



**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по УМР

Е.В. Коновалова

20 июня 2019 г., протокол УС №6

## МОДУЛЬ "ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА"

### Физическая кинетика

#### рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой           **Экспериментальной физики**

Учебный план                       b030302-ЦифрТех-19-1.plx  
03.03.02 ФИЗИКА  
Направленность (профиль): Цифровые технологии в геофизике

Квалификация                       **Бакалавр**

Форма обучения                   **очная**

Общая трудоемкость               **2 ЗЕТ**

Часов по учебному плану	72	Виды контроля в семестрах: зачеты 8
в том числе:		
аудиторные занятия	32	
самостоятельная работа	40	

**Распределение часов дисциплины по семестрам**

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	8 (4.2)		Итого	
	9,7			
Вид занятий	уп	рпд	уп	рпд
Лекции	8	8	8	8
Практические	24	24	24	24
Итого ауд.	32	32	32	32
Контактная работа	32	32	32	32
Сам. работа	40	40	40	40
Итого	72	72	72	72

Программу составил(и):  
к.ф.-м.н., доцент, С. Л. Лебедев



Рабочая программа дисциплины  
**Физическая кинетика**

разработана в соответствии с ФГОС:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 (уровень бакалавриата) (приказ Минобрнауки России от 07.08.2014г. №937)

составлена на основании учебного плана:

03.03.02 ФИЗИКА

Направленность (профиль): Цифровые технологии в геофизике

утвержденного учёным советом вуза от 20 июня 2019 г., протокол УС №6

Рабочая программа одобрена на заседании кафедры  
**Экспериментальной физики**

Протокол от 14 05 2019 г. № 03/10

Срок действия программы: - уч.г.

Зав. кафедрой д.ф.м.-н., с.н.с. Ельников А.В.



Председатель УМС к.т.н., доцент Тараканов Д.В.

07 06 2019 г. № 06/19



### 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1	Знакомство с проблемой обоснования статистической механики. Формирование представления о кинетических процессах, как об эволюции статистических свойств макросистем, и о способах описания неравновесных состояний.
-----	---

### 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ООП:	Б1.Б.08
<b>2.1</b>	<b>Требования к предварительной подготовке обучающегося:</b>
2.1.1	Статистическая физика
2.1.2	Электродинамика
2.1.3	Термодинамика
2.1.4	Теоретическая механика
2.1.5	Модуль "Общая физика"
2.1.6	Модуль "Математика"
2.1.7	Теория вероятностей и математическая статистика
<b>2.2</b>	<b>Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:</b>
2.2.1	Дипломная практика
2.2.2	Модуль "Теоретическая физика"

### 3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**ОК-6:** способностью работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия

**ОК-7:** способностью к самоорганизации и самообразованию

**ОПК-3:** способностью использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач

**В результате освоения дисциплины обучающийся должен**

<b>3.1</b>	<b>Знать:</b>
3.1.1	- основные положения теории термодинамических (равновесных) флуктуаций;
3.1.2	- существо проблемы обоснования статистической механики, как проблемы описания перехода от микроскопической обратимости к макроскопической необратимости;
3.1.3	- основные математические понятия, формирующие технический арсенал неравновесной статистики (неравновесные функции распределения, корреляторы, примеры кинетических уравнений, принцип ослабления корреляций и т.д.), а также содержание теоремы Больцмана;
3.1.4	- физическое содержание и основные параметры (кинетические коэффициенты) простейших неравновесных процессов (вязкость, диффузия, теплопроводность, электропроводность);
3.1.5	- примеры описания кинетических процессов броуновского типа с помощью уравнения Ланжевена и уравнения Фоккера – Планка;
3.1.6	- принципиальные отличия в описании кинетических процессов в классической и квантовой статистике;
3.1.7	- примеры использования фундаментальных законов кинетики для решения профессиональных задач геофизики
<b>3.2</b>	<b>Уметь:</b>
3.2.1	- находить (вычислять) флуктуации основных термодинамических параметров, средние значения и дисперсии величин аддитивного и бинарного динамических типов;
3.2.2	- применять размерностные оценки для нахождения параметров неравновесных состояний;
3.2.3	- работать в многонациональном творческом коллективе в условиях конфессиональных и культурных различий

<b>3.3 Владеть:</b>	
3.3.1	- основными представлениями и понятиями физической кинетики;
3.3.2	- техническими приёмами вычислений (метод якобианов, метод термодинамических потенциалов, метод функций распределения и т.д.);
3.3.3	- приёмами нахождения частных вероятностных распределений для конкретных задач.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетенции	Литература	Инте ракт.	Примечание
	<b>Раздел 1. Теорема возврата А. Пуанкаре и эргодическая гипотеза.</b>						
1.1	Теорема возврата А.Пуанкаре и эргодическая гипотеза. /Лек/	8	1	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.3Л2.1 Л2.3 Э2	0	
1.2	Теорема возврата А.Пуанкаре и эргодическая гипотеза. /Пр/	8	2	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.4Л3.1	0	Решение задач
1.3	Теорема возврата А.Пуанкаре и эргодическая гипотеза. /Ср/	8	4	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.2	0	Подготовка к практическому занятию
	<b>Раздел 2. Состояния, близкие к равновесным. Термодинамические флуктуации</b>						
2.1	Состояния, близкие к равновесным. Термодинамические флуктуации /Лек/	8	3	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л2.1	0	
2.2	Состояния, близкие к равновесным. Термодинамические флуктуации /Пр/	8	5	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.1Л2.2	0	Решение задач
2.3	Состояния, близкие к равновесным. Термодинамические флуктуации /Ср/	8	8	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.2	0	Подготовка к практическому занятию
	<b>Раздел 3. Процессы переноса и кинетические коэффициенты</b>						
3.1	Процессы переноса и кинетические коэффициенты /Лек/	8	1	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.3Л2.1	0	
3.2	Процессы переноса и кинетические коэффициенты /Пр/	8	6	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.1Л2.2	0	Решение задач
3.3	Процессы переноса и кинетические коэффициенты /Ср/	8	8	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.2	0	Подготовка к практическому занятию
	<b>Раздел 4. Броуновское движение и родственные процессы</b>						
4.1	Броуновское движение и родственные процессы /Лек/	8	1	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.3Л2.1 Л2.2 Э3 Э4	0	
4.2	Броуновское движение и родственные процессы /Пр/	8	6	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.1Л2.2 Э3 Э4	0	Решение задач
4.3	/Контр.раб./	8	0			0	Контрольная работа
4.4	Броуновское движение и родственные процессы /Ср/	8	10	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.2 Э3 Э4	0	Подготовка к практическому занятию
	<b>Раздел 5. Уравнение Больцмана. Н-теорема Больцмана.</b>						
5.1	Уравнение Больцмана. Н-теорема Больцмана. /Лек/	8	2	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.3Л2.1 Л2.3 Э2	0	
5.2	Уравнение Больцмана. Н-теорема Больцмана. /Пр/	8	5	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.1Л2.2 Э3 Э4	0	Решение задач
5.3	Уравнение Больцмана. Н-теорема Больцмана. /Ср/	8	10	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.2 Э4	0	Подготовка к практическому занятию
	<b>Раздел 6.</b>						

6.1	/Зачёт/	8	0	ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	0	
-----	---------	---	---	--------------------	-----------------------	---	--

## 5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

### 5.1. Контрольные вопросы и задания

Приложение № 1

### 5.2. Темы письменных работ

Приложение № 1

### 5.3. Фонд оценочных средств

Приложение № 1

### 5.4. Перечень видов оценочных средств

контр. работа. Зачет

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 6.1. Рекомендуемая литература

#### 6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л1.1	Щеголев И. Ф.	Элементы статистической механики, термодинамики и кинетики: [учебное пособие]	Долгопрудный: Интеллект, 2008	3
Л1.2	Кондратьев А. С., Райгородский П. А.	Задачи по термодинамике, статистической физике и кинетической теории: учеб. пособие	Москва: Физматлит, 2007, <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=2209">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=2209</a>	1
Л1.3	Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.	Физическая кинетика	Москва: Физматлит, 2002, <a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=2692">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&amp;pl1_id=2692</a>	1

#### 6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л2.1	Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.	Физическая кинетика: Учебное пособие	М.: Физматлит, 2001	9
Л2.2	Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш.	Термодинамика, статистическая физика и кинетика: Учебное пособие	Новосибирск: Издательство Новосибирского университета, 2001	20
Л2.3	Козлов В. В.	Ансамбли Гиббса и неравновесная статистическая механика	Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2008, <a href="http://www.iprbookshop.ru/16490">http://www.iprbookshop.ru/16490</a>	1

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л2.4	Бокштейн Б. С., Менделев М. И., Похвиснев Ю. В.	Физическая химия. Термодинамика и кинетика: Учебник	Москва: Издательский Дом МИСиС, 2012, <a href="http://www.iprbookshop.ru/57094.html">http://www.iprbookshop.ru/57094.html</a>	1

#### 6.1.3. Методические разработки

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л3.1	Бландов А. Н.	Кинетика ферментативных реакций: Учебно-методическое пособие	Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015, <a href="http://www.iprbookshop.ru/66505.html">http://www.iprbookshop.ru/66505.html</a>	1

#### 6.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

Э1	Государственная публичная научно-техническая библиотека России (ГПНТБ России)			
Э2	каталог статей и препринтов			
Э3	А.Н. Валл, В.А. Наумов, А.Э. Растегин, ФизКин, Лекции, Иркутск, Иркутский Гос Ун-т, 2001			
Э4	Лекторий МФТИ			

#### 6.3.1 Перечень программного обеспечения

6.3.1.1	Microsoft Office			
---------	------------------	--	--	--

#### 6.3.2 Перечень информационных справочных систем

6.3.2.1	<a href="http://www.garant.ru/">http://www.garant.ru/</a> Информационно-правовой портал Гарант.ру			
6.3.2.2	<a href="http://www.consultant.ru/">http://www.consultant.ru/</a> Справочно-правовая система Консультант Плюс			

### 7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

7.1	Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа (практических занятий), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации оснащены: типовой учебной мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации.			
-----	---	--	--	--

### 8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

--	--	--	--	--

**ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА**  
**Приложение к рабочей программе по дисциплине**

**ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА**

Квалификация выпускника	бакалавр
Направление подготовки	03.03.02 Физика
Направленность (профиль)	Цифровые технологии в геофизике
Форма обучения	очная
Кафедра- разработчик	Кафедра экспериментальной физики
Выпускающая кафедра	Кафедра экспериментальной физики

**Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы**

В качестве текущего средства контроля успеваемости предусмотрена одна контрольная работа в конце семестра и устный опрос; **промежуточным** средством контроля является **зачёт** (8 семестр). Курсовая работа учебным планом не предусмотрена. Учебно-методическое сопровождение самостоятельной работы рассчитано на использование студентами книг и учебников из списка как основной, так и дополнительной литературы.

**Этап: проведение текущего контроля успеваемости по дисциплине (7 семестр)**

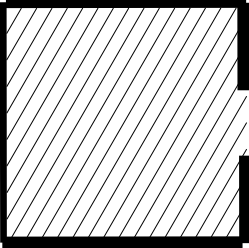
### **СОДЕРЖАНИЕ**

- I. Теорема возврата А. Пуанкаре и эргодическая гипотеза.
- II. Состояния, близкие к равновесным. Термодинамические флуктуации
- III. Процессы переноса и кинетические коэффициенты
- IV. Броуновское движение и родственные процессы
- V. Уравнение Больцмана. *H*-теорема Больцмана.

### **РАЗДЕЛЫ II - V**

1. Какие соображения позволяют совместить фундаментальное утверждение теоремы возврата А. Пуанкаре и наблюдаемую на опыте необратимость процессов релаксации?
2. Рассмотрите идеальный газ в сосуде, разделённом перегородкой с отверстием на две неравные части. Используя биномиальное распределение и принцип Больцмана, покажите, что равновесному состоянию отвечает состояние с одинаковой концентрацией молекул в двух частях сосуда.
3. Используя фундаментальное решение уравнения диффузии, определите функцию распределения вероятности найти броуновскую частицу на расстоянии  $r$  от некоторой начальной точки через промежуток времени  $t$  после начала движения.
4. Подсчитайте число различных микросостояний для системы из двух тождественных фермионов, энергии которых могут принимать только два значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  с кратностями вырождения  $v_{\varepsilon_1} = 4$  и  $v_{\varepsilon_2} = 2$  соответственно (то есть фермионы можно распределять по двум «ящикам» с числом «ячеек» 4 и 2 соответственно). Как изменится ответ, если частицы не тождественны? Совпадёт ли этот ответ со статистическим весом системы двух классических и одинаковых частиц («бильярдных шаров»)?
5. Промоделируйте дискретное отображение «кошка Арнольда» на компьютере, взяв в качестве «объёма» квадрат  $(0,1) \times (0,1)$ . Продемонстрируйте возникновение «динамического хаоса», взяв начальные координаты 20 – 30 точек достаточно близкими друг к другу.



6. Покажите, что спектральная характеристика одномерного случайного процесса с  $\delta$ -образной корреляционной функцией соответствует представлению о «белом шуме».
7. Укажите основные временные и пространственные масштабы, а также соотношения между ними в случае, если броуновская частица движется в газе или жидкости.
8. Запишите уравнение Ланжевена для броуновской частицы, находящейся в поле тяжести. Как изменяется средний квадрат её удаления от произвольной начальной точки с течением времени? Сохранится ли равенство:  $\langle x^2 \rangle \propto t$  ?
9. Адсорбированные на поверхности воды молекулы нерастворимого поверхностно активного вещества могут образовывать двумерный максвелловский газ. Допустим, что этот газ заключён в «сосуд», в стенке которого имеется небольшая одномерная «щель». Найти функцию распределения вылетающих через эту щель частиц и с её помощью определить их среднюю кинетическую энергию.
- 
10. Выясните, являются ли флуктуации давления и температуры в идеальном газе независимыми. Каков будет ответ, если в качестве газа взять равновесный фотонный газ (тепловое излучение)?
11. Являются ли флуктуации энтропии и давления независимыми? Рассмотрите в качестве примера идеальный газ (фотонный газ).
12. Приведите примеры уравнений линейной термодинамики необратимых процессов и укажите в каждом конкретном случае физический смысл обобщённых «потоков» и «сил».
13. Используя распределение Больцмана, вычислить среднеквадратичную дисперсию потенциальной энергии молекулы, обладающей фиксированным магнитным моментом  $\mu$ , если парамагнитный газ помещен во внешнее магнитное поле с индукцией  $B$ . [Указание: используйте соотношение  $\langle (\Delta W_{\Pi})^2 \rangle = \langle W_{\Pi}^2 \rangle - \langle W_{\Pi} \rangle^2$ ,  $W_{\Pi} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ ].
14. Используя определение длины свободного пробега и числа столкновений молекул в единицу времени, определить зависимость этих параметров от давления, если газ сжимали адиабатически.
15. Покажите, что в случае идеального одноатомного газа интеграл столкновений Больцмана обращается в нуль, если функция распределения атомов по скоростям совпадает с максвелловской.
16. Рассмотрите распределение Бернулли и, указав соответствующие асимптотические условия, покажите, как на его основе можно получить распределение Пуассона и распределение Гаусса.
17. Идеальный равновесный пространственно однородный классический газ из  $N$  частиц находится в объёме  $V$ . Определить вероятность обнаружить  $N_1$  частиц в объёме  $V_1 < V$ . Рассмотреть предельные случаи  $N_1 \ll N$  и  $1 \ll N_1 \ll N$ .

18. Определить относительную флуктуацию давления равновесного электромагнитного излучения, заполняющего полость объёма  $V$ , при температуре  $T$ . (Используйте планковскую функцию распределения).
19. На основе кинетического уравнения Больцмана получить барометрическую формулу Больцмана для концентрации идеального газа в однородном поле тяжести. Считать атмосферу изотермической. Подсказка: учесть, что в равновесном состоянии интеграл столкновений обращается в ноль.
20. Используя 2-частичную максвелловскую функцию распределения, найти функцию распределения молекул по *относительным* скоростям. Указание: произвести замену переменных, введя вместо скоростей двух частиц две другие скорости – скорость центра масс и относительную скорость.
21. Идеальный газ сжимают изотермически. Определить характер зависимости длины свободного пробега и средней частоты столкновений в единице объёма от давления.
22. Идеальный газ нагревают изобарически. Определить характер зависимости длины свободного пробега и средней частоты столкновений в единице объёма от температуры.
23. Получить функцию распределения по скоростям для молекул, вылетающих в вакуум через небольшое отверстие в тонкостенном сосуде.
24. Показать, что решением уравнения Фоккера – Планка для свободной броуновской частицы, движущейся в одном измерении, является фундаментальное решение уравнения диффузии. Вычислить средний квадрат удаления броуновской частицы от начального положения с помощью функции распределения Фоккера – Планка.

### Методические материалы, определяющие процедуры оценивания результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций

Текущий контроль предназначен для проверки качества формирования компетенций, уровня овладения теоретическими и практическими знаниями, умениями и навыками. Оценивание знаний теоретического материала по каждому разделу проводится на практических занятиях. Умение решать задачи проверяется контрольной работой.

### Компетенции, формируемые в процессе выполнения заданий

(знаком «\*» отмечены задания повышенной сложности из приведённого выше списка)

<p><b>ОК-6:</b> способностью работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия (Компетенция формируется в процессе коллективного обсуждения и анализа решений задач)</p>	<p><b>ОК-7:</b> способностью к самоорганизации и самообразованию (здесь использованы задачи, решения которых подробно описаны в рекомендованных учебных пособиях)</p>	<p><b>ОПК-3:</b> способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>
<p>№ 1; № 4;</p>	<p>№ 10 - № 12;</p>	<p>№ 2, № 3, №5* - № 15*; № 21 - № 23; № 16 - № 18; № 19* - № 20*; № 24*</p>

### Примеры решений.

**Задача.** Рассмотрите идеальный газ в сосуде, разделённом перегородкой с отверстием на две неравные части. Используя биномиальное распределение и принцип Больцмана, покажите, что равновесному состоянию отвечает состояние с одинаковой концентрацией молекул в двух частях сосуда.

**Решение.** Пусть объём одной части сосуда равен  $V_1$ , а второй  $V_2$ , причём  $V_1 \neq V_2$  и  $V_1 + V_2 = V$ . Вероятность одной молекуле попасть в первую часть сосуда равна  $p = V_1/V$ , а во вторую -  $q = \frac{V_2}{V}$ ,  $p + q = 1$ . Нам необходимо определить вероятность

произвольного неравновесного состояния, когда в первой части сосуда имеется  $N_1$  частиц, а во второй -  $N_2 = N - N_1$ . Общее число частиц  $N$  считается фиксированным. Так как макроскопические свойства системы не должны зависеть от того, какие именно частицы выбраны для заполнения объёмов, то вероятность появления выборки из  $N_1$  частиц в первом объёме и, одновременно,  $N_2$  частиц во втором объёме будет в силу независимости этих событий равна  $p^{N_1} q^{N_2}$ . Осталось определить общее число таких выборок. Оно, очевидно, определяется числом сочетаний  $C_N^{N_1}$  из  $N$  по  $N_1$  (или по  $N_2$ , так как  $C_N^{N_1} = C_N^{N_2} = \frac{N!}{N_1! N_2!}$ ). Таким образом, вероятность указанного распределения частиц по

сообщающимся частям сосуда равна  $W(N_1|N) = C_N^{N_1} p^{N_1} q^{N_2}$ . Согласно Больцману, равновесному состоянию отвечает такая конфигурация, вероятность которой максимальна. Предполагая числа  $N_1$  и  $N_2$  макроскопически большими, воспользуемся формулой Стирлинга для представления логарифма  $W(N_1|N)$  в виде непрерывной функции

$$\ln(W(N_1|N)) = \text{const} - N_1 \ln(N_1) + N_1 - (N - N_1) \ln(N - N_1) + N - N_1.$$

Находим производную этой функции по  $N_1$  и, приравнявая её к нулю, получаем окончательно:

$$\ln\left(\frac{p N_2}{q N_1}\right) = 0.$$

Таким образом, условию максимальности вероятности соответствует равенство концентраций молекул в двух сообщающихся частях сосуда, т.е.  $N_1/V_1 = N_2/V_2$ .

**Задача.** На основе кинетического уравнения Больцмана получить барометрическую формулу Больцмана для концентрации идеального газа в однородном поле тяжести. Считать атмосферу изотермической. Подсказка: учесть, что в равновесном состоянии интеграл столкновений обращается в ноль.

**Решение.** Пусть  $f(\vec{x}, \vec{p}, t)$  обозначает одночастичную функцию распределения. В кинетическом уравнении Больцмана

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f + \vec{F} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = \left[ \frac{\partial f}{\partial t} \right]_{col}$$

сила  $\vec{F} = m \vec{g}$ . В равновесии функция распределения  $f(\vec{x}, \vec{p}, t)$  от времени не зависит (то есть  $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$ ), интеграл столкновений в правой части обращается в ноль, а зависимость от

координат и импульсов факторизуется:  $f = f_M(\vec{p}) n(\vec{x})$ . Последнюю формулу легко понять, если учесть, что в изотермической атмосфере в слоях газа на разных высотах распределение по скоростям - максвелловское. Тем самым распределения по скоростям и по координатам - независимы. Учтём теперь, что

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}, f_M(\vec{p}) = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{-p^2}{2mkT}\right) u n(\vec{x}) = n(z).$$

Для концентрации  $n(z)$  получаем уравнение:

$$v_z f_M \frac{\partial n}{\partial z} - mgn(z) \frac{\partial f_M}{\partial p_z} = 0.$$

Таким образом,  $v_z \frac{\partial n}{\partial z} + \frac{p_z}{kT} gn(z) = 0$ . Так как  $p_z = m v_z$ , получаем:  $n(z) = n(0) \exp(-\beta mgz)$ , где  $\beta \equiv 1/kT$ .

**Задача.** Идеальный газ сжимают изотермически. Определить характер зависимости длины свободного пробега и средней частоты столкновений в единице объёма от давления.

**Решение.** Число столкновений молекулы в единицу времени

$$\nu = 2n d^2 \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{2kT}{\mu}},$$

где  $n, d, \mu$  – концентрация молекул, их диаметр и приведённая масса соответственно. Длина свободного пробега  $l = 1/n\pi d^2 \sqrt{2}$ . При изотермическом процессе имеем  $n \propto p$ . Отсюда получаем:

$$\nu \propto p, l \propto \frac{1}{p}.$$

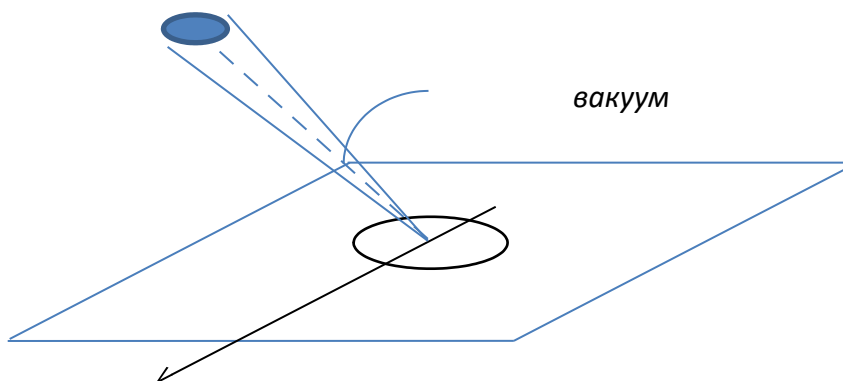
**Задача.** Определить функцию распределения по скоростям для молекул, вылетающих в вакуум через небольшое отверстие в тонкостенном сосуде.

**Решение.** Вначале необходимо определить число молекул, вылетающих через отверстие в единицу времени в заданном направлении. Направление зададим элементом телесного угла, вершина которого расположена в центре отверстия. Используем сферическую систему координат. В сферической системе координат максвелловская функция распределения определяет вероятность  $dW(v, \theta, \varphi)$  того, что находящаяся внутри сосуда частица обладает заданным значением скорости

$$dW(v, \theta, \varphi) = f_M(v, \theta, \varphi) d^3 \vec{v} = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT}\right) v^2 dv d\Omega,$$

где  $d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\varphi$  – элемент телесного угла. Построим наклонный цилиндр, роль

основания в котором играет отверстие в стенке сосуда, а все образующие параллельны направлению, задаваемому бесконечно малым телесным углом. Цилиндр располагается **внутри** сосуда. Выберем длину образующей цилиндра, равную  $v \Delta t$ . Тогда все частицы,



попавшие внутрь цилиндра и двигающиеся в выбранном направлении, за промежуток времени  $\Delta t$  пройдут через отверстие (промежуток  $\Delta t$  выбирается настолько малым, чтобы столкновения между частицами, оказавшимися в цилиндре, можно было не учитывать). Объём цилиндра равен  $\Delta S \cos(\theta) v \Delta t$ , полное число частиц в нём равно  $n \Delta S \cos(\theta) v \Delta t$  ( $n$  – концентрация молекул,  $\Delta S$  – площадь отверстия); из них

$$dN(v, \theta, \varphi) = n \Delta S \cos(\theta) v \Delta t \cdot dW(v, \theta, \varphi)$$

частиц обладают заданным модулем и направлением скорости. Отсюда находим полное число частиц, вылетающих за время  $\Delta t$  через отверстие площадью  $\Delta S$ :

$$N = n \Delta S \Delta t \int_0^{\infty} dv \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta v^3 \cos(\theta) \sin(\theta) \cdot \text{const} \cdot \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT}\right) = i$$

$$i \text{ const} \cdot n \Delta S \Delta t 2\pi \left(\frac{kT}{m}\right)^2.$$

Функция распределения вылетающих через отверстие молекул по скоростям определяется тогда, как

$$\frac{dN(v, \theta, \varphi)}{N} = w(v, \theta, \varphi) dv d\theta d\varphi = \frac{m^2}{2\pi(kT)^2} v^3 \sin(\theta) \cos(\theta) \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT}\right) dv d\theta d\varphi.$$

### Критерии оценивания контрольных работ

Проверяемые компетенции	Критерии оценивания	Оценка
ОК-7 ОПК-3	Все задачи решаются полностью: приводится верное аналитическое решение, делается правильный расчет.	<b>Отлично</b>
	Приведены решения задач контрольной работы, но есть небольшие недочеты при использовании законов, формул, в целом не влияющих на ход решения, допущены ошибки при вычислении численных результатов. Общая доля невыполненных заданий не превышает 5–7 % от общего объема контрольной работы.	<b>Хорошо</b>
	Приведены решения не всех заданий контрольной работы, есть существенные недостатки при выводе аналитических выражений, не проведены численные расчеты. Общая доля невыполненных заданий составляет не более 50 % от общего объема контрольной работы.	<b>Удовлетворительно</b>
	Решения заданий приведены неверно или вовсе отсутствуют. Общая доля невыполненных заданий составляет более 50 % от общего объема контрольной работы.	<b>Неудовлетворительно</b>

### Этап: проведение промежуточной аттестации по дисциплине

**Критерии оценивания к зачёту:** оценка «не зачтено» ставится в случае получения студентом низшего значения критерия оценивания по любому из показателей оценивания. В остальных случаях она вычисляется как среднее по дескрипторам «знает» и «умеет», но

объём усвоенного материала не должен быть ниже 60%. Условием допуска к зачёту является полный анализ ошибок, сделанных в контрольной работе.

### Вопросы к зачёту

1. Основные положения метода Гиббса. Неравновесные состояния с точки зрения метода Гиббса. Эргодическая гипотеза. Теорема возврата А. Пуанкаре. Проблема микроскопического обоснования термодинамики.
2. Время релаксации. Временные и пространственные масштабы, используемые при описании неравновесного состояния. Неравновесные функции распределения. Идея Н. Боголюбова об уменьшении числа параметров, необходимых для задания неравновесного состояния.
3. Основные статистические характеристики случайных процессов. Корреляционные функции и независимость случайных величин. Пространственно-временные корреляции и их Фурье-образы.
4. Термодинамические флуктуации. Функция распределения для флуктуаций основных термодинамических параметров. Закон  $\delta a / a \propto 1 / \sqrt{N}$  для относительных флуктуаций.
5. Процессы переноса (примеры). Обобщённые термодинамические силы и потоки. Кинетические коэффициенты. Уравнения теплопроводности и диффузии.
6. Фундаментальное решение уравнения диффузии. Задача Коши и её решение.
7. Уравнения линейной термодинамики необратимых процессов. Соотношения Онзагера. Принцип минимума производства энтропии.
8. Критерий эволюции Глендсдорфа – Пригожина. Примеры неравновесных термодинамических систем с самоорганизацией.
9. Распределение частиц, вылетающих через отверстие в сосуде, по скоростям. Двумерные распределения Максвелла.
10. Распределение частиц по относительным скоростям. Длина свободного пробега для равновесного идеального газа.
11. Уравнение Ланжевена для броуновской частицы. Зависимость среднего квадрата смещения от времени. Опыты Перрена.
12. Диффузия как случайный процесс. Фундаментальное решение уравнения диффузии как функция распределения вероятностей координат броуновской частицы. Понятие об уравнении Фоккера – Планка.
13. Броуновское движение осциллятора. Теорема Найквиста. Тепловой шум.
14. Электропроводность в модели Друде. Закон Видемана – Франца.
15. Задача рассеяния в классической механике. Основные параметры рассеяния. Сечение. Обратимость во времени.
16. Число столкновений в единице объёма в единицу времени. Интеграл (парных) столкновений для разрежённого газа.
17. Кинетическое уравнение Больцмана. Стационарное решение уравнения Больцмана.
18.  $H$  – теорема Больцмана и эволюция неравновесного состояния.

### Методические рекомендации по подготовке к зачёту.

*На зачёте* подводится итог работы студента в течение семестра.

Подготовка к зачету требует определенного алгоритма действий. Прежде всего, необходимо ознакомиться с вопросами, которые выносятся на зачет. На основе этого надо составить план повторения и систематизации учебного материала. Нельзя ограничиваться

только конспектами лекций, следует проработать рекомендованные учебные пособия и литературу. В отдельной тетради на каждый вопрос зачета следует составить краткий план ответа в логической последовательности и с фиксацией необходимого иллюстративного материала (примеры, рисунки, схемы, цифры).

Если отдельные вопросы программы остаются неясными, их необходимо написать на полях конспекта, чтобы выяснить на консультации. Важнейшую информацию следует обозначать другим цветом, это помогает лучше ее запомнить.

Следует постепенно переходить от повторения материала одной темы к другой. Когда повторен и систематизирован весь учебный материал, необходимо пересмотреть его еще раз уже со своими записями, проверяя мысленно, как усвоен материал.

#### Условия допуска студента к зачету

Для того, чтобы быть допущенным к сдаче зачета, студенту необходимо выполнить следующие требования:

- 1) регулярно посещать аудиторские занятия по дисциплине (пропуск занятий не допускается без уважительной причины); в случае пропуска занятия студент должен быть готов ответить на вопросы преподавателя, относящиеся к пропущенной теме;
- 2) выполнить контрольные работы на оценку «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно», провести анализ ошибок контрольной работы.

#### Критерии оценивания ответов на зачете

Проверяемые компетенции	Критерии оценивания	Оценка
ОК-6 ОК-7 ОПК-3	Студент показывает, что он глубоко и прочно усвоил материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой	<i>Зачтено</i>
	Материал излагается непоследовательно, сбивчиво, не представляет определенной системы знаний.	<i>Не зачтено</i>