

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Высшая школа общей и прикладной физики

Программа утверждена решением президиума
Ученого совета ННГУ
протокол от «14» декабря 2021г. № 4.

Рабочая программа дисциплины

Термодинамика и молекулярная физика

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Фундаментальная физика

Форма обучения
очная

Нижний Новгород

2022 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.О.08.02 «Термодинамика и молекулярная физика» относится к обязательной части ООП направления подготовки 03.03.02 Физика.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности;	Демонстрация способности применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	Знать законы термодинамики; молекулярно-кинетический (статистический) смысл термодинамических характеристик; свойства термодинамических потенциалов; следствия второго начала термодинамики для равновесных и неравновесных процессов; основные статистические распределения; условия равновесия фаз; влияние поверхностного натяжения на форму поверхности жидкого тела. Уметь применять законы термодинамики для анализа термодинамических процессов (адиабатического, изобарического, изотермического); пользоваться для анализа различными термодинамическими потенциалами; анализировать фазовые переходы с помощью равенства Клапейрона—Клаузиуса; определять форму жидких тел при наличии поверхностного натяжения.	Собеседование и задачи (практические задания)

		Владеть навыками решения задач, основываясь на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях и умениях.	
--	--	---	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1. Трудоемкость дисциплины

	Очная
Общая трудоемкость	6
Часов по учебному плану	216
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	64
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	64
- КСР	2
самостоятельная работа	50
Промежуточная аттестация	36
	Экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
	очная	очная	очная	очная	очная	очная
Тема 1. Основные законы термодинамики	44	16	16	0	32	12
Тема 2. Основы молекулярно-кинетической теории	44	16	16	0	32	12
Тема 3. Фазовые равновесия и фазовые превращения	44	16	16	0	32	12

Тема 4. Поверхностные явления	46	16	16	0	32	14
Аттестация	36					
КСР	2				2	
Итого	216	64	64	0	130	50

Практические занятия (семинарские занятия /лабораторные работы) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает:

Разбор решения задач различной степени сложности, проведение обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в соответствующей области знаний. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

На проведение практических занятий (семинарских занятий /лабораторных работ) в форме практической подготовки отводится 8 ч.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:

Применение знаний и умений при решении научно-исследовательских задач профессиональной деятельности

- компетенций:

ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках: занятий семинарского типа, групповых консультаций, индивидуальных консультаций.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		Зачтено				

достижения компетенци й)							
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом . Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
Зачтено	Превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
	Отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	Очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	Хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
	Удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	Плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

(согласно оценочным средствам табл.2)

5.2.1 Контрольные вопросы

Вопрос	Код формируемой компетенции
1. Способы описания систем многих частиц. Термодинамическое описание. Внутренние и внешние параметры. Уравнение состояния.	ОПК-1
2. Понятие температуры. Абсолютная шкала температур. Абсолютный нуль. Давление.	ОПК-1
3. Агрегатные состояния вещества. Идеальный газ (уравнение состояния идеального газа: вывод, пределы применимости). Закон Дальтона.	ОПК-1
4. Идеальный газ во внешнем силовом поле. Барометрическая формула: вывод, частные случаи, условия применимости.	ОПК-1
5. Работа (элементарная работа; работа при конечном процессе; геометрическая интерпретация; положительная и отрицательная работа; круговые процессы). Внешние параметры и обобщённые силы.	ОПК-1
6. Адиабатическая оболочка. Внутренняя энергия. Количество тепла. Первый принцип термодинамики.	ОПК-1
7. Теплоёмкость (теплоёмкость физической системы; удельная и молярная теплоёмкости; зависимость	ОПК-1

	теплоёмкости от процесса; примеры).	
8.	Термодинамическое равновесие. Функции состояния термодинамической системы. Энтальпия (определение, физический смысл, примеры).	ОПК-1
9.	Термодинамические процессы. Квазистатические (обратимые) процессы. Адиабатическое расширение и сжатие (определение; общие соотношения для обратимого процесса; примеры).	ОПК-1
10.	Процесс Джоуля—Томсона. Закон Джоуля. Необратимые термодинамические процессы.	ОПК-1
11.	Второй принцип термодинамики (формулировка; физический смысл; примеры: тепловые двигатели с одним и двумя тепловыми резервуарами.). Следствия для термически однородных систем.	ОПК-1
12.	Обратимый круговой процесс. Идеальный цикл Карно (прямой и обращённый цикл Карно; второй принцип для обратимых круговых процессов).	ОПК-1
13.	Теорема Карно. Абсолютная термодинамическая шкала температур.	ОПК-1
14.	Энтропия (определение, физический смысл, примеры). Второй принцип для обратимых процессов. Равенство Клаузиуса.	ОПК-1
15.	Второй принцип для необратимых процессов. Неравенство Клаузиуса: вывод; физический смысл; следствия для адиабатических процессов.	ОПК-1
16.	Коэффициент полезного действия для необратимых круговых процессов (физические причины необратимости, примеры необратимых процессов).	ОПК-1
17.	Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса (вывод; изотермы Ван-дер-Ваальса; внутренняя энергия и теплоёмкость газа Ван-дер-Ваальса).	ОПК-1
18.	Общие условия термодинамического равновесия и устойчивости (понятие устойчивости, метод исследования на устойчивость, примеры). Свободная энергия, термодинамический потенциал Гиббса (определение, примеры).	ОПК-1
19.	Термодинамическое и статистическое определения макропараметров физической системы. Эргодические системы.	ОПК-1
20.	Основные понятия теории вероятностей (событие, вероятность, статистический ансамбль; непрерывные случайные величины, плотность вероятности; сложение вероятностей; условная вероятность; независимые события; средние значения случайных величин; флуктуации).	ОПК-1
21.	Распределение молекул газа по скоростям (пространство скоростей, изображающая точка, статистическая постановка задачи, функция распределения); закон распределения скоростей Максвелла—Больцмана: математическая запись и физический смысл. Условия применимости максвелловского распределения.	ОПК-1
22.	Закон Максвелла—Больцмана: вывод; одномерное и трёхмерное распределения; распределение по модулю	ОПК-1

скорости; характерные скорости молекул.	
23. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории.	ОПК-1
24. Молекулярно-кинетический смысл температуры. Принцип равномерного распределения энергии по степеням свободы и условия его применимости.	ОПК-1
25. Теплоёмкость газов (классическая теория и пределы её применимости).	ОПК-1
26. Теплоёмкость кристаллических твёрдых тел. Законы Дюлонга—Пти и Неймана—Реньо. Теория Дебая теплоёмкости кристаллических твёрдых тел.	ОПК-1
27. Фотонный газ.	ОПК-1
28. Вероятностный смысл энтропии. Молекулярно-кинетическая формулировка второго принципа. Статистический вес.	ОПК-1
29. Микро- и макросостояния системы. Распределение Больцмана и условия его применимости.	ОПК-1
30. Статистика Ферми—Дирака (фермионы; статистический вес; энтропия; распределение Ферми—Дирака; вырождение ферми-газа).	ОПК-1
31. Статистика Бозе—Эйнштейна (бозоны; статистический вес; энтропия; распределение Бозе—Эйнштейна; бозе-конденсация).	ОПК-1
32. Фазы, их классификация, возможные фазовые превращения, условия равновесия фаз.	ОПК-1
33. Испарение и конденсация веществ, подчиняющихся уравнению Ван-дер-Ваальса. Правило Максвелла. Метастабильные состояния.	ОПК-1
34. Испарение и конденсация в широком смысле. Уравнение Клапейрона—Клаузиуса (вывод, физический смысл, примеры).	ОПК-1
35. Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Критическая точка.	ОПК-1
36. Диаграммы состояний. Тройные точки. Равновесие многофазных систем. Правило фаз Гиббса.	ОПК-1
37. Фазовые превращения второго рода (определение, физический смысл, примеры). Соотношения Эренфеста.	ОПК-1
38. Природа поверхностного натяжения. Коэффициент поверхностного натяжения. Термодинамика поверхностного натяжения.	ОПК-1
39. Смачиваемые и несмачиваемые поверхности. Краевой угол. Капиллярные явления. Закон Жюрена. Примеры.	ОПК-1
40. Соотношение между давлением и кривизной поверхности. Формула Лапласа. Примеры.	ОПК-1
41. Роль поверхностного натяжения при образовании новой фазы. Критический размер зародыша. Метастабильные состояния.	ОПК-1
42. Камера Вильсона.	ОПК-1

5.2.2 Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Типовые задания для оценки сформированности компетенции ОПК-1:

Задача 1.1. Скорость звука при 0 °С составляет 332 м/с. Определить скорость звука в водороде при той же температуре. Относительную молекулярную массу воздуха принять равной 28,8.

Задача 1.2. Найти уравнение процесса для идеального газа, при котором теплоёмкость газа меняется с температурой по закону $C = \alpha T$, где α — постоянная.

Задача 1.3. Доказать соотношения Максвелла:

$$\begin{aligned}(\partial T / \partial V)_S &= -(\partial P / \partial S)_V, & (\partial T / \partial P)_S &= (\partial V / \partial S)_P, \\(\partial S / \partial V)_T &= (\partial P / \partial T)_V, & (\partial S / \partial P)_T &= -(\partial V / \partial T)_P.\end{aligned}$$

Задача 1.4. Теплоизолированный цилиндрический сосуд разделён поршнем пренебрежимо малой массы на две равные части. По одну сторону поршня находится идеальный газ с массой M , относительной молекулярной массой μ и молярными теплоёмкостями C_V и C_P , не зависящими от температуры. По другую сторону поршня создан вакуум. Начальные температура и давление газа T_0 и P_0 . Поршень отпускают, и он, свободно двигаясь, даёт возможность газу заполнить весь объём цилиндра. После этого, постепенно увеличивая давление на поршень, медленно доводят объём газа до первоначальной величины. Найти изменения внутренней энергии и энтропии газа при таком процессе.

Задача 1.5. Какую максимальную работу можно получить из системы двух тел, нагретых до разных абсолютных температур T_{10} и T_{20} ($T_{10} > T_{20}$), если эти тела используются в качестве нагревателя и холодильника в тепловой машине? Теплоёмкости тел C_1 и C_2 считать не зависящими от температуры.

Задача 1.6. На какую величину ΔT температура воздуха внутри мыльного пузыря должна превышать температуру T окружающего воздуха, чтобы пузырь стал подниматься? Радиус пузыря r , поверхностное натяжение плёнки σ . Массой плёнки можно пренебречь. Учесть, что давление воздуха внутри пузыря мало отличается от атмосферного давления P .

Задача 2.1. Через какое время насос откачает 2-литровый баллон с воздухом от давления $P_0 = 10^{-3}$ мм рт. ст. до давления $P = 10^{-5}$ мм рт. ст. Скорость откачки насоса $K = 1$ л/с. Процесс откачки считать изотермическим.

Задача 2.2. Допустим, что температура горения химического горючего для ракетных двигателей $T = 3000$ К, средняя относительная молекулярная масса продуктов горения $\mu = 30$, а истечение продуктов горения в вакуум происходит адиабатически. Найти, во сколько раз стартовая масса M_0 одноступенчатой ракеты должна превышать её конечную массу M , чтобы ракета достигла первой космической скорости $v = 8$ км/с. Молярную теплоёмкость продуктов горения ориентировочно принять равной $C_P = 8$ кал/(моль \times °С). При вычислении скорости ракеты силу тяжести и трение о воздух не учитывать.

Задача 2.3. Найти КПД цикла, проводимого с идеальным газом и состоящего из двух изотерм с температурами T_1 , T_2 и двух изохор с объёмами V_1 , V_2 ($T_1 > T_2$, $V_1 > V_2$).

Задача 2.4. Найти изменение температуры плавления льда при повышении давления на 1 атм. При 0 °С удельный объём воды $v_{\text{ж}} = 1$ см³/г, удельный объём льда $v_{\text{л}} = 1,091$ см³/г, удельная теплота плавления льда $q = 80$ кал/г.

Задача 2.5. Вертикально расположенный стеклянный капилляр длины l и радиуса r запаян с верхнего края. На какую высоту h поднимется вода в капилляре, если его нижний конец привести в соприкосновение с поверхностью воды.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) основная литература:

1. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. [Элек-тронный ресурс]: Учеб. пособие: Для вузов. / Сивухин Д. В. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922106015.html>
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1987. -360 с. - 33 экз.
3. Леонтович М. А. Введение в термодинамику. Статистическая физика: учеб. пособие. М.: Наука, 1983. -416 с. – 46 экз.
4. Базаров И. П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991. -344 с. -94 экз.
5. Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинети-ка М.: Наука, 1972. -400 с. – 32 экз.
6. Иродов И. Е. Задачи по общей физике. М.: Лань, 2016. -416 с. . — Режим дос-тупа: ЭБС «Лань» <https://e.lanbook.com/book/71750>
7. Сборник индивидуальных заданий по физике. Термодинамика и молекулярная физика. Часть 1 / Кочетов А. В., Миронов В. А. Нижний Новгород: ННГУ, 1995. 36 с. (Деканат ВШОПФ)-30 экз
8. Сборник индивидуальных заданий по физике. Термодинамика и молекулярная физика. Часть 2 / Кочетов А. В., Миронов В. А. Нижний Новгород: ННГУ, 1995. 34 с. (Деканат ВШОПФ)-30 экз
9. Сборник индивидуальных заданий по физике. Термодинамика и молекулярная физика. Часть 3 / Кочетов А. В., Миронов В. А. Нижний Новгород: ННГУ, 1996. 32 с. (Деканат ВШОПФ)-30 экз

б) дополнительная литература:

1. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика: 2-е изд, испр. М., 1969. -399 с. -12 экз.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие в 10 т. Т. 5. М.: Физматлиб, 2002. -616 с.-19 экз.
3. Берклеевский курс лекций: в 5 т. Т. 5. Статистическая физика. М.: Наука,1975. -351 с. -11 экз.
4. Сборник задач по общему курсу физики. Термодинамика и молекулярная фи-зика / Под ред. Сивухина Д. В. М.: Наука, 1976. -207 с. -185 экз.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)

- 1) Учебно-образовательная физико-математическая библиотека EqWorld
<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/lectures.htm>
- 2) ВИДЕОДЕМОНСТРАЦИИ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ
<http://учебныефильмы.рф/VideoMol.htm>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО /ОС ННГУ по направлению 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): А. М. Фейгин

Заведующий кафедрой:

Программа одобрена на заседании методической комиссии ВШОПФ от 30.06.2021, протокол № 3.