Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Факультет вычислительной математики и кибернетики

**УТВЕРЖДАЮ**

декан факультета вычислительной математики и кибернетики

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/И.А. Соколов /**

**«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_г.**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**

**Статистическая физика**

**Уровень высшего образования:**

**бакалавриат**

**Направление подготовки / специальность:**

**01.03.02 «Прикладная математика и информатика» (3++)**

**Направленность (профиль):**

**Математические методы обработки информации и принятия решений**

**Форма обучения:**

**очная**

**Москва 2023**

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 01.03.02, 01.04.02 "Прикладная математика и информатика" программы бакалавриата Утвержден приказом МГУ от 30 августа 2019 года № 1041 (в редакции приказов МГУ от 11 сентября 2019 года № 1109, от 10 июня 2021 года № 609, от 7 октября 2021 года № 1048, от 21 декабря 2021 года № 1404, от 2 ноября 2022 года № 1299)

**1.** Дисциплина относится к вариативной части ОПОПВО.

**2.** Входные требования для освоения дисциплины (модуля): учащиеся должны владеть знаниями по общей физике в объеме, соответствующем программе первого и второго годов обучения основных образовательных программ бакалавриата по укрупненным группам направлений и специальностей 01.00.00 «Математика и механика», 02.00.00 «Компьютерные и информационные науки»

**3.** Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников*.*

Компетенции выпускников, частично формируемые при реализации дисциплины (модуля):

* **ОПК-1.Б** Способность применять и адаптировать существующие математические и компьютерные методы для разработки и реализации алгоритмов решения актуальных задач в области фундаментальной и прикладной математики
* **ПК-2.Б** Способность понимать и применять в научно-исследовательской деятельности современный математический аппарат

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

В результате освоения дисциплины обучающийся должен понимать физические принципы, лежащие в основе явлений, происходящих в макроскопических средах; и знать основные теоретические методы, применяющиеся для описания соответствующих явлений и процессов.

В частности, ставятся следующие задачи:

1. создать представление о том, как возникали и развивались основные физические и математические модели явлений, происходящих в макроскопических средах;
2. определить роль и место статистической физики и термодинамики в системе физических знаний;
3. выяснить характер и особенности развития статистической физики в определенные исторические периоды, оценить вклад, внесенный в статистическую физику и термодинамику великими учеными прошлого;
4. проанализировать, каков исторический путь и в какой связи с потребностями людей и задачами других наук шло развитие термодинамики и статистической физики;
5. установить связи статистической физики с другими разделами физики и математики;
6. овладеть навыками работы с литературой, особенностями библиографического поиска, научиться правильно цитировать и ссылаться на использованные материалы.

**4.** Формат обучения: лекции и семинарские занятия проводятся с использованием меловой доски.

**5.** Объем дисциплины (модуля) составляет3 зачетных единицы (108 часов). Лекции – 36 часов, семинары – 36 часов, самостоятельная работа 36 часов, экзамен в 5 семестре.

**6.** Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),**  **Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)** | **Всего**  **(часы**) | В том числе | | | |
| **Контактная работа  (работа во взаимодействии с преподавателем)**  **Виды контактной работы, часы** | | | **Самостоятельная работа обучающегося,**  **часы** |
| Занятия лекционного типа\* | Занятия семинарского типа\* | **Всего** |
| **Предмет и методы статистической физики.** Основные методы и подходы. Необходимые понятия из теории вероятностей и их связь с физическими наблюдениями. Примеры плотностей вероятности. Совместные, парциальные и условные плотности вероятности. Независимые случайные величины.  Броуновское движение. Зависимость среднего квадрата смещения от времени. Агрегатные состояния вещества. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Газовые законы и основные распределения статистической физики.**  Давление идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Фазовое пространство и распределение в нем. Уравнение Лиувилля. Его стационарные решения: микроканоническое и каноническое распределения. Преимущества распределения Гиббса. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Следствия из распределения Гиббса.**  Распределение по проекциям скоростей. Распределение Максвелла. Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Закон распределения энергии по степеням свободы. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Молекулярно-кинетические представления.**  Среднеквадратичная скорость молекулы и средний модуль скорости. Частота соударения молекул и длина свободного пробега.  Явления переноса: диффузия, вязкость и теплопроводность. Элементарный расчет соответствующих коэффициентов. Дифференциальное уравнение диффузии и его решение. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Первый закон термодинамики.**  Внутренние и внешние термодинамические параметры. Внутренняя энергия идеального газа и его теплоемкость. Внешняя работа. Теплота. Первый закон термодинамики в частном случае параметров *N* и*V* и для других сопряженных термодинамических параметров. Различные способы введения внутренней энергии. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Второй закон термодинамики.**  Адиабатический процесс. Цикл Карно. Второй закон термодинамики в формулировках Карно и Томсона.  Термодинамическое определение энтропии. Энтропия как функция состояния в общем случае. Информационный смысл энтропии. Энтропия как мера неопределенности молекул идеального газа. | 12 | 4 | 4 | **8** | **4**  **Контрольная работа №1** |
| **Энтропийная формулировка.**  Энтропийная формулировка второго закона термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.  Парциальная плотность распределения вероятности по внутренним термодинамическим параметрам. Микронарушения второго закона термодинамики. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Термодинамические потенциалы.**  Внутренняя энергия и энтальпия как термодинамические потенциалы. Выражения для *CV* и *CP* через них. Свободная энергия и потенциал Гиббса. Второй закон термодинамики в случае изотермических процессов. Связь равновесного распределения термодинамических параметров со свободной энергией. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Статистическая сумма.**  Выражение, определяющее энтропию через распределение в фазовом пространстве. Статистическая сумма (интеграл) и ее связь со свободной энергией. Определение термодинамических функций при помощи статистической суммы. Примеры их расчета. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Реальные газы.**  Потенциал взаимодействия молекул реального газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса и физический смысл постоянных*а* и *b.* Термодинамические функции газа Ван-дер-Ваальса.  Изотермы Ван-дер-Ваальса. Переход из газообразного состояния в жидкое и наоборот. Критическая точка. Расчет постоянных Ван-дер-Ваальса методом статистической суммы. | **12** | 4 | 4 | **8** | **4**  **Контрольная работа №2** |
| **Корреляционные функции физических флуктуаций.**  Расчет дисперсий и корреляционной матрицы параметров при помощи свободной энергии. Флуктуации основных термодинамических параметров. Частные случаи для переменных (*V,T*) и (*p,S*).  Флуктуации для изотермических-изобарических процессов. Флуктуации объема газа Ван-дер-Ваальса в критической точке. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Пространственные корреляции.**  Пространственные корреляции флуктуаций плотности. Корреляционная функция.  Рассеяние электромагнитных волн в пространственно-неоднородных средах. Функция атомного рассеяния. Рассеяние рентгеновских лучей в идеальных и реальных газах и в твердом теле. Межмолекулярная дифракция. | **12** | 4 | 4 | **8** | **4** |
| **Неравновесные процессы.**  Функция распределения. Уравнение Больцмана. Интеграл парных соударений.  Сохранение числа частиц, импульса и энергии в случае уравнения Больцмана. Его равновесное решение. | **12** | 4 | 4 | **8** | **4** |
| **Основы кинетической теории газов и плазмы.**  Цепочка уравнений Боголюбова.  Электромагнитные волны в плазме. Уравнение Власова. Расчет диэлектрической проницаемости. Электропроводность плазмы. | **6** | 2 | 2 | **4** | **2** |
| **Итого** | **108** | **36** | **36** | **72** | **36** |

**7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)**

**7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.**

|  |  |
| --- | --- |
| **Контрольнаяработа № 1** | |
| **Вариант 1** | **Вариант 2** |
| **1**В сосуде при температуре  находится  молекул идеального газа. Найдите число частиц, имеющих одновременно проекцию скорости на ось  в интервале  и составляющую скорости, перпендикулярную этой оси, модуль которой лежит в интервале . Масса каждой молекулы .  **2** Цилиндр разделен теплонепроницаемым подвижным поршнем на две части. Слева и справа от поршня находится по два моля одноатомного идеального газа. Температура слева поддерживается постоянной и равной , а справа – . Поршень перемещают так, чтобы он разделил сосуд на две равные части. Подсчитайте изменение энтропии  системы. Увеличилась или уменьшилась энтропия? Объясните, почему?  **3**Найдите распределение температуры в веществе, находящемся между двумя большими параллельными пластинами площадью , если их поддерживают при температурах  и , расстояние между ними равно и коэффициент теплопроводности , где  – константа. Теплоемкостью вещества между пластинами можно пренебречь. | **1**Вычислите средние значения проекции и модуля проекции скорости молекулы идеального газа на некоторое направление, если масса каждой молекулы газа , а его температура – .  **2** Цилиндр разделен теплонепроницаемым подвижным поршнем на две части. Слева и справа от поршня находится по молю двухатомного идеального газа. Температура слева поддерживается постоянной и равной , а справа – . Поршень перемещают так, чтобы он разделил сосуд на две равные части. Подсчитайте изменение энтропии  системы. Увеличилась или уменьшилась энтропия? Объясните, почему?  **3**Найдите распределение температуры в веществе, находящемся между двумя большими параллельными пластинами площадью , если их поддерживают при температурах  и , расстояние между ними равно и коэффициент теплопроводности , где  – константа. Теплоемкостью вещества между пластинами можно пренебречь. |
| **Контрольная работа № 2** | |
| **Вариант 1** | **Вариант 2** |
| **1** Найдите КПД цикла, состоящего из двух изохор с объемами  и () и двух адиабат. Рабочим веществом является один моль газа Ван-дер-Ваальса, константы  и  которого известны, а молярная теплоемкость  не зависит от температуры.  **2**Докажите соотношение Максвелла .  **3**В первом состоянии один моль идеального газа находится в цилиндре высотой *H* и площадью *S* в поле силы тяжести *g*. Затем его переводят во второе состояние, деформировав сосуд в цилиндрический сосуд высотой *H*/2 и такого же объема. Найдите, с помощьюстатсуммы на какую величину  изменится свободная энергия. Затем начинается свободное падение сосуда (третье состояние), что соответствует отключению гравитационного поля. Найдите, на какую величину  изменится свободная энергия. Температура поддерживается постоянной. Масса одной молекулы . Увеличивается или уменьшается свободная энергия, объясните, почему. | **1**Найдите КПД цикла, состоящего из адиабаты, изотермы (температура , объем уменьшается от  до ) и изохоры (объем , температура увеличивается от  до ). Рабочим веществом является газ Ван-дер-Ваальса, константы  и которого известны, а теплоемкость  не зависит от температуры.  **2**Докажите соотношение Максвелла .  **3**В первом состоянии один моль идеального газа находится в цилиндре с поршнем высотой *H* площадью *S* в поле силы тяжести *g*. Затем его переводят во второе состояние, опустив поршень до высоты *H*/2. Найдите, с помощьюстатсуммы на какую величину  изменится свободная энергия. Затем начинается свободное падение сосуда (третье состояние), что соответствует отключению гравитационного поля. Найдите, на какую величину  изменится свободная энергия. Температура  поддерживается постоянной. Масса одной молекулы . Увеличивается или уменьшается свободная энергия, объясните, почему |

7.2. **Вопросы к экзамену.**

1. Предмет и методы статистической физики. Броуновское движение. Зависимость среднего квадрата смещения от времени.
2. Примеры плотностей распределения вероятности. Совместные, парциальные и условные плотности вероятности. Независимые случайные величины.
3. Давление идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
4. Фазовое пространство и распределение в нем. Уравнение Лиувилля. Его стационарные решения: микроканоническое и каноническое распределения.
5. Распределение по проекциям скоростей. Распределение Максвелла. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.
6. Закон распределения энергии по степеням свободы.
7. Среднеквадратичная скорость молекулы и средний модуль скорости. Частота соударения молекул и длина свободного пробега.
8. Явления переноса: диффузия, вязкость и теплопроводность. Элементарный расчет соответствующих коэффициентов. Дифференциальное уравнение диффузии и его решение.
9. Внутренние и внешние термодинамические параметры. Внутренняя энергия идеального газа и его теплоемкость. Внешняя работа. Теплота.
10. Первый закон термодинамики в частном случае параметров *T* и *V* и для других сопряженных термодинамических параметров.
11. Второй закон термодинамики. Адиабатический процесс. Цикл Карно. Второй закон термодинамики в формулировках Карно и Томсона.
12. Термодинамическое определение энтропии. Энтропия как функция состояния в общем случае. Информационный смысл энтропии.
13. Энтропия как мера неопределенности молекул идеального газа. Информационный смысл энтропии.
14. Энтропийная формулировка второго закона термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.
15. Внутренняя энергия и энтальпия как термодинамические потенциалы. Выражения для *CV* и *CP* через них.
16. Связь равновесного распределения термодинамических параметров со свободной энергией.
17. Свободная энергия и потенциал Гиббса. Второй закон термодинамики в случае изотермических процессов. Максимальная работа и критерий устойчивости состояния.
18. Статистическая сумма (интеграл) и ее связь со свободной энергией. Определение термодинамических функций при помощи статистической суммы.
19. Парциальная плотность распределения вероятности по внутренним термодинамическим параметрам. Микронарушения второго закона термодинамики.
20. Потенциал взаимодействия молекул реального газа. Статистическая сумма для газа Ван-дер-Ваальса.
21. Уравнение Ван-дер-Ваальса и физический смысл постоянных*а* и *b.* Термодинамические функции газа Ван-дер-Ваальса.
22. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическая точка. Расчет постоянных Ван-дер-Ваальса методом статистической суммы.
23. Выражение, определяющее энтропию через распределение в фазовом пространстве.
24. Флуктуации основных термодинамических параметров.
25. Частный случай флуктуаций для переменных (*V,T*). Флуктуации объема при фиксированном давлении и флуктуации числа частиц в выделенном объеме для газа Ван-дер-Ваальса.
26. Цепочка уравнений ББГКИ для равновесных функций плотности распределения.
27. Одно- и двухчастичные функции в приближении малых взаимодействий. Примеры применения.
28. Идея получения неравновесной цепочки уравнений ББГКИ из уравнения Лиувилля.

**Типовые задачи для экзамена.**

|  |  |
| --- | --- |
| 1. Произвольная термодинамическая система квазистатически переводится из равновесного состояния *1* в равновесное состояние *2* двумя способами. При первом способе система адиабатическиохлаждается до температуры , затем изотермически получает тепло, и, наконец, адиабатически переходит в состояние *2*. При втором способе переход осуществляется по произвольному пути, однако так, что на каждом участке этого пути система получает теплоту, а ее температура остается выше . Покажите, что при первом способе для перевода системы из состояния 1 в состояние 2 она получает меньшее количество теплоты, чем во втором.  2. Пусть имеется цилиндр, разделенный перегородкой на две равные части, объемом *V*каждая, и пусть слева и справа от перегородки находится один и тот же идеальный газ при температуре *Т*. Концентрация частиц слева *n10,* а справа – *n20*. Подсчитайте, как изменится энтропия системы, если перегородку убрать.  3. Обратимый цикл тепловой машины с произвольным рабочим веществом состоит из политропического нагревания, политропического охлаждения (оба процесса происходят с увеличением энтропии) и замыкается изотермой. Определите КПД цикла, если отношение максимальной и минимальной абсолютных температур в цикле равно | 4. Определите зависимость средней длины свободного пробега молекулы идеального газа от температуры для изохорического и изобарического процессов.  5. Металлический цилиндр радиусом  расположен коаксиально внутри цилиндрической оболочки радиусом . Между цилиндром и оболочкой находится вещество с коэффициентом теплопроводности . Найдите зависимость температуры цилиндра от времени, если масса его единицы длины , удельная теплоемкость , температура в начальный момент времени . Температура оболочки постоянна и равна . Теплоемкостью вещества между цилиндрами пренебречь. Теплопроводность цилиндра считать бесконечно большой.  6. Найдите распределение температуры в веществе, находящемся между двумя большими параллельными пластинами площадью , если их поддерживают при температурах  и , расстояние между ними равно и коэффициент теплопроводности , где  – константа. Теплоемкостью вещества между пластинами можно пренебречь |

**Экзаменационный билет** состоит из двух вопросов и задачи, например

1. Примеры плотностей вероятности. Совместные, парциальные и условные плотности вероятности. Независимые случайные величины.

2. Свободная энергия и потенциал Гиббса. Второй закон термодинамики в случае изотермических процессов. Максимальная работа и критерий устойчивости состояния.

3. С одним молем идеального газа проводят процесс , где  и  – постоянные. Найдите максимально возможную температуру газа в этом процессе. На диаграмме  получите решение графически.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)** | | | | |
| Оценка  РО и соответствующие виды оценочных средств | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **Умения**  *Контрольная работа,* | Отсутствие умений | В целом успешное, но не систематическое умение | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера) | Успешное и систематическое умение |
| **Навыки  (владения, опыт деятельности)**  *Экзамен (и/или и т.п.)* | Отсутствие навыков (владений, опыта) | Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта) | В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме | Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач |

8. Ресурсное обеспечение:

Основная литература:

1. СтратановичР.Л., Полякова М.С. Элементы молекулярной физики, термодинамики и статистической физики. – м.: Изд-во Московского университета, 1981.

2. Вишнякова Е.А. Макаров В.А., Полякова М.С., Чичигина О.А. Основы термодинамики и статистической физики. Практические занятия по физике для студентов-математиков. Часть. II. – М.: Макс-пресс, 2010.

Дополнительная литература:

1.Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Статистическая физика, ч.1. – М.: Наука, 1976.

2. Ю. Л. Климонтович Статистическая физика. – М.: Наука, 1982.

3. И.А. Квасников Термодинамика и статистическая физика. В двух томах. – М.: УРСС, 2002.

4. Д. В. Сивухин Общий курс физики, т.II. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1989.

5. Ф. РейфБерклеевский курс физики. Т. V. Статистическая физика. - М.: Наука, 1972.

Информационные справочные системы:

Студентам предлагается ознакомиться с результатами компьютерного моделирования некоторых физических процессов, о которых идет речь в курсе:

<http://ofvp.phys.msu.ru/science_education/lections/detail.php?ID=745>

Материально-техническкое обеспечение: аудитория с партами и меловой доской.

9. Язык преподавания - русский.

10. Преподаватели: профессора физического факультета МГУ А.В.Андреев,

доценты физического факультета МГУ О.А.Чичигина, И.А.Федотов

11. Авторы программы: Сотрудники физического факультета МГУ: профессор А.В.Андреев и доцент О.А.Чичигина