

**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

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Мультифизика в компьютерном моделировании: от теории к практике
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
курс:	3
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

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

Программа обсуждена на заседании кафедры физической и химической механики 20.01.2024

Аннотация

Курс «Мультифизика в компьютерном моделировании: от теории к практике» предназначен для ознакомления обучающихся с основными принципами описания систем с несколькими взаимодействующими физическими полями, тепловыми процессами и поверхностными явлениями.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- ознакомление обучающихся с основными принципами описания систем с несколькими взаимодействующими физическими полями, тепловыми процессами и поверхностными явлениями, формирование умений и навыков, необходимых для проведения расчетов и решения задач мультифизики в технических приложениях.

Задачи дисциплины

- изучение методов построения вычислительных моделей, включающих взаимосвязанное описание нескольких различных физико-химических механизмов, гидродинамики и теплообмена в системах, содержащих вещества в различных фазовых состояниях;
- выработка навыков построения и использования математических моделей мультифизических систем, овладение методами расчета таких систем;
- формирование умений и навыков, необходимых для проведения компьютерных расчетов и решения задач мультифизики в технических приложениях;
- развитие у студентов творческого подхода к выбору методов теоретического анализа и решения сопряженных задач, описывающих взаимосвязанные физические явления.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- постановки задач классической математической физики: формулировка уравнений, постановка начальных и граничных условий;
- особенности мультифизических задач: разнородные модели, различные уравнения состояния и законы сохранения, разная пространственная размерность, необходимость согласования решений;
- подходы к описанию сложных мультифизических систем на примере многофазных сред: фазовая диаграмма, фазовые переходы, уравнения движения и энергии;
- моделирование обтекания тел потоком жидкости с учетом теплопереноса;
- использование программных пакетов для решения мультифизических задач;
- основные приложения мультифизических задач в науке и технике.

уметь:

- формулировать законы сохранения в многофазной системе с учетом явлений на межфазной поверхности;
- оценивать влияние фазовых переходов на характеристики теплообмена;
- записывать уравнения динамики жидкости и газа для медленных течений с учетом фазовых переходов и химических реакций;
- использовать программные пакеты для расчета неизоэнтальпических течений жидкостей.

владеть:

- основными подходами к постановке и решению сопряженных задач различной физической природы;
- методом решения нелинейных задач при сопряжении решений;
- численным методом расчета течений жидкостей и переноса тепла в потоках.

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

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Понятие мультифизических задач, сопряженные задачи в математической физике, науке и технике	2			2
2	Основные сведения из гидродинамики	4			8
3	Многофазные среды как пример мультифизической системы	2			8
4	Течение и теплообмен около изолированных частиц. Расчет испарения сферической капли в атмосфере (Контрольное задание №1)	8			12
5	Краткие сведения из теории горения.	4			4
6	Горение сферической капли топлива как пример задачи с химическими реакциями и фазовыми переходами. Расчет горения сферической капли в атмосфере окислителя (Контрольное задание №2)	4			8
7	Обзор возможностей современных мультифизических программных пакетов	2			4
8	Изучение пакета Agros2D для расчета течений жидкости с учетом теплопереноса. Расчет неизоэнтальпического обтекания тела в плоском канале (Контрольное задание №3)	4			14
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

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

Семестр: 5 (Осенний)

1. Понятие мультифизических задач, сопряженные задачи в математической физике, науке и технике

Введение, понятие мультифизики. Сопряженные задачи с несколькими различными физико-химическими механизмами в одной модели. Примеры мультифизических задач: совместные течения жидкости и газа, задачи с фазовыми переходами, задачи с химическими превращениями, взаимодействие физических полей разной природы. Примеры мультифизических задач в науке и технике (флаттер крыла, термоупругость, пороупругость, физика плазмы).

2. Основные сведения из гидродинамики

Уравнения несжимаемой жидкости. Потoki массы, импульса и энергии в жидкости. Законы сохранения массы, импульса и энергии в жидкости, аналогия с механикой материальной точки. Субстанциональная производная. Уравнения Навье-Стокса в операторной и координатной формах. Граничные условия.

3. Многофазные среды как пример мультифизической системы

Фазовое состояние вещества. Основные характеристики фаз. Линии фазовых переходов в плоскости давление-температура. Тройная точка, критическая точка. Многофазные смеси, отличие от гомогенных смесей и многокомпонентных газов. Фазовый и компонентный состав. Классификация дисперсных смесей. Суспензии, эмульсии, газовзвеси, пузырьковые среды. Примеры течений с простой и сложной формой межфазной поверхности.

4. Течение и тепломассообмен около изолированных частиц. Расчет испарения сферической капли в атмосфере (Контрольное задание №1)

Обтекание сферической частицы потоком жидкости. Критерии подобия, число Рейнольдса. Сила сопротивления, коэффициент сопротивления. Режимы обтекания: ламинарное и турбулентное обтекание, структура течения и законы сопротивления. Ньютоновский режим обтекания. Тепломассообмен твердой частицы в неподвижной среде. Критерии подобия, числа Пекле и Шмидта. Тепломассообмен частицы в потоке. Формула Ранца-Маршалла для движущейся частицы. Испарение капли в неподвижной среде. Интенсификация испарения капли в потоке. Расчет испарения сферической капли в атмосфере (Контрольное задание №1).

5. Краткие сведения из теории горения.

Отличие горения от других процессов тепломассообмена. Применение горения в технике и энергетике. Термодинамика и кинетика реакций горения. Закон Аррениуса. Сильная температурная зависимость скорости реакции при больших энергиях активации. Структура пламени в предварительно перемешанной смеси и при диффузионном горении.

6. Горение сферической капли топлива как пример задачи с химическими реакциями и фазовыми переходами. Расчет горения сферической капли в атмосфере окислителя (Контрольное задание №2)

Схема диффузионного горения капли топлива в неподвижной атмосфере. Уравнения неразрывности для смеси и компонент, уравнение энергии. Подобие уравнений. Приближение бесконечно тонкого фронта пламени. Основные зоны при диффузионном горении. Условия на поверхности горящей капли. Массовая скорость горения. Горение и испарение капли в потоке газа. Расчет горения сферической капли в атмосфере (Контрольное задание №2).

7. Обзор возможностей современных мультифизических программных пакетов

Общая характеристика современных программных пакетов и их применимости для решения задач сопряженных задач с взаимодействием различных физических полей. Свободно распространяемые и коммерческие продукты. Достоинства и недостатки. Обзор пакетов ANSYS, COMSOL, Agros2D.

8. Изучение пакета Agros2D для расчета течений жидкости с учетом теплопереноса. Расчет неизоэнтальпического обтекания тела в плоском канале (Контрольное задание №3)

Возможности свободно распространяемого программного пакета Agros2D для решения сопряженных задач с взаимодействием нескольких физических полей. Физическая постановка задачи. Математическая постановка задачи. Уравнения, начальные и граничные условия. Выбор численной схемы. Настройка параметров численного решения. Построение геометрии. Построение численной сетки. Проведение расчета. Анализ результатов. Расчет неизоэнтальпического обтекания тела в плоском канале (Контрольное задание №3).

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. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. -М.: Наука, 1992
5. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. М.: МФТИ, 1994, 530 с.

Дополнительная литература

1. Kolev N.I. Multiphase Flow Dynamics (4 Vols.). Springer, 2005.
2. Ishii M., Hibiki T. Thermo-fluid dynamics of two-phase flow. Springer, 2006.
3. Машиностроение. Энциклопедия в 40 томах. Том I-2 теоретическая механика. Термодинамика. Теплообмен. М., Машиностроение, 1999.

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

1. http://www.maik.ru/contents/plasphys/plasphys_1_5v31cont.htm
2. http://mipt.ru/study/net_libr/.

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)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
курс:	<u>3</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	С.Е. Якуш, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Мультифизика в компьютерном моделировании: от теории к практике» обучающийся должен:

знать:

- постановки задач классической математической физики: формулировка уравнений, постановка начальных и граничных условий;
- особенности мультифизических задач: разнородные модели, различные уравнения состояния и законы сохранения, разная пространственная размерность, необходимость согласования решений;
- подходы к описанию сложных мультифизических систем на примере многофазных сред: фазовая диаграмма, фазовые переходы, уравнения движения и энергии;
- моделирование обтекания тел потоком жидкости с учетом теплопереноса;
- использование программных пакетов для решения мультифизических задач;
- основные приложения мультифизических задач в науке и технике.

уметь:

- формулировать законы сохранения в многофазной системе с учетом явлений на межфазной поверхности;
- оценивать влияние фазовых переходов на характеристики теплообмена;
- записывать уравнения динамики жидкости и газа для медленных течений с учетом фазовых переходов и химических реакций;
- использовать программные пакеты для расчета неизоэнтальпических течений жидкостей.

владеть:

- основными подходами к постановке и решению сопряженных задач различной физической природы;
- методом решения нелинейных задач при сопряжении решений;
- численным методом расчета течений жидкостей и переноса тепла в потоках.

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

С целью текущего контроля успеваемости в начале каждого занятия проводится опрос по теме предыдущей лекции.

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

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Мультифизика как область вычислительной физики.
2. Примеры сопряженных задач, включающих взаимодействие разнородных физических полей.
3. Фазовое состояние вещества.
4. Диаграмма фазовых состояний. Тройная точка. Критическая точка.
5. Многофазные смеси.
6. Фазовый и компонентный состав.
7. Классификация дисперсных смесей. Суспензии, эмульсии, газовзвеси, пузырьковые среды.
8. Обтекание сферической частицы и пузырька.
9. Критерии подобия, числа Рейнольдса, Пекле и Шмидта.
10. Сила сопротивления, коэффициент сопротивления.
11. Законы сопротивления сферических частиц при ламинарном и турбулентном обтекании.
12. Ньютоновский режим обтекания.
13. Тепломассообмен капли в неподвижной среде.
14. Теплообмен движущейся частицы.
15. Формула Ранца-Маршалла.
16. Задача Стефана об испарении жидкости нагретой поверхностью.
17. Общая характеристика современных программных пакетов для решения задач мультифизики.
18. Применимость существующих пакетов для решения задач сопряженных задач.
19. Свободно распространяемые и коммерческие продукты. Достоинства и недостатки.
20. Обзор пакетов ANSYS, COMSOL, Agros2D, OpenFOAM.

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

Оценка за дифференцированный зачет выставляется по результатам опроса на заключительном коллоквиуме.