

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы газодинамики
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: П.Р. Левашов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высокотемпературных процессов 29.05.2020

## Аннотация

Курс «Основы газодинамики» предусматривает изучение основных законов газодинамики невязкого и вязкого газа, различных явлений, описываемых этими законами и применений этих законов для решения практических задач.

Задачи курса:

- получение представлений о круге задач, решаемых в рамках механики сплошной среды;
- вывод и изучение основных уравнений газовой динамики невязкого и вязкого газа;
- изучение основных автомодельных решений уравнений газовой динамики, включая волну Римана, прямой и косой скачок;
- изучение дозвуковых и сверхзвуковых одномерных и плоских течений;
- получение представлений о численных методах решения уравнений газовой динамики;
- получение представлений о применении законов гидродинамики для решения практических задач.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

законы сохранения массы, импульса и энергии в газодинамике в дифференциальной и интегральной формах;  
уравнения Гюгонио для прямого скачка;  
инварианты Римана;  
решение задачи о распаде произвольного разрыва;  
уравнение Навье-Стокса;  
кинетическое уравнение Больцмана.

Уметь:

выводить уравнения газовой динамики невязкого и вязкого газа и преобразовывать их к виду законов сохранения;  
выводить уравнения Гюгонио для прямого скачка и оценивать параметры вещества за фронтом ударной волны;  
выводить инварианты Римана и уметь ими пользоваться для решения задач методом характеристик;  
качественно представлять себе поведение различных характеристик (плотности, давления, скорости) в волне Римана и ударной волне;  
находить качественное решение задачи о распаде произвольного разрыва;  
изображать детонационную ударную адиабату и точку Чепмена-Жуге;  
качественно изображать двумерные стационарные течения.

Владеть:

навыками решения автомодельных задач газовой динамики;  
навыками качественного изображения характеристик при изоэнтропическом течении;  
практикой качественного решения задачи о распаде разрыва для качественного анализа ударно-волновых экспериментов;  
практикой решения одномерных газодинамических задач с помощью Web-интерфейса базы данных ударно-волновых экспериментов.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Вывод уравнений газовой динамики
2. Вязкость и теплопроводность
3. Гиперболические системы квазилинейных уравнений
4. Двумерное стационарное течение
5. Детонация в газах
6. Задача о распаде произвольного разрыва

7. Кинетическое уравнение и его связь с гидродинамикой
8. Неустойчивости в течениях газов
9. Плоское изоэнтропическое течение
10. Структура фронта ударной волны
11. Ударные волны и уравнения Гюгонио
12. Центрированная волна разрежения

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение основных законов газодинамики невязкого и вязкого газа, различных явлений, описываемых этими законами и применений этих законов для решения практических задач.

### Задачи дисциплины

- получение представлений о круге задач, решаемых в рамках механики сплошной среды;
- вывод и изучение основных уравнений газовой динамики невязкого и вязкого газа;
- изучение основных автомодельных решений уравнений газовой динамики, включая волну Римана, прямой и косой скачок;
- изучение дозвуковых и сверхзвуковых одномерных и плоских течений;
- получение представлений о численных методах решения уравнений газовой динамики;
- получение представлений о применении законов гидродинамики для решения практических задач.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- законы сохранения массы, импульса и энергии в газодинамике в дифференциальной и интегральной формах;
- уравнения Гюгонио для прямого скачка;
- инварианты Римана;
- решение задачи о распаде произвольного разрыва;
- уравнение Навье-Стокса;
- кинетическое уравнение Больцмана.

уметь:

- выводить уравнения газовой динамики невязкого и вязкого газа и преобразовывать их к виду законов сохранения;
- выводить уравнения Гюгонио для прямого скачка и оценивать параметры вещества за фронтом ударной волны;
- выводить инварианты Римана и уметь ими пользоваться для решения задач методом характеристик;
- качественно представлять себе поведение различных характеристик (плотности, давления, скорости) в волне Римана и ударной волне;
- находить качественное решение задачи о распаде произвольного разрыва;
- изображать детонационную ударную адиабату и точку Чепмена-Жуге;
- качественно изображать двумерные стационарные течения.

владеть:

навыками решения автомоделных задач газовой динамики;  
 навыками качественного изображения характеристик при изоэнтропическом течении;  
 практикой качественного решения задачи о распаде разрыва для качественного анализа ударно-волновых экспериментов;  
 практикой решения одномерных газодинамических задач с помощью Web-интерфейса базы данных ударно-волновых экспериментов.

#### 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	Вывод уравнений газовой динамики	2			4
2	Вязкость и теплопроводность	2			10
3	Гиперболические системы квазилинейных уравнений	2			8
4	Двумерное стационарное течение	2			10
5	Детонация в газах	2			1
6	Задача о распаде произвольного разрыва	4			8
7	Кинетическое уравнение и его связь с гидродинамикой	2			1
8	Неустойчивости в течениях газов	2			10
9	Плоское изоэнтропическое течение	2			1
10	Структура фронта ударной волны	4			5
11	Ударные волны и уравнения Гюгонио	3			1
12	Центрированная волна разрежения	3			1
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

###### 1. Вывод уравнений газовой динамики

Математическая модель газовой динамики. Характеристики сплошной среды, связь с термодинамикой. Уравнения газовой динамики. Линеаризация уравнений газовой динамики, звуковые волны.

###### 2. Вязкость и теплопроводность

Вязкость и теплопроводность. Тензор вязких напряжений, поток тепла. Закон Фурье. Критерии необходимости учета вязкости и теплопроводности. Уравнение Навье-Стокса. Течение по трубе.

### 3. Гиперболические системы квазилинейных уравнений

Гиперболические системы квазилинейных уравнений. Собственные векторы. Система законов сохранения. Метод Годунова решения систем квазилинейных гиперболических уравнений.

### 4. Двумерное стационарное течение

Двумерное стационарное течение. Косой скачок уплотнения. Ударная поляра. Течение Прандтля-Майера.

### 5. Детонация в газах

Детонация. Детонационная адиабата. Точка Чепмена-Жуге. Термодинамические параметры за фронтом сильной детонационной волны в точке Чепмена-Жуге.

### 6. Задача о распаде произвольного разрыва

Задача о распаде произвольного разрыва. Качественный анализ возможных комбинаций автомодельных решений. Ударно-волновые эксперименты в конденсированных веществах. Методы торможения и отражения, их анализ с помощью решения задачи о распаде разрыва.

### 7. Кинетическое уравнение и его связь с гидродинамикой

Кинетическое уравнение Больцмана. Принцип детального равновесия. Интеграл столкновений. Связь кинетического уравнения с уравнениями гидродинамики. Кинетические коэффициенты.

### 8. Неустойчивости в течениях газов

Устойчивость стационарного движения жидкости. Понятие о турбулентности. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

### 9. Плоское изоэнтропическое течение

Плоское изоэнтропическое течение, характеристики, инварианты Римана.

### 10. Структура фронта ударной волны

Структура фронта ударной волны в вязкой или теплопроводной среде. Ширина фронта. Изотермический скачок.

### 11. Ударные волны и уравнения Гюгонио

Ударные волны. Соотношения на прямом скачке, уравнение Гюгонио. Ударная адиабата. Ударные волны в газе с постоянной теплоемкостью. Выражения для термодинамических величин за фронтом ударной волны. Предельная степень сжатия.

### 12. Центрированная волна разрежения

Волна разрежения, центрированная волна разрежения. Выражения для термодинамических функций в волне разрежения для газа с постоянной теплоемкостью. Истечение в вакуум.

## **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. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2003. 736 с.
2. Куропатенко В.Ф. Модели механики сплошных сред. Челябинск: Челяб. гос. ун-т, 2007. 303 с.
3. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит. Изд. 3., 656 с., 2008.

### **Дополнительная литература**

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
2. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. 207 с.

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

Не используются

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

не предусмотрены.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	П.Р. Левашов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы газодинамики» обучающийся должен:

### знать:

законы сохранения массы, импульса и энергии в газодинамике в дифференциальной и интегральной формах;  
уравнения Гюгонио для прямого скачка;  
инварианты Римана;  
решение задачи о распаде произвольного разрыва;  
уравнение Навье-Стокса;  
кинетическое уравнение Больцмана.

### уметь:

выводить уравнения газовой динамики невязкого и вязкого газа и преобразовывать их к виду законов сохранения;  
выводить уравнения Гюгонио для прямого скачка и оценивать параметры вещества за фронтом ударной волны;  
выводить инварианты Римана и уметь ими пользоваться для решения задач методом характеристик;  
качественно представлять себе поведение различных характеристик (плотности, давления, скорости) в волне Римана и ударной волне;  
находить качественное решение задачи о распаде произвольного разрыва;  
изображать детонационную ударную адиабату и точку Чепмена-Жуге;  
качественно изображать двумерные стационарные течения.

### владеть:

навыками решения автомодельных задач газовой динамики;  
навыками качественного изображения характеристик при изоэнтропическом течении;  
практикой качественного решения задачи о распаде разрыва для качественного анализа ударно-волновых экспериментов;  
практикой решения одномерных газодинамических задач с помощью Web-интерфейса базы данных ударно-волновых экспериментов.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Вывод уравнений Гюгонио на фронте прямой ударной волны из законов сохранения.
2. Термодинамические функции газа с постоянной теплоемкостью за фронтом ударной волны.
3. Предельная степень сжатия вещества в ударной волне, влияние различных процессов на увеличение максимальной степени сжатия в ударной волне.
4. Вывод уравнений динамики невязкого газа.
5. Дивергентная форма уравнений динамики невязкого газа.



6. Вязкость и теплопроводность в газовой динамике. Вклад в уравнения импульса и энергии. Уравнение Навье-Стокса.
7. Изоэнтропическое течение газа. Характеристическая форма уравнений газовой динамики.
8. Течение вязкого газа. Течение по трубе, формула Пуазейля.
9. Кинетическое уравнение Больцмана и интеграл столкновений.
10. Вывод уравнений газовой динамики из кинетического уравнения.
11. Центрированная волна разрежения. Выражения для термодинамических функций в волне разрежения. Истечение в вакуум.
12. Задача о распаде произвольного разрыва, варианты решения в зависимости от начальных условий.
13. Ударно-волновые эксперименты, их интерпретация с помощью задачи о распаде разрыва.
14. Метод Годунова численного решения уравнений газовой динамики.
15. Детонация в газах и точка Чепмена-Жуге.
16. Выражения для термодинамических функций для продуктов детонации.
17. Структура фронта ударной волны в вязкой и теплопроводной среде. Ширина фронта, изотермический скачок.
18. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.
19. Плоское изоэнтропическое течение. Течение Прандтля-Майера.
20. Сверхзвуковые течения. Сопло Лавала.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 бала - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 бал - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на дифференцированном зачете не должен превышать одного астрономического часа.