

**ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛАМ «ОПТИКА»,  
«КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА» И  
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»**

**ОМСК 2022**

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛАМ «ОПТИКА»,  
«КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА» И  
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

Утверждено методическим советом университета

УДК 531(075.8)  
ББК 22.2я73  
К83

**Практикум для самостоятельной подготовки студентов к решению задач по разделам «Оптика», «Квантовая и атомная физика» и «Физика твердого тела»:** Практикум / И. А. Дроздова, Р. С. Курманов, В. Л. Литневский, Л. А. Литневский, Ю. М. Сосновский, Г. Б. Тодер, Н. А. Хмырова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2022. 34 с.

Содержатся методические рекомендации по изучению курса физики, приведены правила выполнения контрольных заданий, примеры решения задач, контрольные задания по разделам «Волновая оптика», «Квантовая и атомная физика» и «Физика твердого тела», библиографический список.

Предназначен для студентов второго курса всех направлений подготовки.

Библиогр.: 14 назв. Табл. 1. Рис. 3. Прил. 1.

Рецензенты: доктор. физ.-мат. наук, профессор Г. И. Косенко;  
канд. физ.-мат. наук, доцент О. В. Гателюк.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Таблица вариантов и номера задач .....	7
2. Контрольные задачи и примеры их решения .....	8
2.1. Интерференция света .....	8
2.2. Дифракция и поляризация света .....	10
2.3. Квантово-оптические явления .....	14
2.4. Квантовая физика .....	17
2.5. Атомная и ядерная физика .....	19
2.6. Свободные электроны в металле .....	23
2.7. Тепловые свойства твердых тел .....	25
2.8. Электропроводность металлов и полупроводников .....	27
Библиографический список .....	28
Приложение. Справочные данные .....	30



## ВВЕДЕНИЕ

Учебная работа студента вуза по изучению физики складывается из следующих основных этапов: знакомство с материалом курса на лекциях, изучение основных теоретических положений по учебным пособиям, приобретение навыков решения типовых практических задач, выполнение лабораторных работ, контрольных заданий, сдача экзаменов (зачетов).

Для успешного усвоения курса физики необходимо изучить теоретический материал, научиться решать задачи, выполнить лабораторные работы. Контрольные задания нужно сдавать систематически в течение всего учебного процесса, так как подготовка к экзамену в сжатые сроки не даст глубоких и прочных знаний.

Для изучения какой-либо части курса (или по крайней мере ее раздела) следует в качестве основного выбрать одно учебное пособие. Замена одного пособия другим в процессе изучения определенной темы может привести к утрате логической связи между отдельными вопросами. Однако если выбранное пособие не дает полного или ясного ответа на некоторые вопросы программы, необходимо обращаться к другим учебникам.

При изучении нового материала рекомендуется составлять конспект, в который следует записывать законы и формулы, выражающие эти законы, определения физических величин и их единицы, делать рисунки и решать типовые задачи, используя Международную систему единиц (СИ).

Самостоятельную работу по изучению физики необходимо систематически контролировать. Для этого после изучения очередного раздела следует отвечать на вопросы рабочей программы физики.

При самостоятельном изучении дисциплины «Физика» прежде всего следует ознакомиться с методическими рекомендациями к оформлению и решению задач, выполнению контрольной работы (см. разд. 2).

При решении задачи требуется указывать основные законы и формулы, на которых базируется решение, с разъяснением символов в этих формулах. Если применяется формула, полученная для частного случая, не выражающая какой-нибудь физический закон или не являющаяся определением какой-нибудь физической величины, то ее необходимо вывести.

Следует приводить рисунок, поясняющий содержание задачи (в тех случаях, когда это возможно), выполнять его нужно аккуратно с помощью чертежных принадлежностей.

Решать задачу рекомендуется сначала в общем виде, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

Решение задачи следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями.

По полученной рабочей формуле требуется проверить размерность и произвести вычисления (в единицах системы СИ). При этом следует руководствоваться правилами приближенных вычислений.

При подстановке в рабочую формулу, а также при записи ответа числовые значения величин записываются как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти, например, вместо 3520 следует записать  $3,52 \cdot 10^3$ , вместо 0,00129 –  $1,29 \cdot 10^{-3}$ . Ответ должен содержать *две – три значащие цифры и единицы измерения*.

При решении задачи необходимо оценивать, где это целесообразно, правдоподобность численного ответа. В ряде случаев такая оценка поможет обнаружить ошибку в полученном результате. Например, коэффициент полезного действия тепловой машины не может быть больше 100 %, электрический заряд не может быть меньше элементарного заряда, скорость тела не может быть больше скорости света в вакууме и т. д.

*Условия задач в тетрадь переписываются полностью – без сокращений.* Каждая задача оформляется с новой страницы, на которой должны быть указаны вариант и номер задачи, для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляются поля (4 см).

За семестр студент должен решить и сдать восемь контрольных задач, номера которых определяются по таблице вариантов. *Номер варианта студент выбирает по двум последним цифрам шифра в зачетной книжке.* Студенты, имеющие две последние цифры шифра 51, 52, ..., выполняют, соответственно, вариант 1, 2, ... . Если две последние цифры 00, то выполняется вариант 50.

При сдаче (защите) контрольных задач студент должен быть готов дать пояснения по существу решения задачи, предъявленной к сдаче (защите). Если задача не принята преподавателем, требует доработки, выполнения работы над ошибками, то исправленный вариант решения предъявляется совместно с предыдущим.

В данном учебно-методическом пособии приведены примеры решения задач, таблица вариантов и набор контрольных заданий по разделам «Волновая оптика», «Квантовая и атомная физика» и «Физика твердого тела».

# 1. ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ И НОМЕРА ЗАДАЧ

Вариант	Номера задач								Вариант	Номера задач							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
01	1	11	21	31	41	51	61	71	26	6	18	30	32	44	56	68	80
02	2	12	22	32	42	52	62	72	27	7	19	21	33	45	57	69	71
03	3	13	23	33	43	53	63	73	28	8	20	22	34	46	58	70	72
04	4	14	24	34	44	54	64	74	29	9	11	23	35	47	59	61	73
05	5	15	25	35	45	55	65	75	30	10	12	24	36	48	60	62	74
06	6	16	26	36	46	56	66	76	31	1	14	27	40	43	56	69	72
07	7	17	27	37	47	57	67	77	32	2	15	28	31	44	57	70	73
08	8	18	28	38	48	58	68	78	33	3	16	29	32	45	58	61	74
09	9	19	29	39	49	59	69	79	34	4	17	30	33	46	59	62	75
10	10	20	30	40	50	60	70	80	35	5	18	21	34	47	60	63	76
11	1	12	23	34	45	56	67	78	36	6	19	22	35	48	51	64	77
12	2	13	24	35	46	57	68	79	37	7	20	23	36	49	52	65	78
13	3	14	25	36	47	58	69	80	38	8	11	24	37	50	53	66	79
14	4	15	26	37	48	59	70	71	39	9	12	25	38	41	54	67	80
15	5	16	27	38	49	60	61	72	40	10	13	26	39	42	55	68	71
16	6	17	28	39	50	51	62	73	41	1	15	29	33	47	51	65	79
17	7	18	29	40	41	52	63	74	42	2	16	30	34	48	52	66	80
18	8	19	30	31	42	53	64	75	43	3	17	21	35	49	53	67	71
19	9	20	21	32	43	54	65	76	44	4	18	22	36	50	54	68	72
20	10	11	22	33	44	55	66	77	45	5	19	23	37	41	55	69	73
21	1	13	25	37	49	51	63	75	46	6	20	24	38	42	56	70	74
22	2	14	26	38	50	52	64	76	47	7	11	25	39	43	57	61	75
23	3	15	27	39	41	53	65	77	48	8	12	26	40	44	58	62	76
24	4	16	28	40	42	54	66	78	49	9	13	27	31	45	59	63	77
25	5	17	29	31	43	55	67	79	50	10	14	28	32	46	60	64	78



## 2. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ ИХ РЕШЕНИЯ

### 2.1. Интерференция света

**Задача 1.** На поверхность стеклянного объектива нанесена тонкая прозрачная пленка с показателем преломления 1,20. Пленка освещается параллельным пучком белого света, падающим на нее под углом  $45^\circ$ . Найти минимальную толщину пленки, при которой в проходящем свете она будет окрашена в желтый свет с длиной волны 600 нм.

Дано:	СИ
$n_1 = 1,20$	
$n_2 = 1,50$	
$\alpha = 45^\circ$	
$\lambda = 600 \text{ нм}$	$6,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
$d_{\min} - ?$	

Решение.

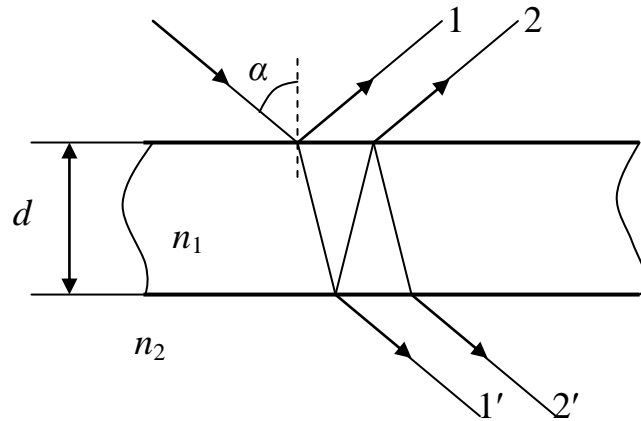


Рис. 2.1

При наблюдении интерференции в проходящем свете (рис. 2.1) интерферируют две волны –  $1'$  и  $2'$ , первая из которых проходит через пленку без отражения, а вторая – испытав отражение от обеих поверхностей пленки (при этом от верхней поверхности пленки свет отражается от менее плотной среды (воздуха) и изменения фазы не происходит, а при отражении от нижней поверхности пленки – от более плотной среды с показателем преломления  $n_2 > n_1$  – происходит изменение фазы волны на  $180^\circ$ , что следует учесть, добавив к оптической длине пути второго луча  $\lambda/2$ ). Тогда оптическая разность хода лучей  $1'$  и  $2'$  может быть представлена в виде:

$$\Delta = 2d\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}. \quad (2.1)$$

Пленка в проходящих лучах будет окрашена в желтый свет, если для этой длины волны выполняется условие максимума интерференции:

$$\Delta = \pm m\lambda, \quad (2.2)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$

С учетом формулы (2.2) получим:

$$2d\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (2.3)$$

отсюда

$$d = \frac{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (2.4)$$

Очевидно, что минимальная толщина пленки будет соответствовать  $m = 1$ :

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (2.5)$$

Производим вычисления:

$$d_{\min} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \sqrt{1,2^2 - \sin^2 45}} = 1,94 \cdot 10^{-7} \text{ (м)} = 0,194 \text{ (мкм)}.$$

О т в е т:  $d_{\min} = 0,194$  мкм.

1) В установке при выполнении опыта Юнга расстояние между двумя щелями равно 2 мм, экран расположен на расстоянии 4 м от щелей. Определить расстояние между темными интерференционными полосами на экране, если щели освещаются красным светом длиной волны 700 нм. Если на пути одного из интерферирующих лучей поместить тонкую стеклянную пластинку с показателем преломления 1,5, то интерференционная картина на экране сместится на 10 полос. Найти толщину этой пластинки.

2) В установке при выполнении опыта Юнга расстояние между щелями равно 1 мм, от щелей до экрана – 10 м. Щели освещаются зеленым светом длиной волны 500 нм. Найти положение двух первых темных полос на экране. На пути одного из интерферирующих лучей помещают стеклянную пластинку толщиной 15 мкм и с показателем преломления 1,5. В какое положение при этом смещается центральная интерференционная полоса?

3) Найти расстояние между щелями установки при выполнении опыта Юнга, если третий интерференционный максимум находится на расстоянии 3 мм от центральной светлой полосы. Расстояние от щелей до экрана равно 5 м. Установка освещается монохроматическим светом длиной волны 650 нм. Какой толщины пластинку нужно поместить на пути одного из интерферирующих лучей, чтобы центральная светлая полоса переместилась в положение шестой светлой полосы? Показатель преломления пластинки равен 1,5.

4) На мыльную пленку под углом  $30^\circ$  к ее поверхности падает параллельный пучок лучей белого света. При какой минимальной толщине пленки отра-

женные от нее лучи желтого цвета длиной волны 600 нм будут максимально ослаблены вследствие интерференции? В какой цвет будет в этом случае окрашена пленка в проходящем свете?

5) Мыльная пленка освещается параллельным пучком белого света. Под каким углом к поверхности пленки падает свет, если при минимальной толщине 260 нм пленка в проходящих лучах представляется красной (длина волны – 640 нм)? Какого цвета лучи не проходят сквозь пленку совсем?

6) На поверхность стеклянного объектива нанесена тонкая прозрачная пленка с показателем преломления 1,3. Пленка освещается параллельным пучком белого света, падающим на нее нормально. Какова минимальная толщина пленки, при которой она в отраженных лучах оказывается окрашенной в красный свет длиной волны 640 нм? В какой цвет окрашена пленка в проходящем свете?

7) На плоскую стеклянную поверхность нанесена тонкая прозрачная пленка из бензола, которая освещается параллельным пучком белого света, падающим на нее под некоторым углом. Найти угол падения света, если при минимальной толщине пленки, равной 215 нм, она в проходящем свете окрашена в красный свет длиной волны 670 нм. В какой цвет будет окрашена пленка в отраженных лучах?

8) Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона равно 2,7 мм. Радиус кривизны линзы равен 1,5 м. Наблюдение проводится в отраженном свете. Найти длину волны монохроматического света, падающего нормально на установку.

9) В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено водой. Установка освещается монохроматическим светом длиной волны 600 нм, падающим нормально. Радиус кривизны линзы равен 1,5 м. Определить показатель преломления воды, если радиус третьего светлого кольца в отраженном свете составляет 1,3 мм.

10) Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом длиной волны 550 нм, падающим нормально. Определить радиус кривизны линзы, если расстояние между девятым и четвертым светлыми кольцами в проходящем свете равно 0,81 мм.

## **2.2. Дифракция и поляризация света**

Задача 2. На дифракционную решетку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет. Период решетки равен 2 мкм.

Определить наибольший порядок дифракционного максимума, который дает эта решетка в случае красного ( $\lambda_k = 0,7$  мкм) и в случае фиолетового ( $\lambda_\phi = 0,41$  мкм) света.

Дано:	СИ	Решение.
$d = 2$ мкм	$2 \cdot 10^{-6}$ м	Из формулы, определяющей положение главных максимумов дифракционной решетки, выразим порядок $m$ дифракционного максимума:
$\lambda_k = 0,7$ мкм	$7 \cdot 10^{-7}$ м	
$\lambda_\phi = 0,41$ мкм	$4,1 \cdot 10^{-7}$ м	
$m_{\max k} - ?$		
$m_{\max \phi} - ?$		$m = \frac{d \sin \varphi}{\lambda}, \quad (2.6)$

где  $d$  – период решетки;

$\varphi$  – угол дифракции;

$\lambda$  – длина волны монохроматического света.

Так как  $\sin \varphi$  не может быть больше единицы, то число  $m$  не может быть больше

$$m \leq \frac{d}{\lambda}. \quad (2.7)$$

Производим вычисления:

$$m \leq \frac{2 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-7}} = 2,86 - \text{ для красного цвета;}$$

$$m \leq \frac{2 \cdot 10^{-6}}{4,1 \cdot 10^{-7}} = 4,88 - \text{ для фиолетового.}$$

Если учесть, что порядок максимумов является целым числом, то окончательно получаем:  $m_{\max k} = 2$ ;  $m_{\max \phi} = 4$ .

О т в е т:  $m_{\max k} = 2$ ;  $m_{\max \phi} = 4$ .

**З а д а ч а 3.** Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении через поляризатор и анализатор, расположенные так, что угол между их плоскостями пропускания составляет  $50^\circ$ . Коэффициент поглощения света равен 0,06. Потери на отражение света не учитывать.

Дано:	Решение.
$\alpha = 50^\circ$	Естественный свет, проходя через поляризатор П, поляризуется в плоскости YOZ (рис. 2.2).
$k = 0,06$	
$I_0 / I_2 - ?$	

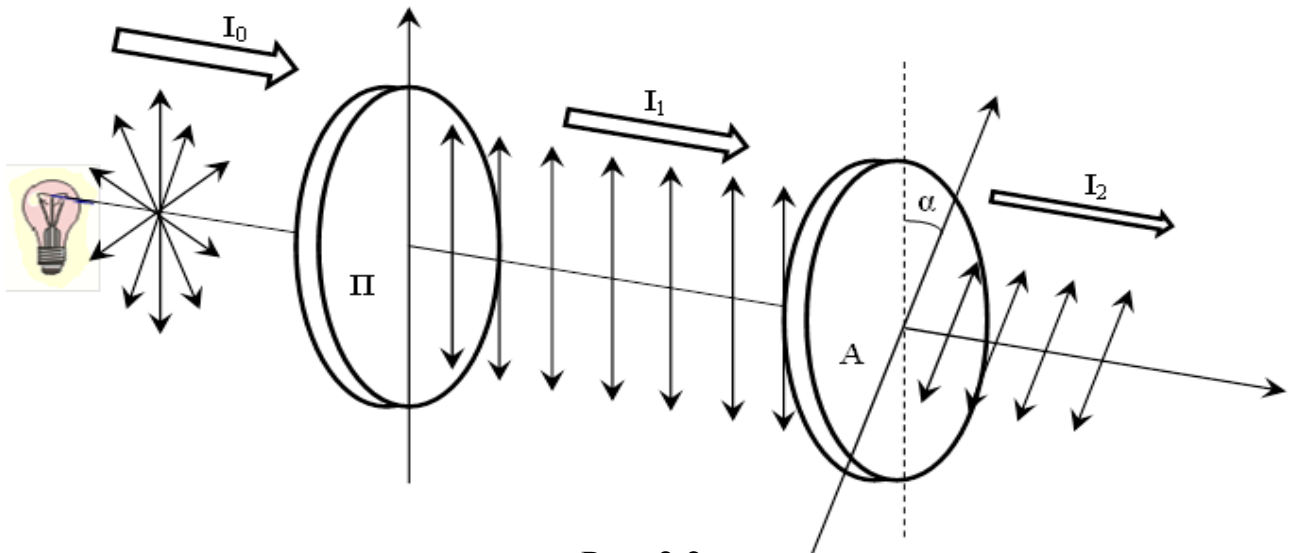


Рис. 2.2

С учетом поглощения интенсивность поляризованного света  $I_1$  может быть записана как

$$I_1 = (1 - k) \frac{I_0}{2}. \quad (2.8)$$

Плоскополяризованный луч света интенсивностью  $I_1$  падает на анализатор А. Интенсивность светового луча  $I_2$ , прошедшего через анализатор, определяется по закону Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha, \quad (2.9)$$

где  $\alpha$  – угол между плоскостью поляризации в поляризованном луче и плоскостью пропускания анализатора.

Учитывая потери интенсивности на поглощение в анализаторе

$$I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha, \quad (2.10)$$

а также выражение (2.8) для определения  $I_1$ , получаем:

$$I_2 = \frac{1}{2} (1 - k)^2 I_0 \cos^2 \alpha. \quad (2.11)$$

Тогда относительное уменьшение интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор, найдем, разделив интенсивность  $I_0$  естественного света, падающего на поляризатор, на интенсивность  $I_2$  поляризованного света, прошедшего через анализатор:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1 - k)^2 \cos^2 \alpha}. \quad (2.12)$$

Подставляя данные задачи и производя вычисления, получим:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1 - 0,06)^2 \cos^2 50^\circ} = 5,48.$$

Ответ: после прохождения света через поляризатор и анализатор, с учетом данных задачи, его интенсивность уменьшится в 5,48 раза.

11) На дифракционную решетку падает монохроматический свет длиной волны 500 нм. Определить число штрихов решетки на 1 мм, если максимум второго порядка виден под углом  $30^\circ$  к нормали. Чему равен угол между максимумами интенсивности первого и второго порядков?

12) Дифракционная решетка содержит 1200 штрихов на 1 мм. На нее падает нормально параллельный пучок белого света. Какой наибольший порядок спектра дает эта решетка? Каково угловое расстояние между границами этого спектра?

13) На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм, падает нормально белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана равно 4 м.

14) На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм, в направлении нормали к ее поверхности падает белый свет. Какой наибольший порядок дифракционного максимума дает эта решетка для длинноволновой границы света и какой для коротковолновой? Определить, под каким углом виден спектр первого порядка.

15) Постоянная дифракционной решетки – 6 мкм. На нее нормально падает монохроматический свет. Угол между максимумами первого и второго порядков равен  $4^\circ 36'$ . Определить длину световой волны.

16) Если угол падения естественного света на поверхность кристалла каменной соли равен  $57^\circ$ , то отраженный свет полностью линейно поляризован. Найти скорость распространения света в этом кристалле.

17) Предельный угол полного внутреннего отражения света некоторого вещества равен  $45^\circ$ . Чему равен угол полной поляризации для этого вещества?

18) Какой процент первоначальной интенсивности сохранится после прохождения естественного света через два поляроида, если угол между плоскостями поляризации составляет  $75^\circ$  и каждый из поляроидов в отдельности поглощает 5 % падающего на него света?

19) Определить, во сколько раз ослабевает свет, проходя через два поляроида, плоскости поляризации которых составляют угол  $63^\circ$ , причем в каждом из поляроидов теряется 10 % падающего света.

20) Интенсивность света, прошедшего через анализатор, составляет 15 % от интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найти угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если потери на поглощение и отражение света в каждом из них равны 10 % от падающего на них света.

### 2.3. Квантово-оптические явления

**Задача 4.** Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности вольфрамовой пластинки при ее облучении электромагнитным излучением длиной волны 230 нм, красную границу для данного металла и задерживающую разность потенциалов, при которой фототок становится равным нулю.

Дано:	СИ	Решение.
$A_{\text{в}} = 4,50 \text{ эВ}$	$7,21 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	<p>При облучении электромагнитным излучением поверхности металла происходит вырывание электронов, это явление называется внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом).</p> <p>Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта имеет вид:</p> $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = A_{\text{в}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2.13)$
$\lambda = 230 \text{ нм}$	$2,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	
$v_{\text{max}} - ?$		
$v_{\text{min}} - ?$		
$U_{\text{з}} - ?$		

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = A_{\text{в}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2.13)$$

где  $h\nu = h\frac{c}{\lambda}$  – энергия падающих фотонов электромагнитного излучения, Дж;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка;

$\nu$  – частота падающего излучения, Гц;

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны падающего излучения, м;

$A_{\text{в}}$  – работа выхода электрона из металла, Дж (табл. П.3);

$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, Дж;

$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса электрона;

$v_{\text{max}}$  – максимальная скорость вылетевшего электрона, м/с.

Из уравнения (2.13) видно, что возникновение фотоэффекта возможно при соблюдении следующего условия:

$$h\nu_{\min} = h \frac{c}{\lambda_{\max}} \geq A_{\text{в}}, \quad (2.14)$$

т. е. энергия падающих фотонов должна быть не меньше работы выхода.

Тогда для каждого металла существует минимальная частота излучения  $\nu_{\min}$  (или максимальная длина волны  $\lambda_{\max}$ ), с которой фотоэффект и начинается:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{в}}}{h} \quad (2.15)$$

или

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\text{в}}} \quad (2.16)$$

( $\nu_{\min}$  или  $\lambda_{\max}$  называют красной границей фотоэффекта).

Работа выхода  $A_{\text{в}}$  для вольфрама (см. табл. П.3)

$$A_{\text{в}} = 4,50 \text{ эВ} = 7,21 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

тогда красная граница фотоэффекта

$$\nu_{\min} = \frac{7,21 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 1,09 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

Из уравнения (2.13) можно найти максимальную скорость вырванных фотоэлектронов:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m} \left( \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{в}} \right)}. \quad (2.17)$$

Производим вычисления:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{9,11 \cdot 10^{-31}} \left( \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,3 \cdot 10^{-7}} - 7,21 \cdot 10^{-19} \right)} = 5,62 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}.$$

Чтобы задержать вылетающие из металла электроны, можно приложить задерживающее электрическое поле, при этом

$$eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (2.18)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль заряда электрона (элементарный заряд);

$U_3$  – задерживающее напряжение, В.



Из формулы (2.18) выразим задерживающее напряжение и произведем вычисление:

$$U_3 = \frac{m v_{\max}^2}{2e} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} (5,62 \cdot 10^5)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,90 \text{ (В)}.$$

Ответ:  $v_{\max} = 0,562 \text{ Мм/с}$ ;  $\nu_{\min} = 1,09 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ ;  $U_3 = 0,90 \text{ В}$ .

21) Определить красную границу фотоэффекта для некоторого металла и максимальную скорость фотоэлектронов, если минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект, равно 4,45 эВ, а облучение металла осуществляется светом длиной волны 200 нм.

22) Квант света длиной волны 200 нм выбивает с поверхности платинового электрода фотоэлектрон. Определить суммарный импульс, сообщаемый при этом электроду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему кванту.

23) На поверхность металла с работой выхода 4,53 эВ падает электромагнитное излучение длиной волны 180 нм. Определить красную границу фотоэффекта для этого металла и максимальную скорость вырванных электронов.

24) До какого максимального потенциала зарядится удаленный от других тел медный шарик при облучении его электромагнитным излучением длиной волны 140 нм?

25) В результате столкновения со свободным электроном рентгеновский фотон был рассеян на угол  $120^\circ$ . При этом длина волны его стала равной 5,45 пм. Определить энергию фотона до рассеяния.

26) Фотон излучения, длина волны которого равна комптоновской, был рассеян на свободном электроне так, что длина волны рассеянного излучения оказалась в 1,293 раза больше длины волны падающего. Под каким углом был рассеян фотон?

27) Фотон рассеивается на свободном электроне. Длина волны фотона до рассеяния была равна 4,13 пм. После рассеивания фотона кинетическая энергия электрона отдачи оказалась равной 0,144 МэВ. Найти угол, под которым рассеивается фотон.

28) Фотон длиной волны 5,22 пм рассеивается на угол  $60^\circ$  на свободном электроне. Определить энергию фотона (в электрон-вольтах) после рассеяния и импульс, полученный электроном.

29) Температура абсолютно черного тела составляет 900 К. Определить, как и на сколько она изменится, если длина волны, соответствующая пику спектра излучения, увеличится на 0,40 мкм.

30) Электрическая лампа накаливания мощностью 100 Вт имеет вольфрамовую нить длиной 19 см и диаметром 100 мкм. Эта нить нагревается до 3000 К. Во сколько раз отличается испускательная способность нити от испускательной способности абсолютно черного тела?

## 2.4. Квантовая физика

**З а д а ч а 5.** Следует ли учитывать волновые свойства у электрона, вылетевшего из электронной пушки электронно-лучевой трубки и движущегося к экрану, если ускоряющая разность потенциалов пушки равна 2,50 кВ, а расстояние от пушки до экрана составляет 500 мм? А если бы электрон с такой же скоростью двигался внутри атома?

Дано:	СИ	<i>Решение.</i>
$U = 2,50 \text{ кВ}$	$2,5 \cdot 10^3 \text{ В}$	Согласно гипотезе де Бройля любой движущейся частице можно сопоставить волну, длина волны которой определяется формулой де Бройля:
$s = 500 \text{ мм}$	$0,5 \text{ м}$	
$\lambda_B - ?$		
		$\lambda_B = \frac{h}{p}, \quad (2.19)$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка;

$p$  – импульс частицы,  $\text{кг} \cdot \text{м/с}$ .

Так как электрон приобрел импульс в ускоряющем электрическом поле электронной пушки, то можно записать:

$$eU = \frac{p^2}{2m}, \quad (2.20)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – модуль заряд электрона (элементарный заряд);

$U$  – ускоряющее напряжение пушки, В;

$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса электрона.

По формуле (2.19) с учетом формулы (2.20) получим:

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2meU}}. \quad (2.21)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\lambda_B] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{(\text{кг} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В})^{1/2}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{(\text{кг} \cdot \text{Дж})^{1/2}} = (\text{Дж/кг})^{1/2} \cdot \text{с} = (\text{м}^2/\text{с}^2)^{1/2} \cdot \text{с} = \text{м}.$$

Проводим вычисления:

$$\lambda_B = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,5 \cdot 10^3}} = 2,46 \cdot 10^{-11} \text{ (м)} \approx 24,6 \text{ (пм)}.$$

Сравнивая дебройлевскую длину волны с расстоянием  $s = 500$  мм, проходящим электроном до экрана, делаем заключение о том, что волновые свойства электрона учитывать не следует ( $\lambda_B \ll s$ ) и электрон в этой задаче можно считать частицей. Произведя аналогичные сравнения для атома (размер атома – порядка  $10^{-10}$  м), можно заключить, что в этом случае, наоборот, электрон нельзя считать частицей ( $\lambda_B$  соизмерима с размером атома) и его поведение следует описывать квантовой (волновой) механикой.

Ответ:  $\lambda_B = 24,6$  пм, при движении электрона в электронно-лучевой трубке волновые свойства несутсущественны, а при движении внутри атома учет волновых свойств обязателен.

31) Следует ли учитывать волновые свойства электрона, ускоренного электрическим полем плоского конденсатора напряженностью  $10^3$  В/см? Расстояние между пластинами равно 1 см. Первоначально электрон покоился.

32) Определить длину волны де Бройля: а) для частицы массой 1 г, движущейся со скоростью 10 м/с. Нужно ли учитывать в этом случае волновые свойства частицы, если она проходит расстояние 2 см? б) для протона, движущегося с такой же скоростью через кристалл.

33) Электрон движется по окружности радиусом 0,5 см в однородном магнитном поле с индукцией 8 мТл. Определить длину волны де Бройля электрона. Следует ли учитывать волновые свойства у такого электрона?

34) Первоначально покоившийся электрон ускорился в однородном электрическом поле разностью потенциалов 51 В. Найти длину волны де Бройля этого электрона. Следует ли учитывать волновые свойства такого электрона, если он в электрическом поле прошел расстояние в 1 см?

35) Какую энергию необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 пм?

36) Найти дебройлевскую длину волны молекул водорода, соответствующую их наиболее вероятной скорости при комнатной температуре (300 К). Следует ли учитывать волновые свойства молекул?

37) При анализе рассеяния альфа-частиц на ядрах (опыты Резерфорда) прицельные расстояния принимались порядка 0,1 нм. Волновые свойства альфа-частиц, имеющих кинетическую энергию 7,7 МэВ, при этом не учитывались. Допустимо ли это?

38) Определить, во сколько раз отличаются друг от друга значения дебройлевской длины волн электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

39) Электрон имеет кинетическую энергию 100 эВ. Определить количество дополнительной энергии, которое необходимо сообщить электрону для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась в два раза.

40) Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов 2,0 кВ, имеет дебройлевскую длину волны 0,215 пм. Найти массу частицы, если ее заряд равен двум элементарным.

## 2.5. Атомная и ядерная физика

**З а д а ч а 6.** Какую наименьшую энергию должны иметь бомбардирующие электроны, чтобы при возбуждении ударами этих электронов атома водорода его спектр содержал бы три спектральных линии? Вычислить длину волны линий, принадлежащих к серии Бальмера. Решение задачи пояснить схемой.

*Решение.*

Энергия электрона в атоме квантуется (принимает дискретные значения)  $W_n$ :

$$W_n = -\frac{\text{const}}{n^2}, \quad (2.22)$$

где const – постоянная для каждого атома величина (для атома водорода const = 13,6 эВ; для перевода в единицы СИ (Дж) умножить на  $1,6 \cdot 10^{-19}$ );

$n = 1, 2, 3, \dots, \infty$  – номер энергетического состояния электрона в атоме (номер уровня энергии).

Выражение (2.22) удобно изображать в виде диаграммы уровней энергии (рис. 2.3).

Самый нижний уровень ( $n = 1$ ) соответствует основному невозбужденному состоянию атома, все остальные состояния ( $n = 2, 3, 4, \dots, \infty$ ) – возбужденные.

Если атому каким-то способом сообщить дополнительную энергию (например, бомбардируя его движущимися частицами, облучая светом), то он может перейти в одно из возбужденных состояний (поглотив определенную порцию энергии). Время жизни в возбужденном состоянии у атома незначительное (порядка  $10^{-8} - 10^{-9}$  с), по прошествии его атом спонтанно (самопроизвольно) переходит в одно из состояний с меньшей энергией, излучая при этом кванты электромагнитной энергии определенной частоты (или длины волны):

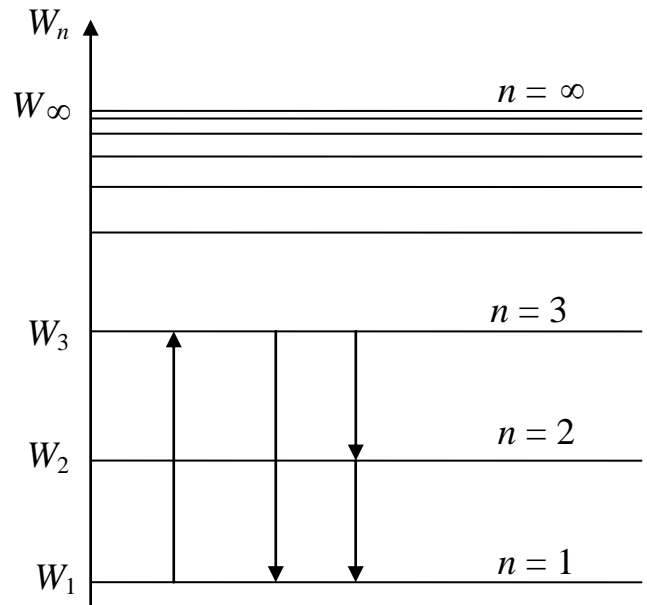


Рис. 2.3

$$h\nu_{mn} = \frac{hc}{\lambda_{mn}} = W_m - W_n, \quad (2.23)$$

где  $h\nu_{mn} = \frac{hc}{\lambda_{mn}}$  – энергия излучаемого атомом электромагнитного излучения, Дж;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

$\nu_{mn}$  – частота излучения, соответствующая переходу электрона с уровня с номером  $m$  на уровень с номером  $n$ , Гц;

$\lambda_{mn}$  – длина волны излучения, м;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;

$W_m, W_n$  – энергия  $m$  и  $n$  уровней электрона в атоме, Дж.

Для того чтобы в спектре излучения водорода появились три спектральные линии, нужно перевести атом во второе возбужденное состояние ( $n = 3$ ). Для этого необходимо, чтобы минимальная кинетическая энергия у бомбардирующих атом электронов

$$W_{k \min} = W_3 - W_1 = -\frac{\text{const}}{3^2} + \frac{\text{const}}{1^2}. \quad (2.24)$$

Подставляя в формулу (2.24) численные значения, получим:

$$W_{k \min} = 13,6 \left( -\frac{1}{3^2} + \frac{1}{1} \right) = 12,09 \text{ (эВ)}.$$

К серии Бальмера принадлежат спектральные линии, соответствующие переходам в первое возбужденное состояние ( $n = 2$ ) с вышележащих уровней. Из рис. 2.3 видно, что такой переход один (с  $m = 3$  на  $n = 2$ ), тогда

$$\frac{hc}{\lambda_{32}} = W_3 - W_2 = -\frac{\text{const}}{3^2} + \frac{\text{const}}{2^2}. \quad (2.25)$$

Отсюда

$$\lambda_{32} = \frac{hc}{\text{const} \left( -\frac{1}{3^2} + \frac{1}{2^2} \right)}. \quad (2.26)$$

Произведем вычисления:

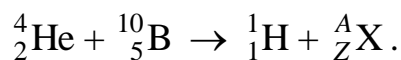
$$\lambda_{32} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \left( -\frac{1}{9} + \frac{1}{4} \right)^{-1} = 6,58 \cdot 10^{-7} \text{ (м)} = 658 \text{ (нм)}.$$

О т в е т:  $W_{k \min} = 12,09 \text{ эВ}$ ;  $\lambda_{32} = 658 \text{ нм}$  (это соответствует видимому диапазону электромагнитного излучения).

**З а д а ч а 7.** При соударении альфа-частицы с ядром бора  $^{10}_5\text{B}$  произошла ядерная реакция, в результате которой образовались два новых ядра. Одним из этих ядер было ядро атома водорода  $^1_1\text{H}$ . Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, дать символическую запись ядерной реакции.

*Решение.*

Обозначим неизвестное ядро символом  $^A_Z\text{X}$ . Так как альфа-частица представляет собой ядро гелия  $^4_2\text{He}$ , запись реакции имеет вид:



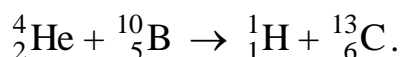
Применив закон сохранения числа нуклонов, получим уравнение:

$$4 + 10 = 1 + A, \text{ откуда } A = 13.$$

Применив закон сохранения заряда, получим уравнение:

$$2 + 5 = 1 + Z, \text{ откуда } Z = 6.$$

Следовательно, неизвестное ядро является ядром атома изотопа углерода  $^{13}_6\text{C}$ . Теперь можно записать реакцию в окончательном виде:



41) В каких пределах должны лежать значения длины волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света наблюдались три спектральные линии? Вычислить длину волны линии, принадлежащей к серии Бальмера. Решение задачи пояснить схемой.

42) Какую наименьшую ускоряющую разность потенциалов должны пройти бомбардирующие электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода спектр водорода содержал три спектральные линии? Вычислить значения длины волн линий, принадлежащих к серии Лаймана. Решение задачи пояснить схемой.

43) Найти наименьшую длину волны в серии Лаймана в спектре водорода. Какую ускоряющую разность потенциалов должны пройти электроны, чтобы при возбуждении ими атома водорода появилась эта линия? Решение задачи пояснить схемой.

44) Найти наибольшую длину волны в серии Бальмера в спектре водорода. Какую ускоряющую разность потенциалов должны пройти электроны, чтобы при возбуждении ими атома водорода появилась эта линия? Решение задачи пояснить схемой.

45) В каких пределах должны лежать значения импульса фотонов, чтобы при возбуждении атомов водорода в спектре этих атомов наблюдалось шесть спектральных линий? Вычислить длину волны линии, принадлежащей к серии Пашена. Решение задачи пояснить схемой.

46) Какую наименьшую ускоряющую разность потенциалов должны пройти бомбардирующие электроны, чтобы при возбуждении ими атомов водорода спектр водорода содержал шесть спектральных линий? Вычислить значения длины волн спектральных линий, принадлежащих к серии Бальмера. Решение задачи пояснить схемой.

47) В результате захвата нейтрона ядром изотопа  $^{14}_7\text{N}$  образуются неизвестный элемент и альфа-частица. Записать реакцию и определить неизвестный элемент.

48) В результате радиоактивного распада химический элемент торий  $^{230}_{90}\text{Th}$  может превратиться в радий  $^{226}_{88}\text{Ra}$  и один неизвестный элемент. Записать реакцию и определить неизвестный элемент.

49) Полоний  $^{214}_{84}\text{Po}$  превращается в висмут  $^{210}_{83}\text{Bi}$  в результате нескольких альфа- и бета-распадов. Записать ядерную реакцию, соответствующую этому превращению, и определить, сколько альфа- и бета-распадов произошло.

50) Какие заряд  $Z$  и массовое число  $A$  будет иметь ядро элемента, получившегося из ядра изотопа  $^{215}_{84}\text{Po}$  после одного альфа-распада и одного электронного бета-распада? Записать ядерную реакцию, соответствующую этому превращению.

## 2.6. Свободные электроны в металле

**Задача 8.** Плотность некоторого металла  $8,9 \text{ г/см}^3$ , массовое число 59. До какой температуры надо было бы нагреть классический электронный газ, чтобы средняя энергия его электронов оказалась равной средней энергии электронов в этом металле при  $T_M = 0$ ? Принять, что на каждый атом приходится один электрон.

Дано:	Решение.
$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	Средняя энергия классических электронов
$A_r = 59 \text{ а. е. м.}$	$\langle W \rangle = \frac{3}{2} k_B T. \quad (2.27)$
$\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$	С другой стороны, эта энергия равна средней энергии электронов в металле при $T_M = 0 \text{ К}$ :
$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$	$\langle W \rangle = \frac{3}{5} W_F. \quad (2.28)$
$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$	Приравниваем правые части уравнений (2.27) и (2.28) друг к другу и выражаем температуру:
$T_M = 0 \text{ К}$	$T = \frac{2}{5} \frac{W_F}{k_B}. \quad (2.29)$
$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	
$T - ?$	

Энергию Ферми определяем по формуле

$$W_F = \frac{h^2}{2m_e} \left( \frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3}, \quad (2.30)$$

где с учетом того, что массовое число достаточно точно характеризует молярную массу элемента  $M$ ,

$$n_e = \frac{N}{V} = \rho \frac{N_A}{M}, \text{ так как } N = \frac{m}{M} N_A. \quad (2.31)$$

Окончательно получим:

$$T = \frac{h^2}{5k_B m_e} \left( \frac{3\rho N_A}{8\pi M} \right)^{2/3}. \quad (2.32)$$



После подстановки числовых значений в формулу (2.32) получим:

$$T = \frac{(6,626 \cdot 10^{-34})^2}{5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}} \cdot \left( \frac{3 \cdot 8900 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{8 \cdot 3,14 \cdot 59 \cdot 10^{-3}} \right)^{2/3} = 34221 \text{ К} \approx 34 \text{ 000 К}.$$

О т в е т:  $T \approx 3,4 \cdot 10^4 \text{ К}$  (очевидно, что металл при такой температуре существовать не может).

51) Найти разность энергий (в электрон-вольтах) электронов, находящихся на уровнях, вероятность заполнения которых равна 0,20 и 0,80 при температуре металла  $27^\circ\text{С}$ .

52) Как и во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами энергетического уровня в металле, если уровень расположен на 0,01 эВ ниже уровня Ферми, а температура изменяется от 200 до 2000 К?

53) Во сколько раз отличается вероятность заполнения в кристалле натрия уровня, энергия которого на 0,5 % меньше энергии Ферми, при температуре 300 и 70 К?

54) При какой концентрации свободных электронов в кристалле температура Ферми (температура вырождения) электронного газа в нем равна  $0^\circ\text{С}$ ?

55) Вычислить среднюю энергию электронов в кристалле натрия при температуре абсолютного нуля.

56) Полагая, что на каждый атом меди в кристалле приходится по одному свободному электрону, оценить долю электронов, энергии которых при абсолютном нуле лежат в интервале от 0,90 максимальной до максимальной.

57) Электроны в металле находятся при температуре 0 К. Найти относительное число  $\Delta N / N$  свободных электронов, кинетическая энергия которых отличается от энергии Ферми не более чем на 2 %.

58) Какая доля электронов в металле при 0 К имеет энергию в интервале от 0,50  $W_F$  до 0,51  $W_F$  ?

59) Кусок меди объемом  $20 \text{ см}^3$  находится при температуре 0 К. Определить число свободных электронов, импульсы которых отличаются от импульса Ферми не более чем на 10 %.

60) Полагая, что на каждый атом меди в кристалле приходится по одному свободному электрону, найти общее число свободных электронов в объеме  $10 \text{ см}^3$  меди и число электронов, энергии которых при температуре 0 К заключены в интервале между 7,010 и 7,011 эВ.

## 2.7. Тепловые свойства твердых тел

**Задача 9.** Определить количество тепла, необходимого для нагревания кристалла NaCl массой 20 г от температуры 2 до 4 К. Характеристическую температуру Дебая  $T_D$  для NaCl принять равной 320 К.

Дано:	СИ	Решение.
$m = 20 \text{ г}$	$2 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$	Тепло, подводимое для нагревания тела от температуры $T_1$ до $T_2$ , может быть вычислено по формуле
$T_1 = 2 \text{ К}$		
$T_2 = 4 \text{ К}$		
$M = 58,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$		
$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$		
$T_D = 320 \text{ К}$		
$Q = ?$		$Q = \int_{T_1}^{T_2} C dT, \quad (2.33)$ <p>где <math>C</math> – теплоемкость тела.</p>

Теплоемкость тела связана с молярной теплоемкостью соотношением

$$C = \frac{m}{M} c_v, \quad (2.34)$$

где  $m$  – масса тела;

$c_v$  – молярная теплоемкость тела;

$M$  – молярная масса.

Подставив выражение (2.34) в формулу (2.33), получим:

$$Q = \frac{m}{M} \int_{T_1}^{T_2} c_v dT. \quad (2.35)$$

В общем случае молярная теплоемкость  $c_v$  сложным образом зависит от температуры. Однако если выполняется условие  $T \ll T_D$ , то нахождение  $Q$  облегчается тем, что можно воспользоваться законом «кубов» Дебая, согласно которому молярная теплоемкость пропорциональна кубу термодинамической температуры:

$$c_v = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{T_D} \right)^3. \quad (2.36)$$

Подставив выражение (2.36) в формулу (2.35), получим:

$$Q = \frac{12\pi^4 m R}{5 M T_D^3} \int_{T_1}^{T_2} T^3 dT. \quad (2.37)$$

Выполним интегрирование:

$$Q = \frac{12\pi^4 mR}{5 M T_D^3} \left( \frac{T_2^4}{4} - \frac{T_1^4}{4} \right) = \frac{3\pi^4 mR}{5 M T_D^3} (T_2^4 - T_1^4). \quad (2.38)$$

Производим вычисления:

$$Q = \frac{3 \cdot (3,14)^4 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 8,31}{5 \cdot 58,5 \cdot 10^{-3} \cdot 320^3} (4^4 - 2^4) = 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 1,21 \text{ мДж}.$$

Ответ:  $Q = 1,21 \text{ мДж}$ .

61) Вычислить количество тепла, необходимого для нагревания кристалла меди массой 100 г от 10 до 20 К. Характеристическая температура Дебая для меди  $T_D = 339 \text{ К}$ .

62) Зная, что для алмаза характеристическая температура Дебая 1910 К, вычислить его удельную теплоемкость при температуре 30 К.

63) Молярная теплоемкость серебра при температуре 20 К равна 1,65 Дж/(моль·К). Чему равна характеристическая температура Дебая для серебра? Считать, что условие  $T \ll T_D$  выполнено.

64) Вычислить теплоемкость цинка массой 100 г при температуре 10 К. Характеристическая температура Дебая для цинка равна 308 К.

65) Вычислить удельную теплоемкость хлористого натрия при температуре  $T = 0,01 T_D$ .

66) На нагревание металлического предмета массой 100 г от 20 до 50 °С затрачено 8,3 кДж тепла. Определить, из какого металла изготовлен предмет, если указанный интервал значений температуры выше характеристической температуры Дебая.

67) Вычислить значение температуры, при которой теплоемкость электронного газа будет равна теплоемкости кристаллической решетки алюминия.

68) Рассчитать относительный вклад электронного газа в общую теплоемкость серебра при комнатной температуре (27 °С), при температуре 3 и 3000 К.

69) Оценить максимальное значение энергии фонона в серебре. Скорость распространения звука в серебре – 3,7 км/с (продольная волна), 1,7 км/с (поперечная волна), плотность серебра – 10,5 г/см<sup>3</sup>, молярная масса серебра – 108 г/моль. Фотон какой длины волны имел бы такую же энергию?

70) Вычислить изменение энтропии 100 г кристаллического хлористого натрия при его нагревании от 10 до 25 К. Характеристическая температура Дебая для хлористого натрия – 320 К.

## 2.8. Электропроводность металлов и полупроводников

**Задача 10.** Температура собственного полупроводника повысилась от 300 до 310 К. Во сколько раз при этом изменилось сопротивление этого полупроводника, если ширина запрещенной зоны 0,3 эВ?

Дано:	Решение.
$T_1 = 300 \text{ К}$	Зависимость сопротивления собственного полупроводника от температуры определяется выражением
$T_2 = 310 \text{ К}$	
$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$	
$\Delta W = 0,30 \text{ эВ}$	$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2k_B T}\right), \quad (2.39)$
$\frac{R_2}{R_1} = ?$	где $\Delta W$ – ширина запрещенной зоны, имеющая смысл энергии активации собственного полупроводника.

Тогда для искомого отношения можно записать:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2k_B T_2}\right)}{R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2k_B T_1}\right)} = \exp\left[\frac{\Delta W}{2k_B} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]. \quad (2.40)$$

После подстановки данных (не забываем перевести электрон-вольты в джоули) получим:

$$\frac{R_2}{R_1} = \exp\left[\frac{0,30 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \left(\frac{1}{310} - \frac{1}{300}\right)\right] = 0,829 \approx 0,83.$$

Ответ:  $R_2 \approx 0,83 \cdot R_1$ . – сопротивление собственного полупроводника уменьшилось примерно на 17%.

71) Удельная проводимость у металла равна 10 МСм/м. Оценить по классической теории число соударений, которые испытывает электрон за время 1 с, находясь в металле, если концентрация свободных электронов равна  $2,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

72) Исходя из классической теории электропроводности металлов, определить среднюю кинетическую энергию электронов в металле, если отношение коэффициента теплопроводности электронного газа к удельной проводимости металла равно  $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ В}^2/\text{К}$ .

73) Исходя из модели свободных электронов, оценить среднюю длину свободного пробега электронов в металле, если концентрация свободных элект-

ронов равна  $5,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ . Удельную проводимость у металла принять равной  $10 \text{ МСм/м}$ , а среднюю скорость хаотического движения электронов –  $1,6 \text{ Мм/с}$ .

74) Полупроводниковый кристалл, ширина запрещенной зоны которого  $0,69 \text{ эВ}$ , нагревают от температуры  $27^\circ\text{С}$  на  $100 \text{ К}$ . Во сколько раз возрастает удельная проводимость данного кристалла?

75) Найти минимальную энергию, необходимую для образования пары электрон-дырка в некотором полупроводниковом кристалле, если его удельная проводимость изменяется в  $1,7$  раза при изменении температуры от  $20$  до  $3^\circ\text{С}$ .

76) Сопротивление полупроводникового кристалла  $\text{PbS}$  при температуре  $20^\circ\text{С}$  равно  $10 \text{ кОм}$ . Определить сопротивление этого кристалла при температуре  $50^\circ\text{С}$ .

77) Найти ширину запрещенной зоны неизвестного полупроводника с собственным типом проводимости, если при его нагревании от  $27$  до  $85^\circ\text{С}$  его проводимость изменилась от  $100$  до  $867 \text{ См}$ .

78) Кремниевый образец нагревают от температуры  $0^\circ\text{С}$  до температуры  $10^\circ\text{С}$ . Во сколько раз возрастет удельная проводимость данного образца?

79) Кристалл германия охлаждают от  $27^\circ\text{С}$  до температуры таяния льда. Как и во сколько раз изменится сопротивление этого кристалла?

80) Кремниевый образец нагревают от  $20$  до  $45^\circ\text{С}$ . Определить, во сколько раз уменьшится сопротивление этого образца.

## Библиографический список

### *Основная литература*

1. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва, 2006. – 560 с. – Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва, 2001. – 607 с. – Текст : непосредственный.
3. Трофимова, Т. И. Краткий курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва, 2006. – 352 с. – Текст : непосредственный.
4. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва, 1990. – 622 с. – Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс физики / И. В. Савельев. – Москва, 2004. – Т. 2. – 442 с. – Текст : непосредственный.
6. Курманов, Р. С. Оптика. Задачи / Р. С. Курманов, О. И. Сер-

дюк, Г. Б. Тодер. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 38 с. – Текст : непосредственный.

7. Гончар, И. И. Элементы квантовой механики / И. И. Гончар, И. А. Дроздова. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 37 с. – Текст : непосредственный.

8. Гончар, И. И. Основы квантовой физики в задачах / И. И. Гончар, Л. А. Литневский. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2008. – 40 с. – Текст : непосредственный.

9. Гончар, И. И. Методические указания к решению задач при изучении разделов физики «Колебания и волны», «Оптика», «Квантовая и атомная физика» / И. И. Гончар, И. А. Дроздова. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2005. – 40 с. – Текст : непосредственный.

10. Аронова, Т. А. Методические указания для подготовки студентов к тестированию по разделам физики «Колебания и волны», «Волновая оптика», «Квантовая физика» / Т. А. Аронова, О. И. Сердюк. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 36 с. – Текст : непосредственный.

11. Аронова, Т. А. Методические указания для подготовки студентов к тестированию по разделам физики «Статистическая физика» и «Физика твердого тела» / Т. А. Аронова, О. И. Сердюк, Г. Б. Тодер. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – 39 с. – Текст : непосредственный.

12. Гончар, И. И. Элементы статистической физики: классические и квантовые распределения / И. И. Гончар, С. Н. Крохин, Г. Б. Тодер. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 42 с. – Текст : непосредственный.

#### *Дополнительная литература*

13. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела / Г. И. Епифанов. – Москва, 1977. – 288 с. – Текст : непосредственный.

14. Бушманов, Б. Н. Физика твердого тела / Б. Н. Бушманов, Ю. А. Хромов. – Москва, 1971. – 224 с. – Текст : непосредственный.

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Т а б л и ц а П.1

## Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Отношение	Наименование	Обозначение	Отношение
деци	д	$10^{-1}$	дека	да	$10^1$
санти	с	$10^{-2}$	гекто	г	$10^2$
милли	м	$10^{-3}$	кило	к	$10^3$
микро	мк	$10^{-6}$	мега	М	$10^6$
нано	н	$10^{-9}$	гига	Г	$10^9$
пико	п	$10^{-12}$	тера	Т	$10^{12}$

Т а б л и ц а П.2

## Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Вода	1,33	Бензол	1,60
Стекло	1,50	Глицерин	1,47
Кварц	1,46	Алмаз	2,42

Т а б л и ц а П.3

## Работа выхода электрона из металла

Металл	$A_v$ , эВ	Металл	$A_v$ , эВ
Алюминий	3,74	Никель	4,84
Железо	4,36	Платина	5,29
Литий	2,39	Серебро	4,28
Медь	4,47	Цинк	3,74

Т а б л и ц а П.4

## Интервалы длины волн и частоты и соответствующие им цвета видимой части спектра

Цвет спектра	Длина волны, нм	Частота, ТГц
Красный	760 – 620	395 – 483
Оранжевый	620 – 590	483 – 508
Желтый	590 – 560	508 – 536
Зеленый	560 – 500	536 – 600
Голубой	500 – 480	600 – 625
Синий	480 – 450	625 – 666
Фиолетовый	450 – 380	666 – 789

Т а б л и ц а П.5

## Заряд и масса частиц

Название частицы	Заряд, Кл	Масса, кг
Электрон	$-1,60 \cdot 10^{-19}$	$9,11 \cdot 10^{-31}$
Протон	$+1,60 \cdot 10^{-19}$	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Альфа-частица	$+3,20 \cdot 10^{-19}$	$6,64 \cdot 10^{-27}$

Т а б л и ц а П.6

## Молярная масса и число степеней свободы молекул газа

Газ	Молярная масса $M$ , г/моль	Число степеней свободы $i$
Водород ( $H_2$ )	2	5
Гелий (He)	4	3
Азот ( $N_2$ )	28	5
Кислород ( $O_2$ )	32	5
Углекислый газ ( $CO_2$ )	44	6
Сернистый газ ( $SO_2$ )	64	6

Т а б л и ц а П.7

Характеристическая температура Дебая  
для некоторых химических элементов и соединений

Элемент	$T_D$ , К	Элемент	$T_D$ , К	Элемент	$T_D$ , К
Be	1160	Fe	467	Al	418
Mg	406	Co	445	In	109
Ca	219	Ni	456	Tl	89
La	132	Pd	275	C (алмаз)	1910
Ti	278	NaCl	320	Si	658
Pt	229	KCl	227	Ge	366
V	273	Cu	339	Sn (серое)	212
Nb	252	Ag	225	Sn (белое)	189
Ta	231	Au	165	Pb	94,5
Cr	402	Zn	308	Bi	117
Mo	425	Cd	300	KBr	174
W	(379)	Hg	(60 – 90)	CaF <sub>2</sub>	474



Таблица П.8

Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева										VII		VIII																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1	H 1,00794 водород	2	He 4,002602 гелий	3	Li 6,941 литий	4	Be 9,01218 бериллий	5	B 10,811 бор	6	C 12,011 углерод	7	N 14,0067 азот	8	O 15,9994 кислород	9	F 18,998403 фтор	10	Ne 20,179 неон	11	Na 22,98977 натрий	12	Mg 24,305 магний	13	Al 26,98154 алюминий	14	Si 28,0855 кремний	15	P 30,97376 фосфор	16	S 32,066 сера	17	Cl 35,453 хлор	18	Ar 39,948 аргон	19	K 39,0983 калий	20	Ca 40,078 кальций	21	Sc 44,95591 скандий	22	Ti 47,88 титан	23	V 50,9415 ванадий	24	Cr 51,9961 хром	25	Mn 54,9380 марганец	26	Fe 55,847 железо	27	Co 58,9332 кобальт	28	Ni 58,69 никель																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3		29	Cu 63,546 медь	30	Zn 65,39 цинк	31	Ga 69,723 галлий	32	Ge 72,59 германий	33	As 74,9216 мышьяк	34	Se 78,96 селен	35	Br 79,904 бром	36	Kr 83,80 криптон	37	Rb 85,4678 рубидий	38	Sr 87,62 стронций	39	Y 88,9039 итрий	40	Zr 91,224 цирконий	41	Nb 92,9064 ниобий	42	Mo 95,94 молибден	43	Tc [98] технеций	44	Ru 101,07 рутений	45	Rh 102,9055 родий	46	Pd 106,42 палладий																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
5	47	Ag 107,8682 серебро	48	Cd 112,41 кадмий	49	In 114,82 индий	50	Sn 118,710 олово	51	Sb 121,75 сурьма	52	Te 127,60 теллур	53	I 126,9045 йод	54	Xe 131,29 ксенон	55	Cs 132,9054 цезий	56	Ba 137,33 барий	57	La* 138,9055 лантан	72	Hf 178,49 гафний	73	Ta 180,9479 тантал	74	W 183,85 вольфрам	75	Re 186,207 рений	76	Os 190,2 осмий	77	Ir 192,22 иридий	78	Pt 195,08 платина																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
6	79	Au 196,9665 золото	80	Hg 200,59 ртуть	81	Tl 204,383 таллий	82	Pb 207,2 свинец	83	Bi 208,9804 висмут	84	Po [209] полоний	85	At [210] астат	86	Rn [222] радон	87	Fr [223] франций	88	Ra [226] радий	89	Ac** [227] актиний	104	Rf [261] резерфордий	105	Db [262] дубний	106	Sg [263] сиборгий	107	Bh [262] борий	108	Hs [265] гасий	109	Mt [266] майгтерний	110	Ds [271] дармштадтий																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
7	111	Rg [272] регентий	112	Uub [285] унубий	113	Uut [ ] ункунтий	114	Uuq [287] унквиздий	115	(Uup) [ ] унпентий	116	Uuh [292] унгексий	117	(Uus) [ ] унгусептий	118	Uuo [293] уноуктий	119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129		130		131		132		133		134		135		136		137		138		139		140		141		142		143		144		145		146		147		148		149		150		151		152		153		154		155		156		157		158		159		160		161		162		163		164		165		166		167		168		169		170		171		172		173		174		175		176		177		178		179		180		181		182		183		184		185		186		187		188		189		190		191		192		193		194		195		196		197		198		199		200		201		202		203		204		205		206		207		208		209		210		211		212		213		214		215		216		217		218		219		220		221		222		223		224		225		226		227		228		229		230		231		232		233		234		235		236		237		238		239		240		241		242		243		244		245		246		247		248		249		250		251		252		253		254		255		256		257		258		259		260		261		262		263		264		265		266		267		268		269		270		271		272		273		274		275		276		277		278		279		280		281		282		283		284		285		286		287		288		289		290		291		292		293		294		295		296		297		298		299		300		301		302		303		304		305		306		307		308		309		310		311		312		313		314		315		316		317		318		319		320		321		322		323		324		325		326		327		328		329		330		331		332		333		334		335		336		337		338		339		340		341		342		343		344		345		346		347		348		349		350		351		352		353		354		355		356		357		358		359		360		361		362		363		364		365		366		367		368		369		370		371		372		373		374		375		376		377		378		379		380		381		382		383		384		385		386		387		388		389		390		391		392		393		394		395		396		397		398		399		400		401		402		403		404		405		406		407		408		409		410		411		412		413		414		415		416		417		418		419		420		421		422		423		424		425		426		427		428		429		430		431		432		433		434		435		436		437		438		439		440		441		442		443		444		445		446		447		448		449		450		451		452		453		454		455		456		457		458		459		460		461		462		463		464		465		466		467		468		469		470		471		472		473		474		475		476		477		478		479		480		481		482		483		484		485		486		487		488		489		490		491		492		493		494		495		496		497		498		499		500		501		502		503		504		505		506		507		508		509		510		511		512		513		514		515		516		517		518		519		520		521		522		523		524		525		526		527		528		529		530		531		532		533		534		535		536		537		538		539		540		541		542		543		544		545		546		547		548		549		550		551		552		553		554		555		556		557		558		559		560		561		562		563		564		565		566		567		568		569		570		571		572		573		574		575		576		577		578		579		580		581		582		583		584		585		586		587		588		589		590		591		592		593		594		595		596		597		598		599		600		601		602		603		604		605		606		607		608		609		610		611		612		613		614		615		616		617		618		619		620		621		622		623		624		625		626		627		628		629		630		631		632		633		634		635		636		637		638		639		640		641		642		643		644		645		646		647		648		649		650		651		652		653		654		655		656		657		658		659		660		661		662		663		664		665		666		667		668		669		670		671		672		673		674		675		676		677		678		679		680		681		682		683		684		685		686		687		688		689		690		691		692		693		694		695		696		697		698		699		700		701		702		703		704		705		706		707		708		709		710		711		712		713		714		715		716		717		718		719		720		721		722		723		724		725		726		727		728		729		730		731		732		733		734		735		736		737		738		739		740		741		742		743		744		745		746		747		748		749		750		751		752		753		754		755		756		757		758		759		760		761		762		763		764		765		766		767		768		769		770	

П р и м е ч а н и я.

1. Ускорение свободного падения на поверхности Земли  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

2. Электрическая постоянная  $k_e = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ;  $k_e = 1 / (4\pi\epsilon_0)$ , где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

3. Магнитная постоянная  $k_m = 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м/А}$ ;  $k_m = \mu_0 / (4\pi)$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

4. Скорость света в вакууме  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

5. Постоянная Планка  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ .

6.  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

7.  $T, \text{ К} = t, ^\circ\text{С} + 273$ .

*Учебное издание*

ДРОЗДОВА Илга Анатольевна, КУРМАНОВ Рамиль Султангареевич,  
ЛИТНЕВСКИЙ Владимир Леонидович, ЛИТНЕВСКИЙ Леонид Аркадьевич,  
СОСНОВСКИЙ Юрий Михайлович, ТОДЕР Георгий Борисович,  
ХМЫРОВА Наталья Анатольевна

ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛАМ «ОПТИКА»,  
«КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА» И  
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

---

Редактор Н. А. Майорова

\* \* \*

Подписано в печать 01.02.2023. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ .  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2,3.  
Тираж 30 экз. Заказ .

\* \*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35