

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»*

*Факультет физико-математических и естественных наук*

*Институт физических исследований и технологий*

Рекомендовано МССН

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**Рекомендуется для направления подготовки/специальности  
03.03.02 «Физика»**

**Квалификация (степень) выпускника  
бакалавр**

## 1. Цели и задачи дисциплины:

Курс излагается для студентов-физиков на 1-ом курсе бакалавриата.

Главной целью дисциплины является создание фундаментальной базы знаний в области молекулярно-кинетической теории вещества и тепловых процессов, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и изучение других разделов общей физики, а также курс статистической физики по теоретической физике.

Задачи дисциплины: сформировать у студентов единую, стройную, логически непротиворечивую физическую картину тепловых явлений. Создание такой картины происходит поэтапно, путем обобщения экспериментальных данных и на их основе производится построение физических моделей наблюдаемых явлений, с обоснованием условий применимости этих моделей.

## 2. Место дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина «Молекулярная физика» относится к базовой части блока Б1.О.01.07 (модуль «Общая физика») учебного плана.

Для изучения дисциплины студент должен обладать знаниями и умениями дисциплин высшей математики, дисциплины «Механика» модуля «Общей физики».

В дисциплину «Молекулярная физика» включаются лабораторные работы по молекулярной физике, которые входят в состав дисциплин модуля «Общий физический практикум» базовой части профессионального цикла по направлению 03.03.02 - физика с общей трудоемкостью - 4 зачетные единицы.

В таблице № 1 приведены предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций дисциплины в соответствии с матрицей компетенций ОП ВО.

Таблица № 1

### Предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций

№ п/п	Шифр и наименование компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
1	ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности		Дисциплины модулей «Общая физика», «Теоретическая физика»

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины:

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать:** экспериментальные основы молекулярной физики, основные явления и законы молекулярно-кинетической теории и термодинамики.

**Уметь:** решать физические задачи, связанные с физикой тепловых процессов, использовать при решении задач основные законы, теоретические представления и модели молекулярной физики.

**Владеть:** способностью проводить физические эксперименты с использованием законов молекулярной физики (в том числе с применением компьютерных технологий).

## 4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры			
				3	4
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	<b>68</b>			<b>36</b>	<b>32</b>
В том числе:					

Лекции		34			18	16
Практические занятия (ПЗ)		34			18	16
Семинары (С)						
Лабораторные работы (ЛР)						
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>		<b>112</b>			<b>36</b>	<b>76</b>
Общая трудоемкость	час	<b>180</b>			<b>72</b>	<b>108</b>
	зач. ед.	<b>5</b>			<b>2</b>	<b>3</b>

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1. Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела (темы)
1	Введение	Предмет молекулярной физики. Развитие представлений о тепловых процессах. Физические величины для описания тепловых процессов и методы их измерения. Единицы измерения термодинамических параметров.
2	Идеальные газы	Эмпирические законы идеальных газов. Число Авогадро и молярная масса. Уравнение Клапейрона-Менделеева. Постоянная Больцмана. Абсолютная шкала температур. Закон Дальтона для смеси идеальных газов.
3	Молекулярно-кинетическая теория	Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Связь средней кинетической энергии теплового движения молекул с абсолютной температурой. Броуновское движение.
4	Первое начало термодинамики	Понятия теплоты, внутренней энергии и работы в термодинамике. Первое начало как одна из форм закона сохранения энергии. Квазистатические тепловые процессы. Понятие теплоемкости. Теплоемкость идеального газа. Уравнение Майера.
5	Тепловые процессы с идеальным газом	Применение первого начала термодинамики к изопроцессам с идеальным газом. Уравнение Пуассона для адиабатического процесса. Звуковая волна в идеальном газе. Политропический процесс. Расширение идеального газа в вакуум.
6	Статистические распределения	Идеальный газ во внешнем поле. Формула Больцмана. Вероятностный смысл функции распределения молекул по скоростям. Теоремы сложения и умножения вероятностей. Условие нормировки. Распределение Максвелла. Средняя арифметическая, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорости. Экспериментальные подтверждения распределения Максвелла. Атмосферы планет. Распределение Максвелла-Больцмана.
7	Столкновения и явления переноса	Средняя длина свободного пробега молекул в газе. Эффективное сечение столкновений. Диффузия теплопроводность и вязкое трение. Нестационарные явления переноса. Перенос в разреженных газах. Эффузия и эффект Кнудсена.
8	Второе начало термодинамики	Тепловые машины и теоремы Карно. Обратимые и необратимые процессы в термодинамике. Неравенство Клаузиуса. Термодинамическое определение энтропии. Различные формулировки второго начала термодинамики. Необратимые процессы с идеальным газом. Парадокс

		Гиббса. Статистический смысл энтропии. Формула Больцмана. Энтропия как мера беспорядка.
9	Реальные газы	Силы взаимодействия между молекулами в реальных газах. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Экспериментальные изотермы реального газа. Фазовые переходы. Критическая точка. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля-Томсона. Методы сжижения газов.
10	Вещество при низких температурах	Третье начало термодинамики. Теплоемкость и внутренняя энергия вещества вблизи абсолютного нуля. Сверхтекучесть жидкого гелия. Опыты Капицы. Термомеханический и механотермический эффекты. Теория сверхтекучести жидкого гелия Ландау. Понятие отрицательной абсолютной температуры.
11	Свойства жидкостей	Сжимаемость и тепловое расширение жидкостей. Движение молекул жидкости. Модель Френкеля. Явление переноса в жидкостях. Поверхностное натяжение. Равновесие жидкости на границе двух сред. Формула Лапласа. Капиллярные явления. Гравитационно-капиллярные волны.
12	Свойства твердых тел	Кристаллические решетки и симметрии в кристалле. Решетка Браве. Дефекты кристаллической решетки и их влияние на упругие свойства твердых тел. Тепловое расширение. Классическая теория теплоемкости твердых тел. Закон Дюлонга и Пти. Квантовая теория теплоемкости Эйнштейна. Явления переноса в твердых телах.
13	Фазовые переходы	Испарение жидкостей. Скрытая теплота испарения. Зависимость упругости насыщенного пара от температуры. Давление насыщенного пара над искривленной поверхностью жидкости. Кипение жидкостей. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые переходы первого рода. Переход в твердое состояние. Диаграммы состояния и тройная точка. Полиморфные переходы. Фазовые переходы второго рода.

## 5.2. Разделы дисциплин и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекц.	Практ. зан.	Лаб. зан.	Семина	СРС	Всего час.
1	Введение	2					2
2	Идеальные газы	2	4			10	16
3	Молекулярно-кинетическая теория	2	4			10	16
4	Первое начало термодинамики	2	4			10	16
5	Тепловые процессы с идеальным газом	2	4			10	16
6	Статистические распределения	4	4			10	18
7	Столкновения и явления переноса	4	4			10	18
8	Второе начало термодинамики	2	2			8	12
9	Реальные газы	2	2			8	12
10	Вещество при низких температурах	2				8	10
11	Свойства жидкостей	4	2			8	14
12	Свойства твердых тел	4	2			10	16
13	Фазовые переходы	2	2			10	14
	ИТОГО	34	34			112	180

## 6. Лабораторный практикум

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость (час.)
1.	11	Определение вязкости жидкости по методу Стокса	4
2.	11	Измерение кинематической вязкости капиллярным методом	4
3.	11	Определение вязкости жидкости с помощью крутильного маятника	4
4.	11	Измерение вязкости газа капиллярным вискозиметром	4
5.	5	Определение отношения удельных теплоемкостей газов методом адиабатического расширения	4
6.	5	Определение скорости звука в газах методом стоячей волны	4
7.	6	Ознакомление со статистическими закономерностями на механической модели	4
8.	7	Определение коэффициента теплопроводности воздуха	4
9.	12	Измерение коэффициента теплопроводности твердых тел	4
10.	11	Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей по методу максимального давления в пузырьке	4
11.	8	Исследование изменения энтропии в изолированной системе	4
12.	12	Измерение коэффициента линейного расширения с помощью горизонтального оптиметра	4

## 7. Практические занятия (семинары)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика практических занятий (семинаров)	Трудоемкость (час.)
1	2	Идеальные газы	4
2	3	Молекулярно-кинетическая теория	4
3	4	Первое начало термодинамики	4
4	5	Тепловые процессы с идеальным газом	4
5	6	Статистические распределения	4
6	7	Столкновения и явления переноса	4
7	8	Второе начало термодинамики	2
8	9	Реальные газы	2
9	11	Свойства жидкостей	2
10	12	Свойства твердых тел	2
11	13	Фазовые переходы	2

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лекционный компьютер, компьютерный проектор, аудитория для компьютерного тестирования, кабинет лекционных демонстраций.

## 9. Информационное обеспечение дисциплины

(а) программное обеспечение:

МЕНТОР, ТУИС

б) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы:

телекоммуникационная учебно-информационная система (ТУИС)

<http://lib.rudn.ru/> - научная электронная библиотека РУДН

<http://www.edu.ru/> – федеральный образовательный портал

<http://genphys.phys.msu.ru/rus/demo/>- кабинет физических демонстраций МГУ

или [genphys.phys.msu.ru/rus/demo/comp.php](http://genphys.phys.msu.ru/rus/demo/comp.php)

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLcsjsqLLSfNCdvG1K6gh8OGVilgkA4k9U>

<http://genphys.phys.msu.ru/rus/ofp/>

<http://www.alpud.ru/>- автоматизированные лабораторные практикумы удаленного доступа.

## 10. Учебно-методическое обеспечение дисциплины:

### а) основная литература:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. СПб.: Лань, 2006.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976.
3. Сборник задач по общему курсу физики. Часть I. Механика. Молекулярная физика. М.: Изд. МФТИ, 1998.

### б) дополнительная литература:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Молекулярная физика. М.: Наука, 2005.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987.
3. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1973.
4. Беспалов С.В., Сомова Э.П., Степина С.П., Туриков В.А. Лабораторный практикум по курсу «Физика». Разделы «Молекулярно-кинетическая теория» и «Термодинамика». М.: Изд. ИАЭ, 2008.
5. Фейнман Р. и др. Фейнмановские лекции по физике. Т.1,2. М.: Либроком, 2009.

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

Необходимо обеспечить себя рекомендованными учебными материалами. В конце каждой главы в рекомендованном основном учебнике Д.В. Сивухина имеются задачи с решениями по теме раздела. Для более глубокого усвоения содержания каждого раздела необходимо внимательно изучить решения этих задач. После этого можно приступить к решению соответствующих задач из домашнего задания. Лекционный материал будет лучше усвоен при регулярной самостоятельной проработке и выполнении домашних заданий.

Лекционный курс предусматривает практическую работу студентов:

- 1) практические занятия (семинары), на которых студенты решают задачи молекулярной физики, осваивают различные методики, применяемые для решения задач;
- 2) домашнее задание по решению наиболее типичных задач по изучаемому курсу;
- 3) лабораторные работы, на которых студенты проводят экспериментальные исследования разнообразных физических явлений и получают навыки работы с современным оборудованием, средствами измерений и методами обработки результатов измерений.

Самостоятельная работа нужна как для усвоения лекционного (теоретического) материала, так и для подготовки к семинарам и лабораторным работам и выполнению домашнего задания. Самостоятельная работа необходима и при подготовке к контрольным мероприятиям (подготовка к контрольным работам и коллоквиумам, выполнение и защита лабораторных работ, решение задач домашнего задания).

## 12. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

### Шкала оценок

Соответствие систем оценок (согласно Приказу Ректора № 996 от 27.12.2006 г.)

Баллы БРС	Традиционные оценки в РФ	Баллы для перевода оценок	Оценки	Оценки
86-100	5	95-100	5+	A
		86-94	5	B
69-85	4	69-85	4	C
51-68	3	61-68	3+	D
		51-60	3	E
0-50	2	31-50	2+	FX
		0-30	2	F
51-60	Зачет		Зачет	Passed

**Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Направление/Специальность: 03.03.02 Физика

Код контролируемой компетенции или ее части	Контролируемый раздел дисциплины	Контролируемая тема дисциплины	Наименование оценочного средства														Баллы темы	Баллы раздела	
			Текущий контроль											Промежуточная аттестация					
			Опрос	Тест	Коллоквиум	Контрольная работа	Выполнение ЛР	Выполнение КР/КП	Выполнение ДЗ	Реферат	Выполнение РГР	...	...	...	Экзамен	...			...
ОПК-1	Раздел 1: Первый закон термодинамики и свойства идеальных газов	Тема 1: Тепловые процессы в идеальном газе				15										30	15	15	25
		Тема 2: Столкновения молекул в газе и явления переноса			10												10	10	
ОПК-1	Раздел 2: Второй закон термодинамики и тепловые машины	Тема 1: Теоремы Карно и КПД циклов			10												10	10	25
		Тема 2: Энтропия и необратимые тепловые процессы				15												15	
ОПК-1	Раздел 3: Свойства жидкостей и твердых тел	Тема 1: Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса			10												10	10	20
		Тема 2: Фазовые переходы и диаграммы состояния			10												10	10	
ОПК-1		Реферат																	
		<b>ИТОГО:</b>			40	30									100	35	35	70	70

## I. Вопросы к коллоквиумам

### Вопросы к коллоквиуму 1 по теме «Идеальный газ. Столкновения молекул в газе и явления переноса»

1. Какой газ можно считать идеальным? Две формы записи уравнения состояния идеального газа.
2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов. Связь абсолютной температуры со средней энергией молекул.
3. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул газа.
4. Дайте определение количества тепла и внутренней энергии. Первое начало термодинамики.
5. Внутренняя энергия и теплоемкость идеального газа. Формула Майера.
6. Адиабатический и политропический процессы. Объясните, почему звуковую волну в идеальном газе можно считать адиабатическим процессом.
7. Формула Больцмана для распределения молекул по координатам в потенциальном поле.
8. Что такое функция распределения по проекции скорости? Ее связь с вероятностью. Теоремы сложения и умножения вероятностей. Распределения Максвелла по проекции скорости (без вывода). Условие нормировки.
9. Получите распределение Максвелла по вектору скорости из распределения Максвелла по проекции скорости.
10. Получите распределение Максвелла по модулю скорости из распределения Максвелла по вектору скорости.
11. Броуновское движение. Физические предположения, лежащие в основе вывода формулы Эйнштейна.
12. Длина свободного пробега молекул и эффективное сечение столкновений.
13. Явления переноса. Законы диффузии, теплопроводности и вязкого трения.
14. Связь коэффициентов переноса с длиной свободного пробега и средней скоростью молекул.
15. Перенос в разреженных газах. Эффузия и эффект Кнудсена.

### Вопросы к коллоквиуму 2 по теме «Второе начало термодинамики. Реальные газы»

1. Коэффициент полезного действия тепловой машины. Цикл Карно и теоремы Карно.
2. Неравенство Клаузиуса. Энтропия.
3. Три формулировки второго начала термодинамики.
4. Вывести выражение для энтропии одного моля идеального газа.
5. Изменение энтропии при расширении газа в вакуум и при перемешивании газов. Парадокс Гиббса.
6. Энтропия и вероятность. Формула Больцмана.
7. Свободная энергия, термодинамический потенциал, химический потенциал.
8. Силы взаимодействия между молекулами.
9. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Физический смысл констант  $a$  и  $b$ .
10. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическая точка.
11. Экспериментальные изотермы реального газа. Фазовые переходы.
12. Получить выражение для энтропии реального газа.
13. Внутренняя энергия реального газа.
14. Процессы адиабатического расширения реального газа.
15. Процесс Джоуля-Томсона. Температура инверсии.

## II. Примерные варианты контрольных работ

### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

#### Задача 1.

Как изменится давление и теплоемкость 8 г водорода если газ нагреть в закрытом сосуде от температуры  $27^{\circ}\text{C}$  до  $1227^{\circ}\text{C}$ ? При этом 20 % молекул водорода диссоциируют на атомы.



### Задача 2.

Как изменится число ударов двухатомного газа об  $1 \text{ см}^2$  стенки сосуда за 1 сек, если объем газа адиабатически увеличить в 2 раза?

### Задача 3.

Некоторая масса азота при давлении 1 атм имела объем 5 л, а при давлении 3 атм объем 2 л. Переход от первого состояния ко второму был сделан в два этапа: сначала по изохоре, затем по изобаре. Определить изменение внутренней энергии, сообщенную теплоту и работу газа.

## **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2**

### Задача 1.

Вычислить к.п.д. цикла, состоящего из изобары, изохоры и адиабаты. Рабочее тело – идеальный газ. Теплоемкости  $C_v$  и  $C_p$  считать известными.

### Задача 2.

Два теплоизолированных баллона соединены трубкой с краном. В одном баллоне объемом  $V$  находится 1 моль газа при температуре  $T$ , в другом баллоне объемом  $4V$  – вакуум. Найти изменение температуры и энтропии газа при открывании крана. Константы Ван-дер-Ваальса и  $C_v$  этого газа считать известными.

### Задача 3.

Радиус мыльного пузыря 6 мм, коэффициент поверхностного натяжения  $4 \cdot 10^{-2}$  н/м. Вычислить добавочное давление воздуха внутри пузыря и его свободную энергию.

## **III. Примерные тренинговые задания**

1. Чему равна молярная теплоемкость одноатомного идеального газа при постоянном давлении?
2. Как изменяется температура идеального газа при его адиабатическом расширении?
3. Как с помощью функции распределения  $f(v_x)$  вычислить вероятность найти молекулу в интервале скоростей от  $v_x$  до  $v_x + dv_x$ ?
4. Как зависит длина свободного пробега молекул идеального газа от концентрации?
5. Какова размерность коэффициента теплопроводности?
6. Как зависит коэффициент теплопроводности идеального газа от температуры при постоянном давлении?
7. Неравенство Клаузиуса для необратимого кругового процесса.
8. Термодинамическое определение энтропии для бесконечно малого обратимого теплового процесса.
9. Как изменяется энтропия замкнутой термодинамической системы в необратимых процессах?
10. Уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля реального газа.
11. Размерность коэффициента поверхностного натяжения жидкости.
12. Как изменяется коэффициент поверхностного натяжения жидкости при ее нагревании?
13. Как изменяется температура кипения жидкости при увеличении внешнего давления?
14. Почему при повторных пластических деформациях (наклеп) увеличивается предел прочности кристалла?
15. Как изменяется внутренняя энергия вещества при фазовом переходе первого рода?
16. Как изменяется молярная теплоемкость твердого тела при стремлении температуры к абсолютному нулю?
17. Как изменяется энтропия идеального газа при адиабатическом расширении?
18. Как изменяется энтропия двух газов, разделенных перегородкой в жестком теплоизолированном сосуде при их перемешивании?
19. В чем состоит парадокс Гиббса при рассмотрении процесса перемешивания двух газов с использованием формулы для энтропии идеального газа?
20. Чему равна молярная теплоемкость  $C_p$  вещества в двухфазном состоянии при температуре ниже критической?

## Перечень вопросов итоговой аттестации по курсу

1. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.
2. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул.
3. Первое начало термодинамики. Теплоемкость идеального газа.
4. Столкновения молекул в газе. Явления в разреженных газах.
5. Явления переноса. Коэффициенты переноса в идеальном газе.
6. Распределение Больцмана.
7. Распределение Максвелла.
8. Теоремы Карно. Неравенство Клаузиуса.
9. Второе начало термодинамики. Энтропия.
10. Необратимые процессы в идеальном газе. Парадокс Гиббса.
11. Силы взаимодействия между молекулами.
12. Реальные газы. Изотермы Ван-дер-Ваальса.
13. Экспериментальные изотермы Ван-дер-Ваальса.
14. Критическое состояние вещества.
15. Эффект Джоуля-Томсона. Сжижение газов.
16. Поверхностное натяжение жидкостей.
17. Формула Лапласа. Капиллярные явления.
18. Явления переноса в жидкостях.
19. Третье начало термодинамики.
20. Поведение вещества при сверхнизких температурах. Жидкий гелий
21. Элементы симметрии в кристаллических решетках. Решетка Браве.
22. Дефекты в кристаллах и их влияние на механические свойства.
23. Теплоемкость твердого тела.
24. Тепловое расширение твердых тел.
25. Явления переноса в твердых телах.
26. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
27. Фазовые переходы первого и второго рода.
28. Диаграммы состояния вещества. Тройная точка.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ВО РУДН.

Руководитель направления 03.03.02

Директор института физических исследований и технологий, д.ф.-м.н., профессор



О.Т. Лоза