

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

|                            |   |
|----------------------------|---|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>  |
| <b>по дисциплине:</b>      | Кинетическая теория газов   |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Авиационные технологии<br>передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии<br>кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау |
| <b>курс:</b>               | 1   |
| <b>квалификация:</b>       | магистр   |

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: Е.А. Дорофеев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики им. Л.Д. Ландау 23.05.2020

## Аннотация

Семестровый курс Кинетическая теория газов предназначен для студентов 1 курса магистратуры УНИЦ АЛТ физтех-школы аэрокосмических технологий (ФАКТ). Курс следует за курсом «Статистическая физика» и является заключительным курсом в общем курсе теоретической физики.

Курс начинается с введения функции распределения молекул – основного объекта кинетической теории газов. Анализируются физические предположения необходимые для вывода кинетического уравнения. В этих предположениях выводится кинетическое уравнение Больцмана, изучаются свойства интеграла столкновений и доказывается Н-теорема Больцмана.

Исходя из кинетического уравнения Больцмана производится вывод макроскопических уравнений и рассматриваются различные приемы для получения замкнутой системы уравнений гидродинамики.

Третий раздел курса посвящен приближенному решению кинетического уравнения при малых числах Кнудсена. Используя метод Чепмена-Энскога находятся поправки к локально-равновесной функции распределения, с помощью которых, вычисляются коэффициенты теплопроводности и вязкости одноатомного газа.

Четвертая часть курса посвящена кинетической теории смеси газов. Метод Чепмена-Энскога распространен на этот случай, что позволяет детально описать такие явления как диффузия и термодиффузия в смеси газов.

Явления в слаборежеженных газах изучаются в пятом разделе курса. Рассматриваются граничные условия на поверхности твердых стенок, а также эффекты температурного скачка и теплового скольжения. Анализируются условия, при которых важны слагаемые в уравнениях гидродинамики, следующие за навье-стоксовским приближением. Выводятся уравнения Барнетта, на их основе рассматривается явление термострессовой конвекции. Рассматриваются также, кинетические явления в поле лазерного излучения такие как светоиндуцированная диффузия и светоиндуцированный дрейф.

В шестом разделе курса изучаются явления в сильно разреженных газах. Изучается концепция коэффициентов аккомодации на поверхности тел и выводятся формулы для аэродинамических коэффициентов простых тел в режиме свободномолекулярного обтекания с большим числом Маха.

В седьмом разделе курса дается введение в неравновесную термодинамику. Выводится принцип симметрии кинетических коэффициентов Онзагера, рассматривается теория линейного отклика системы на внешнее возмущение, вводится понятие обобщенной восприимчивости. Дается формулировка флуктуационно-диссипационной теоремы и выводится формула Кубо.

В заключение курса рассматривается вопрос вывода кинетического уравнения Больцмана исходя из уравнений микроскопической динамики молекул.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать студентам знания, необходимые для описания различных физических явлений в области приложений классической кинетической теории и методы построения соответствующих математических моделей. Показать соответствие физических предположений, положенных в основу кинетической теории, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной в области её применимости. Дать навыки, позволяющие понять адекватность теоретической модели соответствующему физическому явлению и определить пределы её применимости.

### Задачи дисциплины

- Изучение математического аппарата теории кинетических уравнений;
- изучение методов вывода макроскопических уравнений механики сплошных сред из молекулярного описания среды с помощью кинетических уравнений;
- изучение методов вычисления кинетических коэффициентов вязкости и теплопроводности из "первых принципов";
- овладение студентами методов классической кинетической теории газов для описания различных режимов течения газа.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|--------------------------------|-----------------------------------|
|--------------------------------|-----------------------------------|

|   |  |
|---|--|
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения   | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения  |
|   | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)                                   |
|   | ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений                            |
| ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия | ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия  |
|   | ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности  |
|   | ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту  |
| 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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию   | ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива  |
|   | ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях                         |
| ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области                                   | ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)  |
|   | ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)                                   |
|   | ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов  |

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Основные физические положения классической кинетической теории;
- основные уравнения кинетической теории и прежде всего кинетические уравнение Больцмана;
- основные методы математического аппарата для решения линейных интегральных уравнений возникающих в кинетической теории газов;
- основные методы решения задач в динамике разреженного газа;
- методы и способы описания взаимодействия газа с поверхностью;
- методы получения кинетических уравнений из динамической теории.

уметь:

- Пользоваться аппаратом уравнений в частных производных;
- пользоваться аппаратом теории вероятностей;
- пользоваться аппаратом вероятностных функций распределения;
- решать газокинетические задачи с учетом внешних полей;
- решать задачи о поведении макроскопических систем в заданном внешнем поле;
- применять метод теории Чепмена- Энскога для вывода уравнений газовой динамики;
- применять метод Чепмена-Энскога в кинетической теории смеси газов;
- применять уравнение Фоккера-Планка для нахождения коэффициентов диффузии.

владеть:

- Основными методами математического аппарата как классической кинетической теории газов;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами макроскопических систем различной природы, так и с их кинетическими свойствами.

#### 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                     | Функция распределения. Уравнение Больцмана.   | 2   | 2        |                 | 3              |
| 2                     | Свойства интеграла столкновений. Н-теорема.   | 2   | 2        |                 | 3              |
| 3                     | Гидродинамические величины. Общее уравнение переноса. Вывод уравнений газовой динамики.   | 2   | 2        |                 | 3              |
| 4                     | Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа. Линеаризация интеграла столкновений. | 2   | 2        |                 | 4              |
| 5                     | Метод Чепмена-Энскога. Вычисление коэффициентов теплопроводности и вязкости.              | 2   | 2        |                 | 3              |
| 6                     | Уравнение Больцмана для смеси газов. Диффузия и термодиффузия.                            | 2   | 2        |                 | 4              |
| 7                     | Диффузия легкого газа в тяжелом. Газ Лоренца.   | 2   | 2        |                 | 3              |
| 8                     | Диффузия тяжелого газа в легком. Броуновское движение. Уравнение Ланжевена.               | 2   | 2        |                 | 4              |
| 9                     | Уравнение Фоккера-Планка. Уравнение диссипативной динамики.                               | 2   | 2        |                 | 3              |
| 10                    | Явления в слабо разреженных газах. Тепловое скольжение. Термофорез.                       | 4   | 4        |                 | 3              |
| 11                    | Уравнения Барнетта. Температурные напряжения в газах. Термострессовая конвекция.          | 2   | 2        |                 | 3              |
| 12                    | Явления в сильно разреженных газах. Свободномолекулярное течение.                         | 2   | 2        |                 | 3              |
| 13                    | Взаимодействие с поверхностью тела. Коэффициенты аккомодации.                             | 2   | 2        |                 | 3              |
| 14                    | Динамический вывод уравнения Больцмана.   | 2   | 2        |                 | 3              |
| Итого часов           |   | 30  | 30       |                 | 45             |
| Подготовка к экзамену |   | 30 час.   |          |                 |                |
| Общая трудоёмкость    |   | 135 час., 3 зач.ед.   |          |                 |                |

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

Семестр: 1 (Осенний)

### 1. Функция распределения. Уравнение Больцмана.

Уровни описания большого числа частиц. Функция распределения. Физические предположения при выводе кинетического уравнения. Принцип детального равновесия. Кинетическое уравнение Больцмана.

### 2. Свойства интеграла столкновений. H-теорема.

Свойства интеграла столкновений. Вывод формулы связывающей энтропию газа с функцией распределения. H-теорема. Длина свободного пробега молекул. Число Кнудсена.

### 3. Гидродинамические величины. Общее уравнение переноса. Вывод уравнений газовой динамики.

Гидродинамические величины. Общее уравнение переноса. Вывод уравнений газовой динамики из кинетического уравнения Больцмана. Законы сохранения массы, импульса и энергии. Замыкание системы уравнений газовой динамики.

### 4. Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа. Линеаризация интеграла столкновений.

Приближенное решение уравнения Больцмана при малых числах Кнудсена. Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа. Линеаризация интеграла столкновений.

### 5. Метод Чепмена-Энскога. Вычисление коэффициентов теплопроводности и вязкости.

Метод Чепмена-Энскога. Выражение левой части кинетического уравнения через градиенты температуры и скорости. Сведение линейных интегральных уравнений к системе алгебраических уравнений с помощью разложения искомых функций по базису из ортогональных полиномов Сонина. Выражение коэффициентов теплопроводности и вязкости газа через транспортные сечения рассеяния молекул. Симметрия кинетических коэффициентов.

### 6. Уравнение Больцмана для смеси газов. Диффузия и термодиффузия.

Кинетика смеси газов. Уравнение Больцмана для смеси газов. Метод Чепмена-Энскога для бинарной смеси. Диффузия и термодиффузия. Эффект Дюфура как симметричный эффект к термодиффузии.

### 7. Диффузия легкого газа в тяжелом. Газ Лоренца.

Основные предположения модели газа Лоренца. Вывод упрощенного кинетического уравнения и его решение. Формулы для коэффициентов диффузии и термодиффузии в газе Лоренца.

### 8. Диффузия тяжелого газа в легком. Броуновское движение. Уравнение Ланжевена.

Диффузия тяжелого газа в легком. Физические предположения. Броуновское движение. Уравнение Ланжевена. Подвижность тяжелой частицы. Соотношение Эйнштейна связывающие диффузию и подвижность тяжелой частицы.

### 9. Уравнение Фоккера-Планка. Уравнение диссипативной динамики.

Вывод уравнения Фоккера-Планка методом преобразования интеграла столкновения с учетом малости изменения импульса в процессе столкновения. Альтернативный вывод уравнения Фоккера-Планка из уравнения движения частицы со случайной силой. Уравнение диссипативной динамики. Скрытая суперсимметрия уравнения диссипативной динамики.

10. Явления в слабо разреженных газах. Тепловое скольжение. Термофорез.

Граничные условия на поверхности твердого тела. Коэффициент температурного скачка. Тепловое скольжение. Слабое и сильное испарение, Термофорез.

11. Уравнения Барнетта. Температурные напряжения в газах. Термострессовая конвекция.

Неприменимость уравнений Навье-Стокса для описания медленных изотермических течений. Уравнения Барнетта. Температурные напряжения в газах. Термострессовая конвекция.

12. Явления в сильно разреженных газах. Свободномолекулярное течение.

Свободно молекулярное течение газа. Потоки массы, импульса и энергии. Эффект Кнудсена. Общее решение задачи Коши для кинетического уравнения, описывающего свободно молекулярное течение.

13. Взаимодействие с поверхностью тела. Коэффициенты аккомодации.

Взаимодействие газа с поверхностью тела. Режим полной аккомодации. Линейная теория теплообмена и поверхностных сил для тела в сильно разреженном газе. Коэффициенты аккомодации.

14. Динамический вывод уравнения Больцмана.

Уравнение Лиувилля. Цепочка Боголюбова. Проблема замыкания. Анзац Больцмана. Динамический вывод уравнения Больцмана. Возможные обобщения уравнения Больцмана.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 10 : Физическая кинетика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. — 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2007. — 536 с.

### **Дополнительная литература**

1. Введение в современную статистическую физику [Текст] / Р. О. Зайцев - М.ЛИБРОКОМ,2016

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

Доступные через Internet, учебные пособия и сборники задач, разработанные для данного курса.

1. Коган М.Н. Динамика разреженного газа – М.: Наука, 1967.
2. Ферцигер Дж.,Капер К. Математическая теория процессов переноса. – М.: Мир, 1976.
3. Де Гроот С., Мазур Г. Неравновесная термодинамика. – М.: Мир, 1964.
- 4.Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1946.
5. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. - М.: ИЛ, 1960.

6. Грэд Г. Термодинамика газов. -М.: Машиностроение, 1970.
7. Максвелл Дж. К. Труды по кинетической теории газов. -М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
8. Больцман Л. Избранные труды. - М.: Наука, 1984.
9. Черчиньяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана. -М.: Мир, 1978.
10. Коган М.Н., Галкин В.С., Фридлендер О. Г., О напряжениях, возникающих в газах вследствие неоднородностей температуры и концентраций. Новые типы свободной конвекции. УФН, 1976, Т. 119. В. 1. С. 111-126.

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

Электронная библиотека [lib.mipt.ru](http://lib.mipt.ru)

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

Студент, изучающий курс «Кинетическая теория газов», 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 фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики; порядки численных величин, характерные для различных разделов физики; современные проблемы физики, математики.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента.

В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Индивидуальная работа предполагает самостоятельное выполнение студентом определенного в «Задании» набора упражнений и задач в соответствии с тематикой семинарских занятий. При необходимости студент получает консультацию по выполнению отдельных задач у преподавателя ведущего занятия как во время проведения семинарских занятий, так и во внеурочное время по согласованию с преподавателем. «Задание» раздается всем студентам в виде учебно-методического материала, содержащего программу курса и упражнения, и задачи, включенные в два домашних задания.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

|  |   |
|--|---|
| <b>по направлению:</b>   | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b>                                     | Авиационные технологии<br>передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии<br>кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау |
| <b>курс:</b>   | 1   |
| <b>квалификация:</b>   | магистр   |
| Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен |   |
| <b>Разработчик:</b>  | Е.А. Дорофеев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент   |



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции  |
|---|--|
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения   | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения  |
|   | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)                                   |
|   | ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений                            |
| ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия | ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия  |
|   | ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности  |
|   | ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту  |
| 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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию   | ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива  |
|   | ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях                         |
| ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области                                   | ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)  |
|   | ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)                                   |
|   | ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов  |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Кинетическая теория газов» обучающийся должен:

### знать:

- Основные физические положения классической кинетической теории;
- основные уравнения кинетической теории и прежде всего кинетическое уравнение Больцмана;
- основные методы математического аппарата для решения линейных интегральных уравнений возникающих в кинетической теории газов;
- основные методы решения задач в динамике разреженного газа;
- методы и способы описания взаимодействия газа с поверхностью;
- методы получения кинетических уравнений из динамической теории.

### уметь:

- Пользоваться аппаратом уравнений в частных производных;
- пользоваться аппаратом теории вероятностей;
- пользоваться аппаратом вероятностных функций распределения;
- решать газокинетические задачи с учетом внешних полей;
- решать задачи о поведении макроскопических систем в заданном внешнем поле;
- применять метод теории Чепмена-Энскога для вывода уравнений газовой динамики;
- применять метод Чепмена-Энскога в кинетической теории смеси газов;
- применять уравнение Фоккера-Планка для нахождения коэффициентов диффузии.

**владеть:**

- Основными методами математического аппарата как классической кинетической теории газов;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами макроскопических систем различной природы, так и с их кинетическими свойствами.

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

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

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Перечень контрольных вопросов:

1. Термодинамика. Базовые понятия. Начала термодинамики.
2. Идеальный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна
3. Термодинамические потенциалы. Термодинамические тождества.
4. Уравнение состояния и термодинамические потенциалы идеального бозе-газа.
5. Соотношения между производными термодинамических величин.
6. Парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау электронов в металле.
7. Максимальная работа. Термодинамические неравенства.
8. Химический потенциал, давление и теплоемкость электронов в металле.
9. Зависимость термодинамических величин от числа частиц.
10. Идеальный ферми-газ. Энергия Ферми и температура вырождения ферми-газа.
11. Равновесие тела во внешнем поле.
12. Распределение Гиббса с переменным числом частиц. Большой канонический ансамбль.
13. Термодинамический потенциал  $\Omega$ .
14. Квантовые газы. Распределение Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна
15. Связь максимальной работы с энтропией неравновесного состояния.
16. Квантовая поправка к уравнению состояния идеального газа вдали от вырождения.
17. Статистика гауссовых флуктуаций. Флуктуации основных термодинамических величин.
18. Свободная энергия слабо неидеального классического газа. Вириальное разложение. Формула Ван-дер-Ваальса.
19. Флуктуации числа частиц в идеальном газе. Распределения Пуассона и Гаусса.
20. Термодинамические потенциалы идеального газа с постоянной теплоемкостью.
21. Метод ансамблей Гиббса. Средние значения. Эргодическая гипотеза.
22. Условие химического равновесия. Ионизационное равновесие. Формулы Саха.
23. Классический статистический ансамбль. Функция распределения.
24. Свойства пара- и ортоводорода.
25. Классическое уравнение Лиувилля.
26. Статистическая сумма, свободная энергия и энтропия одноатомного идеального газа.
27. Гипотеза о равных априорных вероятностях. (Микроканонический ансамбль).
28. Статистическая сумма, свободная энергия и энтропия двухатомного идеального газа.
29. Матрица плотности. Определение, свойства. Пример матрицы плотности. Квантовое уравнение Лиувилля.
30. Статистика и термодинамика черного излучения. Фотоны.
31. Квантовый статистический ансамбль.
32. Фононы в твердых телах. Модель Дебая.
33. Распределение Гиббса (Канонический ансамбль). Квантовый вариант.
34. Статистическая сумма и свободная энергия идеального газа. (Общее соотношение).
35. Распределение Гиббса (Канонический ансамбль). Классический вариант.
36. Термодинамические потенциалы идеального газа с постоянной теплоемкостью.

37. Энтропия как характеристика статистического ансамбля. Адиабатический процесс.
38. Уравнение адиабаты для идеального газа и черного излучения
39. Статистическая сумма и свободная энергия многоатомного идеального газа.
40. Распределение Гиббса (Канонический ансамбль). Квантовый вариант.
41. Условие равновесия фаз. Формула Клапейрона-Клаузиуса. Критическая точка. Тройная точка.

Примеры контрольных заданий:

1. Система состоит из  $N$  невзаимодействующих осцилляторов. Найти число состояний (фазовый интеграл) в классическом случае и, пользуясь им, определить энтропию системы  $S$  при заданной энергии  $E$ . Получить связь между энергией и температурой системы. Найти теплоемкость системы.
2. Вычислить энтропию и вращательную теплоемкость чистых орто- и параводорода. Записать условие их полного термодинамического равновесия и определить вращательную теплоемкость и определить вращательную теплоемкость смеси. Сравнить теплоемкость смеси при заданных концентрациях орто- и параводорода с теплоемкостью в условиях полного термодинамического равновесия.

#### 4. Критерии оценивания

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания по учебной программе дисциплины, а также по основным вопросам, выходящим за её пределы, и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка «отлично (9)» выставляется обучающемуся, если он показал систематизированные, глубокие и полные знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка «хорошо (8)» выставляется обучающемуся, если он показал систематизированные и глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений.

Оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, 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 (6)» выставляется обучающемуся, если он достаточно твердо знает материал, грамотно излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка «удовлетворительно (5)» выставляется обучающемуся, если он показал недостаточно твердое знание материала, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания в стандартной ситуации.

Оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, если он показал фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения 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 «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, если он показал фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускает ошибки в формулировках, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он в целом владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется студенту, который 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.

*Пример для экзаменационного билета:*

#### **Билет № 6**

1. Равновесие тела во внешнем поле.
2. Распределение Гиббса с переменным числом частиц. Большой канонический ансамбль.
3. Найти степень диссоциации и теплоемкость двухатомного газа при высоких температурах. Молекула газа состоит из одинаковых атомов и в нормальном состоянии не имеет спина и орбитального момента.

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

Например, порядок проведения экзамена, особенности оценки выполненных заданий.

*Пример оформления:*

Для устного экзамена:

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 40 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

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