

**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>	Динамика разреженных газов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.Н. Крылов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедре аэрофизической механики и управления движением 06.04.2020

## Аннотация

Изучение дисциплины направлено на углубление и расширение базовой профессиональной подготовки магистранта, формирование соответствующих компетенций.

В учебной дисциплине рассматриваются основные теоретические понятия, концепции и подходы в области методов расчета и моделирования течений разреженных газов. Студенты изучают различные прикладные и технологические задачи, связанные с течениями разреженного газа, учатся формировать физические модели и математические постановки для математического и экспериментального моделирования задач течений разреженного газа, а также составлять соответствующие численные модели.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по современному состоянию и методам расчета и моделирования течений разреженных газов.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания по современным математическим и численным моделям течений разреженных сред, позволяющие ориентироваться в современном состоянии и перспективах развития данной отрасли знания;
- научить студентов на примерах и задачах методам исследований и основным практическим приемам при анализе разреженных сред в аэрокосмических приложениях. Познакомить с современными программными комплексами, моделирующими течения разреженных сред.

### 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-1.1 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-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	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	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, методы и теории течений разреженного газа;
- современные расчетные и экспериментальные методы, используемые при анализе течений разреженного газа.

уметь:

- решать прикладные и технологические задачи течений разреженного газа;
- формировать физические модели для задач течений разреженного газа;
- формировать математические постановки для математического и экспериментального моделирования течений разреженного газа;
- составлять численные модели для задач течений разреженного газа;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и вычислительные методики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками самостоятельной работы;
- навыками критического и конструктивного анализа информации, присутствующей в научных публикациях и в интернете;
- навыками постановки и вычислительного моделирования задач 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	Задачи, решаемые методами динамики разреженных газов.		3		1
2	Элементарная кинетическая теория.		3		1
3	Уравнение Больцмана в интегральной и в интегро-дифференциальной формах.		3		1
4	Н-теорема и равновесие. Уравнение Больцмана.		3		2
5	Равновесный газ.		3		2
6	Взаимодействие газа с поверхностью.		3		2
7	Свободномолекулярные течения.		3		2
8	Программное обеспечение для аэродинамических расчетов.		3		2
9	Программный комплекс RuSat.		6		2
10	Аэродинамика в переходном режиме обтекания.		3		2

11	Гипотеза «локального» взаимодействия.		3		2
12	Анализ эффективности численных схем.		3		2
13	Метод Монте-Карло прямого моделирования течений разреженного газа.		3		2
14	Программа SMILE.		3		2
15	Собственная внешняя атмосфера КА.		3		5
16	Расчетные и экспериментальные методы исследования СВА.		3		9
17	Эксперименты Астра и Астра-2.		3		2
18	Экспериментальные исследования сброса жидкостей в вакуум.		3		2
19	Решеточные уравнения Больцмана.		3		2
Итого часов			60		45
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. Задачи, решаемые методами динамики разреженных газов.

Режимы течения газовой среды. Верхняя атмосфера Земли. Особенности обтекания космических аппаратов на участках выведения, орбитальном и входа в атмосферу. Задачи, решаемые методами динамики разреженных газов.

##### 2. Элементарная кинетическая теория.

Столкновения частиц. Элементарная кинетическая теория.

##### 3. Уравнение Больцмана в интегральной и в интегро-дифференциальной формах.

Уравнение Больцмана в интегральной и в интегро-дифференциальной формах, уравнение переноса. Уравнения для моментов и уравнения сохранения. Связь уравнения Больцмана с уравнениями газовой динамики для сплошной среды. Параметры подобия.

##### 4. Н-теорема и равновесие. Уравнение Больцмана.

Н-теорема и равновесие. Методы решения уравнения Больцмана. Метод Чепмена Энскога, моментные методы.

##### 5. Равновесный газ.

Объемные величины, потоки и характеристики столкновений в равновесном газе.

##### 6. Взаимодействие газа с поверхностью.

Взаимодействие газа с поверхностью. Модели взаимодействия. Коэффициент аккомодации импульса и энергии.

##### 7. Свободномолекулярные течения.

Свободномолекулярные течения. Одномерные стационарные и нестационарные течения, термофорез, задача Релея.

#### 8. Программное обеспечение для аэродинамических расчетов.

Свободномолекулярная аэродинамика. Программное обеспечение для аэродинамических расчетов.

#### 9. Программный комплекс RuSat.

Программный комплекс RuSat. Возможности, методы расчета, подготовка исходных данных для расчета, запуск задач, просмотр результатов.

Практические занятия по расчету свободномолекулярной аэродинамики с использованием Программного комплекса RuSat.

#### 10. Аэродинамика в переходном режиме обтекания.

Аэродинамика в переходном режиме обтекания. Полуэмпирические методы расчета. Гипотеза «локального» взаимодействия.

#### 11. Гипотеза «локального» взаимодействия.

Практические занятия по расчету аэродинамики в переходном режиме с использованием программного комплекса RuSat.

#### 12. Анализ эффективности численных схем.

Случайные числа и их генерация на ЭВМ. Моделирование случайных величин (методы обратных функций, исключения и суперпозиции) Анализ эффективности численных схем. Вычисление интегралов.

#### 13. Метод Монте-Карло прямого моделирования течений разреженного газа.

Применение метода Монте-Карло для прямого моделирования течений разреженного газа.

#### 14. Программа SMILE.

Программа SMILE. Подготовка исходных данных для расчета, запуск задач, просмотр результатов

#### 15. Собственная внешняя атмосфера КА.

Практические занятия по расчету обтекания тел в переходном режиме с использованием программы SMILE.

#### 16. Расчетные и экспериментальные методы исследования СВА.

Собственная внешняя атмосфера КА, источники, характерные особенности в фоновом и возмущенном состоянии.

#### 17. Эксперименты Астра и Астра-2.

Расчетные и экспериментальные методы исследования СВА. Приборы для измерения давления, состава газа и осаждения загрязнений.

#### 18. Экспериментальные исследования сброса жидкостей в вакуум.

Эксперименты Астра и Астра-2 , измерения давления на КА «Ямал», визуальные наблюдения загрязнений наружных поверхностей КА, зарубежные эксперименты.

19. Решеточные уравнения Больцмана.

Экспериментальные исследования сброса жидкостей в вакуум.

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

учебная аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория [Текст]/М. Н. Коган, -М., Наука, 1967
2. Молекулярная газовая динамика [Текст] = Molecular gas dynamics, монография/Г. Бёрд , -М., Мир, 1981
1. Ю.А. Кошмаров, Ю.А Рыжов Прикладная динамика разреженного газа. Машиностроение, 1977 г.
2. Модель космоса Восьмое издание. 2007 г.

Дополнительная литература

1. Программный комплекс RuSat Руководство пользователя. ИТПМ СО РАН.
2. Программный комплекс Smile Руководство пользователя. ИТПМ СО РАН.

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

1. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/mechanics/fluid.htm> - Мир Математических Уравнений
2. <http://elibrary.ru/defaultx.asp> - российский информационно-аналитический портал в области науки, технологии, медицины и образования, содержащий рефераты и полные тексты более 19 млн научных статей и публикаций
3. [www.mathnet.ru/](http://www.mathnet.ru/) - общероссийский математический портал
4. <http://www.netlib.org/na-digest-html/> Netlib, a collection of mathematical software, papers, and databases
5. <http://www.cfd-online.com/> - ресурс по вычислительной газодинамике CFD Online
6. <http://arxiv.org/> - Open access to 993,562 e-prints in Physics, Mathematics, Computer Science

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

Пакеты офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), OpenOffice.

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

Успешное освоение курса требует большой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам семинаров, учебной и научной литературе);

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате опросов по рассмотренным темам и индивидуальных консультаций.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

**Разработчик:** А.Н. Крылов, канд. физ.-мат. наук



## 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-1.1 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-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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Динамика разреженных газов» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, методы и теории течений разреженного газа;
- современные расчетные и экспериментальные методы, используемые при анализе течений разреженного газа.

### уметь:

- решать прикладные и технологические задачи течений разреженного газа;
- формировать физические модели для задач течений разреженного газа;
- формировать математические постановки для математического и экспериментального моделирования течений разреженного газа;
- составлять численные модели для задач течений разреженного газа;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и вычислительные методики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

- навыками самостоятельной работы;
- навыками критического и конструктивного анализа информации, присутствующей в научных публикациях и в интернете;
- навыками постановки и вычислительного моделирования задач течений разреженного газа.

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

Текущий контроль осуществляется в форме устного опроса на занятиях.

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

Примеры экзаменационных билетов:

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. Особенности обтекания космических аппаратов на участках выведения, орбитальном и входа в атмосферу.
2. Свободномолекулярная аэродинамика
3. Связь уравнения Больцмана с уравнениями газовой динамики для сплошной среды.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. Аэродинамика в переходном режиме обтекания.
2. Метод Монте-Карло прямого моделирования течений разреженного газа.
3. Расчетные и экспериментальные методы исследования СВА.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

1. Взаимодействие газа с поверхностью.
2. Уравнение Больцмана в интегральной и в интегро-дифференциальной формах, уравнение переноса.
3. Коэффициент аккомодации импульса и энергии.

### 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;

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

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при 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, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, 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, 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 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, 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, 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**

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 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 семинаров и любой другой литературой.