систем.

Уметь:

- формулировать цель и постановку проблемы, связанной с расчетом многофазных и гетерогенных систем;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемой физической проблеме;
- применять аналитические и численные методы расчета тепломассообмена в многофазных системах

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Многофазные системы
2. Особенности гетерогенных сред
3. Гидродинамика гетерогенных сред
4. Характеристики многоскоростных континуумов
5. Законы сохранения в механике многофазных сред
6. Проблема замыкания уравнений многоскоростных континуумов
7. Течение около изолированных частиц
8. Тепломассообмен изолированных частиц
9. Массообмен капли при фазовых переходах
10. Горение капли топлива
11. Газожидкостные и газодисперсные системы
12. Режимы течения в гетерогенных системах
13. Дробление капель в потоке

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение теоретических основ механики многофазных сред, основанных на теории взаимопроникающих взаимодействующих континуумов.

## Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области механики многофазных сред;
- приобретение теоретических знаний в области механики многофазных систем;
- изучение подходов к описанию сложных систем при наличии границ раздела фаз и фазовых переходов;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области механики многофазных сред;
- освоение студентами базовых знаний для дальнейшего изучения методов и подходов механики многофазных сред.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные законы и основные принципы описания гетерогенных систем;
- основные подходы и расчетные методики описания процессов в гетерогенных системах;
- базовые принципы математического моделирования многофазных систем;
- математический аппарат теории многофазных систем.

уметь:

формулировать цель и постановку проблемы, связанной с расчетом многофазных и гетерогенных систем;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемой физической проблеме;  
применять аналитические и численные методы расчета тепломассообмена в многофазных системах.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
культурой постановки и математического моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов решения теоретических задач в области механики многофазных сред;  
практикой компьютерного исследования и решения теоретических и прикладных задач.

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

### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Многофазные системы	4			2
2	Особенности гетерогенных сред	4			2
3	Гидродинамика гетерогенных сред	6			2
4	Характеристики многоскоростных континуумов	4			2
5	Законы сохранения в механике многофазных сред	4			2
6	Проблема замыкания уравнений многоскоростных континуумов	4			2
7	Течение около изолированных частиц	4			3
8	Тепломассообмен изолированных частиц	4			5
9	Массообмен капли при фазовых переходах	6			5
10	Горение капли топлива	4			5
11	Газожидкостные и газодисперсные системы	6			5
12	Режимы течения в гетерогенных системах	4			5
13	Дробление капель в потоке	6			5
Итого часов		60			45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Многофазные системы

Фазовое состояние вещества. Многофазные смеси. Фазовый и компонентный состав. Классификация дисперсных смесей. Суспензии, эмульсии, газовзвеси, пузырьковые среды.

##### 2. Особенности гетерогенных сред

Отличительные особенности гетерогенных сред. Примеры течений с простой и сложной формой межфазной поверхности. Необходимость осредненного описания.

##### 3. Гидродинамика гетерогенных сред

Связь с классической гидродинамикой. Подходы к описанию дисперсных систем. Феноменологическая теория многоскоростных взаимопроникающих континуумов.

##### 4. Характеристики многоскоростных континуумов

Основные характеристики континуумов. Объемная доля фаз, средняя и истинная плотность фаз. Средняя плотность, импульс и энергия гетерогенной смеси, их связь с характеристиками отдельных фаз.

##### 5. Законы сохранения в механике многофазных сред

Общая структура уравнений сохранения для отдельных фаз и смеси в целом. Уравнения неразрывности, импульса и энергии для отдельных фаз и смеси в целом.

#### 6. Проблема замыкания уравнений многофазных континуумов

Отличия гетерогенной среды от классической однофазной. Необходимость моделирования замыкающих соотношений для межфазного обмена импульсом, массой и энергией.

#### 7. Течение около изолированных частиц

Обтекание сферической частицы. Обтекание пузырька. Критерии подобия, число Рейнольдса, Сила сопротивления, коэффициент сопротивления. Режимы обтекания, ламинарное и турбулентное обтекание, структура течения и законы сопротивления. Ньютоновский режим обтекания.

### Семестр: 2 (Весенний)

#### 8. Тепломассообмен изолированных частиц

Тепломассообмен твердой частицы в неподвижной среде. Критерии подобия, числа Пекле и Шмидта. Тепломассообмен частицы в потоке. Формула Ранца-Маршалла для движущейся частицы.

#### 9. Массообмен капли при фазовых переходах

Испарение капли в неподвижной среде. Скорость испарения, температура и концентрация пара на поверхности капли. Условия стационарного существования капли в атмосфере. Закон квазистационарного изменения массы и размера испаряющейся капли со временем. Время полного испарения капли.

#### 10. Горение капли топлива

Горение сферической капли топлива в атмосфере окислителя. Структура диффузионного пламени. Скорость выгорания капли, сравнение со скоростью испарения. Время полного выгорания капли. Интенсификация горения капли в потоке.

#### 11. Газожидкостные и газодисперсные системы

Общая характеристика газожидкостных и газодисперсных систем. Предельные случаи малого содержания дисперсной фазы. Объемная доля дисперсной фазы как центральная характеристика смеси, ее связь с концентрацией частиц, средним расстоянием между частицами, удельной площадью межфазной границы. Предельная объемная доля дисперсной фазы при максимально плотной упаковке.

#### 12. Режимы течения в гетерогенных системах

Карта режимов. Дисперсный (пузырьковый, капельный) режим, вспененно-турбулентный режим. Различия в карте режимов для течений в трубе и неограниченном объеме. Снарядный режим, кольцевой режим.

#### 13. Дробление капель в потоке

Число Вебера. Критические условия для устойчивости капли. Механизмы дробления в зависимости от числа Вебера.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. В 2-х ч. М., Наука, 1987
2. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения газа с частицами. М, Физматлит, 2008.
3. Вараксин А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Энергия, 2003.
4. Kolev N.I. Multiphase Flow Dynamics (4 Vols.). Springer, 2005

### Дополнительная литература

1. Ishii M., Hibiki T. Thermo-fluid dynamics of two-phase flow. Springer, 2006.
2. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Машиностроение. Энциклопедия в 40 томах. Том I-2 теоретическая механика. Термодинамика. Теплообмен. М., Машиностроение, 1999.
4. Михатулин Д.С., Чирков А.Ю. Конспект лекций по тепломасообмену, Часть 2: Учебное пособие М.: Янус-К, 2008.
5. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1992

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

не предусмотрены.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	С.Е. Якуш, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Механика многофазных сред» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные законы и основные принципы описания гетерогенных систем;
- основные подходы и расчетные методики описания процессов в гетерогенных системах;
- базовые принципы математического моделирования многофазных систем;
- математический аппарат теории многофазных систем.

### уметь:

формулировать цель и постановку проблемы, связанной с расчетом многофазных и гетерогенных систем;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемой физической проблеме;  
применять аналитические и численные методы расчета тепломассообмена в многофазных системах.

### владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
культурой постановки и математического моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов решения теоретических задач в области механики многофазных сред;  
практикой компьютерного исследования и решения теоретических и прикладных задач.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

1. Фазовое состояние вещества. Диаграмма фазовых состояний. Тройная точка. Критическая точка.
2. Многофазные смеси. Фазовый и компонентный состав. Классификация дисперсных смесей. Суспензии, эмульсии, газовзвеси, пузырьковые среды.
3. Подходы к описанию дисперсных систем. Феноменологическая теория многоскоростных взаимопроникающих континуумов.
4. Гидромеханика многофазных сред. Осреднение в механике многофазных.



5. Уравнения сохранения для многофазных сред: уравнения неразрывности, импульса и энергии для компонент и смеси.
6. Необходимость замыкающих соотношений.
7. Обтекание сферической частицы и пузырька.
8. Критерии подобия, числа Рейнольдса, Пекле и Шмидта.
9. Сила сопротивления, коэффициент сопротивления при обтекании частицы.
10. Законы сопротивления сферических частиц при ламинарном и турбулентном обтекании.
11. Ньютоновский режим обтекания.
12. Тепломассообмен капли в неподвижной среде.
13. Скорость испарения капли в сухой и влажной атмосфере.
14. Закон изменения размера испаряющейся капли.
15. Горение сферической капли топлива в атмосфере окислителя.
16. Формула Ранца-Маршалла для движущейся частицы.
17. Режимы течения двухфазной смеси в большом объеме и в трубах. Понятие о карте режимов течения.
18. Пузырьковый, вспененный, снарядный, дисперсно-кольцевой, парокапельный режимы течения.
19. Дробление капель в потоке. Число Вебера.
20. Критические условия для устойчивости капли.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Фазовое состояние вещества. Диаграмма фазовых состояний. Тройная точка. Критическая точка.
2. Режимы течения двухфазной смеси в большом объеме и в трубах. Понятие о карте режимов течения.

Пример 2.

1. Ньютоновский режим обтекания.
2. Пузырьковый, вспененный, снарядный, дисперсно-кольцевой, парокапельный режимы течения.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет выставляется по результатам текущего контроля успеваемости (коллоквиумов).

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.