

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

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Заведующий кафедрой**

**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Газодинамика высокоскоростных летательных аппаратов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Геокосмические науки и технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра прикладной механики
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 75 всего, в том числе:

лекции: 75 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составили:

Д.Н. Минюшкин

В.В. Курашов

Программа обсуждена на заседании кафедры прикладной механики 18.03.2020

## Аннотация

Дисциплина "Газодинамика высокоскоростных летательных аппаратов" дает студентам представление о течениях газа с высокими скоростями, демонстрирует особенности высокоскоростной газовой динамики.

Дисциплина помогает студентам овладевать численными методами для решения гиперболических, параболических и эллиптических уравнений; современными инструментами для обработки численных данных.

Курс рассчитан на студентов математико-механических, физических факультетов университетов, технических звуков, специализирующихся в области гидрогазодинамики.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- обеспечить освоение студентами основных представлений о течениях газа с высокими скоростями.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания в области газовой динамики;
- научить студентов на примерах и задачах строить газодинамические картины течений, самостоятельно анализировать полученные результаты;
- продемонстрировать особенности высокоскоростной газовой динамики.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной механики;
- порядки численных величин, характерные для газодинамики высокоскоростных летательных аппаратов;
- современные проблемы механики сплошных сред.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

#### 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	Расчёт несжимаемого течения, задача теплопроводности	14			14
2	Расчёт течений сжимаемой жидкости	14			14
3	Адаптация и движение расчётных сеток	11			11
4	Сопряжённые расчёты	6			6
5	Работа с суперкомпьютером. Основы C++ и Python	12			12
6	Метод контрольного объема. Возможности OpenFOAM	12			12
7	Готовые солверы OpenFOAM	6			6
Итого часов		75			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

Семестр: 6 (Весенний)

###### 1. Расчёт несжимаемого течения, задача теплопроводности

Построение одномерных, двумерных и трёхмерных расчётных сеток. Структурированные и неструктурированные расчётные сетки. Сеточные генераторы blockMesh, cartesianMesh, gmsh, salome. Библиотеки интерполяции данных. Метод контрольного объема в OpenFOAM. Аппроксимация производной по времени и источниковых членов. Аппроксимация вязких членов. Явная и неявная схемы. Солверы для решения несжимаемых течений (Pressure based method). SIMPLE алгоритм. Расчёт течения в трубе, расчёт прогрева в трехмерной постановке. Граничные условия первого, второго и третьего рода. Отображение и анализ результатов расчёта, paraview.

## 2. Расчёт течений сжимаемой жидкости

Расчёты на основе стандартного решателя rhoCentralFoam. Одномерные течения — задача о распаде разрыва, сравнение с аналитическим решением.

Плоское течение. Течение на уступе, отражение ударных волн.

Двумерные осесимметричные течения. Построение сеток, расчёт течения в сопле, расчёт затопленной струи.

Расчёт обтекания сферы в трёхмерной постановке при разных значениях числа Рейнольдса на неструктурированной сетке. Определение аэродинамических характеристик. Отход ударной волны.

Расчёты на неструктурированных сетках. Сильный взрыв.

## 3. Адаптация и движение расчётных сеток

Адаптация расчётных сеток к решению. Выделение, разрешение ударных волн и контактных разрывов.

Квазистационарные и нестационарные расчёты на подвижных сетках. Библиотека для работы с динамическими сетками. Адаптивная сетка (разбиение ячеек). Перекрывающиеся сетки (Overset).

Обзор методов слежения за движением разрывов на неподвижной сетке — методы VoF и Level Set Method,

## 4. Сопряжённые расчёты

Понятие сопряжённой задачи, интерполяция данных между расчётными сетками.

Организация совместной работы нескольких решателей, проблема обмена данными между решателями.

## Семестр: 7 (Осенний)

## 5. Работа с суперкомпьютером. Основы C++ и Python

Основы C++. Компиляция программ с использованием библиотеки OpenFOAM (wmake). Первая программа "Hello world!".

Ввод и вывод OpenFOAM (stream). Контейнеры (dictionary, List, dynamicList).

Библиотека Time. Стандартные словари для взаимодействия с программой. Компиляция динамических библиотек (wmake libso).

Библиотеки интерполяции данных. Стандартная атмосфера. Модуль траектории.

CFD идеология. Формат сетки polyMesh. Установка программы визуализации ParaView. Python скрипт для построения простейших сеток в Salome.

Работа с полями в OpenFOAM. Метод Ньютона. Визуализация данных в ParaView. Верификация и валидация программ.

## 6. Метод контрольного объема. Возможности OpenFOAM

Метод контрольного объема в OpenFOAM. Аппроксимация производной по времени и источниковых членов.

Аппроксимация вязких членов. Решение уравнения Лапласа на одномерной сетке. Явная и неявная схемы.

Решение уравнения Лапласа на двумерной сетке (finite area method). Прогрев тонкостенной конструкции.

Решение уравнения Лапласа на трехмерной сетке. Качество сетки (неортогональность, скошенность, неравномерность). Коррекция вязких членов с учетом качества сетки.

Библиотека для параллельной реализации программ Message Passing Interface (MPI). Использование MPI в OpenFOAM. Параллельное вычисление на кластере.

Аппроксимация конвективных членов с первым и вторым порядком по пространству. Решение уравнения переноса на одномерной сетке. Явная и неявная схемы.

Решение уравнения переноса на двумерной сетке (finite area method). Метод эффективной длины.

## 7. Готовые солверы OpenFOAM

Обзор физических библиотек и готовых солверов OpenFOAM

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

Необходимое оборудование для чтения лекций: учебная аудитория, доска, экран.

## 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. Механика сплошной среды [Текст]: в 2 т. : учебник для вузов / Л.И.Седов. — 5-е изд., испр. — М : Наука, 1994. — Т.2. - 1994. - 560 с.
3. Течение реальных газов с большими скоростями [Текст], [монография]/В. В. Лунев, -М., Физматлит, 2007
4. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. П. Райзер. — М. : Интеллект, 2011. — 432 с.

Литература для самостоятельного изучения

1. Liseur M., Turbulence in Fluids, 4th ed. Springer, 2007.

### 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.
- Литература для самостоятельного изучения

1. Pope S.B. Turbulent flows. Cambridge university press, 2000
2. Cercignani C. Rarefied Gas Dynamics Cambridge university press, 2000
3. Слѣзкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости М: ГИТТЛ, 1955

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

1. <http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <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)

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

Успешное освоение курса «Газодинамика высокоскоростных летательных аппаратов» требует большой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях.

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

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические 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>	Геокосмические науки и технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра прикладной механики
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

7 (осенний) - Экзамен

**Разработчики:**

Д.Н. Минюшкин

В.В. Курашов

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Газодинамика высокоскоростных летательных аппаратов» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной механики;
- порядки численных величин, характерные для газодинамики высокоскоростных летательных аппаратов;
- современные проблемы механики сплошных сред.

### уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

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

Текущий контроль осуществляется на семинарских занятиях во время решения задач, ответов на контрольные вопросы.

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

Примерный перечень вопросов к дифференцированному зачету в 6 семестре:

- 1). Понятие сплошной среды . Уравнение неразрывности. Уравнение количества движения (импульсов) в напряжениях. Уравнение энергии.
- 2). Реологическая модель ньютоновских жидкостей и газов.
- 3) Уравнения Эйлера — пределы применимости. Уравнения Навье-Стокса.
- 4) Уравнения состояния газа для смеси газов.
- 5) Турбулентность —уравнения Рейнольдса. Алгебраические и дифференциальные модели турбулентности.
  
- 6) Уравнения пограничного слоя. Пограничный слой на пластине, задача Блаузиса.
- 7) Ударные волны, соотношения Гюгонио.
- 8) Понятие о тепловом барьере. Основные особенности гиреозвуковых течений.

Примеры билетов к экзамену в 7 - м семестре:

Билет 1

1. Аппроксимация вязких членов.
2. Решение уравнения Лапласа на одномерной сетке.

Билет 2.

- 1.Решение уравнения Лапласа на двумерной сетке (finite area method).
2. Прогрев тонкостенной конструкции.

Билет 3.

1. Решение уравнения Лапласа на трехмерной сетке.
2. Качество сетки (неортогональность, скошенность, неравномерность).

#### Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета 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 по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета 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 по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, 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 проведения контрольных работ/тестов:

Во время проведения контрольных работ/тестов обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, калькуляторами.

Порядок проведения дифференцированного зачета:

Дифференцированный зачет по дисциплине проводится по итогам текущей успеваемости: по результатам контрольных, самостоятельных работ/тестов по каждой теме. Также дифференцированный зачет проводится путем организации специального опроса в устной форме, если результатом выполнения контрольной работы является оценка неудовлетворительно или оценка отсутствует по уважительной причине.

Порядок проведения устного экзамена:

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.