

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 23.09.2022 12:11:08  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f0b

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:  
Руководитель ООП:  
Б.Б. Педько  
23.09.2022 г.



Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)


**Молекулярная физика**

Направление подготовки  
**03.03.02 - Физика**

Профиль подготовки  
Физика конденсированного состояния  
вещества

Для студентов 1 курса очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент А.Р. Новоселов



Тверь 2017

## **I. Аннотация**

### **1. Наименование дисциплины в соответствии с учебным планом**

Молекулярная физика

### **2. Цель и задачи дисциплины**

**Целью** освоения дисциплины является:

создание фундаментальной базы знаний по молекулярной физике, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение всех разделов физики и специализированных курсов.

**Задачами** освоения дисциплины являются:

- изучение основных физических моделей и процессов в рамках молекулярной физики;
- установление связи между различными физическими явлениями, вывод основных законов в виде математических уравнений;
- постановка и анализ задач, применение различных методов решения.

### **3. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Молекулярная физика» (Б1.Б.04.02) входит в базовую часть учебного плана ООП и относится к дисциплинам, формирующим ОК и ОПК.

В курсе излагаются базовые, но, в тоже время, фундаментальные представления о термодинамике, молекулярной физике и физической кинетике, на основе которых, в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение всех разделов физики и специализированных курсов. Уровень начальной подготовки обучающегося для успешного освоения дисциплины: *Иметь представление* об основных понятиях и законах молекулярной физики в рамках программы средней школы; *Знать* алгебру, геометрию и основы математического анализа в рамках программы средней школы. Некоторые элементы математического анализа и алгебры, не входящие в школьный курс, вводятся по мере

необходимости. Теоретические дисциплины (или модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (или модуля) необходимо как предшествующее: общий физический практикум, курсы общей и теоретической физики.

**4. Объем дисциплины:** 4 зачетные единицы, 144 академических часа, **в том числе контактная работа:** лекции 38 часов, практические занятия 38 часов, **самостоятельная работа:** 68 часов.

**5. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК 3</b>                      способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>	<p><b>Владеть:</b> не предусмотрено</p> <p><b>Уметь:</b> решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения</p> <p><b>Знать:</b> основные законы и формулы, типичные алгоритмы решения задач</p>
<p><b>ПК 4</b>                      способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин</p>	<p><b>Владеть:</b> не предусмотрено</p> <p><b>Уметь:</b> применять законы термодинамики и молекулярной физики на практике</p> <p><b>Знать:</b> основные законы и формулы</p>

**6. Форма промежуточной аттестации** экзамен (2 семестр)

**7. Язык преподавания** русский

**II. Содержание дисциплины, структурированное по темам с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

**1. Для студентов очной формы обучения**

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)		Самостоятельная работа (час.)
		Лекции	Практические занятия	
1. Предмет молекулярной физики. Термодинамический и статистический методы изучения макроскопических систем. Основные понятия термодинамики. Термодинамические системы. Термодинамическое равновесие. Температура. Термометрия. Термодинамические параметры. Уравнение состояния.	6	2	2	2
2. Внутренняя энергия, работа, теплота. Первый закон термодинамики. Теплоемкость. Применение первого закона термодинамики к процессам в идеальном газе. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.	12	4	4	4
3. Циклы. Тепловые и холодильные машины. Цикл Карно. Второй закон термодинамики. Постулаты Томсона и Клаузиуса. Обратимые и необратимые процессы. Теорема Карно. Термодинамическая шкала температур.	12	4	4	4
4. Равенство Клаузиуса. Энтропия. Закон возрастания энтропии. Фундаментальное соотношение Гиббса. Термодинамические функции. Третий закон термодинамики.	10	4	4	2
5. Теплопроводность. Закон Фурье. Простейшие стационарные задачи теплопроводности. Выравнивание температур.	6	2	2	2
6. Межмолекулярные взаимодействия. Модель идеального газа. Давление газа. Молекулярно-кинетический смысл температуры. Равномерное распределение кинетической энергии по степеням свободы. Теплоемкость идеальных газов и твердых тел. Броуновское движение.	12	4	4	4

7. Распределение молекул по скоростям. Функции распределения Максвелла. Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Характерные скорости. Экспериментальная проверка распределения Максвелла. Столкновения молекул со стенкой сосуда.	10	4	4	2
8. Молекулы в силовом поле. Барометрическая формула. Распределение Больцмана. Связь распределений Больцмана и Максвелла.	6	2	2	2
9. Статистический смысл энтропии. Флуктуации. Зависимость относительной флуктуации от числа молекул.	6	2	2	2
10. Явления переноса в газах. Средняя длина свободного пробега молекул. Молекулярно-кинетическая оценка коэффициентов переноса в газах. Явления в разреженных газах.	10	4	4	2
12. Фазовые переходы. Системы с переменным числом частиц. Химический потенциал. Условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые диаграммы. Тройная точка. Понятие о фазовых переходах второго рода.	6	2	2	2
13. Граница раздела фаз. Поверхностное натяжение. Формула Лапласа. Смачивание. Капиллярные явления. Зависимость давления насыщенного пара от кривизны поверхности жидкости. Метастабильные состояния.	6	2	2	2
14. Твердые тела. Основные свойства кристаллов. Кристаллическая решетка. Элементы симметрии кристаллов. Дефекты в кристаллах.	6	2	2	2
Экзамен	36			36
<b>ИТОГО</b>	<b>144</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>68</b>

### **III. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

- планы практических (семинарских) занятий.
- сборники задач.
- методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.
- требования к рейтинг-контролю.

#### IV. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

**Форма проведения экзамена:** студенты, освоившие программу курса «Молекулярная физика» могут сдать экзамен по итогам рейтинговой аттестации согласно Положения о рейтинговой системе обучения и оценки качества учебной работы студентов ТвГУ (протокол №5 от 31 октября 2017 г.).

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно Положения о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ (протокол №5 от 31 октября 2017 г.).

##### 1. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции ОПК-3: способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания		
		Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)	Средний уровень (2 балла по каждому критерию)	Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)
	<b>Задания для проверки сформированности умений:</b>			
	Решить задачу: Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется по закону $PV^2 = const$ ? Какова его молярная теплоемкость в этом процессе?	Понимает физику явления, указанного в условии задачи. Знает уравнение состояния идеального газа и первый закон термодинамики и уверенно применяет их, записывая необходимые соотношения. Получает решение.	Понимает физику явления, указанного в условии задачи. . Знает уравнение состояния идеального газа и первый закон термодинамики, но неуверенно комбинирует их для получения окончательного результата. Получает решение.	Понимает физику явления, указанного в условии задачи. Знает уравнение состояния идеального газа и первый закон термодинамики, но с трудом применяет их, записывая необходимые соотношения.
	Решите задачу: Идеальный газ сжимается под поршнем в цилиндре так, что уходящее в окружающую среду тепло равно изменению внутренней энергии	Понимает физику явления. Умеет вычислять	Понимает физику явления. Производит вычисления	Понимает физику явления. Неуверенно вычисляет

	газа. Определите работу, затраченную на сжатие одного моля газа при изменении объема в два раза. Чему равна теплоемкость в этом процессе? Начальная температура газа равна $T_0$ .	изменения термодинамических величин в тепловых процессах. Получен правильный ответ.	термодинамических величин в простейших случаях. Получен правильный ответ.	изменения термодинамических величин в тепловых процессах. Получен неточный ответ.
	<b>Задания для проверки сформированности знаний:</b>	<b>Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)</b>	<b>Средний уровень (2 балла по каждому критерию)</b>	<b>Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)</b>
	Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Характерные скорости.	Знает основные функции распределения молекул по скоростям. Знает, как вычислять характерные скорости. Не допускает ошибок.	Знает основные функции распределения молекул по скоростям. Допускает несущественные математические ошибки при вычислении характерных скоростей.	Знает основные функции распределения молекул по скоростям и выражения для характерных скоростей.
	Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы второго рода.	Владеет понятием фазового перехода. Знает связь порядка перехода с частными производным и химического потенциала. Приводит примеры фазовых переходов первого и второго рода.	Владеет понятием фазового перехода. Знает связь порядка перехода с частными производным и химического потенциала.	Владеет понятием фазового перехода. Приводит примеры фазовых переходов первого и второго рода.

## 2. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции ПК-4: способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин.

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания		
Начальный	<b>Задания для проверки сформированности умений:</b>	<b>Высокий уровень</b>	<b>Средний уровень</b>	<b>Низкий уровень</b>

		<i>(3 балла по каждому критерию)</i>	<i>(2 балла по каждому критерию)</i>	<i>(1 балл по каждому критерию)</i>
	<p>Решить задачу: Постоянная температура <math>t_1 = 18\text{ }^\circ\text{C}</math> в комнате поддерживается электронагревателем мощности <math>N = 500\text{ Вт}</math>. Температура воздуха снаружи <math>t_2 = -21\text{ }^\circ\text{C}</math>. Для поддержания в комнате той же температуры можно использовать вместо электронагревателя тепловой насос (тепловая машина, работающая по холодильному циклу). Какую минимальную мощность <math>N'</math> будет потреблять от электросети тепловой насос, работающий с максимальной возможной эффективностью?</p>	<p>Понимает физические принципы работы тепловых машин. Может найти формулу для расчета мощности теплового насоса. Получает решение.</p>	<p>Понимает физику явления, указанного в условии задачи. Знает формулу для расчета мощности. Неуверенно применяет ее, записывая необходимые соотношения. Получает решение.</p>	<p>Понимает физику явления, указанного в условии задачи. Знает основные формулы. С трудом применяет их, записывая необходимые соотношения.</p>
	<p>Решите задачу: Напишите выражение для доли <math>(dN/N)</math> молекул газа, кинетические энергии поступательного движения которых при температуре <math>T</math> заключены между <math>\epsilon</math> и <math>\epsilon + d\epsilon</math>. Найдите наивероятнейшее значение этой энергии <math>\epsilon_m</math>.</p>	<p>Понимает математический аппарат квантовой теории, и записывает основные соотношения квантовой механики. Получает правильный ответ.</p>	<p>Понимает математический аппарат квантовой теории, но неуверенно записывает основные соотношения квантовой механики. Получает правильный ответ.</p>	<p>Понимает математический аппарат квантовой теории, и с трудом записывает основные соотношения квантовой механики. Получает неправильный ответ.</p>
	<p><b>Задания для проверки сформированности знаний:</b></p>	<p><b>Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Средний уровень (2 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)</b></p>
	<p>Знать основные положения статистической физики.</p>	<p>Знает основные положения статистической физики. Умеет правильно оценивать средние значения и распределения вероятностей наблюдаемых физических величин.</p>	<p>Знает основные положения статистической физики. Умеет правильно оценивать средние значения и распределения вероятностей наблюдаемых физических величин. в основных частных случаях.</p>	<p>Знает основные положения статистической физики. Но не умеет оценивать средние значения наблюдаемых физических величин.</p>



	Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы второго рода.	Понимает физику процесса фазового перехода. Может связать порядок перехода с частными производным и химического потенциала. Приводит примеры фазовых переходов первого и второго рода.	Владеет понятием фазового перехода. Знает связь порядка перехода с частными производным и химического потенциала.	Имеет общие представления о фазовых переходах. Приводит примеры фазовых переходов первого и второго рода.
--	---	--	---	---

## **V. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

### а) Основная литература:

1. Кикоин А.К. Молекулярная физика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2008. — 480 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/185>.
2. Телеснин В.Р. Молекулярная физика [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2009. — 368 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/391>.
3. Фриш С.Э. Курс общей физики. В 3-х тт. Т.1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны [Электронный ресурс] : учеб. / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2008. — 480 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/416>.

### б) Дополнительные источники:

1. Зисман Г.А. Курс общей физики. В 3-х тт. Т.1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г.А. Зисман, О.М. Годес. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2007. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/505>.

2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики книга 3: термодинамика, статистическая физика, строение вещества М.: Юрайт, 2013
3. Иродов И.Е. Физика макросистем: основные законы : М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2009.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Москва : Астрель : АСТ 2005.
5. «Сборник задач по общему курсу физики». Часть 2. Термодинамика и молекулярная физика. Под ред. Д.В. Сивухина. М.: Физматлит, 2006.
6. «Сборник задач по общему курсу физики». Часть 1. Механика. Термодинамика и молекулярная физика. Под ред. В.А. Овчинкина. М.: Изд-во МФТИ, 2004
7. Иродов И.Е. «Задачи по общей физике». М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 1998.

#### **VI. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

1. Научная библиотека ТвГУ: <http://library.tversu.ru/>
2. Электронная библиотека издательства Лань: <http://e.lanbook.com/>
3. Университетская библиотека ONLINE: <http://www.biblioclub.ru/>
4. Сайт издательского дома ЮРАЙТ: <http://www.biblio-online.ru/>

#### **VII. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

*– планы практических (семинарских) занятий:*

**Семинар 1:** Решение задач на тему «Уравнение состояния термодинамической системы. Уравнение Клапейрона-Менделеева».

Примеры задач:

1. Атмосфера Венеры почти полностью состоит из углекислого газа. Температура у поверхности планеты около  $t = 500$  °С, а давление около  $p = 100$  атм. Какой объем должен иметь исследовательский зонд массой  $m=1$ т, чтобы плавать в нижних слоях атмосферы Венеры?

2. Определите наименьшее возможное давление идеального газа в

процессе, при котором  $T = T_0 + \alpha V^2$ , где  $T_0$  и  $\alpha$  положительные постоянные,  $V$  – объем моля газа.

**Семинар 2:** Решение задач на тему «Первое начало термодинамики. Применение первого закона термодинамики к процессам в идеальном газе»

Примеры задач:

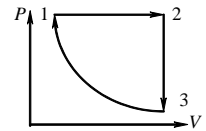
1. Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется по закону  $PV^2 = const$ ? Какова его молярная теплоемкость в этом процессе?

2. Идеальный газ сжимается под поршнем в цилиндре так, что уходящее в окружающую среду тепло равно изменению внутренней энергии газа. Определите работу, затраченную на сжатие одного моля газа при изменении объема в два раза. Чему равна теплоемкость в этом процессе? Начальная температура газа равна  $T_0$ .

**Семинар 3:** Решение задач на тему «Циклы. Тепловые и холодильные машины».

Примеры задач:

1. На рисунке изображен обратимый цикл, выполняемый молем идеального газа в некоторой тепловой машине. Найдите работы  $A_{ij}$ , выполняемые машиной на каждом этапе



цикла; количества тепла  $Q_{ij}$ , получаемые газом на каждом этапе и КПД цикла, выразив его как функцию температур  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ . Процесс 31 – адиабатический.

2. Один моль идеального одноатомного газа ( $C_V = 3R/2$ ), занимающего объем  $V_1$  при давлении  $P_1$ , расширяется при постоянном давлении до объема  $2V_1$ , потом сжимается в политропическом процессе до объема  $V_1/2$  и давления  $P_1/4$ , затем изотермически расширяется до исходного объема  $V_1$ . Цикл завершается повышением давления при постоянном объеме. Найдите КПД цикла.

**Семинар 4:** Решение задач на тему: «Второй закон термодинамики. Равенство Клаузиуса. Энтропия. Закон возрастания энтропии».

Примеры задач:

1. Вычислите изменения внутренней энергии и энтропии одного моля идеального газа при расширении по политропе  $PV^n = const$  от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ . Рассмотрите частные случаи изотермического и адиабатического процессов.

2. При очень низких температурах теплоемкость кристаллов  $C = \alpha T^3$ , где  $\alpha$  – постоянная. Найдите энтропию кристалла как функцию температуры в этой области.

**Семинар 5:** Решение задач на тему: «Теплопроводность. Стационарные задачи теплопроводности. Выравнивание температур».

Примеры задач:

1. Найдите распределение температуры в пространстве между двумя концентрическими сферами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , заполненном проводящим тепло однородным веществом, если температуры сфер равны  $T_1$  и  $T_2$ .

2. По однородному цилиндрическому проводу радиуса  $R$  без изоляции течет постоянный электрический ток  $J$ . Определите стационарное распределение температуры в проводе, если его поверхность поддерживается при постоянной температуре  $T_0$ . Коэффициент теплопроводности провода  $k$ , удельное сопротивление  $\rho$  можно считать не зависящим от температуры.

**Семинар 6:** Решение задач на тему: «Модель идеального газа. Давление газа. Молекулярно-кинетический смысл температуры. Теплоемкость идеальных газов и твердых тел».

Примеры задач:

1. Вакуумные насосы позволяют получать давления до  $P = 4 \cdot 10^{-10}$  Па (при комнатной температуре). Найдите число молекул газа  $n$  в  $1 \text{ см}^3$  и среднее расстояние  $r$  между ними при этом давлении.

2. Какова будет средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы водорода, если первоначально он находился при нормальных условиях, а затем был адиабатически сжат в 32 раза?

**Семинар 7:** Решение задач на тему: «Распределение молекул по скоростям. Функции распределения Максвелла».

1. Найдите для азота при  $T = 300$  К отношение числа молекул  $dN_1$  с компонентами скорости вдоль оси  $x$  в интервале  $300 \pm 0,31$  м/с к числу молекул  $dN_2$  с компонентами скорости в интервале  $500 \pm 0,51$  м/с.

2. Найдите долю молекул  $\alpha_1$ , компоненты скорости которых, параллельные некоторой оси, лежат в интервале  $(v_{//}, v_{//} + dv_{//})$ , а модули перпендикулярной составляющей скорости заключены между  $v_{\perp}$  и  $v_{\perp} + dv_{\perp}$ . Какая часть молекул  $\alpha_2$  удовлетворяет только второму условию?

**Семинар 8:** Решение задач на тему: «Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Характерные скорости.

Примеры задач:

1. Найдите  $\langle 1/v \rangle$  – среднее значение обратной скорости молекул идеального газа при температуре  $T$ , если масса каждой молекулы равна  $m$ . Сравните полученную величину с обратной величиной средней скорости.

2. Напишите выражение для доли  $(dN/N)$  молекул газа, кинетические энергии поступательного движения которых при температуре  $T$  заключены между  $\varepsilon$  и  $\varepsilon + d\varepsilon$ . Найдите наивероятнейшее значение этой энергии  $\varepsilon_m$ .

**Семинар 9:** Решение задач на тему: « Столкновения молекул со стенкой сосуда».

Примеры задач:

1. В тонкостенном сосуде объема  $V$ , стенки которого поддерживаются при постоянной температуре, находится идеальный газ. Сосуд помещен в вакуум. Как будет меняться с течением времени концентрация молекул  $n$  газа внутри сосуда, если в его стенке сделать очень малое отверстие площади  $S$ . Определите время  $t_{1/2}$ , по истечении которого давление газа внутри сосуда уменьшится в два раза. Начальная концентрация  $n_0$ .

2. В тонкостенном сосуде, помещенном в вакууме, имеется очень малое отверстие, на которое извне направляется параллельный пучок одноатомных молекул, летящих с одной и той же скоростью  $v_0$ , перпендикулярной площади отверстия. Концентрация молекул в пучке равна  $n_0$ . Найдите

среднюю скорость  $\langle v \rangle$ , концентрацию молекул  $n$  и температуру  $T$  газа в сосуде в установившемся равновесном состоянии.

**Семинар 10:** Решение задач на тему: «Распределение Больцмана. Связь распределений Больцмана и Максвелла».

Примеры задач:

1. Азот находится в очень высоком сосуде в однородном поле тяжести при температуре  $T$ . Температуру увеличили в  $\eta$  раз. На какой высоте  $h$  концентрация молекул азота осталась прежней?

2. Цилиндр радиуса  $R$  и высоты  $H$ , содержащий идеальный газ, равномерно вращается в однородном поле тяжести вокруг своей геометрической оси с угловой скоростью  $\omega$ . Найдите распределение концентрации молекул газа  $n(r, z)$  внутри цилиндра, если его ось направлена вертикально. Масса одной молекулы  $m$ , полное число молекул  $N$ .

**Семинар 11:** Решение задач на тему: «Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Внутренняя энергия реального газа».

Примеры задач:

1. Найдите выражение для изотермической сжимаемости  $\gamma_T$  и коэффициента объемного расширения  $\alpha$  газа Ван-дер-Ваальса.

2. Моль азота расширяется в пустоту от начального объема  $V_1 = 1$  л до конечного  $V_2 = 10$  л. Найдите понижение температуры  $\Delta T$  при таком процессе, если постоянная  $a$  в уравнении Ван-дер-Ваальса для азота равна  $1,35 \cdot 10^6$  атм·см<sup>6</sup>/моль<sup>2</sup>.

**Семинар 12:** Решение задач на тему: «Эффект Джоуля-Томсона»

Примеры задач:

1. Найдите изменение энтропии в процессе Джоуля-Томсона.

2. Покажите, что газ, подчиняющийся уравнению Ван-дер-Ваальса, с  $a = 0$  в опыте Джоуля – Томсона всегда нагревается, а с  $b = 0$  – всегда охлаждается. Выразите  $\Delta T$  через  $\Delta P$ , считая, что  $|\Delta P| \ll P$ .

### **Семинар 13:** Решение задач на тему: «Граница раздела фаз.

Поверхностное натяжение.».

Примеры задач:

1. Как велико поверхностное натяжение  $\sigma$  жидкости, если петля из резинового шнура длиной  $L$  с поперечным сечением  $S$ , положенная на пленку этой жидкости, растянулась в окружность радиуса  $R$  после того, как пленка была проколота внутри петли? Считайте, что при малых растяжениях для резины справедлив закон Гука, и модуль Юнга резины равен  $E$ .
2. Капля несжимаемой жидкости совершает пульсационные колебания, становясь последовательно вытянутой, сферической, сплюснутой, сферической, снова вытянутой и т.д. Как зависит период этих пульсаций  $T$  от плотности  $\rho$ , поверхностного натяжения  $\sigma$  и радиуса капли  $r$ ?

**Семинар 14:** Решение задач на тему: «Формула Лапласа. Капиллярные явления. Зависимость давления насыщенного пара от кривизны поверхности жидкости».

Примеры задач:

1. Какова разность уровней жидкости в двух сообщающихся капиллярах с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$ ? Поверхностное натяжение жидкости равно  $\sigma$ . Краевые углы менисков равны нулю. Плотность жидкости равна  $\rho$ .
2. Грамм ртути помещен между двумя плоскими стеклянными пластинками. Какую силу  $F$  надо приложить к верхней пластинке, чтобы ртуть приняла форму круглой лепешки однородной толщины и радиуса  $R = 5$  см. Поверхностное натяжение ртути (при  $15^\circ\text{C}$ )  $\sigma = 487$  дин/см, краевой угол между ртутью и стеклом  $\theta = 140^\circ$ .

– *сборники задач:*

1. «Сборник задач по общему курсу физики». Часть 2. Термодинамика и молекулярная физика. Под ред. Д.В. Сивухина. М.: Физматлит, 2006.

2. «Сборник задач по общему курсу физики». Часть 1. Механика. Термодинамика и молекулярная физика. Под ред. В.А. Овчинкина. М.: Изд-во МФТИ, 2004

3. Иродов И.Е. «Задачи по общей физике». М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 1998.

***– методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:***

1. Изучить рекомендуемую литературу.
2. Просмотреть задачи, разобранные на аудиторных занятиях.
3. Разобрать задачи, рекомендованные преподавателем для самостоятельного решения, используя, при необходимости, примеры решения аналогичных задач.
4. Обсудить проблемы, возникшие при решении задач с преподавателем.

***Требования к рейтинг-контролю.*** В течение семестра два раза (на модульных неделях) необходимо:

- 1) сдать преподавателю решения домашних задач, полученных из указанных сборников задач,
- 2) ответить на теоретические вопросы. Примеры вопросов:

### **Модуль 1**

1. Типы термодинамических систем. Термодинамическое равновесие. Температура.
2. Параметры состояния термодинамических систем. Уравнение состояния.
3. Первое начало термодинамики.
4. Первое начало термодинамики для идеальных газов.
5. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.
6. Связь модулей объемной упругости с теплоемкостями.
7. Циклы. Тепловые и холодильные машины.
8. Цикл Карно. КПД цикла Карно для идеального газа.



9. Второе начало термодинамики. Постулаты Томсона и Клаузиуса.
10. Обратимые и необратимые процессы. Теорема Карно.
11. Термодинамическая шкала температур.
12. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса (пример использования теоремы Карно).
13. Равенство Клаузиуса. Энтропия.
14. Процессы на T-S диаграмме.
15. Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии.
16. Термодинамические функции.
17. Примеры применения метода термодинамических функций  $[(\partial U/\partial V)_T, (\partial H/\partial P)_T, C_p - C_v]$ .
18. Третье начало термодинамики (теорема Нернста).
19. Эффект Джоуля – Томсона.
20. Системы с переменным числом частиц. Химический потенциал.
21. Критерии равновесия термодинамических систем.
22. Условия равновесия 2-х фазной однокомпонентной системы.
23. Теплопроводность. Уравнение теплопроводности.
24. Простейшие стационарные задачи теории теплопроводности.

## Модуль 2

1. Межмолекулярные взаимодействия. Модель идеального газа.
2. Молекулярно-кинетический смысл температуры. Равномерное распределение кинетической энергии по степеням свободы.
3. Теплоемкости идеальных газов и твердых тел.
4. Распределение молекул по скоростям (распределение Максвелла).
5. Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Характерные скорости.
6. Столкновения молекул со стенкой сосуда.
7. Экспериментальная проверка закона распределения скоростей Максвелла.
8. Распределение Больцмана.

9. Опыты Перрена по определению числа Авогадро.
10. Статистический смысл энтропии.
11. Флуктуации.
12. Флуктуации концентрации. Биномиальное распределение.  
Распределение Пуассона.
13. Процессы переноса в газах. Теплопроводность, вязкость, диффузия.
14. Столкновения молекул. Средняя длина свободного пробега молекул в газах.
15. Молекулярно-кинетическая оценка коэффициентов переноса в газах.
16. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса.
17. Эффект Джоуля-Томсона для газа Ван-дер-Ваальса.
18. Изотермы реального газа. Критическая точка.
19. Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Диаграммы состояния.
20. Граница раздела фаз. Поверхностное натяжение.
21. Разность давлений на искривлённой межфазной границе. Формула Лапласа.
22. Краевые углы. Смачивание. Капиллярные явления.
23. Зависимость давления насыщенного пара от кривизны поверхности жидкости. Метастабильные состояния.
24. Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы второго рода.

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

1. Лекции и практические занятия проводятся в аудиториях, оснащенных мультимедийной техникой. DLP проектор для демонстрации презентаций и учебных фильмов,
2. доступ к сети Интернет

## IX. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Наименование специальных* помещений	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения
Учебная аудитория № 218 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	1. Комплект учебной мебели на 25 посадочных мест. 2. Экран настенный 153x203 3. Переносной комплект мультимедийной техники.	Adobe Acrobat Reader DC – бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Google Chrome – бесплатно MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017
Лекционная аудитория № 228 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	1. Мультимедийный проектор Casio XJ-N2650 с потол. крепл. и моториз. экраном. 2. Ноутбук (переносной) 3. Комплект учебной мебели на 68 посадочных мест	Adobe Acrobat Reader DC – бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Google Chrome – бесплатно MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017

### Помещения для самостоятельной работы:

Наименование помещений	Оснащенность помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Помещение для самостоятельной работы, учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций,	1. Компьютер RAMEC STORM C2D 4600/160Gb/ 256mB/DVD-RW +Монитор LG TFT 17" L1753S-SF – 12 шт 2. Мультимедийный комплект учебного класса (вариант № 2) Проектор Casio XJ-M140, настенный проекц. экран Lumien 180*180. ноутбук Dell N4050. сумка 15,6", мышь 3. Коммутатор D-Link 10/100/1000mbps 16-port DGS-1016D 4. Видеокамера IP-FALCON EYE	Adobe Acrobat Reader DC - бесплатно Cadence SPB/OrCAD 16.6 - Государственный контракт на поставку лицензионных программных продуктов 103 - ГК/09 от 15.06.2009 Google Chrome - бесплатно Java SE Development Kit 8 Update 45 (64-bit) - бесплатно Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Lazarus 1.4.0 - бесплатно Lego MINDSTORM EV3 -

<p>текущего контроля и промежуточной аттестации, практики, Компьютерный класс физико-технического факультета. Компьютерная лаборатория робототехнических систем №4а (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО  5. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО  6. Демонстрационное оборудование комплект «LegoMidstormsEV3»  7. Комплект учебной мебели</p>	<p>бесплатно  Mathcad 15 M010 - Акт предоставления прав IC00000027 от 16.09.2011  MATLAB R2012b - Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012  Microsoft Express Studio 4 - бесплатно  MiKTeX 2.9 - бесплатно  MPICH 64-bit - бесплатно  MSXML 4.0 SP2 Parser and SDK - бесплатно  Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017  MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017</p>
---	--	---

#### Х. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Дата и протокол заседания кафедры, утвердившего изменения
1	Раздел IV	Реквизиты «Положения о рейтинговой системе обучения и оценки качества учебной работы студентов ТвГУ» и «Положения о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.
2	Раздел IX	Оснащенность аудиторного фонда для проведения учебных занятий и самостоятельной работы студентов согласно «Справки МТО ООП ...»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г