

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

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

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Численное решение задач аэро и гидродинамики в программных комплексах
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Фундаментальная и прикладная физика природных систем Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 30 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составили:

К.Э. Сорокин, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель

В.С. Каширин, старший преподаватель

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФАКТ 02.12.2024

## Аннотация

Дисциплина "Численное решение задач аэро и гидродинамики в программных комплексах" обучает технологии применения средств компьютерного моделирования на основе пакета прикладных программ FlowVision. Формирует базовые знания об общих принципах численного решения задач аэро- и гидродинамики в программных комплексах и освоение программного комплекса FlowVision для численного решения задач аэро- и гидродинамики. Данный курс ориентирован, в первую очередь, на студентов, дипломные работы или иные направления научной деятельности которых связаны решением задач аэро- и гидродинамики. В процессе изучения курса студентам предлагается на основании полученных знаний выполнить курсовую работу во FlowVision, связанную направлением их научной деятельности.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний об общих принципах численного решения задач аэро- и гидродинамики в программных комплексах и освоение программного комплекса FlowVision для численного решения задач аэро- и гидродинамики.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания об общих принципах численного решения задач аэро- и гидродинамики;
- научить студентов решать задачи аэро- и гидродинамики в программном комплексе FlowVision: самостоятельно формировать постановку задачи, проводить расчет, анализировать полученные результаты;
- выработать у студентов навыки, позволяющие быстро осваивать различные программные комплексы, предназначенные для моделирования движения жидкости и газа.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные понятия и принципы численного решения задач аэро- и гидродинамики в программных комплексах;
- наиболее распространенные математические модели, используемые для описания физических процессов при движении жидкости и газа;
- безразмерные комплексы, характеризующие физические процессы при движении жидкости и газа;
- порядки численных величин, характерные для различных задач аэро- и гидродинамики;
- общую классификацию современных программных комплексов.

уметь:

- создать проект для решения задачи в программном комплексе: создать расчетную область, физическую модель, начальные и граничные условия, расчетную сетку, шаг по времени;
- провести исследование сходимости по сетке, расчетной области, шагу по времени;
- провести обработку и анализ полученных результатов расчетов, при необходимости, сопоставить их с теоретическими или экспериментальными данными;
- оценить границы применимости той или иной математической модели в программном комплексе.

владеть:

- навыками самостоятельного освоения программных комплексов, предназначенных для моделирования движения жидкости и газа.

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

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

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение			2	25
2	Основные принципы численного решения задач			26	25
3	Решение задач, предполагающих связь нескольких программных комплексов			2	25
Итого часов				30	75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Введение

Вычислительная гидродинамика. Обзор программных комплексов для решения задач вычислительной гидродинамики. Программный комплекс FlowVision, основные области применения. Основные понятия и принципы работы во FlowVision: расчетная область, физическая модель, начальные и граничные условия, модификаторы, расчетная сетка, шаг по времени.

## 2. Основные принципы численного решения задач

Основные принципы численного решения задач на примере моделирования ламинарного движения жидкости.

Определение ламинарного течения движения жидкости. Круг задач. Уравнения Навье-Стокса для описания движения жидкости. Определяющие свойства веществ. Начальные и граничные условия. Модификаторы (объемные источники) для уравнений движения. Учет силы тяжести. Гидростатическое приближение. Теория подобия. П-теорема. Определяющие безразмерные параметры.

Дискретизация по пространству и времени. Метод конечных объемов. Реконструкция внутри ячейки.

Требования к геометрической модели, допустимые форматы представления, возможные ошибки в геометрической модели. Сходимость решения по расчетной области.

Этапы задания физической модели. Задание веществ, фаз и моделей. Общая классификация физических процессов. Выбор набора физических процессов в фазе.

Этапы задания параметров подобия. Загрузка модели, задание начальных и граничных условий, задание различных типов модификаторов.

Методы задания расчетной сетки. Основные принципы создания расчетной сетки. Расчетная сетка начального уровня. Генераторы неравномерной расчетной сетки. Виды адаптации. Требования к расчетной сетке. Сходимость по расчетной сетке. Применение полуаналитических моделей (модель зазора).

Задание шага по времени. Принципы выбора шага по времени. Сходимость по шагу по времени.

Варианты задания условий остановки расчета.

Основные способы отображения результатов.

Особенности постановки задач внешнего и внутреннего обтекания, одномерных задач, двумерных плоских и осесимметричных задач, трехмерных задач.

### Моделирование ламинарного движения газа

Определение ламинарного движения газа. Круг задач. Уравнения Навье-Стокса, уравнение переноса энергии и уравнение состояния для описания движения газа. Начальные и граничные условия. Определяющие свойства веществ. Число Маха. Критерии перехода от моделирования течения жидкости к моделированию течения газа. Изентропические формулы.

### Моделирование теплопереноса

Определение теплопереноса. Круг задач. Уравнения теплопереноса в газе, жидкости и твердом теле. Начальные и граничные условия. Определяющие свойства веществ. Модификаторы для уравнения теплопереноса. Диффузионный теплоперенос, вынужденная и свободная конвекции. Определяющие безразмерные комплексы: число Прандтля, число Нуссельта, число Грасгофа, число Релея.

### Моделирование турбулентных течений жидкости и газа

Определение турбулентного течения. Круг задач. Условия возникновения турбулентного течения. Число Рейнольдса. Каскадный перенос энергии в турбулентных течениях. Общая классификация моделей турбулентности: RANS, LES, DNS. Классические виды моделей турбулентности семейства RANS: семейство моделей k- $\epsilon$ , SST и SA модель турбулентности. Выбор моделей турбулентности. Граничные условия. Взаимодействие со стенкой. Логарифмический пограничный слой и вязкий подслой,  $y^+$ .

Уравнения турбулентного теплопереноса. Турбулентное число Прандтля.

### Моделирование массопереноса

Определение массопереноса. Круг задач. Понятие смеси веществ. Определение свойств смеси. Уравнения массопереноса. Односкоростное приближение. Число Шмидта и число Льюиса. Изменение уравнений движения, теплопереноса и уравнений переноса турбулентных параметров с учетом наличия нескольких веществ. Начальные и граничные условия. Реакции перехода одних веществ в другие (химические реакции, радиоактивный распад и пр.).

#### Моделирование горения

Определение горения. Круг задач. Условия появления устойчивого горения. Простейшая классификация типов горения: диффузионное горение, кинетическое горение, горение частично смешанной смеси. Модели горения с одной брутто-реакцией: модель Зельдовича, модель Аррениуса, модель Магнуссена, комбинированная модель Аррениуса-Магнуссена, модель EDS. Определение скорости горения в моделях горения с одной брутто-реакцией. Пределы горения. Изменение уравнений движения и теплопереноса с учетом горения. Начальные и граничные условия. Модификаторы для горения.

#### Моделирование излучения

Определение излучения. Круг задач. Модели теплового излучения. Простейшие модели излучения: диффузионная модель и модель оптически тонкого слоя. Уравнение переноса излучения в диффузионной модели. Начальные и граничные условия. Модификация уравнения теплопереноса при учете излучения.

#### Моделирование сопряженного теплообмена

Определение сопряженного теплообмена. Круг задач. Модификация граничных условий при задании условия сопряженного теплообмена.

#### Моделирование многофазных течений

Определение многофазных течений. Круг задач. Классификация многофазных течений. Классификация фазовых переходов. Метод VoF (Volume of fluid). Уравнение переноса фазы в методе VoF. Начальные и граничные условия.

#### Моделирование движения тел

Определение подвижных тел. Круг задач. Законы перемещения подвижных тел. Алгоритм моделирования движения тел. Ограничители движения тел. Пристеночные демпфирующие коэффициенты.

#### Моделирование вращения элементов расчетной области

Определение вращения элементов расчетной области. Круг задач. Модификация уравнений движения и граничных условий при учете вращения элементов расчетной области.

### 3. Решение задач, предполагающих связь нескольких программных комплексов

Связь с программным комплексом, предназначенным для моделирования деформации и нагрева конструкции (Abaqus). Круг задач. Алгоритм связанного решения задачи взаимодействия потока с деформируемой конструкцией в Abaqus и FlowVision. Пристенные демпфирующие коэффициенты.

Связь с программным комплексом, предназначенным для решения задач оптимизации (IOSO). Круг задач. Основные понятия оптимизации. Алгоритм связанного решения задач оптимизации задач аэро- и гидродинамики в программных комплексах FlowVision и IOSO.

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

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

## 6.Перечень рекомендуемой литературы

## Основная литература

1. Механика жидкости и газа [Текст] : учебник для вузов / Л. Г. Лойцянский ; Рек. М-вом образования РФ .— 7-е изд., испр. — М. : Дрофа, 2003 .— 840 с.
2. Теория пограничного слоя [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта ; под ред. Л. Г. Лойцянского .— 6-е изд. — М. : Наука, 1974 .— 711 с.
3. Применение пакета прикладных программ Flow Vision при изучении курсов механики жидкости и газа [Текст] : учеб. пособие для вузов / М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Каф. прикладной механики ; Б. К. Ткаченко [и др.] .— 2-е изд., испр. и перераб. — М. : МФТИ, 2015 .— 98 с.

## Дополнительная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 6 : Гидродинамика : учеб. пособие для вузов : рек. М-вом образования Рос. Федерации / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — 3-е изд., перераб. — М. : Физматлит, 1986, 1988, 2003, 2006 .— 736 с.
2. Механика сплошной среды [Текст] : в 2 т. : учебник для вузов : рек. М-вом образования Рос. Федерации. Т. 1 / Л. И. Седов ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова .— 6-е изд., стереотип. — СПб. : Лань, 2004 .— 528 с.

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

<http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха  
<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».  
<http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

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

программные комплексы (учебные версии) Flow Vision, Solid Works.

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

Данный курс ориентирован, в первую очередь, на студентов, дипломные работы или иные направления научной деятельности которых связаны решением задач аэро- и гидродинамики. В процессе изучения курса студентам предлагается на основании полученных знаний выполнить курсовую работу во FlowVision, связанную направлением их научной деятельности. Если же научная деятельность студента не предполагает решения задач аэро- и гидродинамики, то он может выбрать тему курсовой работы из предложенного преподавателем списка или самостоятельно сформулировать тему курсовой работы и согласовать ее с преподавателем.

По каждой теме проводится практическое занятие, на котором преподаватель подробно разбирает со студентами одну из задач по теме. Для более успешного освоения курса по каждой теме студенты получают домашнее задание.

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

Самостоятельная работа включает в себя:

- решение задач при выполнении курсовой работы и домашних заданий;
- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лабораторных работ, учебной и научной литературе).

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов домашних заданий, текущего состояния курсовой работы, а также индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение ставить и решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Фундаментальная и прикладная физика природных систем Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

К.Э. Сорокин, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель  
В.С. Каширин, старший преподаватель



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Численное решение задач аэро и гидродинамики в программных комплексах» обучающийся должен:

### знать:

- основные понятия и принципы численного решения задач аэро- и гидродинамики в программных комплексах;
- наиболее распространенные математические модели, используемые для описания физических процессов при движении жидкости и газа;
- безразмерные комплексы, характеризующие физические процессы при движении жидкости и газа;
- порядки численных величин, характерные для различных задач аэро- и гидродинамики;
- общую классификацию современных программных комплексов.

### уметь:

- создать проект для решения задачи в программном комплексе: создать расчетную область, физическую модель, начальные и граничные условия, расчетную сетку, шаг по времени;
- провести исследование сходимости по сетке, расчетной области, шагу по времени;
- провести обработку и анализ полученных результатов расчетов, при необходимости, сопоставить их с теоретическими или экспериментальными данными;
- оценить границы применимости той или иной математической модели в программном комплексе.

**владеть:**

- навыками самостоятельного освоения программных комплексов, предназначенных для моделирования движения жидкости и газа.

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

Текущий контроль осуществляется в форме домашних заданий по каждой теме.

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Аттестация по дисциплине «Численное решение задач аэро- и гидродинамики в программных комплексах» проводится в форме экзамена (устного). Текущий контроль проводится в форме курсовой работы. Желательно, чтобы тема курсовой работы была связана с дипломной магистерской работой или иным направлением научной деятельности студента. Если же направление научной деятельности студента не подразумевает решение задач аэро- и гидродинамики, то студент может выбрать в качестве темы курсовой работы одну и тем из списка возможных курсовых работ, который формируется преподавателем.

Текущий контроль осуществляется в форме домашних заданий по каждой теме.

#### **Домашнее задание по теме «Введение»**

1. Установить и настроить программный комплекс FlowVision на домашнем компьютере.
2. Самостоятельно повторить задачу Ламинарное течение в трубе из учебного пособия по FlowVision, разобрannую на семинаре (без подраздела Исследование сходимости по сетке).

#### **Домашнее задание по теме «Основные принципы численного решения задач на примере моделирования ламинарного движения жидкости»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Ламинарное течение в трубе, подраздел Исследование сходимости по сетке,
2. Ламинарное обтекание цилиндра, подраздел Исследование сходимости по расчетной области.
3. Течение в трубе с переменным сечением.
4. Течение в канале с использованием модели зазора.
5. Движение нефти в пласте.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование ламинарного движения газа»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Сверхзвуковое обтекание клина.
2. Гиперзвуковое обтекание сферы.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование теплообмена»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Теплопроводность в твердом теле.
2. Вынужденная конвекция.
3. Естественная конвекция, подраздел Влияние перепада температуры на характер течения.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование турбулентного движения жидкости и газа»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Турбулентное течение в трубе.

2. Турбулентное обтекание пластины.
3. Турбулентное обтекание параллелепипеда.
4. Дозвуковое обтекание крылового профиля.
5. Турбулентное обтекание уступа, подраздел Использование различных моделей турбулентности.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование массопереноса»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Перемешивание нереагирующих веществ.
2. Радиоактивный распад, подраздел Учет тепловыделения при радиоактивном распаде.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование горения»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Горение природного газа в воздухе, подраздел Использование различных моделей горения.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование излучения. Моделирование сопряженного теплообмена»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Теплообмен излучением в непрозрачной среде.
2. Сопряженный конвективный теплообмен.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование многофазных течений»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Свободная струя.
2. Вытеснение масла водой.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование движения тел»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Трансзвуковое обтекание крылового профиля.
2. Тело, плавающее на поверхности жидкости.
3. Лодка, плывущая по воде.
4. Винтовой компрессор.

#### **Домашнее задание по теме «Моделирование вращения элементов расчетной области»**

Выполнить следующие задачи из учебного пособия по FlowVision:

1. Вращающийся бак, частично заполненный жидкостью.

#### **Примеры тем курсовых работ**

1. Обтекание цилиндра:
  - a. Обтекание цилиндра при  $0.5 < Re < 20$
  - b. Обтекание цилиндра при  $20 < Re < 80$

2. Естественная конвекция между двумя изотермическими поверхностями:
  - a. Естественная конвекция между двумя горизонтальными пластинами при  $50 < Ra < 2000$  (неустойчивость Релея-Бенара).
  - b. Естественная конвекция между двумя вертикальными пластинами при  $50 < Ra < 2000$ .
  - c. Естественная конвекция между двумя соосными цилиндрами при  $50 < Ra < 2000$ .
  - d. Естественная конвекция между двумя шарами при  $50 < Ra < 2000$ .
3. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.
4. Конвекция воздуха в комнате:
  - a. Конвекция с учетом влияния окна и батареи при различной температуре батареи.
  - b. Конвекция с учетом влияния окна и батареи при различной температуре окна.
  - c. Конвекция с учетом влияния окна и кондиционера при различной температуре окна.
  - d. Конвекция с учетом влияния окна и кондиционера при различной мощности кондиционера.
5. Конвекция воздуха между оконными рамами.
6. Конвекция воздуха около секции батареи.

Примеры теоретических вопросов к экзамену:

1. Теплообмен излучением. Используемые уравнения и граничные условия.
2. Ламинарное движение жидкости. Свойства веществ. Используемые уравнения и граничные условия. Объемные источники (модификаторы). Определяющие безразмерные параметры. Применение полуаналитических моделей.
3. Ламинарное движение газа. Свойства веществ. Используемые уравнения и граничные условия. Определяющие безразмерные параметры.
4. Турбулентное движение жидкости и газа. Используемые уравнения и граничные условия. Выбор моделей турбулентности. Определяющие безразмерные параметры.
5. Теплоперенос в жидкости, газе и твердом теле. Свойства веществ. Используемые уравнения и граничные условия. Объемные источники (модификаторы). Определяющие безразмерные параметры.
6. Типы задач: задачи внешнего и внутреннего обтекания, одномерные, двумерные плоские и осесимметричные течения, трехмерные течения. Особенности постановки граничных условий.
7. Массоперенос. Течение смешивающихся веществ. Химические реакции. Используемые уравнения и граничные условия. Определяющие безразмерные параметры.
8. Задачи со свободной поверхностью. Однофазные течения с учетом границы раздела. Многофазные течения. Используемые уравнения и граничные условия.
9. Горение. Используемые уравнения и граничные условия. Выбор моделей горения. Модификаторы. Ограничители для горения.
10. Основные понятия и принципы работы: расчетная область, физическая модель, начальные и граничные условия, модификаторы, расчетная сетка, шаг по времени. Что такое сходимость по сетке, расчетной области, шагу по времени.

## Примеры экзаменационных билетов, используемых для проведения экзамена:

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. **Теория:** Основные понятия и принципы работы: расчетная область, физическая модель, начальные и граничные условия, модификаторы, расчетная сетка, шаг по времени. Что такое сходимости по сетке, расчетной области, шагу по времени.
2. **Практика:** Задание локальных систем координат и вращения.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. **Теория:** Типы задач: задачи внешнего и внутреннего обтекания, одномерные, двумерные плоские и осесимметричные течения, трехмерные течения. Особенности расстановки граничных условий.
2. **Практика:** Этапы запуска на расчет. Авторизация на Солвер-Агенте. Запуск Солвера. Проведение расчета.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

1. **Теория:** Ламинарное движение жидкости. Свойства веществ. Используемые уравнения и граничные условия. Объемные источники (модификаторы). Определяющие безразмерные параметры. Применение полуаналитических моделей.
2. **Практика:** Этапы задания связей между подобластями.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

1. **Теория:** Ламинарное движение газа. Свойства веществ. Используемые уравнения и граничные условия. Определяющие безразмерные параметры.
2. **Практика:** Этапы задания параметров подобласти. Загрузка модели, задание начальных и граничных условий, задание различных типов модификаторов.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

1. **Теория:** Теплоперенос в жидкости, газе и твердом теле. Свойства веществ. Используемые уравнения и граничные условия. Объемные источники (модификаторы). Определяющие безразмерные параметры. Что такое диффузионный теплоперенос, вынужденная и естественная конвекция?
2. **Практика:** Геометрическая модель расчетной области. Основные общие требования. Допустимые форматы представления. Возможные ошибки в геометрической модели.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

1. **Теория:** Турбулентное движение жидкости и газа. Используемые уравнения и граничные условия. Выбор моделей турбулентности. Определяющие безразмерные параметры.
2. **Практика:** Этапы задания физической модели. Задание Веществ, Фаз и Моделей. Выбор набора физических процессов в фазе.

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

1. **Теория:** Массоперенос. Течение смешивающихся веществ. Химические реакции. Используемые уравнения и граничные условия. Определяющие безразмерные параметры.
2. **Практика:** Задание шага по времени. Принципы выбора шага по времени.

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

1. **Теория:** Задачи со свободной поверхностью. Однофазные течения с учетом границы раздела. Многофазные течения. Используемые уравнения и граничные условия.
2. **Практика:** Отображение результатов. Физические и пользовательские переменные. Виды переменных. Создание и настройка параметров объектов. Создание и настройка параметров слоев. Виды слоев. Создание видео из картинок.

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9

1. **Теория:** Теплообмен излучением. Используемые уравнения и граничные условия.
2. **Практика:** Методы задания расчетной сетки. Основные принципы создания расчетной сетки. Расчетная сетка начального уровня. Генераторы неравномерной расчетной сетки. Виды адаптации. Требования к расчетной сетке. Исследование сходимости по сетке.

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10

1. **Теория:** Горение. Используемые уравнения и граничные условия. Выбор моделей горения. Модификаторы. Ограничители для горения.
2. **Практика:** Создание подвижного тела. Способы получения геометрической модели тела. Задание массовых характеристик и закона движения.

### 4. Критерии оценивания

*оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при выполнении курсовой работы, домашних заданий, ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины;*

*оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при выполнении курсовой работы, домашних заданий, ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины;*

*оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении курсовой работы, домашних заданий, ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины;*

*оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, демонстрирует умение*

*применять полученные знания на практике при выполнении курсовой работы и домашних заданий, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;*

*оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении курсовой работы и домашних заданий, но допускает в ответе или в решении задач много неточностей;*

*оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении курсовой работы и домашних заданий, не допускает в ответе грубых ошибок;*

*оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, если во время ответа экзаменационного билета, при выполнении курсовой работы и домашних заданий он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;*

*оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, если во время ответа экзаменационного билета, при выполнении курсовой работы и домашних заданий он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;*

*оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту, если во время ответа экзаменационного билета, он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.*

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

Порядок сдачи курсовой:

Перед сдачей курсовой работы студент должен заблаговременно передать преподавателю проекты, сделанные в рамках выполнения курсовой работы для того, чтобы преподаватель проверил корректность заданных проектов и полученных результатов. Если проекты заданы корректно и результаты адекватны, то студент допускается до сдачи курсовой работы.

Демонстрация результатов курсовой работы происходит в виде презентации. При сдаче курсовой работы студенту предоставляется 10 минут на изложение постановки задачи и полученных результатов и 5 минут на ответы на дополнительные вопросы по курсовой. Вопросы имеют право задавать как преподаватель курса, так и студенты, посещающие данный курс.

Порядок проведения устного экзамена:

К устному экзамену допускаются только студенты, сдавшие курсовые работы.



При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций, семинаров и любой другой литературой.

Во время проведения экзамена при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины он не может пользоваться конспектами лекций и семинаров и любой другой литературой.