

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ)**

УТВЕРЖДАЮ

Ректор МФТИ

д-р физ.-мат. наук, профессор

Д.В. Ливанов

2022 г.



**Программа
дополнительного образования**

**«Модели и методы вычислительной гидродинамики. Моделирование
течений сплошных сред»**

Москва 2022

1. Общая характеристика программы

1.1. Целью реализации программы дополнительного образования является формирование базовых знаний по вычислительной гидродинамике для дальнейшего использования при моделировании течений жидкости и газа и в других дисциплинах технического естественнонаучного содержания; формирование естественнонаучной культуры, исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

1.2. Курс рассчитан на круг участников, прошедших общую инженерную подготовку на начальных курсах университета. Для эффективного прохождения курса желательно знание и понимание основ:

- классической механики
- классической и статистической термодинамики
- теоретической гидродинамики (механики сплошных сред)
- математического и векторного анализа
- уравнений математической физики
- вычислительных методов

1.3. Нормативный срок освоения программы – 72 академических часа.

1.4. Форма обучения – очно-заочная с применением дистанционных образовательных технологий.

1.5. Режим обучения: 12 недель (6 часов в неделю).

2. Планируемые результаты обучения

В результате освоения программы слушатель должен:
знать:

- основной теоретической базы курса
- базовые модели вычислительной гидродинамики
- связи изучаемых теоретических моделей с практикой инженерных расчётов
- методы вычислительной гидродинамики, реализованные в современных промышленных программных комплексах

уметь:

- применять навыки работы в программных комплексах вычислительной гидродинамики для решения конкретных задач

владеть:

- основными математическими методами решения задач гидродинамики

- приемами качественного и количественного анализа применимости физических моделей и выбора модели, адекватной исследуемой задаче

3. Структура программы

Программа предусматривает изучение следующих тем (модулей):

- Введение в вычислительную гидродинамику
- Методология решения задач вычислительной гидродинамики
- Моделирование несжимаемых течений, постановка расчетных задач
- Методология CFD и практика проведения расчетов несжимаемых течений
- Моделирование теплопереноса в сплошных средах, постановка расчетных задач
- Методология CFD и практика проведения расчетов тепловых задач
- Моделирование сжимаемых течений, постановка расчетных задач
- Методология CFD и практика проведения расчетов сжимаемых течений
- Моделирование турбулентности, постановка расчетных задач
- Методология CFD и практика проведения расчетов турбулентных течений

Структура программы представлена в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Тема (модуль)	Кол-во часов	В том числе	
			Аудит. занятия	Самост. работа
1	Модуль 1. Введение	8,8	3,3	5,5
2	Модуль 2. Несжимаемые течения. Геометрические модели	11,6	4,3	7,3
3	Модуль 3. Теплоперенос. Построение расчетной сетки	14,2	4,1	10,1
4	Модуль 4. Сжимаемые течения. Дискретизация уравнений CFD	15,4	4,7	10,7
5	Модуль 5. Турбулентные течения. Дискретизация уравнений CFD по времени	20	7	13
6	Итоговое тестирование	2		2
	Итого	72	23,4	48,6

4. Содержание программы

4.1. Учебно-тематический план программы

Таблица 2

Тема (модуль)	Тема урока	Кол-во часов	
		Аудит. занятия	Самост. работа
Модуль 1. Введение	Неделя 1. Часть 1. Введение в вычислительную гидродинамику	1,1	1,2
	1.0 Чему будем учиться на этом курсе	0,1	0,1
	1.1 Автоматизация инженерных расчетов	0,3	0,2
	Тест 1.1		0,2
	1.2 Вычислительная гидродинамика	0,3	0,1
	Тест 1.2		0,2
	1.3 Современные инструменты CFD	0,4	0,2
	Тест 1.3		0,2
	<i>1.3.1 Надежность метода CFD*</i>	0,3	
	Неделя 2. Часть 2. Методология решения задач вычислительной гидродинамики	2,2	4,3
	1.4.1 Решение задач CFD. Анализ постановки задачи	0,3	0,1
	1.4.2 Решение задач CFD. Этапы работы в программном комплексе	0,4	0,2
	Тест 1.4		0,2
	1.5.1 Практика. Течение в круглой трубе. Формулировка физико-математической модели в программном комплексе	0,7	0,4
	1.5.2 Практика. Течение в круглой трубе. Расчет и анализ в программном комплексе	0,8	0,4
	Расчетная задача		3
Модуль 2. Несжимаемые течения. Геометрические модели	Неделя 3. Часть 1. Моделирование несжимаемых течений, постановка расчетных задач	1,9	2,5
	2.1 Несжимаемые течения	0,2	0,2
	Тест 2.1		0,2

	2.2.1 Моделирование несжимаемых течений. Уравнение неразрывности	0,3	0,2
	Тест 2.2.1		0,2
	2.2.2 Моделирование несжимаемых течений. Закон сохранения импульса. Напряжения	0,3	0,1
	Тест 2.2.2		0,2
	2.2.3 Моделирование несжимаемых течений. Деформации в сплошной среде	0,3	0,2
	Тест 2.2.3		0,2
	2.2.4 Моделирование несжимаемых течений. Уравнения Навье-Стокса	0,2	0,1
	Тест 2.2.4		0,2
	2.3.1 Начальные и граничные условия	0,2	0,1
	Тест 2.3.1		0,2
	2.3.2 Граничные условия для системы уравнений Навье-Стокса	0,4	0,2
	Тест 2.3.2		0,2
	Неделя 4. Часть 2. Методология CFD и практика проведения расчетов несжимаемых течений	2,4	4,8
	2.4 Подобие гидродинамических течений	0,3	0,4
	Тест 2.4		0,2
	2.5 Подготовка геометрической модели расчетной области задачи	0,3	0,5
	Тест 2.5		0,2
	2.6.1 Ламинарное обтекание цилиндра. Описание постановки задачи	0,4	0,6
	Тест 2.6.1		0,2
	2.6.2 Ламинарное обтекание цилиндра. Практика в программном комплексе CFD	1,4	1,5
	Расчетная задача		3
Модуль 3. Теплоперенос. Построение расчетной сетки	Неделя 5. Часть 1. Моделирование теплопереноса в сплошных средах, постановка расчетных задач	1,7	3,1
	3.1 Процессы теплопереноса в сплошных средах	0,3	0,3

Тест 3.1		0,2
3.2.1 Моделирование теплопереноса. Теорема живых сил	0,2	0,2
Тест 3.2.1		0,2
3.2.2 Моделирование теплопереноса. Основные понятия термодинамики	0,3	0,3
Тест 3.2.2		0,2
3.2.3 Моделирование теплопереноса. Первое и второе начало термодинамики	0,3	0,3
Тест 3.2.3		0,2
3.2.4 Моделирование теплопереноса. Закон сохранения энергии	0,2	0,2
Тест 3.2.4		0,2
3.2.5 Моделирование теплопереноса. Другие формы уравнения энергии	0,2	0,2
Тест 3.2.5		0,2
3.3 Граничные условия для уравнения энергии	0,2	0,2
Тест 3.3		0,2
Неделя 6. Часть 2. Методология CFD и практика проведения расчетов тепловых задач	2,4	7
3.4 Подобие тепловых процессов	0,2	0,2
Тест 3.4		0,2
3.5.1 Методы построение расчетных сеток. Криволинейные сетки	0,4	0,4
Тест 3.5.1		0,2
3.5.2 Методы построение расчетных сеток. Прямоугольные сетки и адаптация	0,2	0,2
Тест 3.5.2		0,2
3.6.1 Конвекция в помещении. Постановка задачи	0,2	0,2
3.6.2 Свободная конвекция (верификация модели). Практика в программном комплексе CFD	0,8	0,8
Расчетная задача 3.6.2		2

	3.6.3 Конвекция в помещении. Практика в программном комплексе CFD	0,6	0,6
	Расчетная задача 3.6.3		2
Модуль 4. Сжимаемые течения. Дискретизация уравнений CFD	Неделя 7. Часть 1. Моделирование сжимаемых течений, постановка расчетных задач	0,8	1,6
	4.1 Сжимаемые течения	0,2	0,2
	Тест 4.1		0,2
	4.2 Полная система уравнений газодинамики	0,2	0,2
	Тест 4.2		0,2
	4.3 Уравнение адиабатического течения	0,2	0,2
	Тест 4.3		0,2
	4.4 Гидростатика	0,2	0,2
	Тест 4.4		0,2
	Неделя 8. Часть 2. Моделирование сжимаемых течений, постановка расчетных задач	1,5	2,7
	4.5.1 Теорема Бернулли	0,2	0,2
	Тест 4.5.1		0,2
	4.5.2 Теорема Бернулли. Примеры применения	0,2	0,2
	Тест 4.5.2		0,2
	4.6 Изозэнтропические формулы	0,3	0,3
	Тест 4.6		0,2
	4.7.1 Распространение звука	0,2	0,2
	Тест 4.7.1		0,2
	4.7.2 Ударные волны	0,3	0,3
	Тест 4.7.2		0,2
	4.8 ГУ для сжимаемых течений	0,3	0,3
	Тест 4.8		0,2

	Неделя 9. Часть 3. Методология CFD и практика проведения расчетов сжимаемых течений	2,4	6,4
	4.9.1 Дискретизация уравнений CFD. Методы дискретизации	0,1	0,1
	Тест 4.9.1		0,2
	4.9.2 МКР и МКО	0,3	0,5
	Тест 4.9.2		0,2
	4.9.3 Метод конечных объемов	0,2	0,3
	Тест 4.9.3		0,2
	4.9.4 Сходимость численного метода	0,3	0,5
	Тест 4.9.4		0,2
	4.10.1 Трансзвуковое обтекание крыла. Описание постановки задачи	0,3	0,4
	Тест 4.10.1		0,2
	4.10.2 Трансзвуковое обтекание крыла. Практика в программном комплексе CFD	1,2	1,2
	Расчетная задача		3
Модуль 5. Турбулентные течения. Дискретизация уравнений CFD по времени	Неделя 10. Часть 1. Моделирование турбулентности, постановка расчетных задач	1,6	2,6
	5.1.1 Турбулентные течения	0,3	0,3
	Тест 5.1.1		0,2
	5.1.2 Введение в теорию турбулентности	0,3	0,3
	Тест 5.1.2		0,2
	5.2 Моделирование турбулентности	0,4	0,4
	Тест 5.2		0,2
	5.3.1 RANS. Осреднённые уравнения	0,3	0,3
	Тест 5.3.1		0,2
	5.3.2 Гипотеза Буссинеска и теория Прандтля	0,3	0,3
	Тест 5.3.2		0,2
	Неделя 11. Часть 2. Моделирование турбулентности, постановка расчетных задач	2,2	3,6
	5.4.1 Турбулентный пограничный слой	0,3	0,3
	Тест 5.4.1		0,2

	5.4.2 Пристеночная турбулентность	0,2	0,2
	Тест 5.4.2		0,2
	5.5.1 Семейство k-ε моделей	0,4	0,4
	Тест 5.5.1		0,2
	5.5.2 Модели SST и SA	0,3	0,3
	Тест 5.5.2		0,2
	5.5.3 Турбулентный теплоперенос	0,2	0,2
	Тест 5.5.3		0,2
	5.5.4 ГУ и НУ для RANS моделей	0,4	0,4
	Тест 5.5.4		0,2
	5.6 Выбор модели турбулентности	0,4	0,4
	Тест 5.6		0,2
	Неделя 12. Часть 3. Методология CFD и практика проведения расчетов турбулентных течений	3,2	6,8
	5.7.1 Дискретизация уравнений CFD по времени	0,3	0,3
	Тест 5.7.1		0,2
	5.7.2 Число CFL и шаг по времени задачи	0,4	0,4
	Тест 5.7.2		0,2
	5.8.1 Практика. Турбулентное обтекание обратного уступа	1,1	1,1
	Тест 5.8.1		0,2
	5.8.2 Практика. Турбулентное обтекание крылового профиля	1,4	1,4
	Расчетная задача		3
6. Итоговое тестирование	Итоговая контрольная работа по курсу (тестовые вопросы и задачи для самостоятельного решения)		2

* - бонусный урок, не обязательный к просмотру

4.2. Учебная программа по модулям

Таблица 3

№ п/п	Наименование темы (модуля)	Содержание обучения, наименование и тематика практических занятий (семинаров), самостоятельной работы, используемых образовательных технологий
Модуль 1. Введение		
1	Неделя 1. Часть 1. Введение в вычислительную гидродинамику	
1.1	1.0 Чему будем учиться на этом курсе	<i>Лекция:</i> знакомство. Определение вычислительной гидродинамики. Чему будем учиться. Вопросы курса. Эффективное использование. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
1.2	1.1 Автоматизация инженерных расчетов	<i>Лекция:</i> инженерные расчеты. Технический прогресс. Концептуальное проектирование. Рабочее проектирование. Технологическая проработка. Испытания опытного образца. Набор инструментов в докомпьютерную эпоху. Современные инструменты. Автоматизация проектирования. Системы автоматизированного проектирования (САПР). Системы автоматизации инженерных расчетов (CAE), их применение. Минимизация ошибок. Сокращение числа испытаний. Опасные и дорогостоящие экзотические испытания изделий. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 1.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
1.3	1.2 Вычислительная гидродинамика	<i>Лекция:</i> задачи и методы исследования в классической гидродинамике. Определение гидродинамики. Задачи теоретической гидродинамики, экспериментальной гидродинамики, вычислительной гидродинамики. Вычислительный эксперимент. Смыслы понятия «эксперимент». Преимущества CFD. Области применения CFD. Пример: расчет аэродинамических характеристик гоночного болида. Надежность результатов CFD. Понятие сходимости. Метод сеток. Определение расчетной сетки. Требование сходимости численного метода. Пределы применимости CFD. Понятие числа Кнудсена. Средняя длина свободного пробега. Характерный размер задачи. Примеры: течение жидкости в трубе, задача об обтекании круглого цилиндра. Понятие сплошной среды.

		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 1.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
1.4	1.3 Современные инструменты CFD	<i>Лекция:</i> подходы к решению задач CFD. Академический подход. Промышленный подход. Определение модели CFD. Корректная постановка задач CFD. Методы CFD. Свободно распространяемые ПК CFD. Коммерческие ПК CFD. Выбор ПК CFD для инженерных расчетов. ПК CFD для практической части курса. Круг задач CFD. ПК FlowVision. Методы CFD в ПК FlowVision. Результаты решения задач на FV.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 1.3	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
1.5	1.3.1 Надежность метода CFD	<i>Лекция:</i> подтверждение надежности метода вычислительной гидродинамики. Формальные определения верификации и валидации. Верификация ПК CFD. Валидация ПК CFD. Расчет течения в трубе. Расчет обтекания крыла. Погрешность метода CFD. Определение погрешности. Неустраняемая погрешность. Вычислительная погрешность. Ошибки округления. Верификация расчета трубы.
2	Неделя 2. Часть 2. Методология решения задач вычислительной гидродинамики	
2.1	1.4.1 Решение задач CFD. Анализ постановки задачи	<i>Лекция:</i> концепция решения задач инженерных расчетов. Пример: расчет гидравлических потерь. Анализ постановки задачи. Графическая схематизация. Решение задачи. Гидравлические потери. Упрощение задачи: прямой участок трубопровода. Грубая оценка результата. Режим течения. Аналитика для трубы. Упрощение задачи: гладкость стенок трубы. Учет силы тяжести. Тонкости: длина установления.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
2.2	1.4.2 Решение задач CFD. Этапы работы в программном комплексе	<i>Лекция:</i> повторение основных этапов решения инженерных расчетных задач. Подготовка геометрической модели. Этапы работы в CFD-

		системе. Препроцессинг. Физические свойства и процессы. Расчетная область задачи. Граничные и начальные условия. Построение расчетной сетки. Равномерная расчетная сетка. Задание шага по времени. Расчет в ПК CFD. Выход на стационарный режим. Постпроцессинг в ПК CFD. Течение Пуазейля. Напор насоса.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 1.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекций
2.3	1.5.1 Практика. Течение в круглой трубе. Формулировка физико-математической модели в программном комплексе	<i>Лекция:</i> постановка задачи. Расчет гидравлических потерь. Секторная постановка задачи о течении жидкости в круглой трубе. Этапы работы в ПК CFD. Препроцессинг в ПК CFD. Работа в FV (скринкаст). Постановка задачи. Общие установки. Граничные условия.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
2.4	1.5.2 Практика. Течение в круглой трубе. Расчет и анализ в программном комплексе	<i>Практика:</i> повторение постановки задачи. Расчет гидравлических потерь при заданном расходе нефти. Расчет и постпроцессинг. Работа в FV (скринкаст). Расчет значений контрольных параметров. Солвер. Условия останова. Анализ результатов. Вязкость нефти. График расхода на выходе из трубы.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
2.5	Расчетная задача	<i>Самостоятельная работа:</i> расчетная задача, которую необходимо решить в ПК
Модуль 2. Несжимаемые течения. Геометрические модели		
3	Неделя 3. Часть 1. Моделирование несжимаемых течений, постановка расчетных задач	
3.1	2.1 Несжимаемые течения	<i>Лекция:</i> понятие плотности сплошной среды. Допущение: изотермические течения. Сжимаемые и несжимаемые течения. Критерий сжимаемости. Число Маха. Жидкие среды. Несжимаемые течения в задачах инженерных расчетов. Понятие медленного течения газа. Инженерные задачи с несжимаемыми течениями.

		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
3.2	2.2.1 Моделирование несжимаемых течений. Уравнение неразрывности	<i>Лекция:</i> модель несжимаемого течения. Система уравнений Навье-Стокса. Описание движения сплошной среды. Понятие жидкой частицы. Переменные Лагранжа. Переменные Эйлера. Понятие полной производной по времени. Оператор градиента. Понятие элементарной жидкого объема. Закон сохранения массы. Дивергенция вектора. Уравнение неразрывности.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.2.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
3.3	2.2.2 Моделирование несжимаемых течений. Закон сохранения импульса. Напряжения	<i>Лекция:</i> второй закон Ньютона для жидкой частицы, для системы жидких частиц. Третий закон Ньютона. Закон сохранения импульса. Тензорное произведение. Вектор массовых сил. Вектор напряжений. Напряжения в сплошной среде. Тензор напряжений. Механическое равновесие. Нормальные, касательные напряжения. Случай движущейся жидкости. Шаровая, девиаторная часть тензора напряжений. Вектор поверхностных сил. Формула Гаусса-Остроградского. Дифференциальная форма закона сохранения импульса. Векторная форма записи, скалярный вид.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.2.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
3.4	2.2.3 Моделирование несжимаемых течений. Деформации в сплошной среде	<i>Лекция:</i> повторение: законы сохранения массы и импульса. Реология сплошной среды. Тензор скоростей деформации. Состояние механического равновесия. Определение кинематики. Кинематика твердого тела. Теорема Эйлера о разложении. Оператор ротора. Кинематика сплошной среды. Оператор набла. Первая теорема Гельмгольца. Физический смысл компонент тензора скоростей

		деформации. Деформации: растяжение, сжатие, сдвиг.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.2.3	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
3.5	2.2.4 Моделирование несжимаемых течений. Уравнения Навье-Стокса	<i>Лекция:</i> повторения законов сохранения массы и импульса. Реология сплошной среды. Простейшее реологическое уравнение. Закон трения. Ламинарный режим. Закон Ньютона-Стокса. Коэффициент динамической вязкости, кинематической вязкости. Ньютоновская жидкость. Обобщенный закон трения Ньютона. Неньютоновские среды (реологические). Идеальные жидкости. Уравнение импульсов. Закон для несжимаемой сплошной среды. Полная производная по времени для несжимаемой жидкости. Система уравнений Навье-Стокса.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.2.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
3.6	2.3.1 Начальные и граничные условия	<i>Лекция:</i> понятие расчетной области задачи. Задачи инженерных расчетов. Примеры расчетных областей. Граница расчетной области. Граничные условия (ГУ). Временной интервал задачи. Начальные условия (НУ). Расчет течения жидкости в трубе. Единственность (существование) решения. Корректная постановка задачи. Формулировка начальных условий.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.3.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
3.7	2.3.2 Граничные условия для системы уравнений Навье-Стокса	<i>Лекция:</i> повторение границы расчетной области. Вход, выход, стенка, симметрия. Типы задач гидродинамики. Внутренние течения. Примеры задач на расчет внутренних течений. Внешние течения. Понятие обтекания. Примеры задач о внешнем обтекании. Виды граничных условий для системы уравнений Навье-Стокса. Упрощение трехмерной постановки. ГУ симметрии. ГУ входа/выхода. Математически некорректная постановка задачи,

		примеры. Замкнутые задачи. Примеры корректных комбинаций ГУ. ГУ полное давление.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.3.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
4	Неделя 4. Часть 2. Методология CFD и практика проведения расчетов несжимаемых течений	
4.1	2.4 Подобие гидродинамических течений	<i>Лекция:</i> теория подобия. Определение механического подобия, геометрического подобия, физического подобия. П-теорема. Подобные течения. Гидродинамическое подобие. Обезразмеривание уравнений Навье-Стокса. Характерные величины. Критерии подобия. Число Рейнольдса. Ламинарное течение. Турбулентные течения. Число Эйлера. Число Фруда. Проблемы постановки лабораторного эксперимента. Число Струхала.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
4.2	2.5 Подготовка геометрической модели расчетной области задачи	<i>Лекция:</i> базовая концепция решения задач инженерных расчетов. Расчетная область и геометрическая модель задачи. Инструмент для подготовки геометрических моделей. Возможности САД-систем. Форматы представления и хранения геометрических данных. Алгебраические форматы. Конечноэлементные сетки. Поверхностные сетки. Триангулированная поверхность. Требования к геометрическим моделям. Ошибки при подготовке геометрических моделей. Пересечения и касания подобластей. Острые кромки. Качество разрешения триангулированной поверхности. Степень детализации поверхности геометрической модели. Размерность геометрической модели.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.5	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
4.3	2.6.1 Ламинарное обтекание цилиндра.	<i>Лекция:</i> Ламинарное обтекание цилиндра. Термоанемометр. Принцип действия. Диапазон действия. Режимы обтекания цилиндра. Природа

	Описание постановки задачи	явления отрыва потока. Постановка задачи. Анализ постановки задачи. Упрощения. Двумерная постановка задачи. Размер расчетной области для задач внешнего обтекания. Аналитические решения. Понятие силы сопротивления. Экспериментальные данные.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 2.6.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
4.4	2.6.2 Ламинарное обтекание цилиндра. Практика в программном комплексе CFD	<i>Практика:</i> Постановка задачи. Исследование режима обтекания. Определение числа Рейнольдса. Коэффициент сопротивления. Сгущение расчетной сетки. Мониторинг расчета. Работа в FV (скринкаст). Создание проекта. Граничные условия. Начальные условия. Расчетная сетка. Результаты расчета. Безотрывная картина обтекания. Визуализация распределения давления. График окна мониторинга. Физичность решения. Расчетные значения коэффициента сопротивления цилиндра при заданном значении числа Рейнольдса. Стационарные возвратные зоны. Переходные значения числа Рейнольдса. Срыв вихрей, искусственное возмущение. Табличные значения коэффициента сопротивления.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
4.5	Расчетная задача	<i>Самостоятельная работа:</i> расчетная задача, которую необходимо решить в ПК
Модуль 3. Теплоперенос. Построение расчетной сетки		
5	Неделя 5. Часть 1. Моделирование теплопереноса в сплошных средах, постановка расчетных задач	
5.1	3.1 Процессы теплопереноса в сплошных средах	<i>Лекция:</i> определение теплопереноса. Понятие энергии для элементарного жидкого объема сплошной среды. Идеальный одноатомный газ. Тепловое движение. Постоянная Больцмана. Определение температуры. Основные механизмы теплопереноса. Определение теплопроводности. Теплопроводность в твердом теле. Фононы. Квазичастицы. Теплопроводность в газе. Конвекция. Примеры конвекции. Виды конвекции. Вынужденная конвекция. Пример. Естественная

		(свободная) конвекция. Излучение. Примеры инженерных задач. Теплообменники.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
5.2	3.2.1 Моделирование теплопереноса. Теорема живых сил	<i>Лекция:</i> понятие кинетической энергии, мощности. Теорема об изменении кинетической энергии для жидкого объема. Мощность внутренних сил. Теорема живых сил.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.2.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
5.3	3.2.2 Моделирование теплопереноса. Основные понятия термодинамики	<i>Лекция:</i> определение термодинамики, термодинамической системы, термодинамического равновесия. Гипотеза о локальном термодинамическом равновесии. Законы термодинамики (начала термодинамики). Нулевые начала термодинамики. Понятие внутренней энергии. Функция состояния термодинамической системы. Понятие степеней свободы на примере двухатомной молекулы. Понятие температуры. Частичное равновесие. Понятия тепла и работы.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.2.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
5.4	3.2.3 Моделирование теплопереноса. Первое и второе начало термодинамики	<i>Лекция:</i> первое начало термодинамики. Энтальпия. Преобразование Лежандра. Стандартная энтальпия образования вещества. Теплоемкость. Зависимость теплоемкости от температуры. Примеры теплоемкости различных веществ. Понятие энтропии. Диссипация в сплошной среде.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.2.3	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
5.5	3.2.4 Моделирование теплопереноса. Закон сохранения энергии	<i>Лекция:</i> первое начало термодинамики для элементарного жидкого объема. Элементарное приращение тепла. Элементарная работа. Уравнение

		энергии, уравнение энергии через энтальпию. Вектор теплового потока. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Уравнение энергии через энтальпию.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.2.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
5.6	3.2.5 Моделирование теплопереноса. Другие формы уравнения энергии	<i>Лекция:</i> понятие полной термодинамической энтальпии. Уравнение энергии через полную термодинамическую энтальпию. Несжимаемая жидкость. Полная система уравнений для вязкой несжимаемой жидкости. Уравнение энергии через температуру. Инженерные приложения. Приближение Буссинеска. Уравнение теплопроводности для твердого тела.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.2.5	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
5.7	3.3 Граничные условия для уравнения энергии	<i>Лекция:</i> повторение типов границ расчетной области. Граничные условия температуры. Понятие термостата. Граничные условия на удельный тепловой поток. Понятие теплоизолированной (адиабатической) поверхности. Граничные условия нулевой градиент температуры. Задачи на расчет теплопереноса. Свободная конвекция в помещении. Расчет теплообменника. ГУ Полная энтальпия (температура).
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.3	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
6	Неделя 6. Часть 2. Методология CFD и практика проведения расчетов тепловых задач	
6.1	3.4 Подobie тепловых процессов	<i>Лекция:</i> повторение понятия гидродинамического подobie. Естественная конвекция. Приближение Буссинеска. Обезразмеривание уравнения импульса. Критерии подobie. Число Прандтля. Тепловой пограничный слой. Число Грасгофа. Число Рэлея. Вынужденная конвекция. Число Нуссельта.

		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
6.2	3.5.1 Методы построения расчетных сеток. Криволинейные сетки	<i>Лекция:</i> методологическая часть. Повторение метода сеток. Расчетная сетка. Ячейка расчетной сетки. Виды расчетных сеток. Неструктурированные сетки. Структурированные сетки. Криволинейные сетки. Преобразование координат, уравнений. Выбор преобразования. Методы построения блочно-структурированных сеток. Алгебраические методы. Трансфинитная интерполяция. Дифференциальный эллиптический метод. Дифференциальный гиперболический метод. Преимущества и недостатки блочно-структурированных сеток.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.5.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
6.3	3.5.2 Методы построения расчетных сеток. Прямоугольные сетки и адаптация	<i>Лекция:</i> повторение метода сеток. Структурированные сетки. Прямоугольные сетки, их преимущества и недостатки. Методы аппроксимации границ. Подсеточное разрешение границ. Композитные сетки «Химера». Адаптация расчетной сетки. Виды адаптации. Адаптация на границе. Адаптация в объеме. Адаптация к решению.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 3.5.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
6.4	3.6.1 Конвекция в помещении. Постановка задачи	<i>Лекция:</i> естественная конвекция, повторение. Конвекция в помещении. Анализ постановки задачи. Упрощения постановки задачи. Результаты эксперимента. Картины течения.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
6.5	3.6.2 Свободная конвекция (верификация модели). Практика в	<i>Практика:</i> повторение постановки задачи. Число Рэлея. Число Нуссельта. Мониторинг расчета. Работа в FV (скринкаст). Геометрическая модель. Общие установки. Граничные условия. Расчет задачи при

	программном комплексе CFD	разных числах Рэлея. Число Нуссельта на горячей стенке, результаты.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Расчетная задача 3.6.2	<i>Самостоятельная работа:</i> расчетная задача, которую необходимо решить в ПК
6.6	3.6.3 Конвекция в помещении. Практика в программном комплексе CFD	<i>Практика:</i> повторение постановки задачи, граничные условия, что нужно рассчитать. Настройка расчетного проекта. Работа в FV (скринкаст). Геометрическая модель помещения. Общие установки. Граничные условия.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
6.7	Расчетная задача 3.6.3	<i>Самостоятельная работа:</i> расчетная задача, которую необходимо решить в ПК
Модуль 4. Сжимаемые течения. Дискретизация уравнений CFD		
7	Неделя 7. Часть 1. Моделирование сжимаемых течений, постановка расчетных задач	
7.1	4.1 Сжимаемые течения	<i>Лекция:</i> сжимаемые и несжимаемые течения. Газообразное состояние вещества. Эффект Прандтля-Глоерта. Неизотермические течения. Критерий сжимаемости. Сжимаемые течения в инженерных расчетах. Инженерные задачи.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
7.2	4.2 Полная система уравнений газодинамики	<i>Лекция:</i> уравнения Навье-Стокса. Уравнение энергии, дозвуковые течения, сверхзвуковые течения. Полная система уравнений для сжимаемой сплошной среды. Уравнение состояния идеального газа. Моль и число Авогадро. Идеальный газ. Газ Ван-дер-Ваальса. Сжимаемость в жидкостях. Объемная вязкость.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
7.3	4.3 Уравнение адиабатического течения	<i>Лекция:</i> определение идеальной жидкости. Уравнения Эйлера, их применение. Динамический пограничный слой. Задачи внешнего обтекания. Уравнение энергии

		для идеальной жидкости. Адиабата Пуассона для модели идеального газа. Показатель адиабаты. Адиабатическое расширение.
	Тест 4.3	<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
7.4	4.4 Гидростатика	<i>Лекция:</i> механическое равновесие в сплошной среде. Уравнение гидростатики. Потенциальность поля массовых сил. Барометрическая формула. Учет гидростатики в уравнениях. Учет силы тяжести для жидких сплошных сред, для газа.
	Тест 4.4	<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
8	Неделя 8. Часть 2. Моделирование сжимаемых течений, постановка расчетных задач	
8.1	4.5.1 Теорема Бернулли	<i>Лекция:</i> понятия траектории и линии тока жидких частиц. Производная вдоль направления. Теорема Бернулли. ГУ Полная температура. Теорема Бернулли для идеального газа. Адиабатическое падение температуры в атмосфере. Теорема Бернулли для несжимаемого течения.
	Тест 4.5.1	<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
8.2	4.5.2 Теорема Бернулли. Примеры применения	<i>Лекция:</i> Теорема Бернулли для несжимаемого течения. Труба переменного диаметра. Подъемная сила. ГУ Полное давление. Критерий сжимаемости.
	Тест 4.5.2	<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
8.3	4.6 Изоэнтропические формулы	<i>Лекция:</i> понятие изоэнтропического процесса. Теорема Бернулли. Скорость звука в идеальном газе. Изоэнтропические формулы. Критерий учета сжимаемости сплошной среды. Измерение скорости.

		Скоростная труба. Расчет КПД турбомашин. Осевой компрессор.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.6	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
8.4	4.7.1 Распространение звука	<i>Лекция:</i> малые возмущения (звук). Распространение малых возмущений. Линеаризованные уравнения Эйлера. Скорость звука. Эффект Доплера.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.7.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
8.5	4.7.2 Ударные волны	<i>Лекция:</i> образование ударной волны. Конечные возмущения. Инварианты Римана. Характеристики и простая волна. Адиабатическая функция давления. Прямой скачек уплотнения. Условия на ударной волне. Распространение возмущений в трехмерном пространстве. Косой скачек.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.7.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
8.6	4.8 ГУ для сжимаемых течений	<i>Лекция:</i> типы границ расчетной области. Вход/выход для сжимаемых течений. Сверхзвуковой вход. Система уравнений Эйлера. Инварианты Римана и характеристики. Дозвуковые потоки, ГУ. Сверхзвуковые потоки, ГУ. Отражение малых возмущений. Решение проблемы отражения возмущений. Неотражающие ГУ, физический смысл, особенности применения.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.8	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
9	Неделя 9. Часть 3. Методология CFD и практика проведения расчетов сжимаемых течений	
9.1	4.9.1 Дискретизация уравнений CFD. Методы	<i>Лекция:</i> методологическая часть курса. Повторение полной системы уравнений газодинамики. Алгоритм численного решения. Конвективно-диффузионное

	дискретизации	уравнение переноса. Метод сеток, дискретизация. Методы дискретизации уравнений гидродинамики.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.9.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
9.2	4.9.2 МКР и МКЭ	<i>Лекция:</i> Методы дискретизации уравнений гидродинамики. Метод конечных разностей (МКР). Пример: уравнение теплопроводности. Применение МКР. МКР в CFD. Метод конечных элементов. Линейная интерполяция. Пример: уравнение теплопроводности. Минимизация невязки. МКЭ в CFD.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.9.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
9.3	4.9.3 Метод конечных объемов	<i>Лекция:</i> понятие конечного объема, центров конечного объема. Идея МКО. Пример: уравнение теплопроводности. Применение МКО. Конвективно-диффузионное уравнение. Интегрирование в конечном объеме. Результат численного решения.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.9.3	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
9.4	4.9.4 Сходимость численного метода	<i>Лекция:</i> надежность численного метода, условия. Устойчивость численного метода. Понятие сходимости численного метода. Исследование сеточной сходимости. Пример: течение в трубе. Исследование сходимости по шагу по времени (нестационарные задачи). Пример: течение в трубе с переменным расходом. Задачи внешнего обтекания, отличительная особенность. Исследование сходимости по размерам расчетной области при решении задач внешнего обтекания. Задача об обтекании круглого цилиндра.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.9.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции

9.5	4.10.1 Трансзвуковое обтекание крыла. Описание постановки задачи	<i>Лекция:</i> практическая часть модуля. Подъемная сила и сопротивление крыла. Трансзвуковое обтекание. Местный скачок уплотнения. Влияние на режим обтекания. Коэффициент давления. Пример: профиль RAЕ 2822. Анализ постановки, условие задачи. Что необходимо рассчитать. Аэродинамические коэффициенты. Упрощение постановки задачи. Аналитические решения.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 4.10.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
9.6	4.10.2 Трансзвуковое обтекание крыла. Практика в программном комплексе CFD	<i>Практика:</i> практика в численном моделировании сжимаемого течения заданного типа в программном комплексе вычислительной гидродинамики. Неотражающее ГУ и размер расчетной области. Постановка задачи, ГУ. Что необходимо рассчитать. Мониторинг расчета. Сеточная сходимость. Работа в FV (скринкаст). Настройка проекта на основе готовой геометрической модели. Сравнение с экспериментом. Итоги модуля.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
9.7	Расчетная задача	<i>Самостоятельная работа:</i> расчетная задача, которую необходимо решить в ПК и выдать числовой ответ, который должен укладываться в некоторый интервал
	Модуль 5. Турбулентные течения. Дискретизация уравнений CFD по времени	
10	Неделя 10. Часть 1. Моделирование турбулентности, постановка расчетных задач	
10.1	5.1.1 Турбулентные течения	<i>Лекция:</i> определение турбулентности по П. Брэдшоу. Опыты Осборна Рейнольдса: ламинарное, турбулентное течение, перемежаемость. Иллюстрация нестационарности и непредсказуемости турбулентного течения. Условия перехода из ламинарного течения в турбулентное. Число Рейнольдса. Картина турбулентного течения жидкости в трубе. Более простое определение турбулентности. Явление кризиса сопротивления возле плохообтекаемого тела – цилиндра. Турбулентное обтекание крыла. Турбулизаторы на

		крыле. Инженерные задачи с турбулентными течениями.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.1.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
10.2	5.1.2 Введение в теорию турбулентности	<i>Лекция:</i> повторение определения турбулентности. Понятие турбулентного вихря. Гипотеза каскадного переноса Колмогорова. Определение колмогоровского масштаба. Каскад турбулентных вихрей. Спектр турбулентной энергии. Ламинарные вихри и турбулентность. Общие критерии потери устойчивости, число Рейнольдса. Критическое число Рейнольдса.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.1.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
10.3	5.2 Моделирование турбулентности	<i>Лекция:</i> основные подходы к моделированию. DNS, LES, RANS. Различия между подходами. Задача о расчете слоя смешения. Задача об изменении характеристики течения со временем в выбранной точке развитого турбулентного потока. Точное разрешение вихрей и подсеточное моделирование. Энергетический спектр. Прямое моделирование (DNS). Уравнения Навье-Стокса и турбулентная вязкость. Метод крупных вихрей (LES). Модель Смагоринского. RANS модели. Трехмерность турбулентности. Сравнение ресурсоемкости.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
10.4	5.3.1 RANS. Осреднённые уравнения	<i>Лекция:</i> повторение особенностей RANS. Статистическое описание турбулентности. Нестационарная турбулентность (URANS). Условия осреднения по Рейнольдсу. Осреднение уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности, уравнения импульсов. Тензор напряжений Рейнольдса. Полуэмпирические модели. Литература для дополнительного изучения.

		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.3.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
10.5	5.3.2 Гипотеза Буссинеска и теория Прандтля	<i>Лекция:</i> гипотеза Буссинеска. Определение величины турбулентной вязкости. Теория Прандтля. Длина пути смешения. Недостатки теории Прандтля. Дифференциальные RANS модели.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.3.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11	Неделя 11. Часть 2. Моделирование турбулентности, постановка расчетных задач	
11.1	5.4.1 Турбулентный пограничный слой	<i>Лекция:</i> явление свободной турбулентности. Пристеночная турбулентность. Результаты экспериментального исследования структуры турбулентного пограничного слоя, формирующегося при течении воды по каналу. Структура турбулентного пограничного слоя. Уравнение пограничного слоя. Закон стенки. Двух(трех)-слойная схема. Литература для дополнительного изучения
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.4.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11.2	5.4.2 Пристеночная турбулентность	<i>Лекция:</i> основные подходы к решению задачи о пристеночной турбулентности. Низкорейнольдсовый подход. Высокореинольдсовый подход. Пристеночные функции. Профиль скорости. Учет градиента давления. Шероховатость стенки. Исследование сеточной сходимости.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.4.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11.3	5.5.1 Семейство k-ε моделей	<i>Лекция:</i> определение турбулентной вязкости. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций. Замыкания уравнения для k. Недостатки использования одного уравнения для k. Уравнения переноса для скорости диссипации

		турбулентной энергии. Уравнения $k-\epsilon$ модели. Замыкания уравнений $k-\epsilon$ модели. Демпфирующие функции. Модель $k-\epsilon$-AKN. Корректный расчет около стенки. Учет сжимаемости. Преимущества и недостатки модели турбулентности семейства $k-\epsilon$. Литература для дополнительного изучения. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.5.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11.4	5.5.2 Модели SST и SA	<i>Лекция:</i> модели $k-\omega$. Модель SST. Перекрестный член и турбулентная вязкость. Преимущества и недостатки модели SST. Ламинарно-турбулентный переход. Модель γ-Reθt. Перемерзаемость и ЛТП. Однопараметрические модели. Модель SA. Преимущества и недостатки. Литература для дополнительного изучения. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.5.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11.5	5.5.3 Турбулентный теплоперенос	<i>Лекция:</i> турбулентность и теплообмен. Модификация уравнения энергии. Турбулентное число Прандтля. Подходы к моделированию. Области применения простой модели. Модели $k-\epsilon-\theta$. Перенос дисперсии. Перенос диссипации. Литература для дополнительного изучения. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.5.3	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11.6	5.5.4 ГУ и НУ для RANS моделей	<i>Лекция:</i> повторение. Типы границ расчетной области. ГУ на границах расчетной области. ГУ для моделей турбулентности. ГУ для модели SA. ГУ для $k-\epsilon$ и $k-\omega$ моделей. Понятие интенсивности турбулентности, первый статистический момент. Масштаб турбулентности. Уровни турбулизации потока. Пристеночные функции (ПФ). ГУ для $k-\epsilon-\theta$ моделей. НУ для моделей турбулентности. Турбулентность в атмосфере.

		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.5.4	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
11.7	5.6 Выбор модели турбулентности	<i>Лекция:</i> модели Sm (Смагоринского), SA (Спалларта-Алмареса), k-ε модель. Модели k-ε-AKN (Абе-Кондох-Нагано), SST. Критерии выбора RANS модели. Выбор модели турбулентности. Разрешение структуры пограничного слоя. По Y+ в центре пристеночной ячейки.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.6	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
12	Неделя 12. Часть 3. Методология CFD и практика проведения расчетов турбулентных течений	
12.1	5.7.1 Дискретизация уравнений CFD по времени	<i>Лекция:</i> повторение, наиболее общая форма записи нестационарного конвективно-диффузионного уравнения переноса. Одномерное нестационарное уравнение теплопроводности. Метод конечных объемов. Интегрирование по конечному объему. Нестационарное и диффузионное слагаемое, интегрирование по времени. Явная схема, её устойчивость. Неявная схема
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.7.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
12.2	5.7.2 Число CFL и шаг по времени задачи	<i>Лекция:</i> этап при настройке расчетного проекта, шаг по времени задачи в секундах, с использованием числа CFL. Число Куранта-Фридрихса-Леви. Определение результирующего шага задачи. Явный конвективный шаг по времени. Неустойчивость явной схемы при CFL>1. Конвективный, диффузионный, поверхностный, гравитационный шаг. Процессы с собственным шагом.
		<i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции

	Тест 5.7.2	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
12.3	5.8.1 Практика. Турбулентное обтекание обратного уступа	<i>Лекция:</i> актуальность задачи. Обратные уступы в технике. Структура течения внутри газовой горелки. Стабилизация пламени. Решение проблемы срыва. Отрыв турбулентного пограничного слоя. Тестирование модели турбулентности. Постановка задачи, ее анализ. Длина входного и выходного участка. Упрощения постановки задачи. Размер возвратной зоны. Аналитические решения. Сравнение моделей турбулентности. Граничные условия. Мониторинг расчета. <i>Практика:</i> (скринкаст) геометрическая модель канала с резким расширением. Настройка расчетного проекта. Сравнение с экспериментом. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
	Тест 5.8.1	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам лекции
12.4	5.8.2 Практика. Турбулентное обтекание крылового профиля	<i>Практика:</i> постановка задачи о турбулентном дозвуковом обтекании крылового профиля. Расчет данной задачи в программном комплексе. Повторение, подъемная сила и сопротивление крыла. Аэродинамическое качество крыла. Пикирующий момент (тангаж). Влияние турбулентности на сопротивление крыла. Профиль NACA0012. Анализ постановки задачи. Упрощения постановки задачи. Модель SA (Спалларта-Алмареса). Аналитические решения. Постановка задачи в терминах расчетных граничных условий. Мониторинг расчета. Скринкаст. Настройка расчетного проекта на основе готовых геометрических моделей расчетной области и крылового профиля. Сравнение с экспериментом. Рекомендуемые исследования. Итоги модуля. <i>Самостоятельная работа:</i> изучение дополнительных материалов, подготовка к выполнению расчетной задачи по материалам лекции
12.5	Расчетная задача	<i>Самостоятельная работа:</i> расчетная задача, которую необходимо решить в ПК и выдать числовой ответ, который должен укладываться в некоторый интервал
13	Итоговое тестирование	

13.1	Итоговая контрольная работа по курсу (тестовые вопросы и задачи для самостоятельного решения)	<i>Самостоятельная работа:</i> тестирование по материалам курса, задачи для самостоятельного решения
------	---	--

4.3. Примеры заданий для организации самостоятельной работы слушателей

1. В настроенном в рамках практической части модуля расчетном проекте создайте блок характеристик на плоскости, которая расположена в трех метрах от выхода из трубы. Чему будет равна средняя скорость в сечении?
Для ответа на данный вопрос слушателю необходимо изучить материалы первого модуля.
2. Какие уравнения входят в состав уравнений Навье-Стокса?
Для ответа на данный вопрос слушателю необходимо изучить материалы второго модуля
3. Что представляет из себя процесс теплопереноса?
Для ответа на данный вопрос слушателю необходимо изучить материалы третьего модуля

4.4. Список рекомендуемой литературы

Основная литература:

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям, – М.: Книга по Требованию, 2012. – 466 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа, -М: Дрофа, 2004, 7-е изд. Испр. – 840 с.
3. Флетчер К. Вычислительные методы в механике жидкостей, -М: Мир, 1991
4. Л. И. Седов. Механика сплошной среды : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности "Механика" : в 2 т.; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова Т. 1 , 2004
5. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика, -М.-Ижевск: ИКИ, 2016
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя, -М: Наука, 1974
7. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика, -М: Энергия, 1968
8. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика, -М: URSS, 2008, 2-е изд, стереотип. – 432 с.
9. J. F. Thompson Handbook of Grid Generation. CRC Press LLC, 1999
10. Лисейкин В. Д. Разностные сетки. Теория и приложения. - М: СО РАН, 2019. –

254 с.

11. Исаченков В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. –М.: Энергия, 1975
12. Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – М.: Мир, 1990
13. С. Патанкар Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984
14. Самарский А.А. Теория разностных схем , -М: Наука, 1989
15. Cook, P.H., M.A. McDonald, M.C.P. Firmin Aerofoil RAE 2822 - Pressure Distributions, and Boundary Layer and Wake Measurements // AGARD Report AR 138, 1979

Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет":

1. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
2. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
3. <http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.
4. Томилин И.А. «Физическая химия. Термодинамика», openedu.ru, 2022

5. Материально-технические условия реализации программы

Таблица 4

Наименование специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий	Вид занятий	Наименование оборудования, программного обеспечения
Система дистанционного обучения	Лекции	Слушателю необходим компьютер, наличие доступа в сеть интернет.
Система дистанционного обучения	Самостоятельная работа	Слушателю необходим компьютер, наличие доступа в сеть интернет.
Система дистанционного обучения	Практика	Слушателю необходим компьютер, наличие доступа в сеть интернет.

6. Оценка качества освоения программ

Оценка качества освоения программы осуществляется в процессе промежуточной аттестации.

Формы и методы промежуточного контроля представлены в таблице 5.

Таблица 5

Наименование модулей	Основные показатели оценки	Формы и методы контроля и оценки
Модуль 1. Введение	Знать: процесс разработки новых изделий, место инженерных расчетов и системы автоматизации в проектировании. Основные методы гидродинамических исследований, их преимущества и недостатки. Метод вычислительной гидродинамики, основные требования к нему и пределы применимости. Современные программные комплексы вычислительной гидродинамики. Общий подход к решению задач инженерных расчетов. Основные этапы работы в программном комплексе. Уметь: решать расчетные задачи по материалам модуля	Тестирование, расчетная задача
Модуль 2. Несжимаемые течения. Геометрические модели	Знать: Плотность сплошной среды, условия несжимаемости сплошной среды. Определение полной производной, закон сохранения массы в дифференциальном виде для элементарного жидкого объема сплошной среды. Дифференциальную форму закона сохранения импульса для элементарного жидкого объема сплошной среды. Тензор скоростей деформации. Несжимаемую форму системы уравнений Навье-Стокса. Корректную постановку граничных условий для них. Методы гидродинамического подобия. Общие требования к геометрическим моделям. Определение числа Рейнольдса. Уметь: решать расчетные задачи по материалам модуля	Тестирование, расчетная задача
Модуль 3. Теплоперенос. Построение расчетной сетки	Знать: Основные механизмы теплопереноса в сплошных средах. Теорему живых сил.	Тестирование, расчетная задача

	Основные понятия термодинамики (внутренняя энергия, температура, тепло, работа). Базовые законы термодинамики. Уравнение энергии для элементарного жидкого объема сплошной среды, различные формы. Виды граничных условий для уравнения энергии. Постановки классических задач о свободной тепловой конвекции, критерии подобия тепловых процессов. Числа Прандтля, Грасгофа, Рэлея, Нуссельта. Основные виды расчетных сеток. Преимущества и недостатки использования криволинейных блочно-структурированных расчетных сеток, применения прямоугольных расчетных сеток. Методику адаптации расчетных сеток. Уметь: решать расчетные задачи по материалам модуля	
Модуль 4. Сжимаемые течения. Дискретизация уравнений CFD	Знать: Определение сжимаемости сплошной среды. Полную систему уравнений газодинамики. Уравнения течения идеальной жидкости. Подходы к расчету состояния механического равновесия в сплошных средах. Теорему Бернулли. Общая энергетическая и механическая формулировка. Примеры применения. Следствие, основанное на предположении об адиабатичности течения. Отличительную особенность пространственных сверхзвуковых потоков. Особенности постановки задач сверх- и дозвуковой аэродинамики. Специальные граничные условия для минимизации влияния волн, отраженных от границ расчетной области. Метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечных объемов, их применение, реализация на примерах, особенности. Понятие сходимости численного метода, его применение. Уметь: решать расчетные задачи по материалам модуля	Тестирование, расчетная задача
Модуль 5. Турбулентные течения. Дискретизация уравнений CFD по времени	Знать: Определение турбулентного течения. Влияние турбулентности на характер течения сплошной среды. Качественные различия ламинарного и турбулентного течений.	Тестирование, расчетная задача

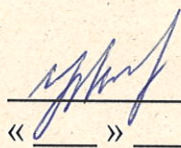
	Условия возникновения турбулентных течений. Энергетическая структура развитого турбулентного потока. Различия между подходами DNS, LES, RANS. Полуэмпирическая теория турбулентности. Гипотеза Буссинеска. Модель, основанная на теории Прандтля. Уравнение пограничного слоя. Закон стенки. Низкорейнольдсовый и высокорейнольдсовый подход. Преимущества и недостатки модели турбулентности семейства $k-\epsilon$. Преимущества и недостатки моделей SST и SA. Подходы к моделированию турбулентного теплопереноса. ГУ и НУ при расчетах турбулентных течений для выбранной полуэмпирической модели. Общие рекомендации к выбору модели турбулентности. Определение расчетного шага задачи. Уметь: решать расчетные задачи по материалам модуля.	
Итоговое тестирование	Обобщение знаний по темам курса. Применение полученных знаний.	Тестирование

7. Составители программы

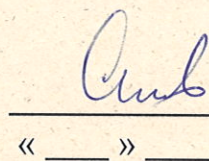
К. Э. Сорокин Старший преподаватель кафедры прикладной механики МФТИ, кандидат физико-математических наук

В. С. Каширин Старший преподаватель кафедры прикладной механики МФТИ

Согласовано
Ведущий специалист ОСОП

 Ж. И. Зубцова
« ____ » _____ 2022 г.

Согласовано
Зав. кафедрой прикладной механики

 С. С. Негодяев
« ____ » _____ 2022 г.