

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

УТВЕРЖДЕНО
Директор физтех-школы
аэрокосмических технологий
С.С. Негодяев

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Вычислительная аэродинамика в задачах обтекания
по направлению:	Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки:	Программная инженерия
	передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии
	кафедра компьютерного моделирования
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: С.М. Босняков, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры компьютерного моделирования 15.04.2022

Аннотация

В данной программе предлагается освоить несколько методов для решения задач обтекания летательных аппаратов потоком вязкого турбулентного газа. Подробно изучается система уравнений Навье-Стокса, осредненная по Рейнольдсу. Описывается система уравнений, математическая постановка задачи, граничные и начальные условия. Дисциплина также направлена на изучение свойств схем: Годунова, Центральных разностей и Ван Лира на примере линейного уравнения переноса. Включены некоторые сведения из курса «вычислительная математика», дисциплина в том числе направлена на изучение процесса образования скачка уплотнения при пересечении характеристик одного семейства на примере нелинейного уравнения переноса.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами нескольких наиболее успешных методов Вычислительной Аэродинамики, сформулированных в рамках осредненных уравнений Навье Стокса, и получение навыков решения конкретных задач.

Задачи дисциплины

- глубокое изучение основ предлагаемых методов;
- тестирование;
- валидация;
- практическое применение.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов аэродинамики;
- ☐ современные проблемы аэродинамики, механики, математики;
- ☐ современное положение дел в проблеме идентификации аэродинамических механизмов создания подъемной силы и сопротивления в турбулентных течениях;
- ☐ разновидности современных способов экспериментального исследования турбулентных течений и физические принципы, на которых они основаны;
- ☐ современные численные методы;
- ☐ современные языки программирования;
- ☐ современные компьютерные системы.

уметь:

- ☐ абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- ☐ делать правильные выводы из сопоставления результатов расчета и эксперимента;
- ☐ производить численные оценки по порядку величины;
- ☐ делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- ☐ видеть в технических задачах физическое содержание;
- ☐ осваивать новые предметные области, теоретические подходы и численные методы;
- ☐ выводить основные уравнения Навье-Стокса и понимать их физический смысл;
- ☐ пользоваться аппаратом аналитических функций, методом Годунова и методом Рунге в решаемых задачах;
- ☐ эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- ☐ культурой постановки и моделирования задач математической физики;
- ☐ навыками грамотной обработки результатов расчета и сопоставления с теоретическими данными;
- ☐ практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- ☐ навыками теоретического анализа реальных задач аэродинамики.

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	Введение и обзор используемой в курсе литературы..	2	4		4
2	Система уравнений, математическая постановка задачи, граничные и начальные условия. Изучение свойств схем: Годунова, Центральных разностей и Ван Лира на примере линейного уравнения переноса.	2	4		4
3	Некоторые сведения из курса «вычислительная математика». Изучение процесса образования скачка уплотнения при пересечении характеристик одного семейства на примере нелинейного уравнения переноса.	2	4		4
4	Некоторые сведения из курса «Уравнения математической физики». Исследование методов решения нелинейного дифференциального уравнения с правой частью, зависящей от искомой функции с применением схем различного порядка аппроксимации (схемы Рунге-Кутты).	2	2		4

5	Метод Годунова первого порядка точности. Исследование свойств численного решения системы уравнений распространения плоских звуковых волн методом Годунова.	2	2		4
6	Метод типа Годунова повышенного порядка точности. Исследование свойств численного решения, полученного с выделением газодинамических особенностей методом Годунова. Сопоставление решений, полученных с применением схем первого и второго порядка аппроксимации.	2	2		4
7	Расчетные сетки, методы и алгоритмы. Исследование свойств решения «Задачи Римана», полученного классическим итерационным методом. Сопоставление решений полученных в линейной и нелинейной постановках.	2	2		4
8	Решение задач внешней аэродинамики. Исследование свойств решения задачи Римана, полученного в приближении Роу.	2	2		3
9	Решение задачи обтекания воздухозаборника двигателя. Исследование свойств решений задач образования скачка уплотнения и волны разрежения на клине в двумерной постановке. Методы борьбы с «энтропийным» слоем	2	2		2
10	Решение задач истечения газа из сопла. Исследование свойств решения, полученного для уравнения переноса с диффузией. Условие устойчивости численной схемы в данном случае.	2	2		4
11	Решение задачи «тянущего винта» транспортного самолета. Исследование свойств решения уравнения переноса с диффузией и источником членом. Свойства локально неявной схемы	2	2		4
12	Основные направления развития методов вычислительной аэродинамики в настоящее время. Исследование свойств явной и неявной схем Годунова на примере задач обтекания профиля NACA0012, крыла ONERAM6, компоновки DLR F6	8	2		4
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

1. Введение и обзор используемой в курсе литературы..

Введение и обзор используемой в курсе литературы.

Делается подробный обзор литературы, затрагивающий вопросы: 1) место вычислительной аэродинамики в современном научном мире; 2) решаемые задачи; 3) применяемые методы (явные и неявные); 4) используемые сетки (структурированные и неструктурированные); 5) физические модели и модели турбулентности; 6) стационарные и нестационарные подходы; 7) Высокие и низкие температуры.

2. Система уравнений, математическая постановка задачи, граничные и начальные условия. Изучение свойств схем: Годунова, Центральных разностей и Ван Лира на примере линейного уравнения переноса.

Система уравнений, математическая постановка задачи, граничные и начальные условия.

Выписывается система уравнений Навье Стокса осредненных по Фавру и путем упрощения получаются все системы, используемые в курсе (Навье Стокса, Эйлера, полного потенциала, переноса).

Изучение свойств схем: Годунова, Центральных разностей и Ван Лира на примере линейного уравнения переноса.

На практическом занятии разрабатываются программы и изучаются свойства четырех разностных схем (Годунова, центральных разностей, правый уголок, Лакса-Вендрофа). Вводится понятие числа Куранта и изучаются свойства схем при разных значениях Cu .

3. Некоторые сведения из курса «вычислительная математика». Изучение процесса образования скачка уплотнения при пересечении характеристик одного семейства на примере нелинейного уравнения переноса.

Некоторые сведения из курса «вычислительная математика».

Рассматриваются понятия сходимости, аппроксимации устойчивости. Формулируется принцип Куранта-Фридрихса-Леви. Доказывается признак Неймана Обсуждается понятие характеристика и инвариант Римана.

Изучение процесса образования скачка уплотнения при пересечении характеристик одного семейства на примере нелинейного уравнения переноса.

На практическом занятии с использованием нелинейного уравнения переноса исследуется процесс образования "висячего" скачка уплотнения при пересечении характеристик одного семейства.

4. Некоторые сведения из курса «Уравнения математической физики». Исследование методов решения нелинейного дифференциального уравнения с правой частью, зависящей от искомой функции с применением схем различного порядка аппроксимации (схемы Рунге-Кутты).

Некоторые сведения из курса «Уравнения математической физики».

Рассматриваются постановка задачи Коши. Указываются признаки эллиптической, параболической, гиперболической систем уравнений. Формулируется задача Гурса. Изучается краевая задача. Метод установления. Роль граничных условий в достижении сходимости. Теорема единственности и однозначности решения.

На практическом занятии происходит исследование методов решения нелинейного дифференциального уравнения с правой частью, зависящей от искомой функции с применением схем различного порядка аппроксимации (схемы Рунге-Кутты).

5. Метод Годунова первого порядка точности. Исследование свойств численного решения системы уравнений распространения плоских звуковых волн методом Годунова.

Метод Годунова первого порядка точности.

Задача Римана и ее применение в численной схеме. Отличительные особенности подхода Годунова. Задача Римана для различных систем уравнений. Вывод метода для случая полной системы уравнений Эйлера и в звуковом приближении

На практическом занятии происходит исследование свойств численного решения системы уравнений распространения плоских звуковых волн методом Годунова.

6. Метод типа Годунова повышенного порядка точности. Исследование свойств численного решения, полученного с выделением газодинамических особенностей методом Годунова. Сопоставление решений, полученных с применением схем первого и второго порядка аппроксимации.

Метод типа Годунова повышенного порядка точности. Исследование свойств численного решения, полученного с выделением газодинамических особенностей методом Годунова.

Рассматриваются различные подходы к построению монотонной схемы Годунова повышенного порядка точности. Методы Ограниченной Полной Вариации. Предельная реконструкция. Метод Колгана. Метод Ван Лира. Понятие Лимитор и сопоставления различных подходов к созданию лимитора. Методы повышения порядка точности по времени. Дробный шаг по времени. Локальный шаг.

На практическом занятии происходит сопоставление решений, полученных с применением схем первого и второго порядка аппроксимации. Изучаются свойства лимиторов. Показывается, что ограничение полной вариации не ведет к монотонности.

7. Расчетные сетки, методы и алгоритмы. Исследование свойств решения «Задачи Римана», полученного классическим итерационным методом. Сопоставление решений полученных в линейной и нелинейной постановках.

Расчетные сетки, методы и алгоритмы.

Рассматриваются различные подходы к построению расчетных сеток. Структурированные и неструктурированные сетки. Заплатки Кунса. Применение конформных преобразований к построению ортогональных сеток. Сеточный пакет ICEM - преимущества и недостатки.

На практических занятиях происходит исследование свойств решения «Задачи Римана», полученного классическим итерационным методом. Сопоставление решений полученных в линейной и нелинейной постановках. Энтропийная коррекция в методе Roe.

8. Решение задач внешней аэродинамики. Исследование свойств решения задачи Римана, полученного в приближении Roe.

Решение задач внешней аэродинамики.

Рассматриваются подходы к решению задачи обтекания профиля. Сетки типа O и C. Сход вихревой пелены. Исследуются подходы к решению задачи о обтекании крыла. Сопротивление на трансзвуке. Тест ONERA M-6. Крыло с механизацией. Тест DeSiReH TC-216. Исследуется обтекание крыла в компоновке с фюзеляжем. Особенности построения сетки. Тест DLF F-6, Тест CRM. П-образный вихрь и его роль в создании подъемной силы. Диссипация вихря численной схемой.

На практическом занятии происходит исследование свойств решения задачи Римана, полученного в приближении Roe. Сопоставляются решения для профиля полученные в нелинейной и линейной постановках решения задачи Римана.

9. Решение задачи обтекания воздухозаборника двигателя. Исследование свойств решений задач образования скачка уплотнения и волны разрежения на клине в двумерной постановке. Методы борьбы с «энтропийным» слоем

Решение задачи обтекания воздухозаборника двигателя.

Особенности постановки задачи для сверхзвукового и дозвукового воздухозаборников. Задача согласования воздухозаборника с двигателем. Дроссельная характеристика. Неравномерности потока и пульсации. Положительная и отрицательная интерференция. Отрыв в канале. Моделирование отсоса пограничного слоя. Некоторые специальные граничные условия. "полупроницаемая" стенка.

На практическом занятии происходит исследование свойств решений задач образования скачка уплотнения и волны разрежения на клине в двумерной постановке. Рассматриваются методы борьбы с «энтропийным» слоем.

10. Решение задач истечения газа из сопла. Исследование свойств решения, полученного для уравнения переноса с диффузией. Условие устойчивости численной схемы в данном случае.

Решение задач истечения газа из сопла.

Идеальное сопло. Математическая постановка задачи сопла. Определение тяги и эффективной тяги. Одноконтурные и двухконтурные сопла. Перерасширенная и недорасширенная струя. Проблема начального участка круглой струи. Методы расчета шума струи. Метод волн неустойчивости. Подавление шума. Сопла типа - смеситель-эжектор. Интерференция струи с элементами планера. Особенности постановки граничных условий в случае сопла.

На практическом занятии проводится исследование свойств решения, полученного для уравнения переноса с диффузией. Обращается внимание на условие устойчивости численной схемы в данном случае.

11. Решение задачи «тянущего винта» транспортного самолета. Исследование свойств решения уравнения переноса с диффузией и источниковым членом. Свойства локально неявной схемы

Решение задачи «тянущего винта» транспортного самолета.

Постановка задачи тянущего винта. Понятие тяги и КПД. Подвижные и неподвижные сетки. Переинтерполяция. Цилиндрическая система координат. Стационарный и нестационарный подхода. Проблема отрыва на конце лопасти. Шум винта. Полуэмпирические методы. Тестовый случай винт АВ-12.

На практическом занятии проводится исследование свойств решения уравнения переноса с диффузией и источниковым членом. исследуются свойства локально неявной схемы.

12. Основные направления развития методов вычислительной аэродинамики в настоящее время. Исследование свойств явной и неявной схем Годунова на примере задач обтекания профиля NACA0012, крыла ONERAM6, компоновки DLR F6

Основные направления развития методов вычислительной аэродинамики в настоящее время.

Модели больших вихрей (LES Смагоринский, Жермано). Решение задачи у границы (DES, Стрелец, ШУР. Спаларт). Параллельные вычисления. Высокие порядки точности (WENO, DG). Криволинейные сетки. Многодисциплинарные задачи.

На практическом занятии проводится исследование свойств явной и неявной схем Годунова на примере задач обтекания профиля NACA0012, крыла ONERAM6, компоновки DLR F6. Изучаются готовые решения, полученные методами DG и DES.

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

учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст]/под ред. С. К. Годунова , -М., Наука, 1976
2. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений [Текст]/А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов, -М., ФИЗМАТЛИТ, 2012

Дополнительная литература

1. Теория пограничного слоя [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта ; под ред. Л. Г. Лойцянского .— 6-е изд. — М. : Наука, 1974 .— 711 с.
2. Аэрогазодинамика : (Краткий курс) [Текст] / И. П. Гинзбург - М.Высшая школа,1966
3. Газовая динамика [Текст] / Г. Г. Черый - М.Наука,1988

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)

на занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, изучающий курс «Вычислительная аэродинамика в задачах обтекания», 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 фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики; порядки численных величин, характерные для различных разделов физики; современные проблемы физики, математики;

современное положение дел в проблеме идентификации механизмов в турбулентных течениях; разновидности современных способов экспериментального исследования турбулентных течений и физические принципы, на которых они основаны, современные вычислительные методы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- подготовку к экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки:	Программная инженерия передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии кафедра компьютерного моделирования
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	С.М. Босняков, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Вычислительная аэродинамика в задачах обтекания » обучающийся должен:

знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов аэродинамики;
- ☐ современные проблемы аэродинамики, механики, математики;
- ☐ современное положение дел в проблеме идентификации аэродинамических механизмов создания подъемной силы и сопротивления в турбулентных течениях;
- ☐ разновидности современных способов экспериментального исследования турбулентных течений и физические принципы, на которых они основаны;
- ☐ современные численные методы;
- ☐ современные языки программирования;
- ☐ современные компьютерные системы.

уметь:

- ☐ абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- ☐ делать правильные выводы из сопоставления результатов расчета и эксперимента;
- ☐ производить численные оценки по порядку величины;
- ☐ делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- ☐ видеть в технических задачах физическое содержание;
- ☐ осваивать новые предметные области, теоретические подходы и численные методы;
- ☐ выводить основные уравнения Навье-Стокса и понимать их физический смысл;
- ☐ пользоваться аппаратом аналитических функций, методом Годунова и методом Рунге в решаемых задачах;
- ☐ эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- ☐ культурой постановки и моделирования задач математической физики;
- ☐ навыками грамотной обработки результатов расчета и сопоставления с теоретическими данными;
- ☐ практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- ☐ навыками теоретического анализа реальных задач аэродинамики.

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

1. Алгоритм векторно-матричной прогонки. Теорема об устойчивости векторно-матричной прогонки.
2. Метод Гаусса с выбором ведущего элемента.
3. Метод простой итерации для решения линейных уравнений. Метод простой итерации с оптимальным выбором ω .
4. Метод переменных направлений для решения линейных уравнений.
5. Треугольные методы для решения линейных уравнений.
6. Итерационные методы вариационного типа. Метод минимальных невязок.
7. Методы построения расчетных сеток. Алгебраические методы построения расчетных сеток. Методы построения расчетных сеток, основанные на решении эллиптических уравнений. Методы построения расчетных сеток, основанные на решении гиперболических уравнений.
8. Адаптивные расчетные сетки. Адаптивные расчетные сетки вариационного типа.
9. Анализ устойчивости явных и неявных схем для уравнений пограничного слоя (ПС) Прандтля.
10. Оценка погрешности аппроксимации схемы с весами для уравнения теплопроводности. Схема повышенного порядка аппроксимации для уравнения теплопроводности. Необходимые и достаточные условия устойчивости по начальным данным схемы с весами для уравнения теплопроводности.
11. Блочный метод Келлера для решения уравнений ПС Прандтля. Метод Кранка-Николсона для решения уравнений ПС Прандтля. Метод повышенного порядка точности Петухова для решения уравнений ПС Прандтля.
12. Схема Лакса-Вендроффа для решения уравнений Эйлера. Двухшаговый вариант схемы Лакса-Вендроффа и схема Мак-Кормака. Необходимое условие устойчивости схемы Лакса-Вендроффа.
13. Понятие монотонности и теоремы Годунова о построении монотонных разностных схем.
14. Монотонная схема первого и второго порядка точности для уравнения переноса.
15. Свойство монотонности разностных схем. Условие невозрастания полной вариации.
16. Линеаризованный вариант монотонной схемы первого и второго порядка точности для уравнений Эйлера.
17. Нелинейный вариант монотонной схемы Годунова первого и второго порядка точности для уравнений Эйлера.
18. Метод Рунге для приближенного решения задачи Римана.

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

1. Уравнения Навье-Стокса в дивергентной форме, описывающие течения вязкого совершенного газа. Постановка задачи внешнего обтекания тел вязким газом. Уравнения Навье-Стокса в дивергентной форме в криволинейной системе координат.
2. Постановка задачи внешнего обтекания тел в рамках уравнений Эйлера. Характеристические свойства уравнений Эйлера и Навье-Стокса. Постановка граничных условий для уравнений Эйлера.
3. Постановка задачи для уравнений пограничного слоя Прандтля. Характеристические свойства уравнений.
4. Понятие жесткой системы дифференциальных уравнений.
5. Моделирование турбулентных течений.
6. Моделирование химически неравновесных процессов в вычислительной аэродинамике.
7. Постановка задач в механике твердого упругого тела.
8. Основные понятия теории разностных схем для обыкновенных дифференциальных уравнений (аппроксимация, сходимость, устойчивость).
9. Методы Рунге-Кутты для решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений. Многошаговые методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений. Условно устойчивые и абсолютно устойчивые разностные методы. Явные и неявные разностные схемы.
10. Основные понятия теории разностных схем для краевых задач обыкновенных дифференциальных уравнений (аппроксимация, сходимость, устойчивость). Теорема Лакса.

11. Конечно-разностные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений.
12. Интегро-интерполяционные метод решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений.
13. Методы типа конечных элементов. Метод Бубнова-Галеркина.
14. Свойства разностных схем для модельного уравнения: $\square u_{xx} + \square u_x = 0$. 23. Сеточное число Рейнольдса. Свойство монотонности разностных схем.
15. Схема Келлера для решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. О согласованности дифференциальных уравнений и граничных условий.
16. Метод Рундсона для повышения порядка точности.
17. Метод простой итерации для решения нелинейных сеточных уравнений. Скорость сходимости метода.
18. Метод Ньютона для решения нелинейных сеточных уравнений. Скорость сходимости метода. Модифицированный метод Ньютона. Метод Ньютона-Рафсона.
- 19 Разностная задача на собственные значения $u_{xx} + \square u = 0$.
20. Понятие обусловленности систем линейных алгебраических уравнений.

Билет 1

1. Построение монотонных разностных схем для многомерных задач газовой динамики.
2. Методы решения уравнений Навье-Стокса с применением монотонных разностных схем.

Билет 2

1. Метод конечного элемента для решения уравнений механики твердого упруго тела.
2. Метод конечного элемента для решения уравнений механики жидкости и газа.

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

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой.

Экзамен проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.