

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

\_\_\_\_\_  
(подпись) Юнаков Л. П.  
ФИО  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ

Направление/специальность подготовки	24.03.05 Двигатели летательных аппаратов
Специализация/профиль/программа подготовки	Авиационная и ракетно-космическая теплотехника
Уровень высшего образования	Бакалавриат
Форма обучения	Очная
Факультет	А Ракетно-космической техники
Выпускающая кафедра	А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА
Кафедра-разработчик рабочей программы	А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

КУРС	СЕМЕСТР	ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ (ЗАЧЕТНЫХ ЕДИНИЦ)	ЧАСЫ (по наличию видов занятий)									ВИД ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ
			ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ	АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ				САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА				
				ВСЕГО	ЛЕКЦИИ	ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	ВСЕГО	КУРСОВОЙ ПРОЕКТ	КУРСОВАЯ РАБОТА	ДРУГИЕ ВИДЫ САМОСТ. РАБОТЫ	
4	7	4	144	51	34	0	17	93	36	0	57	ЭКЗ.

*ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ*

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА СОСТАВЛЕНА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ФГОС ВО)**

**24.03.05 Двигатели летательных аппаратов**

год набора группы: 2024

Программу составил:

Кафедра А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

Брыков Никита Александрович, к.т.н., доцент, доцент

Программа рассмотрена

на заседании кафедры-разработчика

рабочей программы **А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

Заведующий кафедрой Тетерина И.В., к.т.н., доц.

Программа рассмотрена

на заседании выпускающей кафедры

**А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

Заведующий кафедрой Тетерина И.В., к.т.н., доц.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ**

### **Разделы рабочей программы**

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **Приложения к рабочей программе дисциплины**

- Приложение 1. Аннотация рабочей программы
- Приложение 2. Технологии и формы обучения
- Приложение 3. Фонды оценочных средств

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПСК-1.1 — способность использовать знания фундаментальных разделов естественнонаучного и профессионального циклов для понимания физической сущности рабочих процессов энергетических установок авиационной и ракетно-космической техники
ПСК-1.3 — способность выполнять расчеты параметров рабочего процесса, теплового состояния и характеристик двигателей и энергоустановок летательных аппаратов

Формированию компетенций служит достижение следующих результатов образования:

### **ПСК-1.1**

*знания:*

на уровне представлений: основные понятия и определения в области современных вычислительных технологий; основные понятия о реализации вычислительного эксперимента; понятия о технологиях вычислительного моделирования в области механики сплошной среды;

на уровне воспроизведения: законы сохранения в интегральной и дифференциальной форме, разностная аппроксимация дифференциальных и интегральных;

на уровне понимания: теоретические основы вычислительного моделирования процессов в гидроаэродинамике, функциональная схема пакетов вычислительного моделирования;

*умения:*

теоретические: применять системный подход к решению задач с применением вычислительного моделирования;

практические: способность к профессиональной эксплуатации современных средств вычислительного эксперимента в предметной области;

*навыки:*

способностью и готовностью проводить работы по вычислительному моделированию задач механики сплошной среды, оценивать результаты исследований.

### **ПСК-1.3**

*знания:*

на уровне представлений:

- численные методы, используемые для проведения расчетов по вышеуказанным моделям;

на уровне воспроизведения:

- основные способы разработки и применения численных методов для решения отмеченных задач;

- способы проведения численных экспериментов процессов.

на уровне понимания:

- основные свойства численных методов;

*умения:*

- строить математические модели физических явлений;

- использовать теоретические знания для решения конкретных практических задач, грамотно выбирать метод и параметры численного решения, получать результат требуемой точности;

- проводить математическое моделирование процессов;

- разрабатывать и применять численные методы;

*навыки:*

- разработки математических моделей, описывающих функционирование изделий теплоэнергетики и РКТ;

- разработки и применения численных методов;

- решения инженерных задач с применением вычислительной техники.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *24.03.05 Двигатели летательных аппаратов*.

Содержание дисциплины является логическим продолжением дисциплин: **МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА, РАЗНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**.

Содержание дисциплины является основой для освоения дисциплин: **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ**.

Предварительные компетенции, сформированные у обучающегося до начала изучения дисциплины:

- ОПК-1 — Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности
- ОПК-5 — Способен использовать современные подходы и методы решения профессиональных задач в области авиационной и ракетно-космической техники
- ОПК-6 — Способен анализировать, систематизировать и обобщать информацию о современном состоянии и перспективах развития отрасли двигателестроения и энергетической техники
- ОПК-8 — Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения
- ПСК-1.4 — Способен проводить анализ тепловых и газодинамических процессов с использованием современных информационных технологий, готовность к профессиональной эксплуатации современных средств вычислительного моделирования

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 ч.

#### 3.1. Содержание (дидактика) дисциплины

КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %	
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ПСК-1.1	ПСК-1.3
4	7	Раздел 1. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. История развития вычислительной газодинамики. Триада математического моделирования. Методика математического моделирования. Особенности вычислительных задач аэрогазодинамики и тепломассопереноса. Возможности современных информационных технологий в задачах вычислительного моделирования. Численное моделирование в задачах аэрокосмической техники. Современные системы численного моделирования и пакеты прикладных программ. Достигнутые результаты и проблемные разработки.	11	4	2	2	7	5	5
4	7	Раздел 2. Интегральная форма уравнений газодинамики. Законы сохранения для материального объема и балансовые соотношения. Понятия материального объема: подвижный объем, неподвижный в пространстве объем, перемещающийся в пространстве объем. Физико-механические характеристики материальной частицы. Потоки через поверхность контрольного объем. Потоки через поверхность контрольного объем. Внутренние напряжения. Формулировка законов сохранения. Формулировка законов сохранения для подвижного объема. Формулировка законов сохранения для фиксированного объема. Балансовые уравнения. Балансовые соотношения для перемещающегося объема. Эквивалентность двух форм записи интегральных законов сохранения.	6	4	4	0	2	5	5
4	7	Раздел 3. Дифференциальная форма законов сохранения. Дифференциальная форма законов сохранения для фиксированного контрольного объема. Закон сохранения массы. Закон изменения количества движения. Закон сохранения энергии. Консервативная форма системы уравнений динамики сплошной среды.	6	4	2	2	2	5	5
4	7	Раздел 4. Качественный анализ решений некоторых дифференциальных уравнений в частных производных. Простейшее гиперболическое уравнение. Нелинейное уравнение переноса. Характеристики нелинейного уравнения переноса. Укручение волнового фронта и возникновение разрывов. Интегральный закон сохранения для нелинейного уравнения переноса. Характеристический анализ системы уравнений одномерной акустики. Характеристики в классификации систем уравнений.	12	4	2	2	8	5	5
4	7	Раздел 5. Дискретизация математической модели. Операторные методы в исчислении разностей. Конечные разности и производные. Понятие об операторных методах вычисления разностей. Методы построения разностных схем. Схемы конечных разностей и конечного объема. Вариационные и проекционные методы. Компактные схемы и схемы высокого порядка. Свойства разностных схем. Сходимость, аппроксимация, устойчивость, разностной схемы. Понятие о монотонности. Консервативность на разностной сетке. Понятие экономичности.	7	4	4	0	3	5	5
4	7	Раздел 6. Классификация методов решения сеточных уравнений. Особенности реализации сеточных методов для эллиптических, параболических и гиперболических задач. Параболические задачи. Метод скалярной прогонки. Разностные схемы для двумерных задач. Понятие о методе дробных шагов и разностных схемах расщепления. Эллиптические уравнения и системы. Разностные схемы для эллиптических задач. Уравнение Пуассона. Прямые методы решения. Общие сведения о технике работы с разреженными матрицами. Итерационные методы решения. Методы установления. Аппроксимация граничных условий. Гиперболические задачи. Запись уравнений Эйлера в матричном виде. Линеаризация на временном шаге уравнений газовой динамики. Матрицы Якоби для потоков. Аппроксимация временного шага.	8	6	4	2	2	5	5
4	7	Раздел 7. Введение в построение расчетных сеток. Расчетная сетка и ее геометрические элементы. Типы расчетных сеток. Способы описания неструктурированных расчетных сеток. Использование отображений для построения структурированных сеток. Способы адаптации структурированных сеток. Построение конечно-элементной сетки. Дискретизация геометрии.	7	4	4	0	3	10	10
4	7	Раздел 8. Решение нестационарного уравнения теплопроводности. Явные и неявные схемы. Метод прогонки. Векторизованные алгоритмы. Рассмотрение примеров решения уравнения теплопроводности для различного круга задач: задачи с внутренними источниками тепла, задачи с теплофизическими параметрами, зависящими от температуры.	20	6	4	2	14	10	10
4	7	Раздел 9. Течения с ударными волнами. Дискретизация на основе методов конечного объема и схемы распада произвольного разрыва. Задача Римана. Метод С.К. Годунова. Линеаризованные схемы распада разрыва. Понятие о гибридных схемах. Уравнения одномерного нестационарного соплового течения.	14	4	2	2	10	15	15
4	7	Раздел 10. Моделирование вязких течений. Способы моделирования задач механики жидкости и газа. Подходы Лагранжа и Эйлера. Различные подходы моделирования турбулентных течений: RANS, LES, DNS. Классификация моделей турбулентности.	10	7	4	3	3	10	10
4	7	Раздел 11. Подходы и методы вычислительного моделирования течений вязкой жидкости и газа. Современные информационные технологии для вычислительного моделирования задач течения вязкой жидкости. Пакеты CAE-технологии. Структура пакетов. Пре- и постпроцессинг решения. Примеры решения различных задач.	7	4	2	2	3	10	10
4	7	Раздел 12. Курсовой проект. Написание курсового проекта по индивидуальному заданию.	36	0	0	0	36	15	15
Всего за 7 семестр			144	51	34	17	93	100	100
Всего по дисциплине			144	51	34	17	93	100	100

#### 3.2. Аудиторный практикум

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Тема практического занятия	Объем, ауд. часов
1	Раздел 1. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.	Интегрирование систем обыкновенных дифференциальных уравнений.	2
2	Раздел 3. Дифференциальная	Особенности разностных схем для задач газодинамики.	2

	форма законов сохранения.		
3	Раздел 4. Качественный анализ решений некоторых дифференциальных уравнений в частных производных.	Разностная схема для уравнений акустики.	2
4	Раздел 6. Классификация методов решения сеточных уравнений.	Примеры разностных схем эллиптических и гиперболических систем уравнений.	2
5	Раздел 8. Решение нестационарного уравнения теплопроводности.	Метод конечных разностей для нестационарного уравнения теплопроводности. Одномерная, двумерная задача теплопроводности. Граничные условия 1, 2, 3 и 4 родов. Уравнение теплопроводности с зависящими от температуры теплофизическими коэффициентами. Уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла.	2
6	Раздел 9. Течения с ударными волнами.	Уравнения одномерного нестационарного соплового течения. Маршевые методы - моделирование начального участка сверхзвуковой струи.	2
7	Раздел 10. Моделирование вязких течений.	Моделирование турбулентных эффектов. Высокореинольдсовы и низкореинольдсовы модели турбулентности.	3
8	Раздел 11. Подходы и методы вычислительного моделирования течений вязкой жидкости и газа.	Примеры моделирования течений вязкой жидкости и газа на примере различных задач с применением CAE-технологий.	2
Всего за 7 семестр			17

### 3.3. Самостоятельная работа студента (СРС)

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Содержание учебного задания	Объем, часов
1		Изучение материала раздела.	2
2	Раздел 1. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.	Написание программы интегрирования системы ОДУ на примере внутренней газодинамики РДТТ в термодинамической постановке. Формирование математической модели. Сопоставление метода Эйлера первого порядка точности и модифицированного метода Эйлера второго порядка точности.	5
3	Раздел 2. Интегральная форма уравнений газодинамики.	Изучение материала раздела.	2
4	Раздел 3. Дифференциальная форма законов сохранения.	Изучение материала раздела.	2
5	Раздел 4. Качественный анализ решений некоторых дифференциальных уравнений в частных производных.	Изучение материала раздела.	2
6		Написание программы моделирования распространения акустического возмущения в газовой среде.	6
7	Раздел 5. Дискретизация математической модели.	Изучение материала раздела.	3
8	Раздел 6. Классификация методов решения сеточных уравнений.	Изучение материала раздела.	2
9	Раздел 7. Введение в построение расчетных сеток.	Изучение материала раздела.	3
10		Изучение материала раздела.	2
11	Раздел 8. Решение нестационарного уравнения теплопроводности.	Написание программы моделирования нагрева одномерного стержня с постоянными теплофизическими свойствами. Явная схема интегрирования.	5
12		Написание программы моделирования нагрева одномерного стержня с постоянными теплофизическими свойствами. Неявная схема интегрирования - метод прогонки.	7
13	Раздел 9. Течения с ударными волнами.	Изучение материала раздела.	2
14		Выполнение практического задания №5 на тему "Моделирование сверхзвукового течения".	8
15	Раздел 10. Моделирование	Изучение материала раздела.	3

	вязких течений.		
16	Раздел 11. Подходы и методы вычислительного моделирования течений вязкой жидкости и газа.	Изучение материала раздела.	3
17	Раздел 12. Курсовой проект.	Выполнение курсового проекта по индивидуальному заданию. Анализ процессов и формирование математических моделей. Проведение вычислительного моделирования. Анализ результатов. Подготовка пояснительной записки, доклада и презентации.	36
<b>Всего за 7 семестр</b>			93

### 3.4. Курсовой проект

СОДЕРЖАНИЕ ЭТАПА	ПЕРИОД ИСПОЛНЕНИЯ (недели семестра)	ПЛАНИРУЕМОЕ ВРЕМЯ (час)
Этап 1. Обсуждение с руководителем содержания работы. Определение целей и постановка задач работы. Разработка плана работы над проектом	1 - 2	6
Этап 2. Анализ литературы по тематике курсового проекта. Анализ протекающих процессов и формирование математических моделей	3 - 8	10
Этап 3. Проведение вычислительного моделирования. Анализ результатов численного моделирования	9 - 16	15
Этап 4. Подготовка пояснительной записки, доклада и презентации	17 - 17	5
<b>Всего за 7 семестр</b>		36

## 4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

СЕМЕСТР	НЕДЕЛИ СЕМЕСТРА																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7	Отч. по ПЗ		Отч. по ПЗ	КВ	ДР	Отч. по ПЗ			ДР		КВ	Отч. по ПЗ			Отч. по ПЗ	ДР	КП

Условные обозначения:

- ДР – диагностическая работа;
- Отч. по ПЗ – отчет по практическому заданию;
- КВ – контрольные вопросы;
- КП – курсовой проект.

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- отчет по практическому заданию;
- контрольные вопросы;
- курсовой проект.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- экзамен.

## 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Основная литература по дисциплине:

1. В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем. Москва: Юрайт, 2020, эл. рес.
2. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012, 63 экз.
3. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013, 30 экз.
4. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017, 50 экз.
5. К. Н. Волков, Ю. Н. Дерюгин, В. Н. Емельянов. . Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014, 10 экз.
6. Н. Н. Фёдорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов. . Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017, эл. рес.

### 5.2. Дополнительная литература по дисциплине:

не требуется.

### 5.3. Периодические издания:

не требуются.

### 5.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины, электронные библиотечные системы:

1. <https://e.lanbook.com/> — ЭБС Лань;
2. [http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=474](http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=474) — Фундаментальная библиотека БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова;
3. <https://urait.ru/> — Образовательная платформа «Юрайт». Для вузов и ссузов..

### Современные профессиональные базы данных:

1. <https://rusneb.ru> – Национальная электронная библиотека (НЭБ);
2. <https://cyberleninka.ru/> - Научная электронная библиотека «Киберленинка»;
- <http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library> - Полнотекстовая электронная библиотека Российского фонда фундаментальных исследований.

### Информационные справочные системы:

1. Техэксперт – Информационный портал технического регулирования: Нормы, правила, стандарты РФ;
2. [http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=457](http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=457) - БД ГОСТов собственной генерации БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова;
3. <http://www.consultant.ru/> - КонсультантПлюс- информационный портал правовой информации.

### 5.5. Программное обеспечение:

1. Matlab 2015a SP1.

### 5.6. Информационные технологии:

взаимодействие с обучающимися посредством ЭИОС Moodle БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Лекционные занятия:**

специализированные требования по оборудованию отсутствуют; аудитория с посадочными местами по количеству студентов; доска.

### **6.2. Практические занятия:**

1. Проектор;
2. Matlab 2015a SP1.

### **6.3. Прочее:**

1. рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет;
2. рабочие места студентов, оснащенные компьютерами с доступом в Интернет, предназначенные для работы в электронной образовательной среде.

### **Аннотация рабочей программы**

Дисциплина **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению **24.03.05 Двигатели летательных аппаратов**. Дисциплина реализуется на факультете А Ракетно-космической техники БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова кафедрой А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА.

Дисциплина нацелена на формирование *компетенций*:

ПСК-1.1 способность использовать знания фундаментальных разделов естественнонаучного и профессионального циклов для понимания физической сущности рабочих процессов энергетических установок авиационной и ракетно-космической техники;

ПСК-1.3 способность выполнять расчеты параметров рабочего процесса, теплового состояния и характеристик двигателей и энергоустановок летательных аппаратов.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с вычислительной гидрогазодинамикой. Данная дисциплина ориентирована на выработку навыков, необходимых для исследовательской и проектно-конструкторской деятельности специалиста в области создания новой техники и в области интенсификации рабочих процессов в изделиях высокой технологии. Особое внимание уделяется освоению методов численного моделирования газодинамических процессов, характерных для энергетических установок различных типов, а также активного владения методами расчетного моделирования тепломассопереноса. Изучаются современные подходы вычислительной газодинамики, реализованные в специализированных информационных САЕ-средах.

Программой дисциплины предусмотрены следующие **виды контроля**:

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- отчет по практическому заданию;
- контрольные вопросы;
- курсовой проект.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- экзамен.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет **4 з.е., 144 ч**. Программой дисциплины предусмотрены лекционные занятия (**34 ч.**), практические занятия (**17 ч.**), самостоятельная работа студента (**93 ч.**).

## ТЕХНОЛОГИИ И ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

### Рекомендации по освоению дисциплины для студента

Трудоемкость освоения дисциплины составляет 144 ч., из них 51 ч. аудиторных занятий, и 93 ч., отведенных на самостоятельную работу студента.

Рекомендации по распределению учебного времени по видам самостоятельной работы и разделам дисциплины приведены в таблице.

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о текущем, рубежном контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся.

Формы контроля и критерии оценивания приведены в приложении 3 к Рабочей программе.

Наименование работы	Рекомендуемая литература	Трудоемкость, час.
Раздел 1. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (Введение, 1)	2
Написание программы интегрирования системы ОДУ на примере внутренней газодинамики РДТТ в термодинамической постановке. Формирование математической модели. Сопоставление метода Эйлера первого порядка точности и модифицированного метода Эйлера второго порядка точности.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (Введение)	5
Итого по разделу 1		7
Раздел 2. Интегральная форма уравнений газодинамики.		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (2)	2
Итого по разделу 2		2
Раздел 3. Дифференциальная форма законов сохранения.		
Изучение материала раздела.	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (1) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (2)	2
Итого по разделу 3		2
Раздел 4. Качественный анализ решений некоторых дифференциальных уравнений в частных производных.		
Изучение материала раздела.	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (4.2)	2
Написание программы моделирования распространения акустического возмущения в газовой среде.		6
Итого по разделу 4		8
Раздел 5. Дискретизация математической модели.		
Изучение материала раздела.	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (2, 3) К. Н. Волков, Ю. Н. Дерюгин, В. Н. Емельянов. . Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014 (1.1, 1.2)	3
Итого по разделу 5		3
Раздел 6. Классификация методов решения сеточных уравнений.		
Изучение материала раздела.	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (6, 7)	2

Итого по разделу 6		2
Раздел 7. Введение в построение расчетных сеток.		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (1.7) В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (2)	3
Итого по разделу 7		3
Раздел 8. Решение нестационарного уравнения теплопроводности.		
Изучение материала раздела.	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (7)	2
Написание программы моделирования нагрева одномерного стержня с постоянными теплофизическими свойствами. Явная схема интегрирования.		5
Написание программы моделирования нагрева одномерного стержня с постоянными теплофизическими свойствами. Неявная схема интегрирования - метод прогонки.		7
Итого по разделу 8		14
Раздел 9. Течения с ударными волнами.		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (5)	2
Выполнение практического задания №5 на тему "Моделирование сверхзвукового течения".	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (6.3) К. Н. Волков, Ю. Н. Дерюгин, В. Н. Емельянов. . Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014 (2.4)	8
Итого по разделу 9		10
Раздел 10. Моделирование вязких течений.		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013 (1)	3
Итого по разделу 10		3
Раздел 11. Подходы и методы вычислительного моделирования течений вязкой жидкости и газа.		
Изучение материала раздела.	Н. Н. Фёдорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов. . Основы работы в ANSYS 17: М.: ДМК Пресс, 2017 (Все главы) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (5)	3
Итого по разделу 11		3
Раздел 12. Курсовой проект.		
Выполнение курсового проекта по индивидуальному заданию. Анализ процессов и формирование математических моделей. Проведение вычислительного моделирования. Анализ результатов. Подготовка пояснительной записки, доклада и презентации.	В. Н. Емельянов. . Численные методы: введение в теорию разностных схем: Москва: Юрайт, 2020 (Все главы) Н. Н. Фёдорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов. . Основы работы в ANSYS 17: М.: ДМК Пресс, 2017 (Все главы) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (Все главы)	36
Итого по разделу 12		36

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, включают в себя:

- диагностическая работа
- отчет по практическому заданию;
- контрольные вопросы;
- курсовой проект;
- экзамен.

### Критерии оценивания

#### Диагностическая работа

Диагностическая работа проводится в форме теста в ЭИОС Moodle:

- при правильном ответе менее чем на 60% вопросов - не аттестация;
- при правильном ответе на 60% вопросов и более - аттестация.

#### Отчет по практическому заданию

Отчет по практическому заданию (ПЗ)

Отчет по ПЗ представляется в печатном виде в формате, предусмотренном шаблоном отчета по ПЗ. Отчет по ПЗ должен содержать:

- постановку задачи, математическую модель и основные расчетные соотношения используемых методов решения;
- схему расчетной области с характеристиками сетки, краевыми и начальными условиями, реализованными в решаемом варианте;
- графическое представление полученных результатов;
- содержание исследовательского задания, результаты вычислительного моделирования, анализ и выводы по проведенным исследованиям.

#### Защита ПЗ

Защита ПЗ проходит в форме доклада студента по выполненной работе и ответов на вопросы преподавателя.

Процедура защиты включает ответы на вопросы преподавателя по работе и разделу курса. В ходе защиты ПЗ обучающиеся должны продемонстрировать знания, умения и навыки:

- культуру речи при изложении своих мыслей, логичность в постановке и изложении материала,
- понимание постановки задачи, знание основных элементов математической модели, формулировка начальных и граничных условий, обоснование основных упрощающих положений;
- умение определить место исследованного явления в конкретных технических процессах и устройствах;
- умение анализировать полученные результаты и умение прогнозировать характер процессов в технических устройствах на основании полученных данных;
- умение самостоятельно модифицировать математические модели и программные средства для целей конкретизации или расширения области приложения моделей, использованных в работе.

Оценка защиты работы выставляется по 100 бальной шкале с учётом:

- выполнение ПЗ – 40 баллов,
- оформление пояснительной записки – 20 баллов,
- защита результатов, ответы на вопросы и их логика, культура речи – 40 баллов.

ПЗ считается принятой при наборе более 80 баллов.

Перечень практических заданий приведен в УМК дисциплины.

### Контрольные вопросы

Критерии оценивания ответов на контрольные вопросы

Ответы на контрольные вопросы по определенным разделам дисциплины осуществляются в устной форме. Студенту задаются 3 вопроса в рамках изучаемого раздела, для успешной аттестации необходимо правильно ответить на 2 и выше вопросов. Ответ на вопрос должен быть правильным, содержательным, аргументированным.

Список контрольных вопросов:

1. Математическое моделирование течений газа. Триада моделирования.
2. Интегральная форма уравнений газодинамики. Формулировка для покоящегося, движущегося и подвижного объемов.
3. Дифференциальная форма уравнений газодинамики. Консервативные и физические переменные.
4. Некоторые свойства матриц. Обратная матрица. Преобразование подобия.
5. Собственные числа и собственные вектора. Матрицы левых и правых собственных векторов. Подобные матрицы и диагонализация.
6. Волновые решения и гиперболические системы. Характеристическая форма гиперболической системы.
7. Характеристический анализ системы уравнений одномерной акустики.
8. Дифференциальная и интегральная формы уравнений газодинамики.
9. Законы сохранения для материального объема и балансовые соотношения.

10. Дифференциальная форма уравнений газовой динамики.
11. Форма обобщенного закона сохранения. Консервативная форма и консервативные переменные.
12. Консервативная и неконсервативная формы уравнений газовой динамики.
13. Матричная запись уравнений газодинамики. Вектор переменных и вектор потока.
14. Свойство однородности вектора потока. Якобиан и квазилинейная форма системы уравнений.
15. Консервативная и неконсервативная формы системы уравнений газодинамики.
16. Переменные Лагранжа. Дифференциальная и интегральная формулировки задач в переменных Лагранжа.
17. Приведение гиперболической системы к характеристической форме
18. Граничные условия для гиперболических задач. Характеристическая форма граничных условий.
19. Выставление граничных условий в задаче о квазиодномерном течении в сопле.
20. Запись уравнений Эйлера в матричном виде. Линеаризация на временном шаге уравнений газовой динамики.
21. Операторные методы. Операторное представление конечных разностей.
22. Связь разностного и дифференциального операторов.
23. Свойства решений простейшего уравнения переноса и простейшего нелинейного уравнения переноса. Градиентная катастрофа. Разрывные решения.
24. Распад разрыва для нелинейного уравнения переноса.
25. Первое дифференциальное приближение. Исследование свойств разностных схем на основе первого дифференциального приближения
26. Свойства решений простейших дифференциальных уравнений в частных производных. Волновые решения. Диффузия. Диссипация. Дисперсия.
27. Аппроксимация временного шага в разностных схемах газодинамики Дельта-форма разностной схемы.
28. Методы построения разностных схем. Схемы конечных разностей и конечного объема.
29. Задача о распаде произвольного разрыва. Вычисление потоков на основе задачи о распаде разрыва.
30. Дискретизация на основе методов конечного объема и схемы распада произвольного разрыва.
31. Схемы расщепления. Расщепление по физическим процессам и по координатное расщепление.
32. Схемы расщепления при расчете конвективных членов. Расщепление матричных коэффициентов и расщепление векторов потока.
33. Искусственная вязкость Неймана и Рундмайера
34. Схема Лакса Схема Лакса-Вендроффа.
35. Схема Бима и Уорминга.
36. Криволинейные координаты и криволинейные сетки в задачах механики
37. Преобразование координат. Метрические коэффициенты прямого и обратного преобразования координат. Якобиан. Фундаментальный метрический тензор.
38. Базис криволинейных координат. Метрические коэффициенты
39. Ковариантные и контравариантные проекции вектора в криволинейных координатах.
40. Геометрические соотношения на криволинейных сетках. Длины, площади, объемы.
41. Генерация криволинейных сеток на основе эллиптической системы уравнений.
42. Дифференциальная и вариационная формулировки краевой задачи для уравнения Пуассона.
43. Расчет несжимаемых течений и течений с малыми скоростями
44. Обобщенное решение уравнений газодинамики. Условия совместности для разрывного решения уравнений одномерной нестационарной газодинамики.
45. Метод С.К. Годунова. Линеаризованные схемы распада разрыва. Понятие о гибридных схемах. Аппроксимация по Рунд.
46. Характеристический анализ дифференциального уравнения с частными производными второго порядка.
47. Разностная аппроксимация простейших дифференциальных операторов (первая и вторая производная, порядок аппроксимации, формулы дифференцирования назад, вперед и центральные).
48. Разностная аппроксимация простейших дифференциальных операторов. Производные на трехточечном шаблоне.
49. Свойство аппроксимации разностной схемы Сходимость разностной схемы Устойчивость разностной схемы. Зависимость между аппроксимацией устойчивостью и сходимостью
50. Численное решение задач параболического типа. Разностные схемы для уравнения теплопроводности. Метод прогонки.

### **Курсовой проект**

Курсовой проект представляется в печатном виде в формате, соответствующим «Положению по содержанию, оформлению, организации выполнения и защиты курсовых проектов и курсовых работ БГТУ. Защита курсового проекта проходит в форме доклада студента по выполненной работе и ответов на вопросы членов комиссии. В ходе защиты КП обучающиеся должны продемонстрировать культуру речи при изложении своих мыслей, логичность в постановке и изложении материала, необходимые начальные знания по существу обсуждаемой темы.

В случае, если оформление курсового проекта и поведение студента во время защиты соответствуют указанным требованиям, студент получает оценку:

- оценка «отлично» выставляется, при правильном выполнении курсового проекта, правильных ответов студента на вопросы преподавателя от 90 до 100%;
- оценка «хорошо» выставляется, при незначительных ошибках в содержании курсового проекта, правильных ответов студента на вопросы преподавателя от 75 до 90%;
- оценка «удовлетворительно» выставляется, при незначительных ошибках в содержании курсового проекта, правильных ответов студента на вопросы преподавателя от 50 до 75%.
- оценка «не защитил» выставляется, при значительных ошибках в содержании курсового проекта, при допущении принципиальных ошибок в ответах на вопросы преподавателя - правильных ответов менее 50%.

Основаниями для снижения оценки за курсовой проект могут служить:

- небрежное выполнение,
- низкое качество графического материала (неверный выбор масштаба чертежей, отсутствие указания единиц измерения на графиках),
- незначительные ошибки при ответах на теоретические вопросы.

Курсовой проект не может быть принят и подлежит переработке в случае:

- несоответствия заданию на курсовое проектирование;
- отсутствия необходимых разделов,
- отсутствия необходимого графического материала,
- некорректной обработки результатов вычислений.

Примеры тематик для курсового проектирования:

1. Интенсификация теплообмена за счет развитых поверхностей.
2. Численное моделирование теплообменного аппарата.
3. Численное моделирование обтекания и теплообмена сферических тел.
4. Численное моделирование обтекания и теплообмена летательного аппарата на закритических углах атаки.
5. Численное моделирование обтекания и теплообмена тел в газовых потоках.
6. Численное моделирование двухфазного потока в тракте энергетической установки.
7. Исследование течения в камере сгорания газотурбинной установки.
8. Моделирование кавитационных процессов на гребных винтах и телах при высокоскоростном движении.
9. Моделирование конвективного теплообмена в трубе.
10. Моделирование теплового и газодинамического воздействия взрывной волны на многослойные тела.
11. Численное моделирование теплового состояния жаровой трубы камеры сгорания ГТ-65.
12. Газодинамические и тепловые процессы при разделении ступеней ракеты.
13. Моделирование влияния акустических возмущений на процессы конденсации и испарения.
14. Приготовление горючих смесей газов во встречных сверхзвуковых струях.
15. Тепломассоперенос в околосопловых двухфазных течениях.
16. Процессы тепломассопереноса в сверхзвуковых импактных струях.
17. Подготовка газообразной горючей смеси сверхзвуковыми соосными струями.
18. Моделирование процессов термобурения в космических условиях.
19. Термические нагрузки в ударно-волновых технологиях.
20. Газо- и термодинамика разделения ступеней ракеты.
21. Аэродинамика и нагрев управляемого снаряда.
22. Численное моделирование химически реагирующих течений в элементах теплообменника.
23. Моделирование системы газодинамического напыления с подогревом рабочего газа.
24. Математическое моделирование теплозащитного покрытия.
25. Газодинамика и теплообмен взаимодействия струй с преградой.
26. Аэротермомеханика дозвуковых летательных аппаратов.
27. Численное моделирование быстропротекающих процессов с тепловыделением.
28. Численное моделирование влияния излучения на процессы тепломассопереноса.
29. Взаимодействие струи ЖРД с отделяемой ступенью ракеты - носителя.
30. Анализ энергетических характеристик компоновочных схем грузовых беспилотных самолетов.
31. Моделирование дренажной системы с подогревом.
32. Моделирование динамики прогрева конструкций в условиях пожара.
33. Моделирование эжекционной горелки.
34. Моделирование газо- и гидродинамики в теплообменных элементах.
35. Моделирование работы органов управления космических аппаратов.
36. Взаимодействие двухфазной струи с преградой.
37. Термодинамический проект газотурбинной установки.
38. Проектирование и численное моделирование термогазодинамических процессов ВРД.
39. Численное моделирование ветровых воздействий на объекты.
40. Численное моделирование процессов теплообмена.

### Экзамен

Экзамен, включает в себя два контрольных вопроса по выбору преподавателя из списка вопросов для собеседования по разделам дисциплины. Перечень экзаменационных вопросов приведен в УМК дисциплины.

Знания, умения и навыки студентов определяются следующим образом:

Оценки «отлично» заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «отлично» выставляется студентам, усвоившим взаимосвязь основных понятий дисциплины в их значении для приобретаемой профессии, проявившим творческие способности в понимании, изложении и использовании учебного материала.

Оценки «хорошо» заслуживает студент, обнаруживший полное знание учебного материала, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе. Как правило, оценка «хорошо» выставляется студентам, показавшим систематический характер знаний по дисциплине и способным к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности.

Оценки «удовлетворительно» заслуживает студент, обнаруживший знания основного учебного материала в объеме,

необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «удовлетворительно» выставляется студентам, допустившим погрешности в ответе на экзамене и при выполнении экзаменационных заданий, но обладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение или приступить к профессиональной деятельности по окончании вуза без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %		НАИМЕНОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОГО СРЕДСТВА
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ПСК-1.1	ПСК-1.3	
4	7	Раздел 1. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.	11	4	2	2	7	5	5	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 2. Интегральная форма уравнений газодинамики.	6	4	4	0	2	5	5	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 3. Дифференциальная форма законов сохранения.	6	4	2	2	2	5	5	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 4. Качественный анализ решений некоторых дифференциальных уравнений в частных производных.	12	4	2	2	8	5	5	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 5. Дискретизация математической модели.	7	4	4	0	3	5	5	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 6. Классификация методов решения сеточных уравнений.	8	6	4	2	2	5	5	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 7. Введение в построение расчетных сеток.	7	4	4	0	3	10	10	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 8. Решение нестационарного уравнения теплопроводности.	20	6	4	2	14	10	10	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 9. Течения с ударными волнами.	14	4	2	2	10	15	15	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 10. Моделирование вязких течений.	10	7	4	3	3	10	10	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 11. Подходы и методы вычислительного моделирования течений вязкой жидкости и газа.	7	4	2	2	3	10	10	Контрольные вопросы
4	7	Раздел 12. Курсовой проект.	36	0	0	0	36	15	15	Курсовой проект
Всего за 7 семестр			144	51	34	17	93	100	100	
Всего по дисциплине			144	51	34	17	93	100	100	

## Критерии оценивания

### ПСК-1.1

*Вопросы открытого типа:*

- № 1 Рассматривается контрольный объем, движущийся со скоростью  $v_s$ . Через элемент поверхности этого объема среда протекает со скоростью  $v$ . В этом случае поток среды через поверхность объема в данной точке будет определяться как ...

Используйте следующие обозначения:

$v_s$  - скорость контрольного объема

$v$  - скорость среды через элемент контрольного объема

$n_1$  - местная внешняя нормаль,

$n_2$  - местная внутренняя нормаль

- № 2 Задать последовательность действий при использовании метода прогонки для одномерной задачи теплопроводности
- № 3 Верно ли утверждение, что под сходимостью решения понимается стремление решения конечно-разностного аналога уравнения в частных производных к решению исходного уравнения при измельчении сетки
- № 4 Верно ли утверждение: в изолированной системе с течением времени прекращается видимый макроскопический обмен энергией и веществом между различными её частями и система приходит в такое состояние, при котором во всех её частях устанавливаются одинаковые параметры.
- № 5 Законы сохранения каких параметров представлены ниже

$$\text{а - } \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV = - \iint_S \rho (v \cdot n) dS$$

$$\text{б - } \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho v dV = - \iint_S (pn + \rho v(v \cdot n)) dS$$

$$\text{в - } \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) dV = - \iint_S \left( p + \rho \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) \right) v \cdot n dS$$

- № 6 Фамилию какого ученого носит численный метод решения нестационарных газодинамических уравнений, базирующийся на аналитическом решении задачи о распаде произвольного разрыва?
- № 7 Верно ли утверждение, что условие устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви для явной разностной схемы уравнения переноса имеет вид:

$$0 < \frac{a \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

- № 8

**Запишите разностные аналоги для производной первого порядка  $\frac{\partial y}{\partial x}$ , используя следующие точки**



- № 9 Верно ли утверждение, что при использовании метода конечных разностей решается на самом деле не исходное уравнение в частных производных, а модифицированное уравнение.
- № 10 Необходимое условие устойчивости явного численного решения дифференциальных уравнений в частных производных, называется...

*Вопросы закрытого типа:*

- № 1 Обобщенный закон сохранения можно сформулировать следующим образом

- изменение некоторой сохраняемой величины, связанной с выделенной порцией сплошной среды, происходит только за счет источников этой субстанции, действующих внутри объема.

- изменение любой величины, связанной с выделенной порцией сплошной среды, происходит только за счет источников этой субстанции, действующих внутри объема.

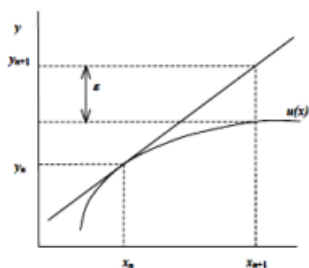
- изменение некоторой сохраняемой величины, связанной с выделенной порцией сплошной среды, происходит за счет потока, приносящего через границы материального объема эту субстанцию внутрь объема, и за счет источников, действующих внутри объема.
- изменение некоторой сохраняемой величины, связанной с выделенной порцией сплошной среды, происходит только за счет потока, приносящего через границы материального объема эту субстанцию внутрь объема.
- № 2 Что такое математическая модель?
- точное представление реальных объектов, процессов или систем, выраженное в математических терминах и сохраняющее существенные черты оригинала
- точное представление реальных объектов, процессов или систем, выраженное в физических терминах и сохраняющее существенные черты оригинала
- приближенное представление реальных объектов, процессов или систем, выраженное в математических терминах и сохраняющее существенные черты оригинала
- приближенное представление реальных объектов, процессов или систем, выраженное в физических терминах и сохраняющее существенные черты оригинала
- № 3 Метод конечных разностей относится к классу ... методов решения уравнений математической физики.
- вариационных
- проекционных
- вероятностных
- численных
- № 4 Триада моделирования
- Модель – Алгоритм – Программа
- Эксперимент – Модель – Программа
- Алгоритм – Программа – Эксперимент
- Модель – Эксперимент – Программа
- № 5 К какому типу относится данное уравнение
- $$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y)$$
- эллиптический тип
- параболический тип
- гиперболический тип
- смешанного типа
- № 6 К какому типу относится данное уравнение
- $$\frac{\partial u}{\partial t} - a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$
- эллиптический тип
- параболический тип
- гиперболический тип
- смешанного типа
- № 7 К какому типу относится данное уравнение
- $$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$
- эллиптический тип
- параболический тип

- гиперболический тип
  - смешанного типа
- № 8 Основной метода конечных разностей является:
- замена непрерывной области изменения независимых переменных совокупностью изолированных точек
  - представление решения в виде разности двух и более функций
  - поиск решения на конечных отрезках интегрирования
- № 9 Искусственная вязкость изменяет градиенты всех параметров независимо от причины возникновения этих градиентов следующим образом:
- уменьшает градиенты
  - увеличивает градиенты
  - оказывает влияние только на градиенты скорости
  - не влияет на изменение этих градиентов
- № 10 Метод позволяющий получить корни системы с заданной точностью путем сходящихся бесконечных процессов
- итерационный метод
  - точный метод
  - приближенный метод
  - относительный метод

### ПСК-1.3

Вопросы открытого типа:

- № 1 Верно ли утверждение, что в схеме С.К. Годунова для вычисления величин потоков через грани контрольного элемента используется аналитическое решение задачи о распаде произвольного разрыва?
- № 2 Верно ли утверждение, что измельчение сетки, снижая погрешность аппроксимации, может увеличивать погрешность округления
- № 3 При распаде произвольного разрыва могут реализовываться определённые конфигурации течения, укажите какие
- № 4 Верно ли утверждение, что измельчение сетки, снижая погрешность округления, может увеличивать погрешность аппроксимации
- № 5 Верно ли утверждение, что измельчение сетки, снижая погрешность округления, тем самым снижает погрешность аппроксимации
- № 6 Верно ли утверждение, что метод Эйлера, представленные на рисунке, аппроксимирует исходное дифференциальное уравнение с первым порядком точности?



№ 7

Верно ли утверждение, что модифицированный метод Эйлера 2 порядка точности основывается на вычислении функции  $u^{n+1}$  в последующей точке  $x^{n+1}$  по значению угла наклона касательной в точке  $(x^{n+1/2}, u^{n+1/2})$ , расположенной посередине между точками  $x^n$  и  $x^{n+1}$ .

- № 8 Свойство разностной схемы, обусловленное наличием в выражении для погрешности аппроксимации производных четного порядка, называют
- № 9 Верно ли утверждение, что под сходимостью решения понимается стремление решения конечно-разностного аналога уравнения в частных производных к решению исходного уравнения при измельчении сетки?
- № 10 Свойство разностной схемы, обусловленное наличием в выражении для погрешности аппроксимации производных нечетного порядка, называют

Вопросы закрытого типа:

№ 1 Полная энергия единицы объема определяется как:

Здесь:

$\rho$  - плотность  
 $\varepsilon$  - внутренняя энергия  
 $v$  - скорость  
 $c$  - теплоёмкость

-  $\rho \left( \varepsilon + \frac{\bar{v}^2}{2} \right)$

-  $\rho c \left( \varepsilon + \frac{\bar{v}^2}{2} \right)$

-  $\rho c \left( \frac{\bar{v}^2}{2} \right)$

-  $\left( \varepsilon + \frac{\bar{v}^2}{2} \right)$

№ 2 В правой части выражения

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(t, x + \Delta x) - u(t, x - \Delta x)}{2\Delta x} - \frac{(\Delta x)^2}{3!} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \dots$$

второе и последующие слагаемые называются

- конечно-разностным аналогом производной
- погрешностью аппроксимации производной
- порядком аппроксимации производной
- погрешностью округления

№ 3 Выберите закон изменения количества движения

-  $\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \mathbf{v} dV = - \iint_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \iint_S \boldsymbol{\sigma}_n dS + \iiint_V \rho \mathbf{f} dV.$

-  $\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z \mathbf{v}}{\partial z} = \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_x}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_y}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_z}{\partial z} + \rho \mathbf{f}.$

-  $\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial e v_x}{\partial x} + \frac{\partial e v_y}{\partial y} + \frac{\partial e v_z}{\partial z} = \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_x \cdot \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_y \cdot \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_z \cdot \mathbf{v}}{\partial z} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}.$

-  $\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \left( \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \epsilon \right) dV = - \iint_S \rho \left( \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \epsilon \right) (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS +$   
 $+ \iint_S \boldsymbol{\sigma}_n \cdot \mathbf{v} dS + \iiint_V \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV.$

№ 4 Выберите закон сохранения энергии

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \mathbf{v} dV = - \iint_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \iint_S \boldsymbol{\sigma}_n dS + \iiint_V \rho \mathbf{f} dV. \\
& \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y v}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z v}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho f. \\
& \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial e v_x}{\partial x} + \frac{\partial e v_y}{\partial y} + \frac{\partial e v_z}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_x \cdot \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y \cdot \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z \cdot \mathbf{v}}{\partial z} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}. \\
& \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \left( \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \epsilon \right) dV = - \iint_S \rho \left( \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \epsilon \right) (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \\
& \quad + \iint_S \boldsymbol{\sigma}_n \cdot \mathbf{v} dS + \iiint_V \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV.
\end{aligned}$$

№ 5

Порядок аппроксимации производной  $\frac{\partial u}{\partial x}$  в формуле  $\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(t, x) - u(t, x - \Delta x)}{\Delta x}$  равен

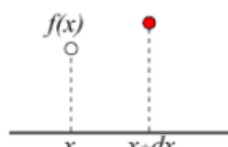
- первый
- второй
- третий
- четвертый

№ 6

производной  $\frac{\partial u}{\partial x}$  можно построить следующее количество конечно-разностных аппроксимаций

- единственное
- не более двух
- не более трех
- бесконечное множество

№ 7 Каким образом можно оценить изменение скалярной величины  $f(x)$ , известной в точке  $x$ , в точке  $(x + dx)$ , где  $dx$  малая величина



$$\begin{aligned}
& f(x) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} \frac{dx}{2} \\
& f(x) - \frac{\partial f(x)}{\partial x} dx \\
& f(x) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} dx \\
& f(x) + \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} dx
\end{aligned}$$

№ 8 Каким образом можно оценить изменение векторной величины  $\mathbf{u}(x)$ , известной в точке  $x$ , в точке  $(x + dx)$ , где  $dx$  малая величина

$$\begin{array}{l}
 - \bar{u} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dx \\
 - \bar{u} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \frac{dx}{2} \\
 - \bar{u} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} dx \\
 - \bar{u} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dx
 \end{array}$$

№ 9 Сеточной функцией называется

- множество значений решения конечно-разностного аналога в узлах разностной сетки
- множество значений решения исходного дифференциального уравнения в узлах разностной сетки
- множество значений решения конечно-разностного уравнения во всей области изменения непрерывных аргументов
- непрерывное распределение функции в области решения

№ 10 Как иначе называют метод бисекций?

- Метод половинного деления
- Метод хорд
- Метод пропорциональных частей
- Метод «начального отрезка»