

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Динамика разреженного газа
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии
	Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
	кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.Л. Горелов, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 04.03.2025

## Аннотация

Динамика разреженных газов изучает явления, имеющие место при произвольном отношении длины пробега (времени между столкновениями) молекул к характерному размеру (времени) явления. Изучаемые явления могут быть сколь угодно далеки от равновесных. Исследования таких явлений требуют в общем случае учета молекулярной структуры газа, кинетического описания, применения уравнения Больцмана. В круг задач динамики разреженных газов входят, например, задачи об обтекании летательных аппаратов, движущихся на больших высотах, о движении газов в вакуумных аппаратах, ультразвуковых колебаниях в газе, структуре ударных волн, неравновесных течениях и т.д.

В настоящем курсе рассматриваются, главным образом, задачи, требующие кинетического описания для решения которых неприменимы методы газовой динамики, в частности, задачи высотной аэродинамики. Эти задачи основаны на методах решения уравнения Больцмана. Для решения таких задач широко применяются методы Монте-Карло, приближенные полуэмпирические методы. Целью курса является изучение представлений, понятий и методов исследования динамики разреженного газа, позволяющих определять аэродинамические характеристики летательных аппаратов и их частей в верхних слоях атмосферы, позволяющих исследовать другие характеристики обтекания этих аппаратов, а также характеристики течений около микрочастиц и в микроустройствах.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение представлений, понятий и методов исследования динамики разреженного газа, позволяющих определять аэродинамические характеристики летательных аппаратов и их частей в верхних слоях атмосферы, позволяющих исследовать другие характеристики обтекания этих аппаратов, а также характеристики течений около микрочастиц и в микроустройствах.

### Задачи дисциплины

- раскрытие физической природы и закономерностей возникновения и изменения силового и теплового воздействия атмосферы на аппараты и их части в условиях, когда отношение средней длины свободного пробега молекул к характерному размеру летательного аппарата или его частей является малым;
- формирование представлений об особенностях силового и теплового воздействия на космический аппарат в верхних слоях атмосферы, когда средняя длина свободного пробега молекул много больше характерного размера аппарата;
- ознакомление с параметрами подобия и основными закономерностями силового и теплового воздействия атмосферы на летательные аппараты и их элементы в переходном режиме обтекания (переходном от режима сплошной среды к свободномолекулярному режиму), когда средняя длина свободного пробега молекул сравнима с характерным размером аппарата;
- формирование представлений об особенностях течения газа около микрочастиц и в микроустройствах, когда эффекты разреженности газа становятся значительными;
- ознакомление с численными и экспериментальными методами исследования динамики разреженного газа.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость

ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории аэрогидромеханики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов аэрогидромеханики;
- современные проблемы аэрогидромеханики;
- основные понятия динамики разреженных газов и закономерности силового и теплового воздействия верхних слоев атмосферы на летательные аппараты;
- теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования течений разреженного газа.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов;
- проводить оценки величин силового и теплового воздействия разреженного газа на части летательных аппаратов и другие тела при различных режимах обтекания;
- уметь проводить оценки параметров медленных течений разреженного газа около малых аэрозольных частиц и в микроустройствах.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- культурой постановки и моделирования физических задач, алгоритмами определения методов исследования, адекватных возникающим задачам;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами течений разреженного 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	Аэрофизические характеристики летательных аппаратов при их движении в верхних слоях атмосферы. Гиперзвуковые течения в переходном режиме.	3			3
2	Динамика разреженного газа и кинетическая теория.	3			3
3	Медленные течения разреженного газа. Течения в свободно-молекулярном, близком к равновесному и переходном режимах.	3			2
4	Свободномолекулярный гиперзвуковой режим обтекания.	3			3
5	Течения в режиме первых межмолекулярных столкновений.	3			3
6	Течения слабо разреженного газа.	3			4
7	Характеристики равновесного газа. Основные представления кинетической теории газов. Уравнение Больцмана. Физические свойства верхней атмосферы Земли и космической среды.	4			4
8	Численные методы исследования течений разреженного газа.	4			4
9	Экспериментальные методы исследования течений разреженного газа.	4			4
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

1. Аэрофизические характеристики летательных аппаратов при их движении в верхних слоях атмосферы. Гиперзвуковые течения в переходном режиме.

Основные особенности изменения скорости, перегрузок и теплового потока к аппарату на траектории спуска. Влияние подъемной силы.

Переходный режим обтекания космических и аэрокосмических аппаратов при гиперзвуковом движении. Интегральный и локальный приближённые методы расчета аэродинамических характеристик. Суммарные (сопротивление, подъёмная сила) и локальные (распределения давления, трения и теплового потока) характеристики при обтекании затупленных тел. Основные свойства полей течения (полей температуры) в переходном режиме течения.

Особенности зависимости сопротивления тонких тел от числа Кнудсена. Особенности зависимости коэффициента момента тангажа от числа Кнудсена (на примере плоской пластины).

## 2. Динамика разреженного газа и кинетическая теория.

Разложения по малому параметру при малом или большом значении числа Кнудсена (метод Чепмена-Энскога и метод первых столкновений).

Метод линеаризации уравнения Больцмана и решение линейного уравнения.

Уравнение Больцмана и термодинамика необратимых процессов.

## 3. Медленные течения разреженного газа. Течения в свободно-молекулярном, близком к равновесному и переходном режимах.

Обтекание мелких частиц. Сопротивление в различных режимах течения. Скорость оседания. Время и расстояние выравнивания скоростей частицы и газа.

Термофорез аэрозольных частиц при движении в температурно-неоднородной среде. Фотофорез. Диффузофорез.

Течение газа в коротких и длинных каналах; расход газа. Термомолекулярная разность давлений.

Одномерные течения: теплопередача между параллельными пластинами, плоские сдвиговые течения. Течения сквозь проницаемые мембраны. Скачки температуры и давления около плоских проницаемых мембран.

Пределы применимости уравнений Навье-Стокса. Течения газа как сплошной среды, не описываемые уравнениями Навье-Стокса: медленные течения при сильной теплопередаче.

Процессы переноса массы и тепла к частицам как источник сил взаимодействия

## 4. Свободномолекулярный гиперзвуковой режим обтекания.

Давление и трение на поверхности как передача ей импульса молекул.

Давление и трение на пластине, расположенной под углом атаки к потоку газа; давление и трение на пластине, расположенной под нулевым углом атаки. Пределы применимости гиперзвукового приближения для передачи импульсов падающих молекул элементам поверхности.

Взаимодействие молекул газа с поверхностью. Вклад в давление и трение импульса молекул, отраженных от поверхности; давление равновесно отраженных молекул. Математические модели взаимодействия молекул с поверхностью; диффузное отражение, коэффициенты аккомодации. Лабораторные и натурные методы определения коэффициентов передачи импульса. Модели функции распределения отраженных молекул.

Определение коэффициентов сопротивления и подъемной силы космического аппарата. Выпуклые и вогнутые поверхности. Интерференция частей космических аппаратов. Сильная и слабая интерференция. Гиперзвуковое приближение затенения. Точные решения при диффузном отражении.

Газодинамические понятия в свободномолекулярных течениях.

Эффузия газа через малое отверстие в вакуум. Расход газа при эффузии, распределение потока массы по углу истечения.

Смысл предельного по числу Кнудсена перехода во внутренних и во внешних задачах. Примеры неравновесных функций распределения во внешних и внутренних свободномолекулярных задачах.

Поток энергии на элемент поверхности в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке. Энергия рекомбинации. Температура поверхности спутника на солнечной и теневой стороне Земли в адиабатическом приближении.

## 5. Течения в режиме первых межмолекулярных столкновений.

Молекулы, потенциалы их взаимодействия (степенные потенциалы, потенциалы Леннарда-Джонса и Борна-Майера), зависимость сечения столкновения молекул от скорости их относительного движения для степенной модели потенциала взаимодействия молекул.

Понятие о разных длинах свободного пробега молекул: зависимость от системы отсчёта и от типа молекул. Примеры для двух моделей молекул: упругих сферических молекул и максвелловских молекул.

Сопротивление затупленных тел в режиме первых межмолекулярных столкновений.

Сопротивление пластины, параллельной потоку газа, в режиме первых межмолекулярных столкновений.

Загрязнение поверхности космических аппаратов вследствие столкновений молекул друг с другом. Свечение около КА.

## 6. Течения слабо разреженного газа.

Значения числа Кнудсена и кинетические эффекты в течениях слабо разреженного газа: внутреннее трение и теплопередача (процессы переноса), число Прандтля. Тензор напряжений и вектор потока тепла (потоки импульса и энергии). Уравнения, описывающие течения слабо разреженного газа. Уравнения Навье-Стокса как первое приближение решения уравнения Больцмана методом Чепмена-Энскога. Соотношения Ньютона-Фурье. Зависимости тензора напряжений и вектора потока тепла от градиентов скорости и температуры. Быстрые и медленные течения. Гиперзвуковые сдвиговые течения около холодных поверхностей.

Граничные и внутренние кнудсеновы слои (локальные значения числа Кнудсена).

Граничные условия для уравнений Навье-Стокса (определения, постановки задач и результаты): скольжение, температурное скольжение и температурный скачок; испарение и конденсация, условие Герца-Кнудсена, диффузионное скольжение.

Ударная волна. Профили параметров в слабой и сильной ударных волнах. Функции распределения в таких ударных волнах. Ударные волны и макроскопические модели.

Поля параметров в гиперзвуковых течениях слабо разреженного газа при обтекании сферического и цилиндрического затуплений, кромки стреловидного крыла, тонкой пластины, расположенной под нулевым углом атаки.

Газовые подшипники.

## 7. Характеристики равновесного газа. Основные представления кинетической теории газов. Уравнение Больцмана. Физические свойства верхней атмосферы Земли и космической среды.

Давление, плотность, температура, молярная масса равновесного газа. Уравнение состояния. Смесь газов, парциальное давление, молярная масса смеси газов.

Уровни описания течений газа (макро- и микроскопический, континуальный и кинетический). Функция распределения молекул по скоростям. Связь макропараметров (плотности газа, концентрации молекул, скорости газа, температуры) с функцией распределения.

Равновесная функция распределения молекул по скоростям. Наиболее вероятная и средняя скорости молекул (с выводом); скорость звука. Поток числа молекул на элемент поверхности в равновесном газе.

Диаметр молекул и среднее расстояние между молекулами. Частота столкновения молекул, средняя длина свободного пробега молекул. Вязкость и теплопроводность воздуха. Связь вязкости газа и средней длины свободного пробега молекул. Зависимость/независимость от температуры и плотности газа.

Параметр подобия - число Кнудсена - как характеристика разреженности течений; его связь с другими параметрами подобия - числами Рейнольдса и Маха. Параметр идеальности газа. Классификация течений в зависимости от значения числа Кнудсена (числа Рейнольдса).

Причины необходимости в кинетическом описании и кинетическом уравнении. Кинетическое уравнение Больцмана, физический смысл его членов. Постановки задач для уравнения Больцмана. Общие свойства функции распределения и решений уравнения Больцмана. Н-теорема. Число Кнудсена и уравнение Больцмана. Предельные режимы (свободномолекулярный и газодинамический). Траектория молекул как характеристика дифференциального уравнения Больцмана в свободномолекулярном пределе. Максвелловская функция распределения как точное решение уравнения Больцмана.

Понятия статической и динамической атмосферы. Зависимости плотности, температуры, состава и молярной массы воздуха от высоты. Зависимость плотности от высоты при изотермической атмосфере. Потоки света и частиц от Солнца.

Влияние сопротивления верхней атмосферы на движение спутника по круговой орбите: изменение высоты движения и скорости за один виток. Баллистический коэффициент.

## 8. Численные методы исследования течений разреженного газа.

Метод прямого статистического моделирования Монте-Карло. Метод дискретных ординат. Модельные кинетические уравнения и методы их решения. Моментные методы. Методы решения линеаризованного кинетического уравнения Больцмана.

## 9. Экспериментальные методы исследования течений разреженного газа.

Вакуумные аэродинамические установки (ВАУ, ВАТ). Методы создания потоков разреженного газа. Принципы моделирования. Модели ЛА и их частей в ВАУ.

Методы создания молекулярных пучков. Методы измерения: датчики потоков массы, импульса и энергии в молекулярных пучках.

## 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. Краевые задачи вычислительной аэрогидромеханики [Текст] : в 2 ч., Ч. 2 Течения вязкого газа и турбулентные течения / В. В. Вышинский - М.МФТИ,2009
1. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. - М.: Наука, 1967г. - 440с. (Темы: 1 - 7)
2. БердГ. Молекулярная газовая динамика. - М.: Мир, 1981г. - 320с. ( Темы: 1, 2, 8)
3. Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. - М.: Машиностроение, 1977г. - 184с. ( Темы: 1 – 6, 8)
4. Бондарев Е.Н., Дубасов В.Т., Рыжов Ю.А., Свирщевский С.Б., Семенчиков Н.В. Аэрогидродинамика. - М.: Машиностроение, 1993г. - 607с. ( Темы: 2 - 6, 8)
5. Ковтуненко В.М., Камеко В.Ф., Яскевич Э.П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. - Киев : Наукова думка, 1984г. - 188с. ( Темы: 1,2 )
6. Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А., Свирщевский С.Б. Экспериментальные методы в механике разреженного газа. - М. : Машиностроение, 1981г. - 200с. ( Темы: 1, 2, 8)
7. Баранцев Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М. : Наука, 1975г. - 344с. ( Темы: 2, 5)
8. Гудман Ф., Вахман Г. Динамика рассеяния газа поверхностью. - М. : Мир, 1980, - 423с. ( Темы: 2, 3)
9. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.. Теоретическая физика. Т.10. Физическая кинетика. М. Наука. 1979. 527 с. (Темы 1, 7)
10. Чепмен С., Каулинг Т.. Математическая теория неоднородных газов. М. ИЛ. 1960. 511 с. (Темы 1, 7)
11. де Грот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М. Мир. 1964. 456 с. (Тема 7)

### Дополнительная литература

1. Динамика рассеяния газа поверхностью [Текст]/Ф. Гудман, Г. В. Вахман , -М., Мир, 1980

1. Y.Sone. Kinetic Theory and Fluid Dynamics. Birkhauser, Boston, 2002.
2. Y.Sone. Molecular Gas Dynamics Birkhauser, Boston, 2007.
3. C.Cercignani. Rarefied Gas Dynamics: from basic concepts to actual calculations. Cambridge University Press. Cambridge, 2000.
4. Sharipov F., Seleznev V. Data on internal rarefied gas flows // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1998. V. 27. № 3. P.657-706.
5. Ерофеев А.И., Коган М.Н., Фридлендер О.Г. Квазиравновесный граничный кнудсеновский слой на неизотермическом пористом теле // Изв. РАН. МЖГ. 2010. №1. С.152-166.
6. Александров В.Ю., Фридлендер О.Г. Медленные течения газа и эффект отрицательного сопротивления сильно нагретой сферической частицы // Известия РАН. МЖГ. 2008. №3. С.485-492.
7. Ерофеев А.И., Никифоров А.П., Нестеров С.Б., Нежметдинова Р.А. Взаимодействие высокоскоростных свободномолекулярных потоков газа с гладкими и шероховатыми поверхностями. М. «Новелла». 2012.75

**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 предусмотрено.

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

Студент, изучающий дисциплину "Динамика разреженного газа", 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, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой 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), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к экзамену.

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

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



**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Авиационные технологии  
Физтех-школа авиационных и цифровых технологий  
кафедра аэрофизики и летательных аппаратов  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчик:** С.Л. Горелов, канд. физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Динамика разреженного газа» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории аэрогидромеханики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов аэрогидромеханики;
- современные проблемы аэрогидромеханики;
- основные понятия динамики разреженных газов и закономерности силового и теплового воздействия верхних слоев атмосферы на летательные аппараты;
- теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования течений разреженного газа.

### уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов;
- проводить оценки величин силового и теплового воздействия разреженного газа на части летательных аппаратов и другие тела при различных режимах обтекания;
- уметь проводить оценки параметров медленных течений разреженного газа около малых аэрозольных частиц и в микроустройствах.

#### **владеть:**

- навыками освоения большого объема информации;
- культурой постановки и моделирования физических задач, алгоритмами определения методов исследования, адекватных возникающим задачам;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами течений разреженного газа.

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

- 1) Сопротивление затупленных тел в режиме первых межмолекулярных столкновений.
- 2) Сопротивление пластины, параллельной потоку газа, в режиме первых межмолекулярных столкновений.
- 3) Загрязнение поверхности космических аппаратов вследствие столкновений молекул друг с другом. Свечение около КА.
- 4) Значения числа Кнудсена и кинетические эффекты в течениях слабо разреженного газа: внутреннее трение и теплопередача (процессы переноса), число Прандтля. Тензор напряжений и вектор потока тепла (потоки импульса и энергии). Уравнения, описывающие течения слабо разреженного газа. Уравнения Навье-Стокса как первое приближение решения уравнения Больцмана методом Чепмена-Энскога. Соотношения Ньютона-Фурье. Зависимости тензора напряжений и вектора потока тепла от градиентов скорости и температуры.
- 5) Быстрые и медленные течения слаборежеженного газа. Гиперзвуковые сдвиговые течения около холодных поверхностей. Сдвиговое течение как пример возможности макроскопического описания течений газа в переходном режиме.
- 6) Граничные и внутренние кнудсеновы слои (локальные значения числа Кнудсена). Граничные условия для уравнений Навье-Стокса (определения, постановки задач и результаты): скольжение, температурное скольжение и температурный скачок; испарение и конденсация, условие Герца-Кнудсена, диффузионное скольжение.
- 7) Внутренние кнудсеновы слои. Ударная волна. Профили параметров в слабой и сильной ударных волнах. Функции распределения в таких ударных волнах. Ударные волны и макроскопические модели.
- 8) Поля параметров в гиперзвуковых течениях слабо разреженного газа при обтекании сферического и цилиндрического затуплений, кромки стреловидного крыла, тонкой пластины, расположенной под нулевым углом атаки.
- 9) Основные особенности изменения скорости, перегрузок и теплового потока к аппарату на траектории спуска. Влияние подъемной силы.
- 10) Переходный режим обтекания космических и аэрокосмических аппаратов при гиперзвуковом движении. Интегральный и локальный приближённые методы расчета аэродинамических характеристик. Суммарные (сопротивление, подъёмная сила) и локальные (распределения давления, трения и теплового потока) характеристики при обтекании затупленных тел. Основные свойства полей течения (полей температуры) в переходном режиме течения.

- 11) Особенности зависимости сопротивления тонких тел от числа Кнудсена в разреженном газе. Особенности зависимости коэффициента момента тангажа от числа Кнудсена (на примере плоской пластины).
- 12) Обтекание мелких частиц. Сопротивление в различных режимах течения. Скорость оседания. Время и расстояние выравнивания скоростей частицы и газа.
- 13) Термофорез аэрозольных частиц при движении в температурно-неоднородной среде. Фотофорез. Диффузиофорез.
- 14) Течение газа в коротких и длинных каналах; расход газа. Термомолекулярная разность давлений.
- 15) Одномерные течения: теплопередача между параллельными пластинами, плоские сдвиговые течения. Течения сквозь проницаемые мембраны. Скачки температуры и давления около плоских проницаемых мембран.
- 16) Пределы применимости уравнений Навье-Стокса. Течения газа как сплошной среды, не описываемые уравнениями Навье-Стокса: медленные течения при сильной теплопередаче. Процессы переноса массы и тепла к частицам как источник сил взаимодействия.
- 17) Разложения по малому параметру при малом или большом значении числа Кнудсена (метод Чепмена-Энскога и метод первых столкновений).
- 18) Метод линеаризации уравнения Больцмана и решение линейного уравнения. Уравнение Больцмана и термодинамика необратимых процессов.
- 19) Метод прямого статистического моделирования Монте-Карло решения уравнения Больцмана.
- 20) Метод дискретных ординат решения уравнения Больцмана.
- 21) Модельные кинетические уравнения и методы их решения. Моментные методы. Методы решения линеаризованного кинетического уравнения Больцмана.
- 22) Вакуумные аэродинамические установки (ВАУ, ВАТ). Методы создания потоков разреженного газа. Принципы моделирования. Модели ЛА и их частей в ВАУ.
- 23) Методы создания молекулярных пучков. Методы измерения: датчики потоков массы, импульса и энергии в молекулярных пучках.
- 24) Решение задач по определению характеристик равновесного газа.
- 25) Решение задач по определению аэродинамических характеристик в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке.
- 26) Решение задач по определению характеристик течений слаборазреженного газа.
- 27) Решение задач по определению характеристик медленных течений около аэрозольных частиц и в микроканалах.
- 28) Решение задач по определению свойств датчиков потоков массы, импульса и энергии молекулярных пучков.

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

- 1) Давление, плотность, температура, молярная масса равновесного газа.
- 2) Уравнение состояния. Смесь газов, парциальное давление, молярная масса смеси газов.
- 3) Уровни описания течений газа (макро- и микроскопический, континуальный и кинетический).
- 4) Функция распределения молекул по скоростям. Связь макропараметров (плотности газа, концентрации молекул, скорости газа, температуры) с функцией распределения.
- 5) Равновесная функция распределения молекул по скоростям. Наиболее вероятная и средняя скорости молекул (с выводом); скорость звука.
- 6) Поток числа молекул на элемент поверхности в равновесном газе.
- 7) Диаметр молекул и среднее расстояние между молекулами. Частота столкновения молекул, средняя длина свободного пробега молекул.
- 8) Вязкость и теплопроводность воздуха. Связь вязкости газа и средней длины свободного пробега молекул (без вывода).
- 9) Зависимость/независимость от температуры и плотности газа.
- 10) Параметр подобия - число Кнудсена - как характеристика разреженности течений; его связь с другими параметрами подобия - числами Рейнольдса и Маха.
- 11) Параметр идеальности газа. Классификация течений в зависимости от значения числа Кнудсена (числа Рейнольдса).

12) Причины необходимости в кинетическом описании и кинетическом уравнении. Кинетическое уравнение Больцмана, физический смысл его членов. Постановки задач для уравнения Больцмана.

13) Общие свойства функции распределения и решений уравнения Больцмана. H-теорема. Число Кнудсена и уравнение Больцмана.

14) Предельные режимы (свободномолекулярный и газодинамический). Траектория молекул как характеристика дифференциального уравнения Больцмана в свободномолекулярном пределе.

15) Максвелловская функция распределения как точное решение уравнения Больцмана.

#### Билет 1

Понятия статической и динамической атмосферы. Зависимости плотности, температуры, состава и молярной массы воздуха от высоты. Зависимость плотности от высоты при изотермической атмосфере. Потоки света и частиц от Солнца.

#### Билет 2

Влияние сопротивления верхней атмосферы на движение спутника по круговой орбите: изменение высоты движения и скорости за один виток. Баллистический коэффициент.

#### Билет 3

Давление и трение на поверхности как передача ей импульса молекул. Давление и трение на пластине, расположенной под углом атаки к потоку газа; давление и трение на пластине, расположенной под нулевым углом атаки. Пределы применимости гиперзвукового приближения для передачи импульсов падающих молекул элементам поверхности.

#### Билет 4

Взаимодействие молекул газа с поверхностью. Вклад в давление и трение импульса молекул, отраженных от поверхности; давление равновесно отраженных молекул. Математические модели взаимодействия молекул с поверхностью; диффузное отражение, коэффициенты аккомодации.

#### Билет 5

Лабораторные и натурные методы определения коэффициентов передачи импульса. Модели функции распределения отраженных молекул.

#### Билет 6

Определение коэффициентов сопротивления и подъемной силы космического аппарата. Выпуклые и вогнутые поверхности. Интерференция частей космических аппаратов. Сильная и слабая интерференция. Гиперзвуковое приближение затенения. Точные решения при диффузном отражении.

#### Билет 7

Газодинамические понятия в свободномолекулярных течениях. Эффузия газа через малое отверстие в вакуум. Расход газа при эффузии, распределение потока массы по углу истечения. Смысл предельного по числу Кнудсена перехода во внутренних и во внешних задачах. Примеры неравновесных функций распределения во внешних и внутренних свободномолекулярных задачах.

#### Билет 8

Поток энергии на элемент поверхности в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке. Энергия рекомбинации. Температура поверхности спутника на солнечной и теневой стороне Земли в адиабатическом приближении.

#### Билет 9

Молекулы, потенциалы их взаимодействия (степенные потенциалы, потенциалы Леннарда-Джонса и Борна-Майера), зависимость сечения столкновения молекул от скорости их относительного движения для степенной модели потенциала взаимодействия молекул.

#### Билет 10

Понятие о разных длинах свободного пробега молекул: зависимость от системы отсчёта и от типа молекул. Примеры для двух моделей молекул: упругих сферических молекул и максвелловских молекул.

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 балла - 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 балла - 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 балла - 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 балл - 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**

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Экзамен проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.