

---

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

# **КОМПЛЕКСНЫЕ ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ**

УДК 538.91, 548.73, 378.147:53

ББК 74.265.1 я 73

Ч 75

**Рецензент:** Ревинский А.Ф., доктор физико-математических наук, профессор  
«БрГУ им. А. С. Пушкина»

Секержицкий В.С., кандидат физико-математических наук, доцент  
«БрГУ им. А. С. Пушкина»

**[Чопчиц Н.И.].** Комплексные задачи по физике. – Брест: Из-во БрГТУ,  
Ч 75 2014. – 108 с.

**ISBN 978-985-493-285-9**

Сборник составлен из комплексных задач, написанных доцентом кафедры физики Брестского государственного технического университета Чопчицом Н.И., содержит 21 комплексную задачу по всем разделам курса общей физики. Каждая из задач представляет собой физическую модель с множеством различных параметров. Разнообразие и оригинальность комплексных задач в сочетании с таблицами и рисунками, позволяющими ставить перед студентом индивидуальные задания любого уровня сложности, делают этот сборник полезным и удобным для проведения практических занятий по физике.

Для студентов и преподавателей физических и инженерно-технических специальностей вузов.

УДК 538.91, 548.73, 378.147:53

ББК 74.265.1 я 73

ISBN 978-985-493-285-9

© Чопчиц Н. И., 2014

© Из-во БрГТУ, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

1.	Всупительное слово.	4
2.	Чопчиц Н.И. Новый подход к повышению эффективности самостоятельной работы студентов.	5
3.	<b>Раздел I.</b> Задача 1. Кинематика и динамика материальной точки.	6
4.	Задача 2. Динамика вращательного движения. Законы сохранения.	12
5.	Задача 3. Колебания.	15
6.	Задача 4. Молекулярная физика и термодинамика.	18
7.	Задача 5. Электрическое поле в вакууме.	22
8.	Задача 6. Электрическое поле в веществе.	30
9.	Задача 7. Магнитное поле в вакууме.	32
10.	Задача 8. Интерференция.	38
11.	Задача 9. Дифракция света.	40
12.	Задача 10. Поляризация.	41
13.	Задача 11. Квантовая оптика.	44
14.	Задача 12. Специальная теория относительности.	46
15.	<b>Раздел II.</b> Задача 1. Кинематика, динамика и законы сохранения	50
16.	Задача 2. Механические колебания	53
17.	Задача 3. Молекулярная физика и термодинамика	55
18.	Задача 4. Электростатика. Постоянный электрический ток	59
19.	Задача 5. Магнитное поле постоянных токов. Электромагнитная индукция	61
20.	Задача 6. Самоиндукция. Индуктивность	64
21.	Задача 7. Геометрическая оптика. Тонкие линзы. Интерференция света.	68
22.	Задача 8. Дифракция Френеля и Фраунгофера.	72
23.	Задача 9. Поляризация света. Тепловое излучение. Квантовые свойства света.	75
24.	Приложение 1	79
25.	Приложение 2	99
26.	Отзыв Секержицкого В.С.	107

## ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Данный сборник – плод многолетнего труда доцента кафедры физики Брестского государственного технического университета Чопчица Н.И. Это авторская, творческая работа: от условия задач и формулировки заданий до таблиц, рисунков. Все задачи разбиты на два больших раздела. Первый составлен в более ранний период работы Николая Игнатьевича на кафедре, второй – позднее. В первый раздел включена задача по специальной теории относительности, которой нет во втором. Кроме этого, задачи по динамике поступательного и вращательного движения, поляризации и квантовой физики во втором разделе разделены. Различаются разделы и по содержанию. Например, первая задача в обеих частях посвящена кинематике и динамике, только в первой части для решения требуются более глубокие знания высшей математики по сравнению с задачей второго раздела. Задача по молекулярной физике и термодинамике в первом разделе включает помимо традиционно рассматриваемых процессов ещё и  $pV$  - линейный процесс. В электростатике в первом разделе рассматривается распределение зарядов на плоскости и в пространстве, во втором – только на плоскости и т.д. Изначально комплексные задачи второго раздела были задуманы Николаем Игнатьевичем для факультета заочного обучения, поэтому задания были упрощены, но вместе с тем появились новые оригинальные задания, новые рисунки (как в механических колебаниях, динамике, интерференции, дифракции), очень интересной сделал Николай Игнатьевич задачу по магнетизму. Появилась новая, оригинальная задача по самоиндукции и индуктивности.

В конце сборника в качестве Приложения вынесены методические рекомендации, написанные Чопчицем Н.И. по молекулярной физике и термодинамике, и варианты экзаменационных заданий, которые он писал только от руки и практически никогда не задавал сам численные значения физических величин, которые должны были задавать сами экзаменуемые, что означало своеобразный тест на понимание студентом порядка рассматриваемых параметров. Кроме этого, теоретические задания Николай Игнатьевич, как правило, формулировал в виде задач, подчёркивая прикладную специфику нашего университета.

Все задачи за более чем 30-летнюю работу Чопчица Н.И. на кафедре физики БрГТУ прошли проверку практикой и используются всеми преподавателями кафедры для проведения практических занятий для студентов всех факультетов дневной и заочной форм обучения. Большое количество физических и геометрических параметров, характеризующих каждую рассматриваемую физическую ситуацию, позволяет варьировать выбор заданий как по количеству, так и по содержанию, что очень важно, т.к. даёт возможность формулировать индивидуальное задание одновременно большому количеству студентов.

В первой задаче первого раздела приведён выбор варианта условия и рисунка, который предлагал студентам Николай Игнатьевич. Тот же принцип выбора варианта используется и во всех остальных задачах.

Янусик И.С.



## **НОВЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

В связи с грядущими переменами в системе высшего образования и, в частности, с переходами инженерного образования на многоступенчатую систему, резко возрастает роль и значение самостоятельной работы студентов. Она должна стать одним из основных звеньев образовательного процесса, развивать творческие способности будущих инженеров (бакалавров, магистров), стимулировать их активность в приобретении новых знаний и научно-исследовательской деятельности. Однако это возможно лишь в том случае, если у студентов имеются не только технические возможности, но и заинтересованность в качественном выполнении самостоятельной работы.

Эффективным средством стимулирования такого вида работы является развитие у студентов навыков самостоятельной формулировки заданий для последующего их выполнения.

В курсе общей физики, например, для этих целей могут быть использованы так называемые комплексные задачи, в которых рассматриваются достаточно сложные физические ситуации, характеризующиеся большим числом физических и геометрических параметров, которые могут изменяться в достаточно широких пределах. На подготовительном этапе преподаватель вместе со студентами определяет набор характеристик системы, пределы их изменения и трансформации. После этого выписывается система соотношений, которые могут быть получены для данной ситуации на основе физических законов, а также геометрических и иных соображений, и определяется число свободных характеристик системы, которые могут быть заданы независимо друг от друга. Поливариантность постановки задач достигается за счет варьирования геометрических элементов характеристик ситуации, вариантов их сочетаний, а также выбора задаваемых и определяемых физических величин.

Разумеется, важным элементом образовательного процесса является также вырабатываемое при самостоятельном задании численных значений представление о взаимосвязи рассматриваемой модельной ситуации с моделируемой реальностью. Следует отметить, что при таком подходе появляется возможность самостоятельного выбора студентом степени сложности задания, соответствующей уровню его теоретической подготовки.

## РАЗДЕЛ I

### Задача 1. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

**Условие:** Груз массой  $m$ , который можно считать материальной точкой, начинает двигаться под действием сжатой пружины с коэффициентом упругости  $k$  из точки  $A$  в жёлобе, расположенном в вертикальной плоскости. В точке  $B$  действие пружины прекращается. Длина участка  $AB$  равна  $l_0$ . Участки  $AC$  и  $DF$  прямолинейны и имеют длины  $l_1$  и  $l_2$  соответственно, а участок  $CD$  является дугой окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $O$ . На участках  $AC$  и  $DF$  действует сухое трение с коэффициентом трения  $\mu$ , на криволинейном участке  $CD$  действием трения можно пренебречь. Расстояние от точки  $F$  до поверхности земли равно  $H$ . Сопротивлением воздуха при движении груза вне жёлоба можно пренебречь. Ориентация жёлоба в вертикальной плоскости задана на рисунке. Точку закрепления пружины и её длину в недеформированном состоянии задать самостоятельно.

#### Задания:

1. Записав последовательно уравнения динамики движения материальной точки для каждого участка жёлоба, определите скорости груза в точках  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $F$ . Из уравнения динамики для груза после его вылета из жёлоба (точка  $F$ ) запишите кинематический закон движения груза  $x = x(t)$  и  $y = y(t)$  в явном виде.

2. Определите величину силы давления груза  $P$  на стенки криволинейного участка  $CD$  в его средней точке.

3. Найдите касательное (тангенциальное) ускорение груза  $a_{т1}$  в средней точке криволинейного участка жёлоба  $CD$ .

4. Определите тангенциальное  $a_{т2}$  и нормальное  $a_{н2}$  ускорения груза вблизи поверхности земли и радиус кривизны траектории  $R_2$  движения груза в точке падения его на землю.

5. Найдите расстояние по горизонтали  $S$  между точкой вылета груза из жёлоба  $F$  и точкой падения его на землю.

Решение задачи обязательно сопровождайте краткими пояснениями и рисунками. Вычисления проводите в системе СИ и обязательно проверяйте единицы измерения ответов. Если выбранный Вами коэффициент упругости  $k$  не позволяет грузу в жёлобе достичь верхней точки, его значение следует увеличить в 10 раз.

#### Выбор варианта условия:

Вариант рисунка выбирается согласно Вашему порядковому номеру в списке группы.

Условие выбирается из нижеприведенной таблицы 1. Для этого необходимо сложить две последние цифры номера своей группы и свой порядковый номер в списке группы. По предпоследней цифре полученного числа находится соответствующая строка таблицы, а по последней – соответствующий столбец. Пересечением выбранных столбца и строки определяют номер Вашего условия.

**Пример выбора:** группа П-263, порядковый номер в списке группы –11.  $63+11=74$ . На пересечении строки 7 и столбца 4 получили цифру 0. Из таблицы 2 выписываем условие из строки под №0, т.е.

№	$m$ , кг	$l_0$ , м	$l_1$ , м	$l_2$ , м	$R$ , м	$\mu$	$H$ , м	$k$ , Н/м
0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,15	1,1	6,8

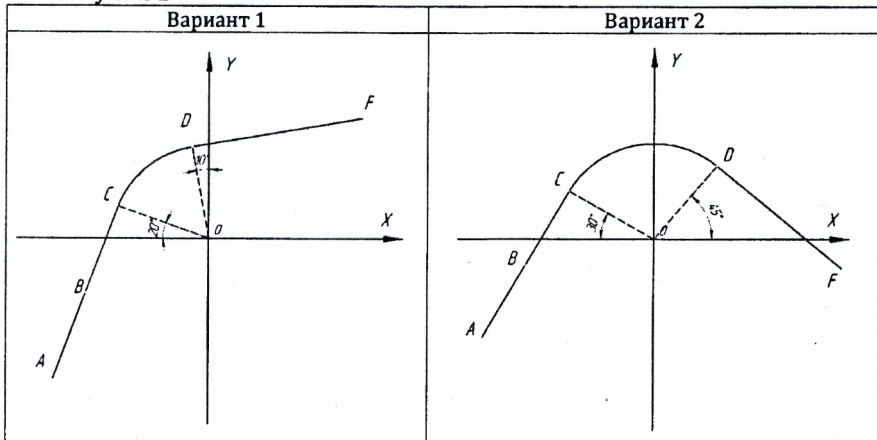
Таблица 1.

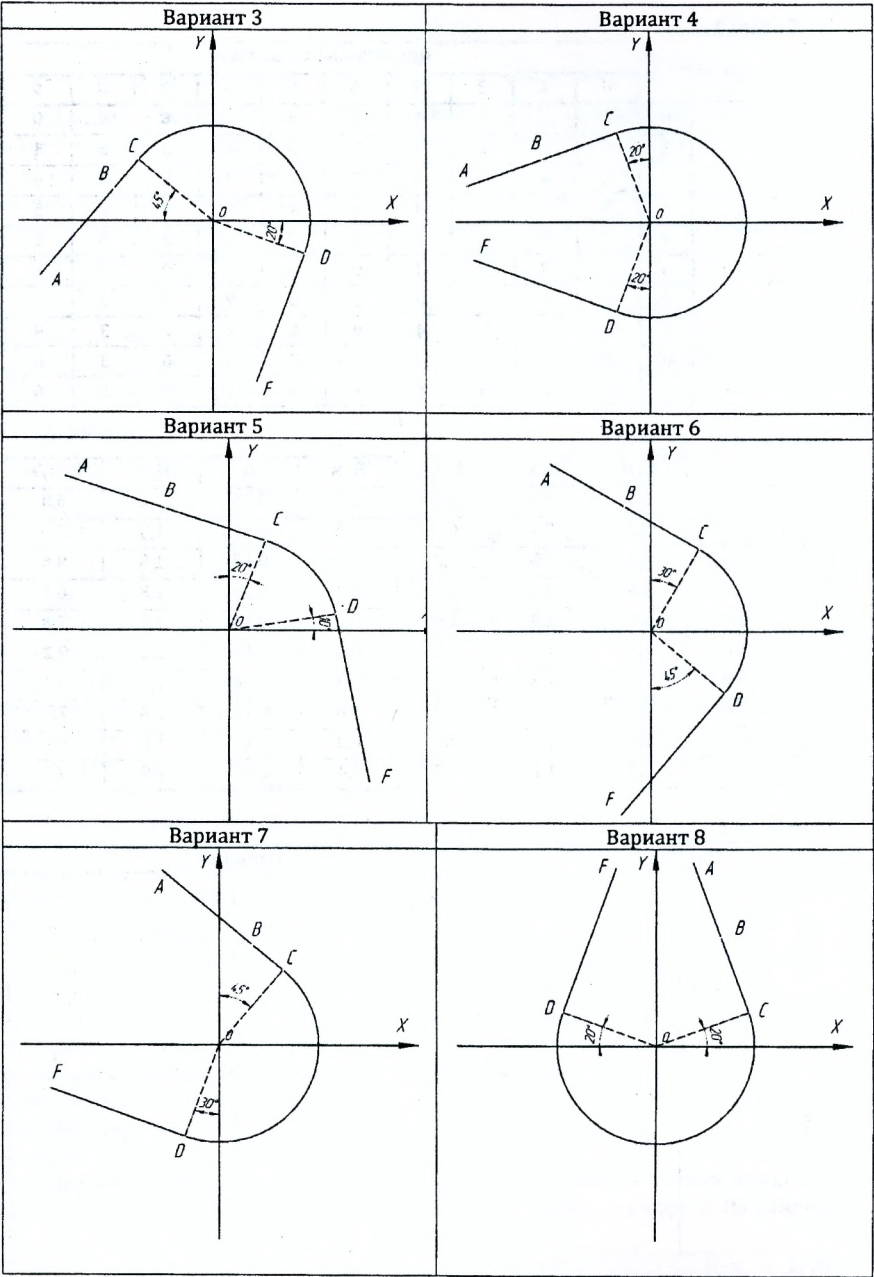
		Последняя цифра кода									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Предпоследняя цифра кода	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	1	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	2	8	0	1	3	5	7	9	2	4	6
	3	3	1	0	8	6	4	2	9	7	5
	4	2	5	8	1	4	7	0	3	6	9
	5	4	8	5	2	9	6	3	0	7	1
	6	6	0	4	8	1	5	9	3	7	2
	7	5	1	8	4	0	6	2	7	3	9
	8	7	4	1	8	5	2	9	6	3	0
	9	9	2	5	8	1	4	7	0	3	6

Таблица 2.

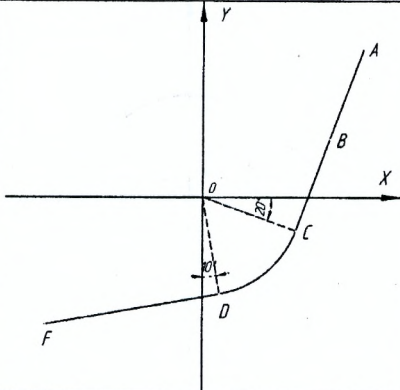
№	m, кг	l <sub>0</sub> , м	l <sub>1</sub> , м	l <sub>2</sub> , м	R, м	μ	H, м	k, Н/м
0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,15	1,1	6,8
1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,8	0,11	1,3	7,2
2	0,5	0,6	0,8	0,2	0,6	0,13	1,5	8,6
3	0,7	0,8	1,6	0,3	0,9	0,16	1,8	6,3
4	0,9	1,0	1,9	1,0	0,7	0,14	1,4	7,8
5	1,0	1,4	1,8	0,9	0,1	0,18	1,9	8,2
6	0,8	1,2	1,3	0,7	0,5	0,20	2,0	8,4
7	0,6	0,5	1,7	0,8	1,0	0,12	1,6	7,9
8	0,4	0,4	1,5	0,6	0,3	0,10	1,2	9,7
9	0,2	0,2	1,2	0,5	0,4	0,05	1,0	9,5

Рисунки 1

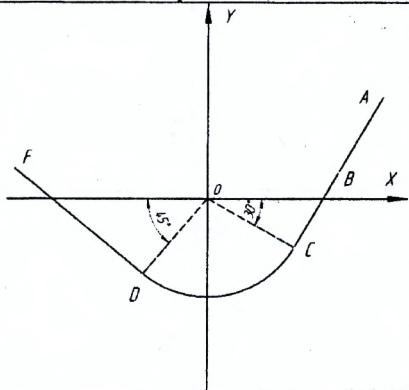




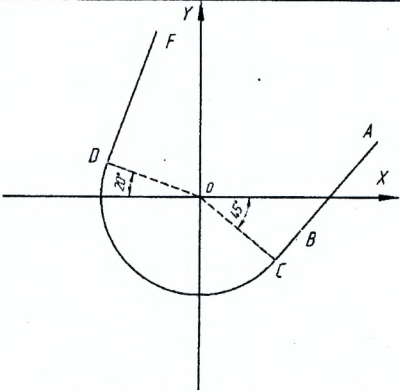
Вариант 9



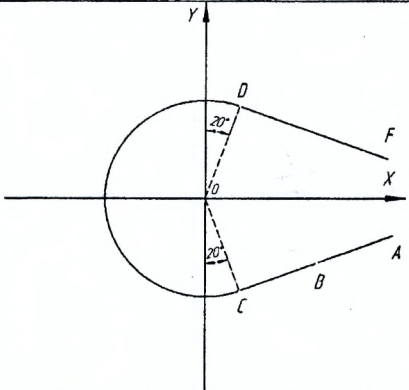
Вариант 10



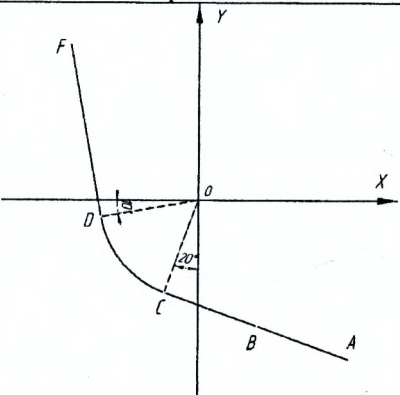
Вариант 11



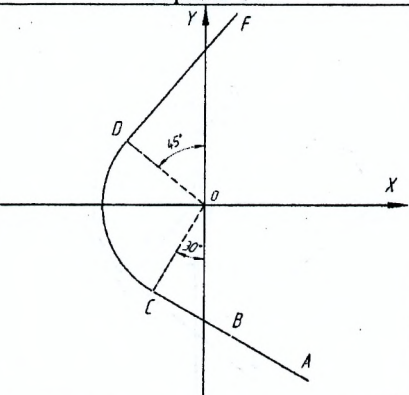
Вариант 12



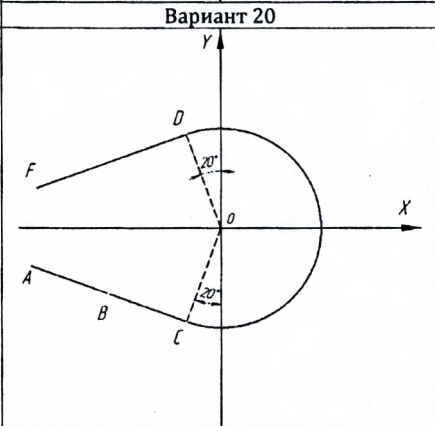
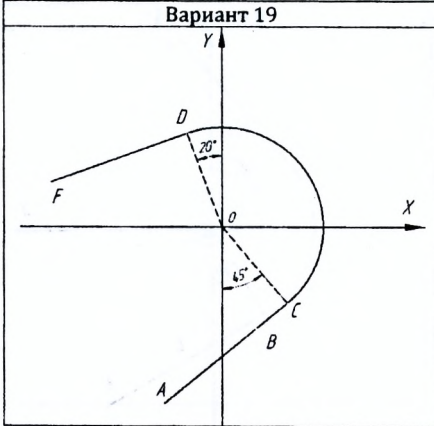
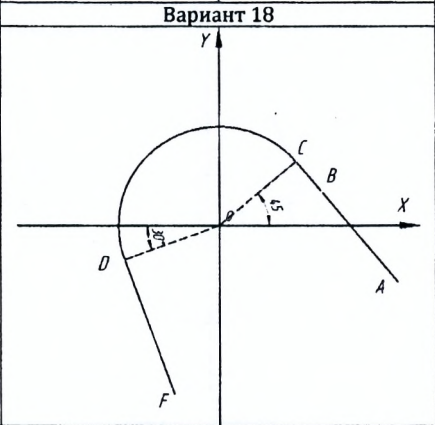
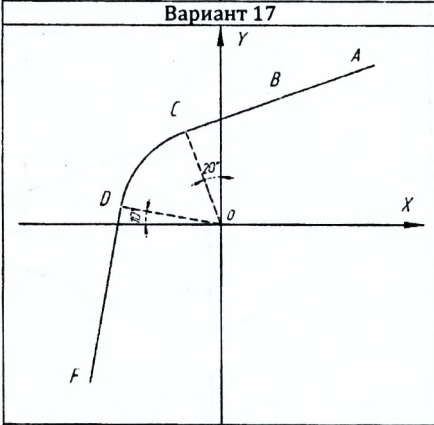
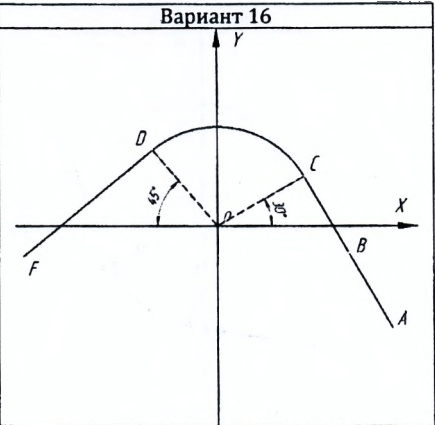
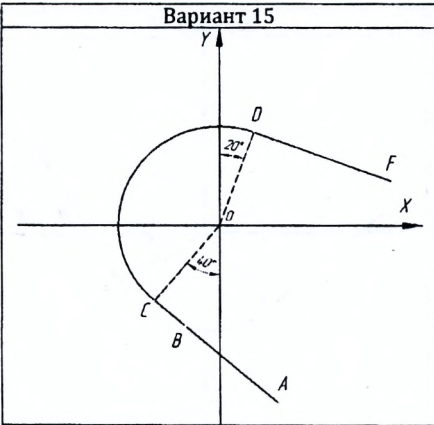
Вариант 13



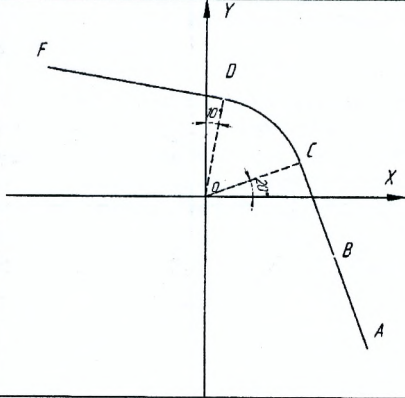
Вариант 14



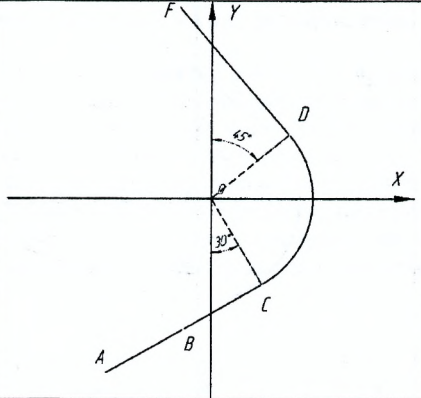




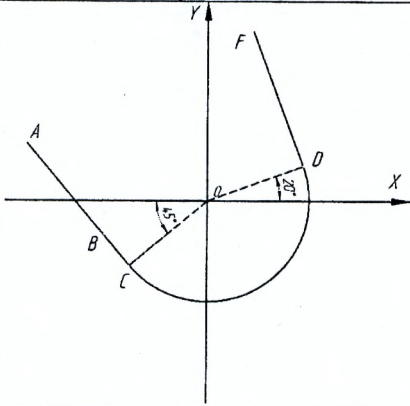
Вариант 21



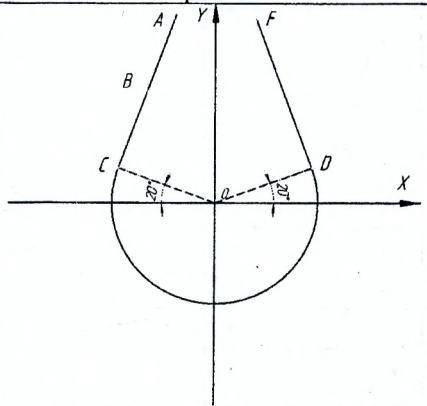
Вариант 22



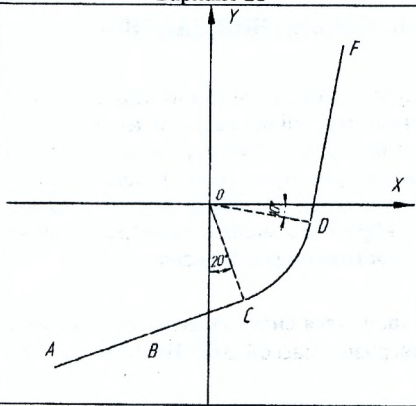
Вариант 23



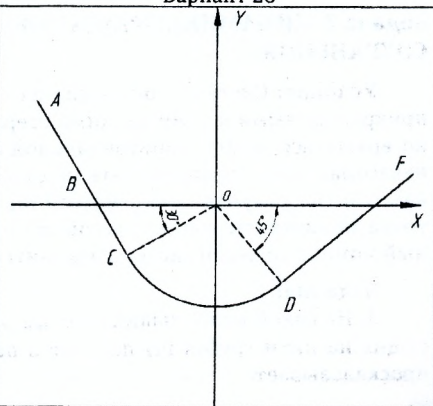
Вариант 24

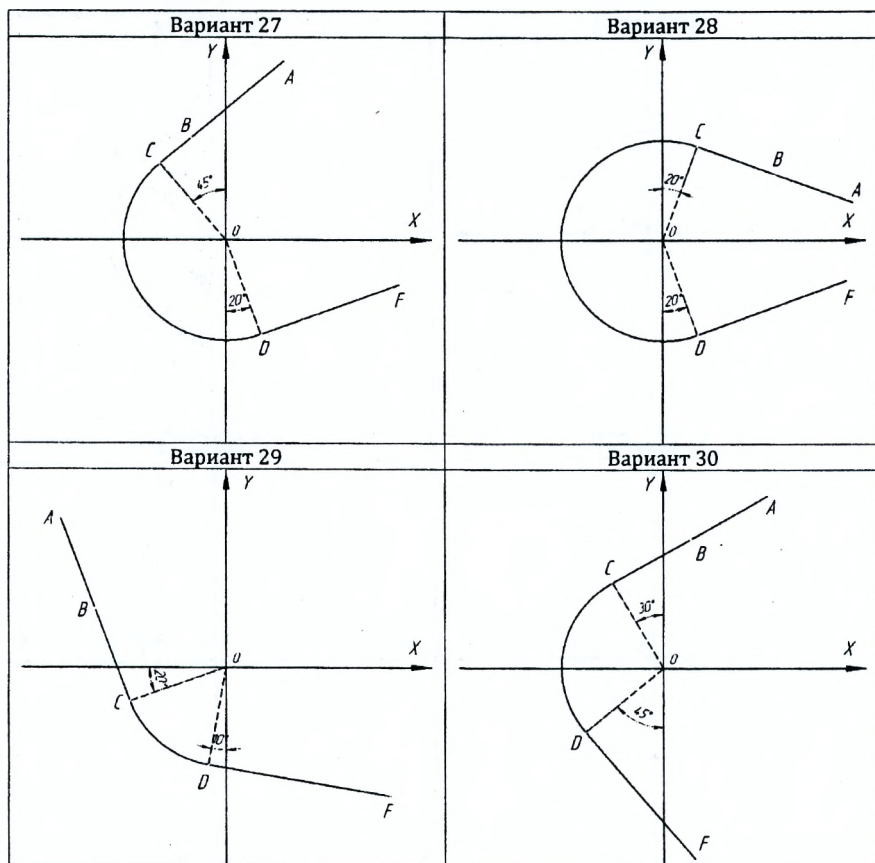


Вариант 25



Вариант 26





## Задача 2. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

**Условие:** Система, состоящая из тонкого обруча массой  $m$ , и радиусом  $R$  с прикреплёнными к нему тонкими стержнями массой  $m_1$  каждый, может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси  $O$ . Через обруч переброшена тонкая, невесомая, нерастяжимая нить, к концам которой привязаны грузы массой  $m_2$  каждый (на рисунке грузы массой  $m_2$  не указаны). На ободу обруча в нижней точке прикреплен шарик массой  $m_3$  пренебрежимо малого размера. В начальный момент времени система находится в состоянии равновесия.

### Задания:

1. На какой наибольший угол  $\varphi_{max}$  повернётся система, если на один из висящих на нити грузов  $m_2$  положить перегрузок массой  $\Delta m$ ? Нить по блоку не проскальзывает.



2. Найдите угловую скорость и угловое ускорение системы в тот момент, когда угол отклонения составит  $k$ -ю часть от  $\varphi_{max}$  ( $\varphi_k = k \cdot \varphi_{max}$ ). Найдите также в этот момент силы натяжения нитей, ускорение грузов и силу реакции, действующую на ось  $O$ .

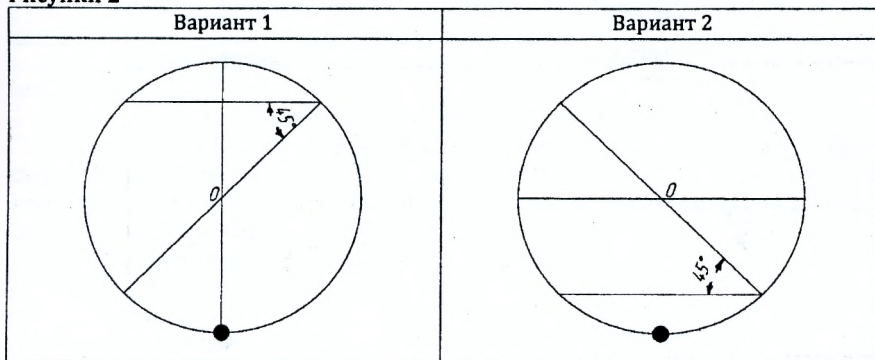
3. Какова будет угловая скорость системы в тот момент, когда она, вращаясь от положения, соответствующего  $\varphi_{max}$ , будет проходить положение равновесия, соответствующее первоначальному положению центра масс, если к этому моменту шарик  $m_3$  под действием внутренних сил переместится в центр  $O$ ?

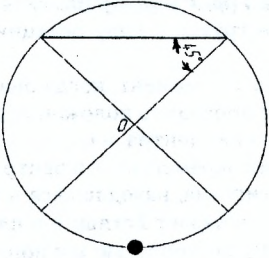
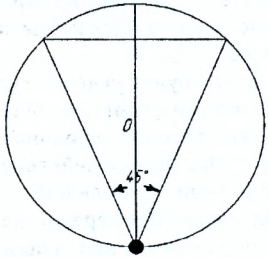
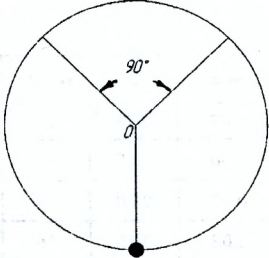
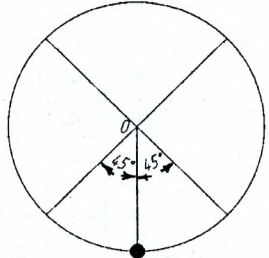
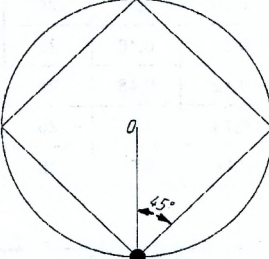
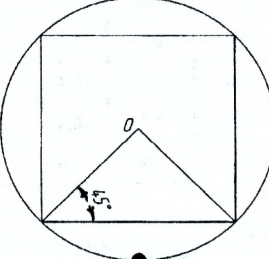
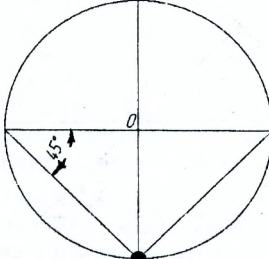
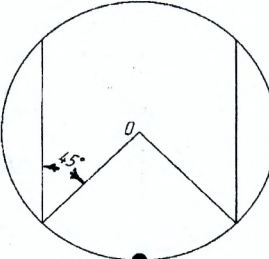
4. На какой наибольший угол отклонится система, находящаяся в положении равновесия (без перегрузки  $\Delta m$ ), если в неё попадает летящий в плоскости обруча под углом  $\alpha$  к вертикали шарик массой  $m_3$  со скоростью  $v$  и прилипает к шарiku на обруче той же массы? Какое количество теплоты  $Q$  выделится после удара?

Таблица 2.

№	$m$ , кг	$R$ , м	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$m_3$ , кг	$\Delta m$ , кг	$k$	$v$ , м/с	$\alpha$ , °
0	0,1	0,3	0,05	0,55	0,5	0,05	0,10	10	10
1	0,2	0,4	0,10	0,60	0,7	0,06	0,15	12	15
2	0,3	0,5	0,15	0,65	0,9	0,07	0,20	14	20
3	0,4	0,6	0,20	0,70	1,1	0,08	0,25	16	25
4	0,5	0,7	0,25	0,75	1,3	0,09	0,30	18	30
5	0,6	0,8	0,30	0,80	0,6	0,10	0,35	20	35
6	0,7	0,9	0,35	0,85	0,8	0,11	0,40	22	40
7	0,8	1,0	0,40	0,90	1,0	0,12	0,45	24	45
8	0,9	1,1	0,45	0,95	1,2	0,13	0,50	26	50
9	1,0	1,2	0,50	1,00	1,4	0,14	0,55	28	55

Рисунки 2



<p style="text-align: center;"><b>Вариант 3</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Вариант 4</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Вариант 5</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Вариант 6</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Вариант 7</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Вариант 8</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Вариант 9</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Вариант 10</b></p> 

### Задача 3. КОЛЕБАНИЯ

**Условие:** Тяжелая платформа массы  $m_0$  может колебаться на пружинах с коэффициентами упругости  $k_1$  и  $k_2$  в горизонтальном и вертикальном направлениях. Вначале пружины сжаты на  $x_0 = m_0 \cdot g / k_1$ ,  $y_0 = m_0 \cdot g / k_2$  и удерживаются в этом положении стопорами. На платформе подвешена на горизонтальной оси (точка  $O$ ) система, состоящая из конструкции стержней длиной  $L$ , массой  $m$  (или обруча диаметром  $L$ , массой  $m$ ) и шарика массы  $m_1$ , который можно считать материальной точкой (см. рисунки 3). Система удерживается в отклонённом от положения равновесия состоянии с помощью нити, перекинутой через блок. К концу нити привязан груз массы  $m_2$ . При  $t = 0$  нить пережигают. В процессе движения на шарик массы  $m_1$  действует сила сопротивления, равная по модулю  $F = \alpha V$ , где  $V$  – скорость шарика,  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

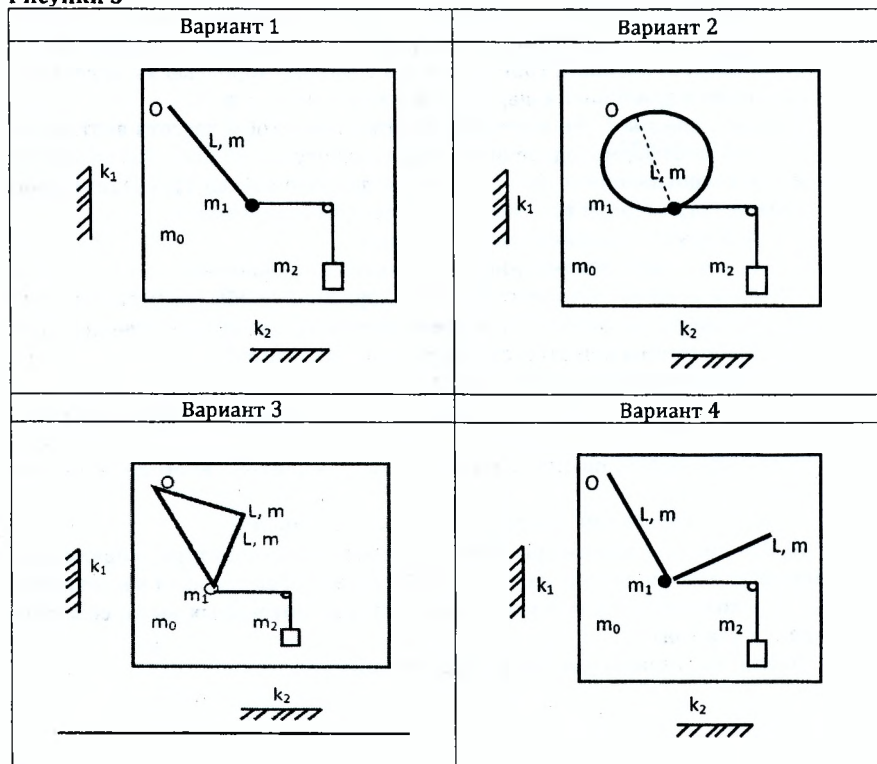
#### Задания:

1. Напишите дифференциальное уравнение колебаний системы и его решение.
2. Выясните условия применимости приближения малых колебаний с точностью до  $0,01$ .
3. Запишите уравнение колебаний шарика при другом способе их возбуждения, когда при  $t = 0$  с системой, находящейся в положении равновесия, не упруго сталкивается летящий горизонтально с малой скоростью  $V_0$  маленький шарик массой  $m_1$  и прилипает к шарiku той же массы.
4. Какова должна быть жёсткость  $k_2$  пружины, чтобы частота вертикальных колебаний платформы вдвое превышала частоту колебаний системы в отсутствие сил сопротивления? Изобразите для данного случая траекторию движения шарика, когда стопор вертикальной пружины отпускают:
  - а) в крайнем левом положении шарика;
  - б) в момент прохождения им положения равновесия.
5. Какова должна быть жёсткость  $k_1$  пружины, чтобы частота горизонтальных колебаний платформы была равна  $\omega_0 + 0,2 \cdot \omega_0$ , где  $\omega_0$  – собственная частота колебаний системы при отсутствии сил сопротивления?
6. Изобразите график колебаний шарика.
7. Найдите логарифмический декремент затухания. Платформа закреплена.
8. Найдите время, по истечении которого амплитуда колебаний уменьшится в  $n$  раз.
9. Сколько колебаний совершит система за это время?
10. Рассчитайте параметры  $R$ ,  $C$ ,  $L$  колебательного контура, моделирующего механическую систему с частотой в  $10000$  раз превышающей частоту собственных колебаний контура. Укажите аналоги рассмотренных выше способов возбуждения для контура.
11. Какова резонансная частота Вашего контура?

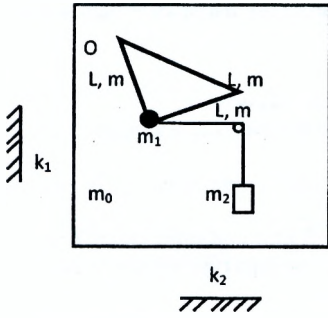
Таблица 3

№	$m_0$ , кг	$k_1$ , кН/м	$k_2$ , кН/м	$L$ , см	$m$ , кг	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$\alpha$ , Н·с/м	$n$	$V_0$ , м/с
0	80	8	16	60	0,6	0,05	0,05	0,02	5	0,01
1	85	8,5	17	55	0,8	0,15	0,06	0,01	6	0,015
2	90	9	18	30	0,7	0,2	0,12	0,03	4	0,025
3	95	9,5	19	45	0,4	0,1	0,07	0,02	6	0,04
4	100	10	20	50	0,5	0,25	0,15	0,01	10	0,01
5	105	10,5	21	40	0,6	0,45	0,06	0,02	9	0,015
6	110	11	22	35	0,8	0,5	0,09	0,01	8	0,02
7	115	11,5	23	65	0,9	0,4	0,07	0,03	7	0,015
8	120	12	24	80	0,3	0,35	0,08	0,01	15	0,03
9	125	12,5	25	70	1	0,3	0,1	0,02	20	0,02

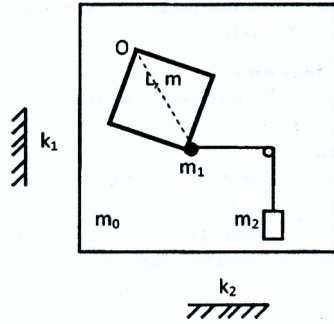
Рисунки 3



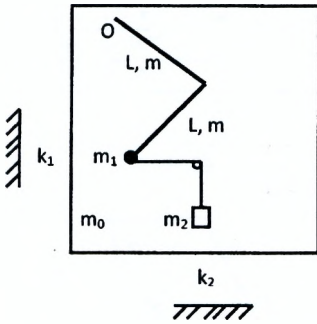
Вариант 5



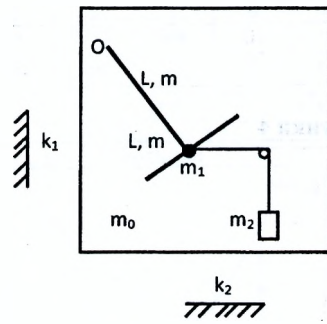
Вариант 6



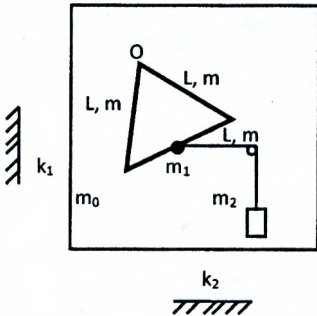
Вариант 7



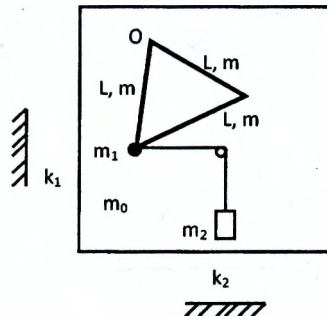
Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10





### Задача 4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

**Условие:** На рисунке задан цикл, происходящий с идеальным газом массой  $m$  (химическая природа газа и масса заданы в таблице), изображённый в осях  $(p, V)$  или  $(p, T)$ , или  $(V, T)$ .

**Задания:**

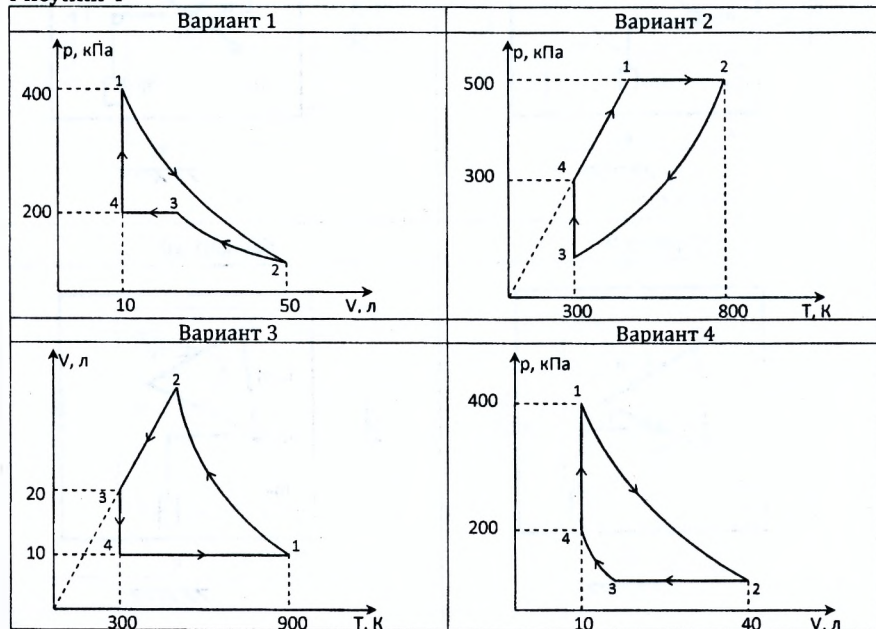
1. Изобразите вид цикла в двух других парах осей.
2. Определите все термодинамические параметры в характерных точках цикла.
3. Напишите первое начало термодинамики для всех процессов цикла и во всех процессах цикла вычислите  $dU, A$  и  $Q$ .
4. Найдите КПД цикла и сравните с КПД цикла Карно, считая, что температура теплоотдатчика равна максимальной температуре цикла, а температура охладителя – минимальной.

*Все циклы состоят из изотермы, изохоры, изобары, адиабаты и  $pV$ -линейного процесса, который студент добавляет самостоятельно, по своему выбору, в любом месте цикла.*

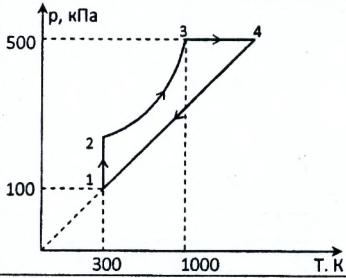
**Таблица 4**

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
газ	H <sub>2</sub>	He	CO <sub>2</sub>	Kr	O <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ne	N <sub>2</sub>
m, г	8	12	88	188	64	51	56	36	80	66

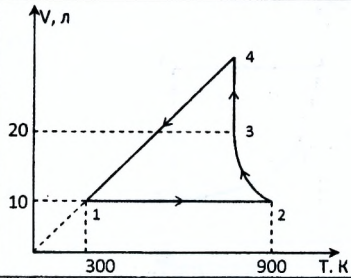
**Рисунки 4**



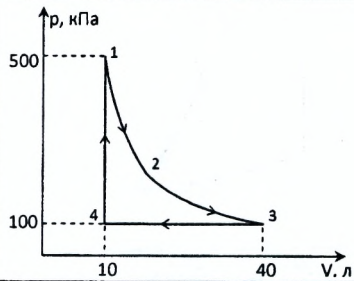
Вариант 5



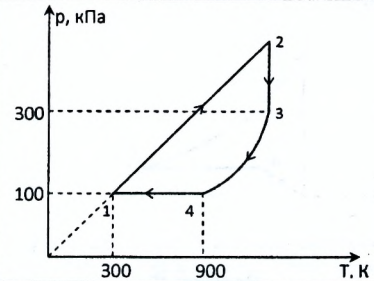
Вариант 6



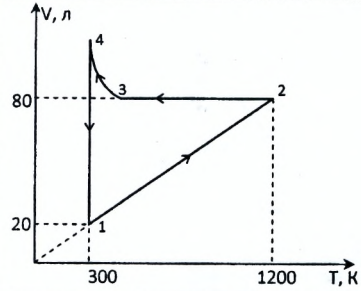
Вариант 7



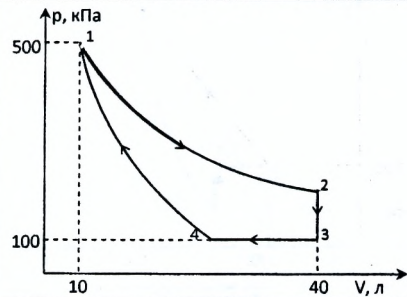
Вариант 8



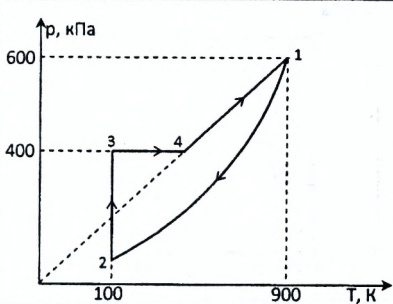
Вариант 9



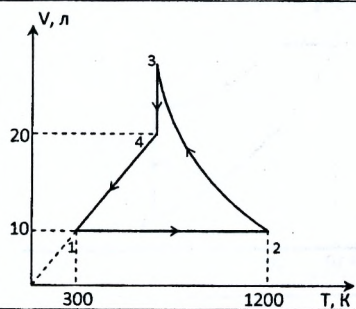
Вариант 10

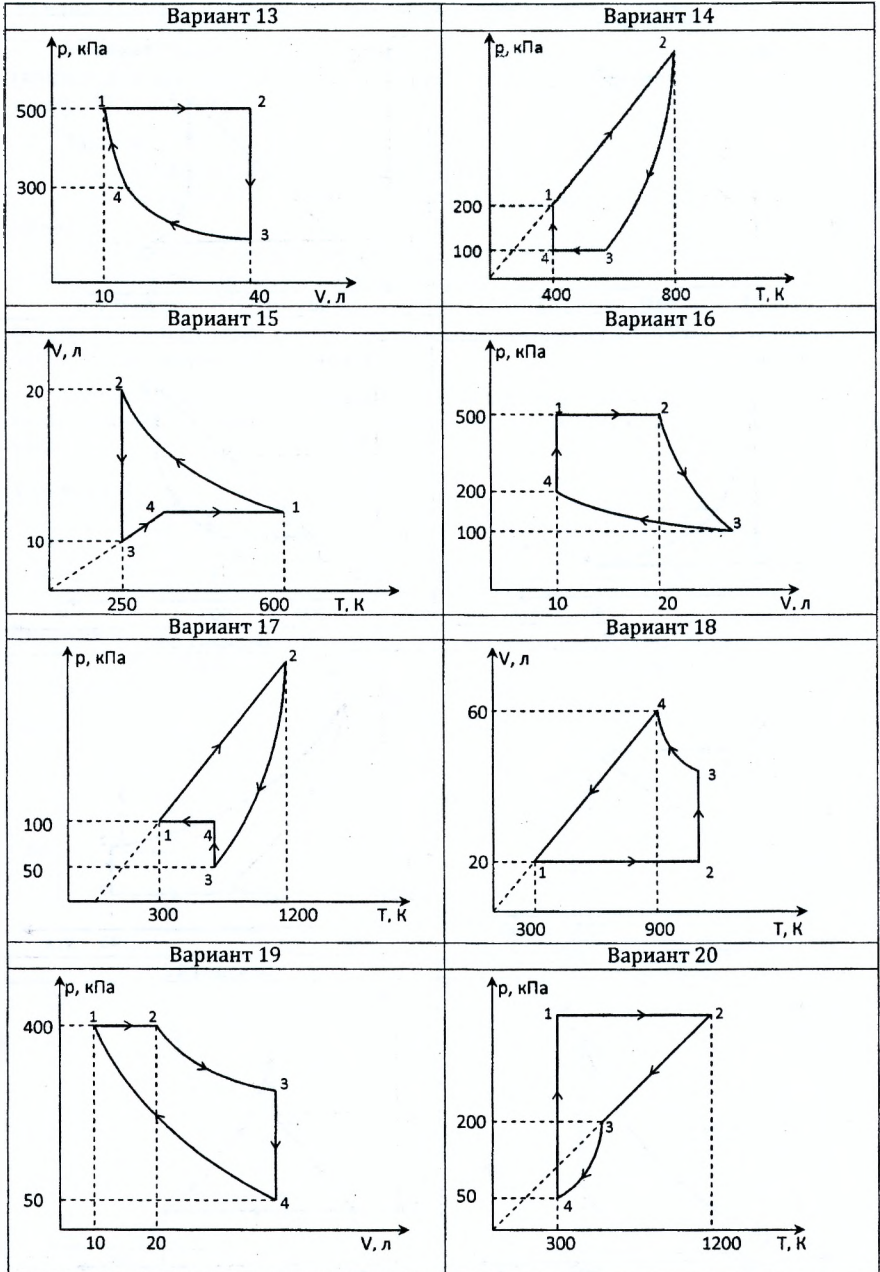


Вариант 11



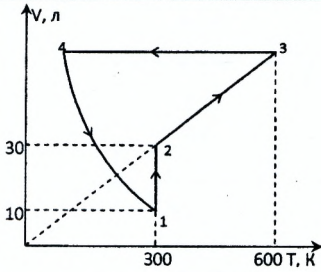
Вариант 12



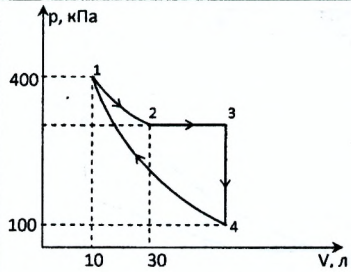




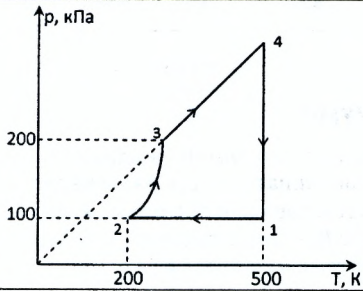
Вариант 21



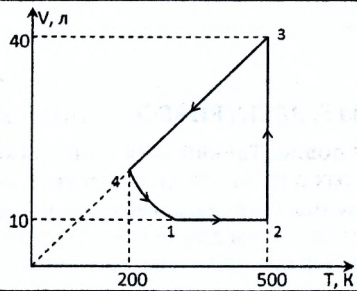
Вариант 22



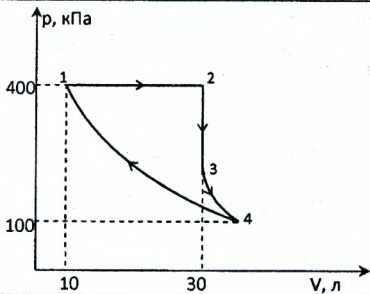
Вариант 23



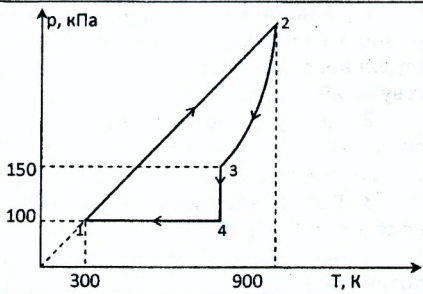
Вариант 24



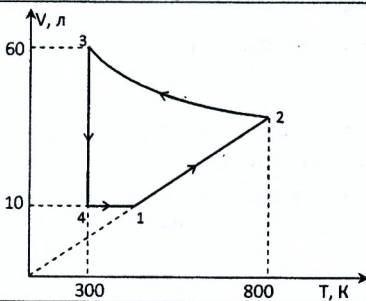
Вариант 25



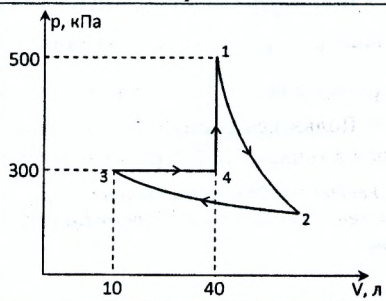
Вариант 26

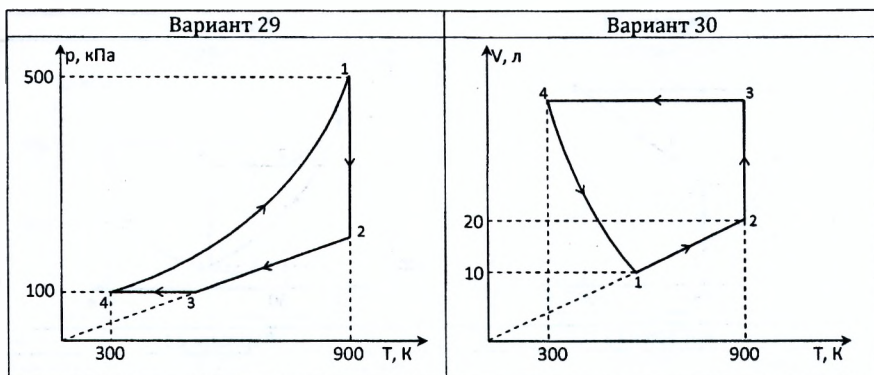


Вариант 27



Вариант 28





### Задача 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

**Условие:** Тонкий диск или плоское кольцо расположены в одной из координатных плоскостей симметрично началу координат и несут равномерно распределённый заряд с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ . В системе координат  $XYZ$  расположены два тонких стержня  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$  и несут равномерно распределённые заряды  $q_1$  и  $q_2$  соответственно. Вся система находится в вакууме.

#### Задания:

1. Пользуясь принципом суперпозиции, найдите значения векторов напряжённости электрических полей, создаваемых всеми распределениями зарядов в отдельности в точке на оси симметрии диска или кольца как функции соответствующей координаты.

2. Пользуясь принципом суперпозиции, рассчитайте потенциал электрического поля системы в точке на оси симметрии диска или кольца как функцию соответствующей координаты.

3. Рассчитайте модуль напряжённости результирующего электрического поля в точках  $C$  и  $D$ .

4. Используя формулы для расчётов, полученные в п. 2, найдите разность потенциалов ( $\varphi_C - \varphi_D$ ) для электрического поля системы.

5. Используя связь напряжённости с потенциалом для результирующего поля в виде  $\varphi_C - \varphi_D = \int_C^D \vec{E}(r) d\vec{r}$ , найдите разность потенциалов между точками  $C$  и

$D$  и сравните результаты со значением п. 4.

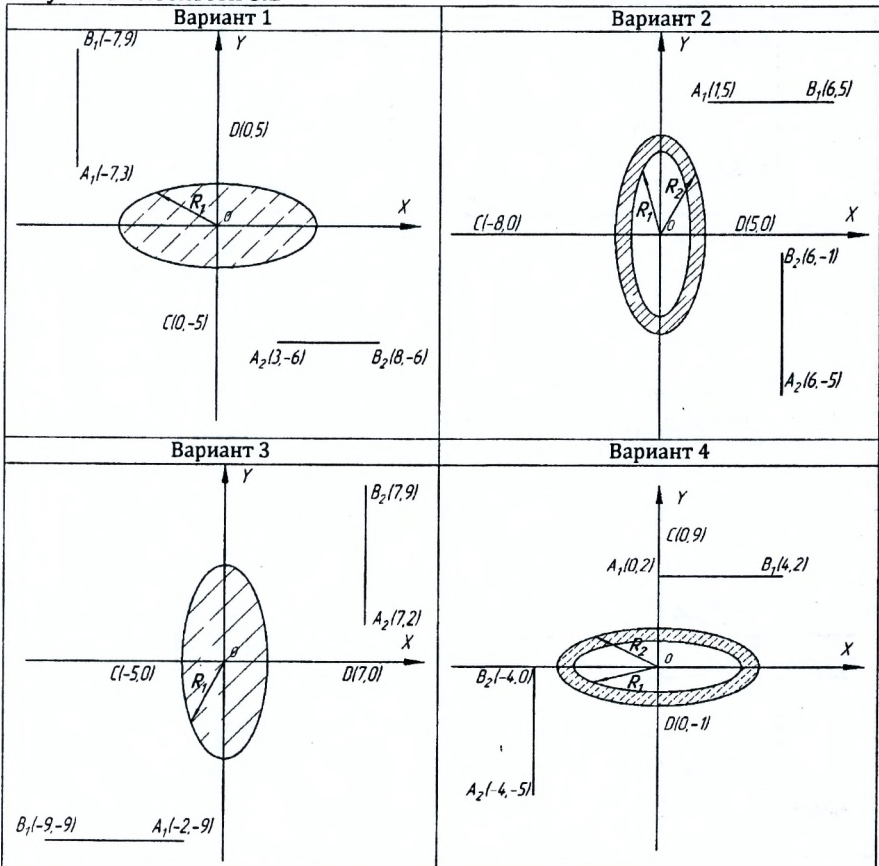
6. Пользуясь формулой  $\vec{E} = -\overline{grad}\varphi$ , найдите напряжённость электрического поля в точках  $C$  и  $D$  и сравните результаты со значением п. 3.

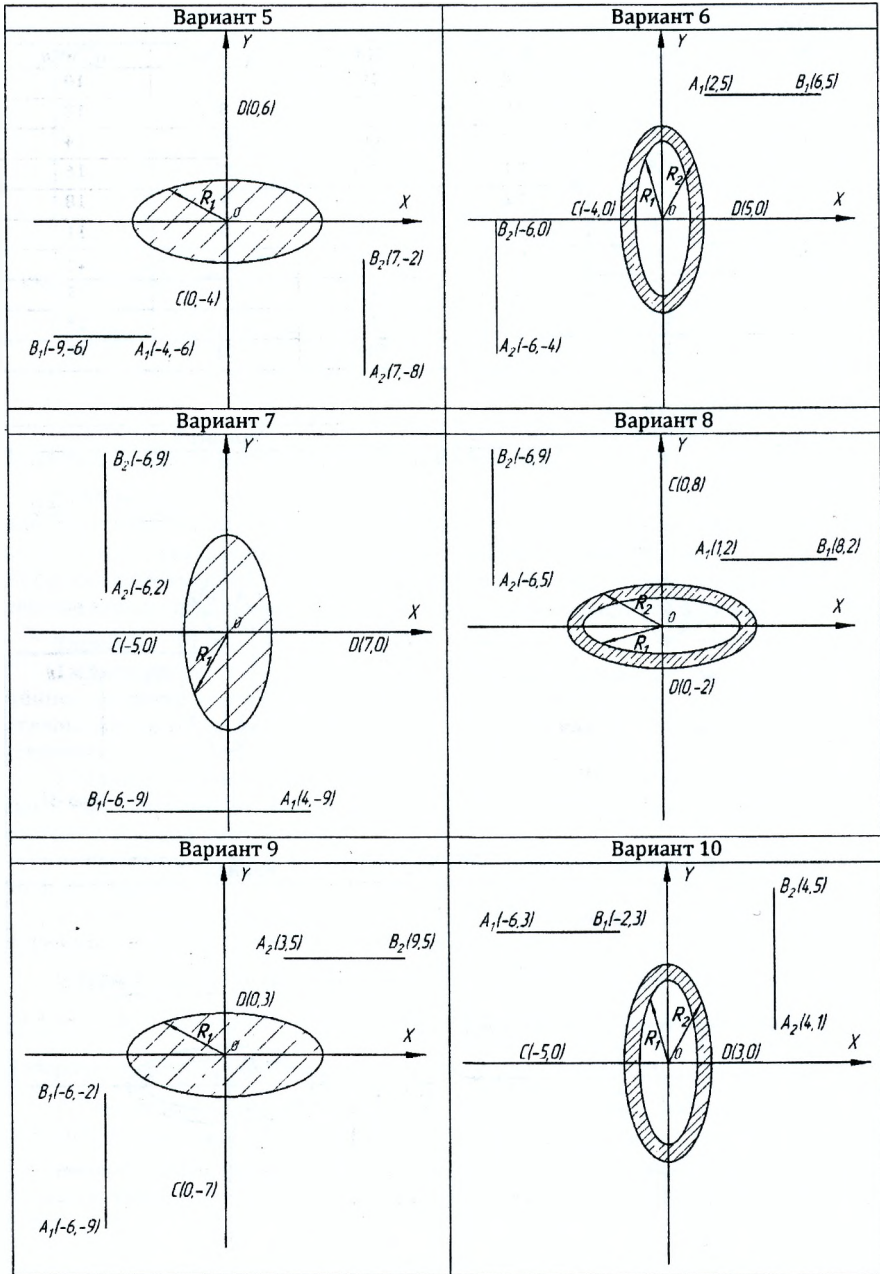
*Решение задачи обязательно сопровождайте краткими пояснениями и рисунками. Вычисления проводите в системе СИ и обязательно проверяйте единицы измерения ответов.*

Таблица 5

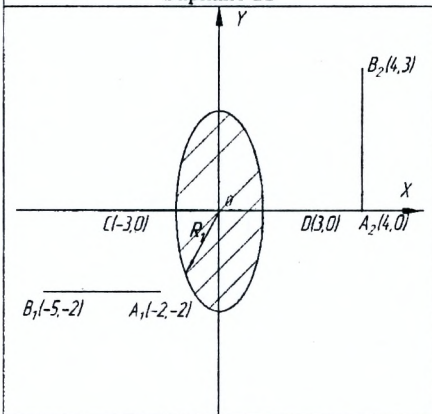
№	$R_1, м$	$R_2, м$	$\sigma, нКл/м^2$	$q_1, нКл$	$q_2, нКл$
0	0,5	0,8	10	5	10
1	0,6	0,9	130	8	12
2	0,7	1,0	60	13	14
3	0,8	1,1	190	10	16
4	0,9	1,2	20	9	18
5	1,0	1,3	150	8	11
6	1,1	1,4	25	7	13
7	1,2	1,5	180	11	15
8	1,3	1,6	90	6	17
9	1,4	1,7	140	12	19

Рисунки в плоскости 5.1

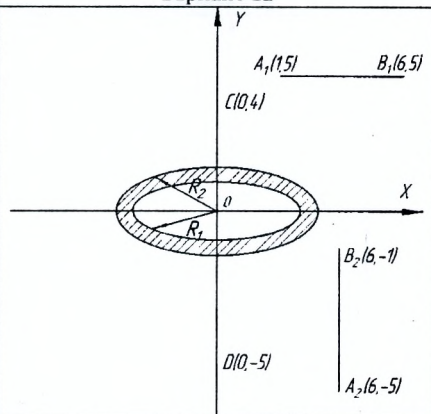




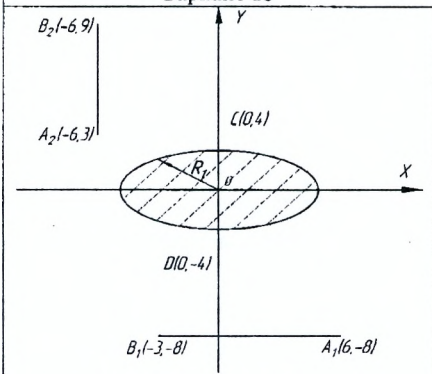
Вариант 11



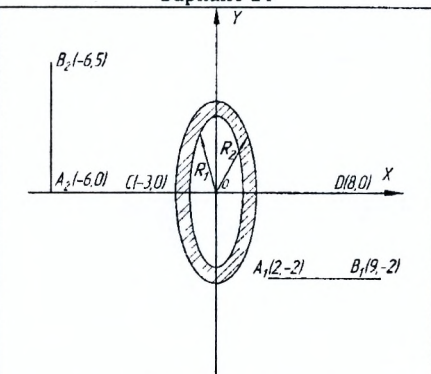
Вариант 12



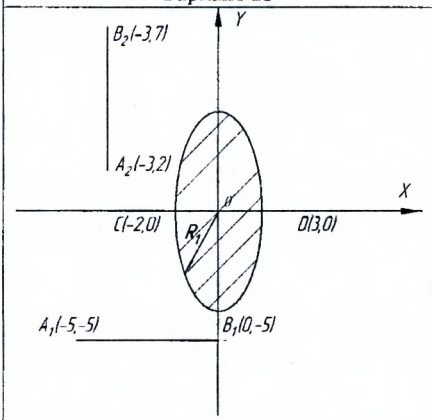
Вариант 13



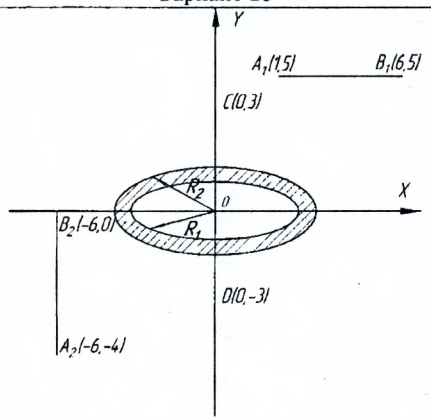
Вариант 14



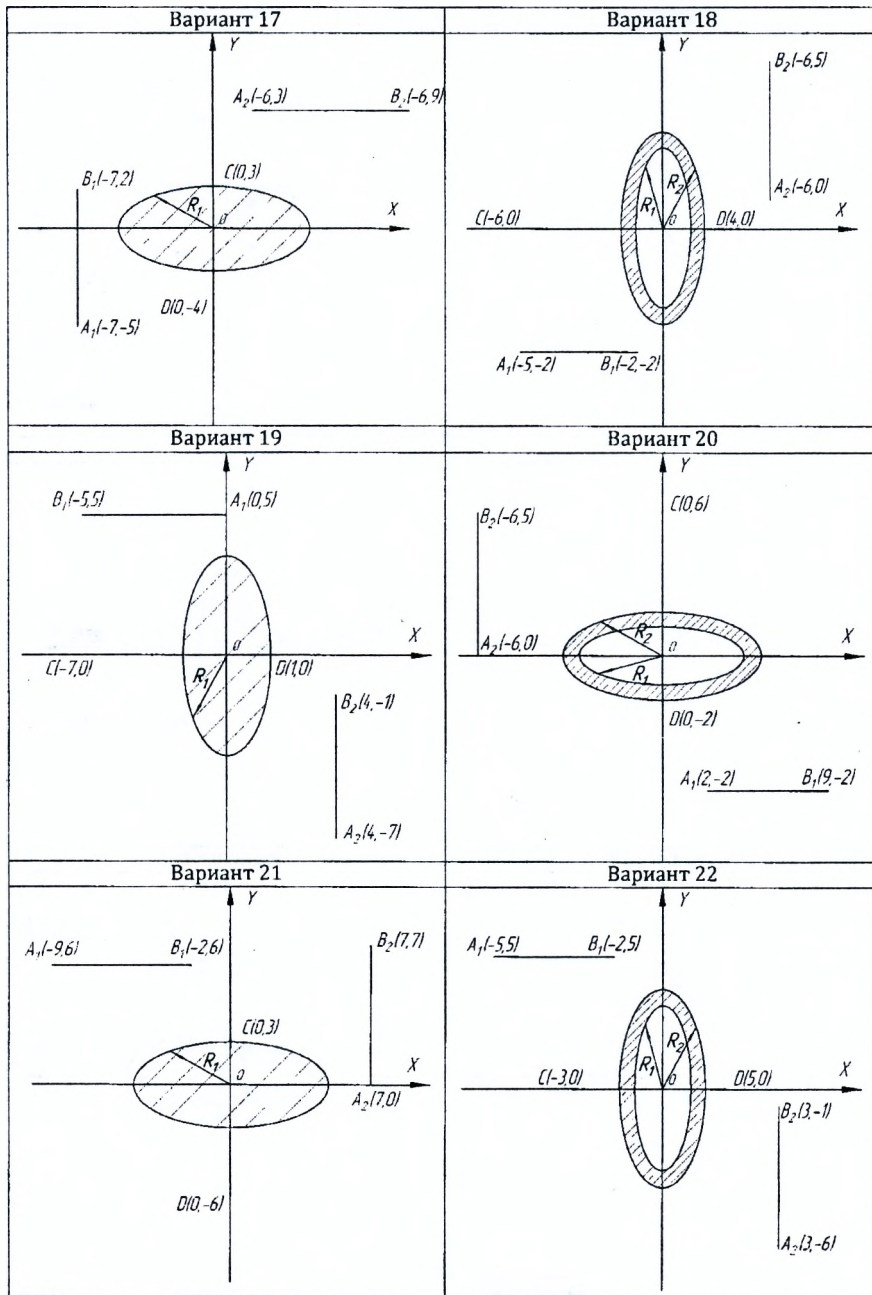
Вариант 15



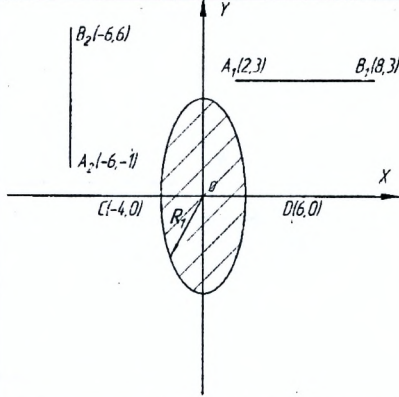
Вариант 16



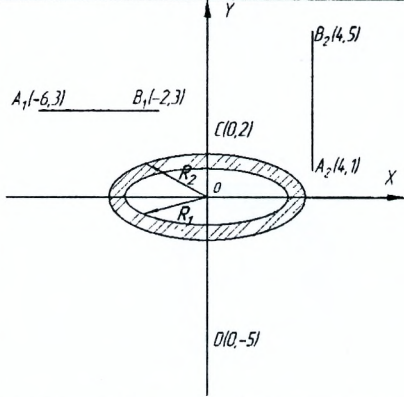




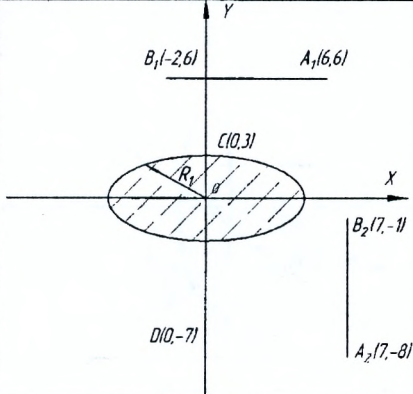
Вариант 23



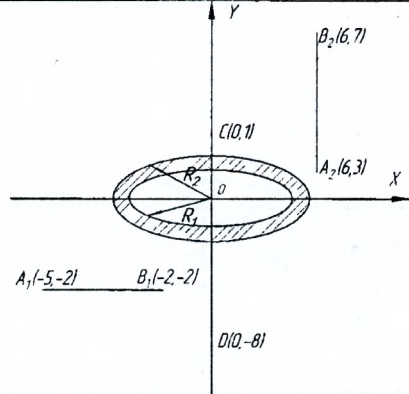
Вариант 24



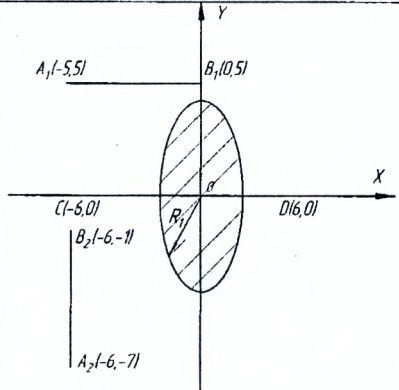
Вариант 25



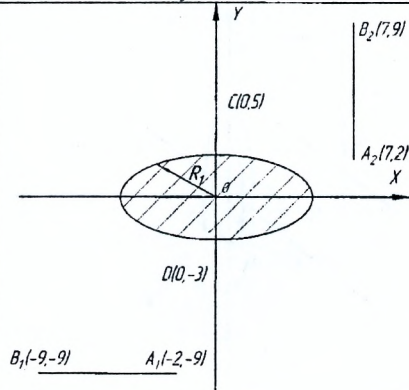
Вариант 26

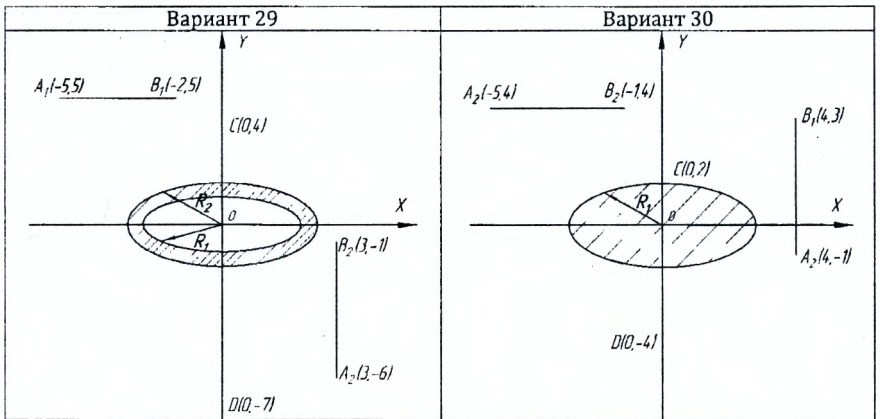


Вариант 27

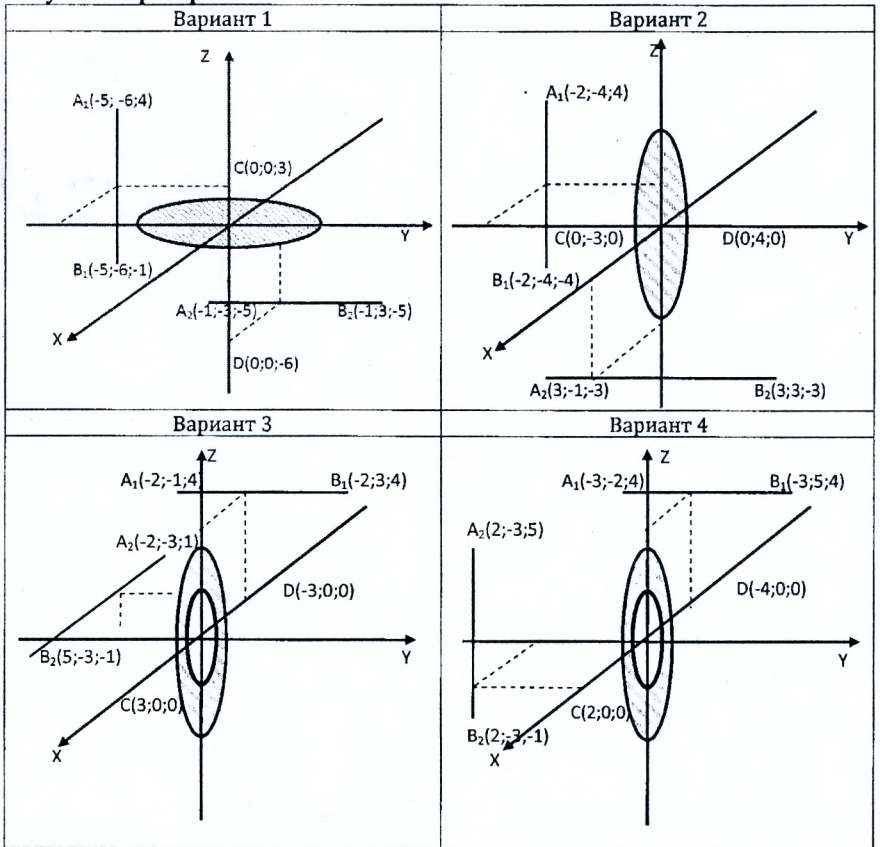


Вариант 28



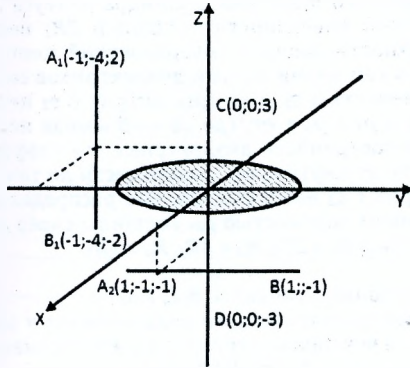


**Рисунки в пространстве 5.2**

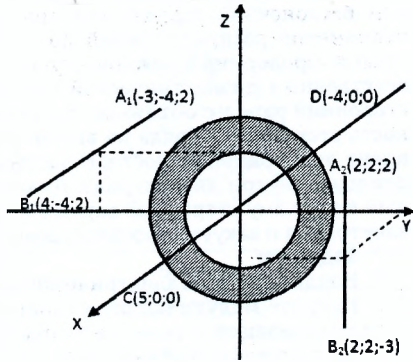




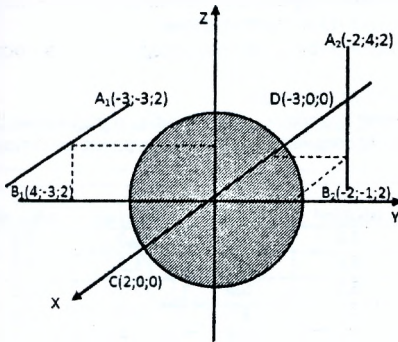
Вариант 5



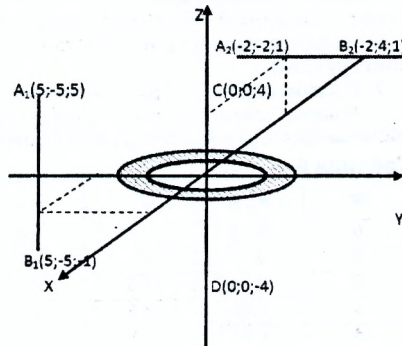
Вариант 6



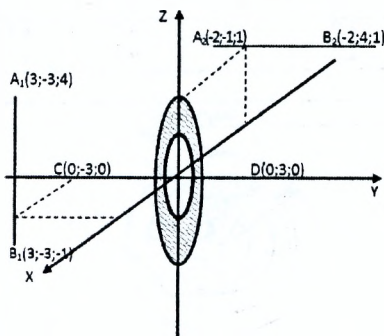
Вариант 7



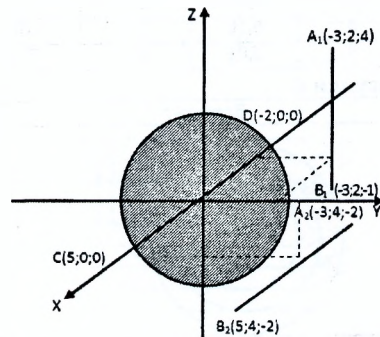
Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10



## Задача 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ (ТЕОРЕМА ГАУССА-ОСТРОГРАДСКОГО)

**Условие:** Проводник в виде заряженного шара или цилиндра радиуса  $R_1$  или бесконечной заряженной проводящей поверхности толщиной  $2R_1$  несёт равномерно распределённый по поверхности заряд с поверхностной плотностью  $\sigma$ . Проводник в каждом случае окружён двумя слоями диэлектриков соответственно с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . Диэлектрик с  $\epsilon_1$  несёт сторонний заряд с объёмной плотностью  $\rho_1 = \rho_0 + \alpha r$ , где  $\rho_0$  – объёмная плотность стороннего заряда на внутренней поверхности диэлектрика,  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности,  $r$  – расстояние от внутренней поверхности до точки, лежащей внутри диэлектрика. Диэлектрик с  $\epsilon_2$  несёт равномерно распределённый по объёму сторонний заряд с объёмной плотностью  $\rho_2$ . Толщины слоёв диэлектриков и вакуума соответственно равны  $R_2 = 2R_1$ ,  $R_3 = 3R_1$ ,  $R_4 = 4R_1$ .

**Задания:**

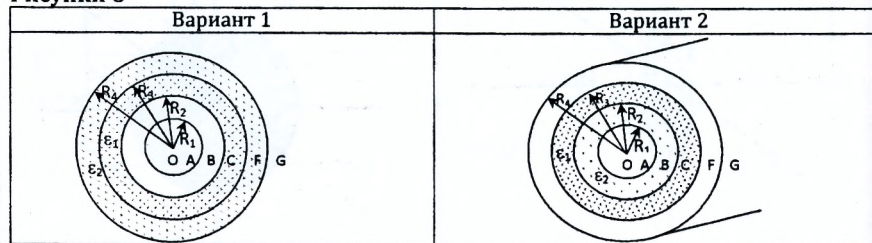
1. Найдите модуль электрического смещения в точках  $A, B, C, F, G$ .
2. Найдите модули напряжённости электростатического поля системы и вектора поляризации, и укажите направление вектора поляризации в этих точках.
3. Постройте примерные графики зависимостей  $E(r), D(r), P(r)$ .
4. Найдите поверхностную плотность связанных зарядов  $\sigma'$  на всех границах раздела.
5. Найдите объёмную плотность связанных зарядов в обоих диэлектриках, а также суммарный связанный заряд в каждом из диэлектриков.
6. Найдите разность потенциалов между проводниками, входящими в состав конструкции.
7. Рассчитайте электрическую ёмкость конструкции.

*Решение задачи обязательно сопроводите краткими пояснениями и рисунками. Вычисления проводите в системе СИ и обязательно приводите единицы измерения ответов.*

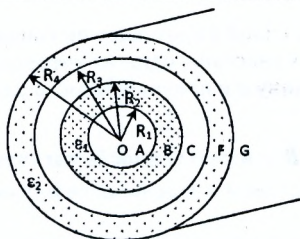
**Таблица 6**

№	$R_1, \text{ м}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\rho_0, \text{ нКл/м}^3$	$\alpha, \text{ нКл/м}^4$	$\rho_2, \text{ нКл/м}^3$	$\sigma, \text{ нКл/м}^2$
0	0,02	1,1	2,0	1,0	1,0	6,0	2,0
1	0,03	1,2	4,0	9,0	3,0	1,3	4,0
2	0,04	1,3	8,0	5,5	5,0	1,0	8,0
3	0,05	1,5	6,0	6,0	7,0	9,0	6,0
4	0,06	1,8	1,3	7,0	9,0	5,5	1,3
5	0,07	0,5	1,4	2,0	2,0	6,0	1,0
6	0,08	0,8	9,0	4,0	4,0	7,0	9,0
7	0,09	1,7	5,5	8,0	6,0	2,0	5,5
8	0,10	1,6	6,0	6,0	8,0	4,0	6,0
9	0,01	0,9	7,0	1,3	7,0	8,0	7,0

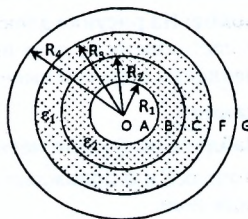
**Рисунки 6**



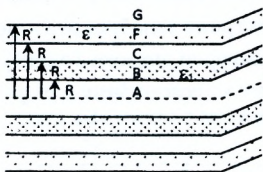
Вариант 3



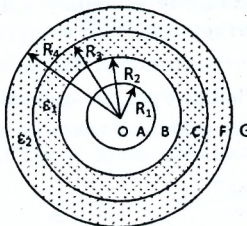
Вариант 4



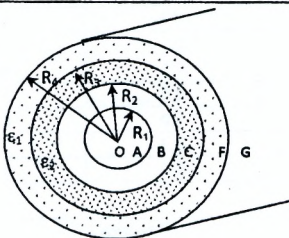
Вариант 5



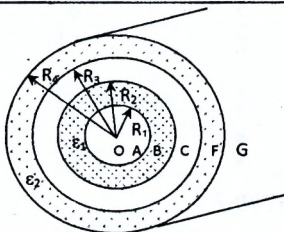
Вариант 6



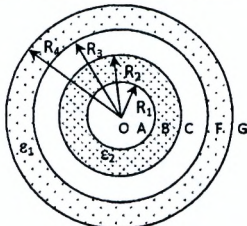
Вариант 7



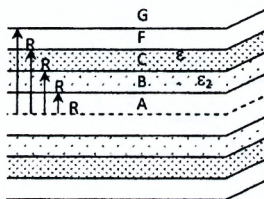
Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10





### Задача 7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ. ЗАКОН БИО-САВАРА-ЛАПЛАСА. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

**Условие:** На рисунке электрический ток силой  $I$  протекает по тонкому проводнику, состоящему из двух прямолинейных участков, один из которых уходит в бесконечность, а другой имеет конечную длину  $a$  и полуокружность радиуса  $R$ .

**Задания:**

1. Найдите индукцию магнитного поля  $\vec{B}$  и напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$  в точках  $C$  и  $D$  порождаемых каждой системой в отдельности и суммарного магнитного поля.

2. Найдите циркуляцию напряжённости магнитного поля вдоль квадрата, одной стороной которого является отрезок  $ZCD$ , направление обхода по контуру задайте самостоятельно.

3. Найдите величину и направление силы Лоренца, действующей на электрон, который влетает в магнитное поле в точке  $D$  и проходит ускоряющую разность потенциалов  $U$ . Направление скорости электрона задаётся вектором  $\vec{I}_0$ .

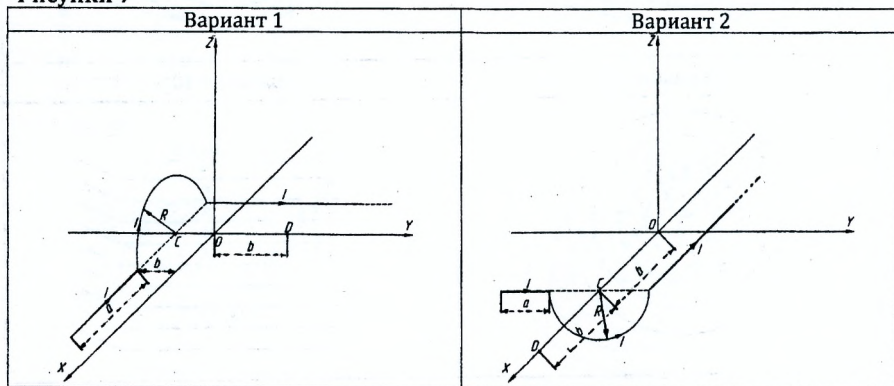
4. Найдите радиус кривизны траектории, по которой движется электрон в т.  $D$ .

*Решение задачи обязательно сопровождайте краткими пояснениями и рисунками. Вычисления проводите в системе СИ и обязательно проверяйте единицы измерения ответов.*

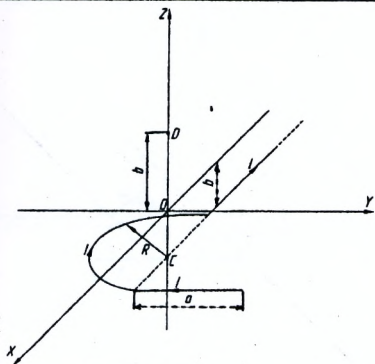
Таблица 7.

№	а, м	б, м	R, м	I, А
0	0,1	0,1	0,2	1,0
1	0,3	0,3	0,8	2,0
2	0,5	0,6	0,6	3,0
3	0,7	0,8	0,9	4,0
4	0,9	1,0	0,7	5,0
5	1,0	1,4	0,1	8,0
6	0,8	1,2	0,5	7,0
7	0,6	0,5	1,0	8,0
8	0,4	0,4	0,3	9,0
9	0,2	0,2	0,4	1,5

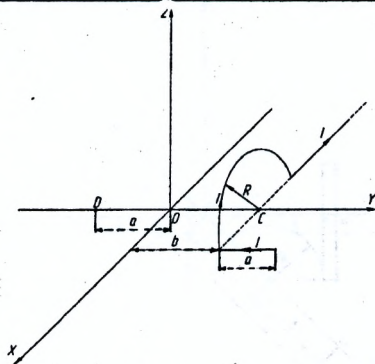
Рисунки 7



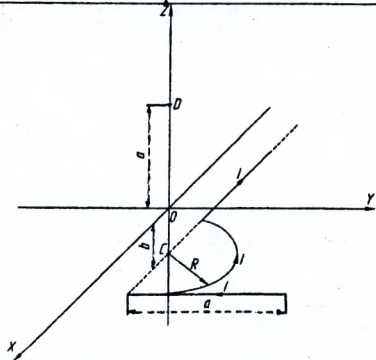
Вариант 3



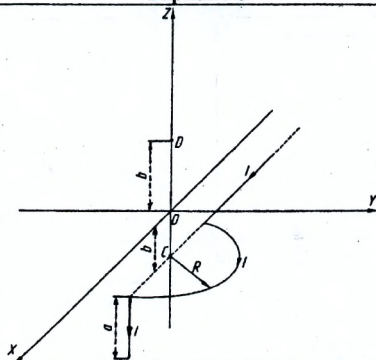
Вариант 4



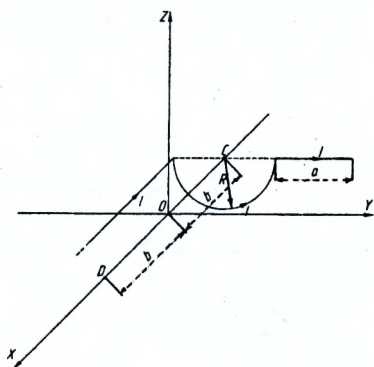
Вариант 5



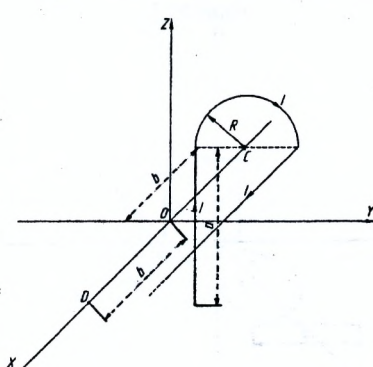
Вариант 6



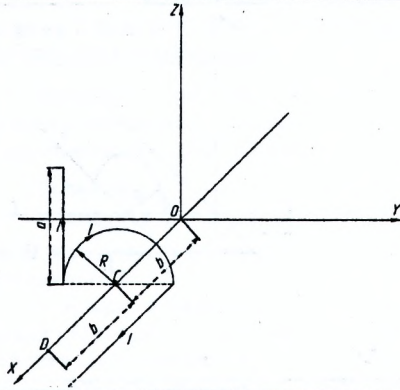
Вариант 7



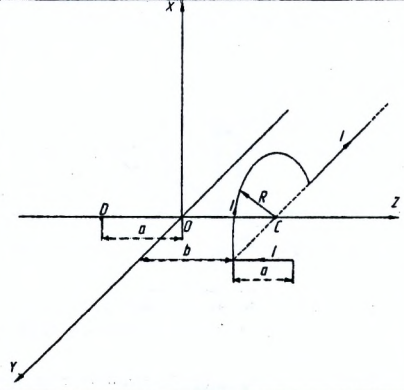
Вариант 8



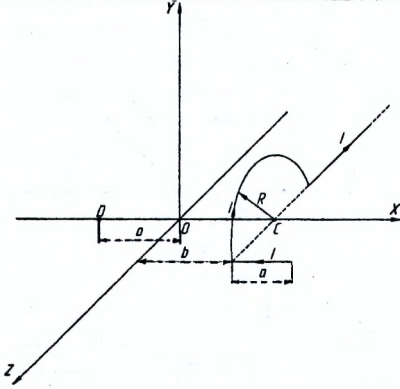
Вариант 9



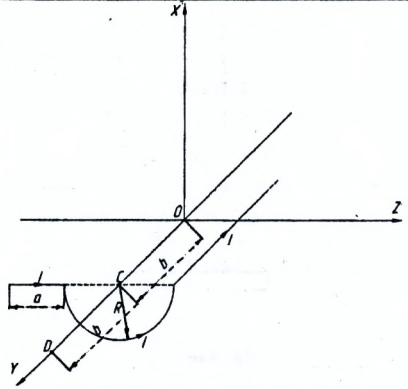
Вариант 10



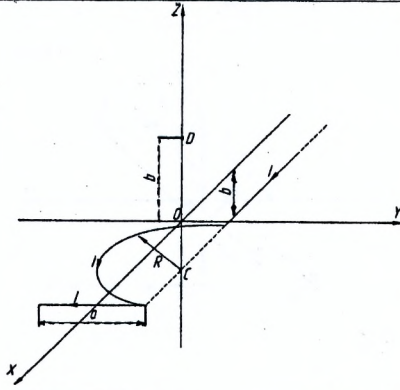
Вариант 11



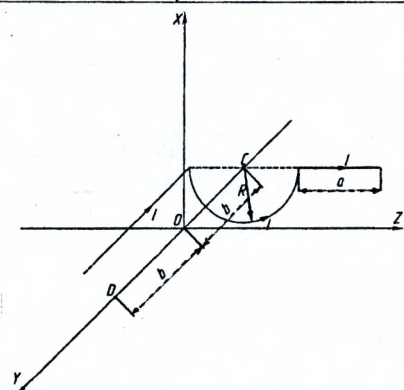
Вариант 12



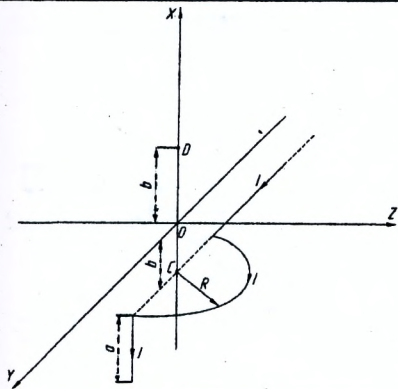
Вариант 13



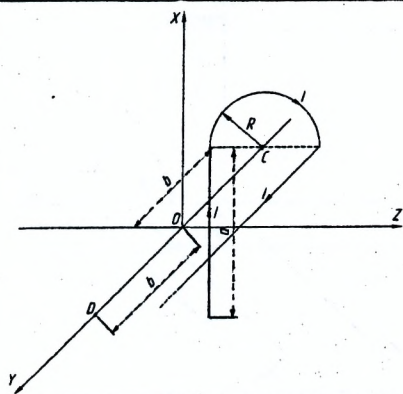
Вариант 14



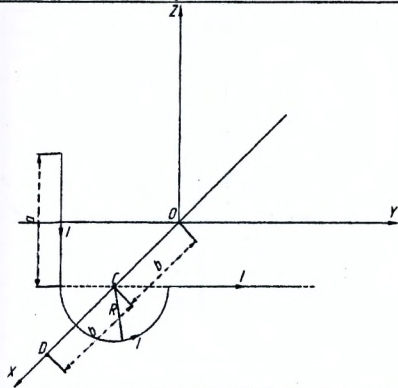
Вариант 15



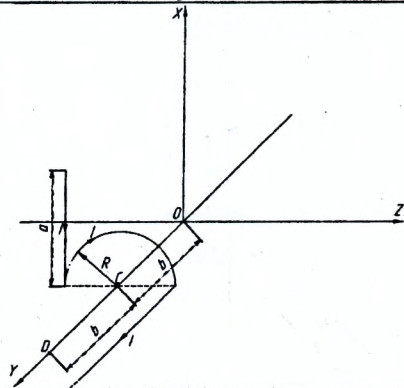
Вариант 16



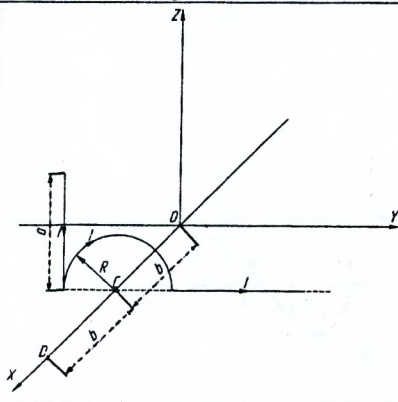
Вариант 17



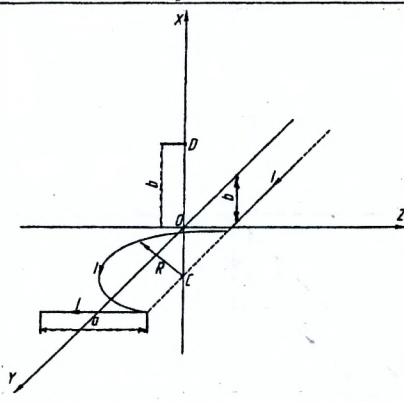
Вариант 18



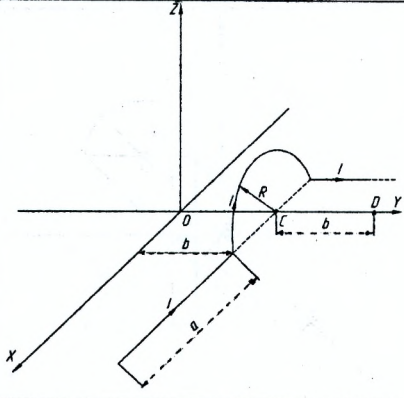
Вариант 19



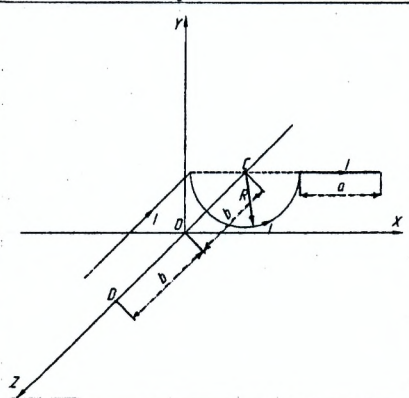
Вариант 20



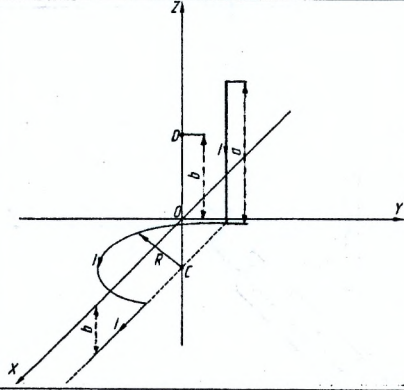
Вариант 21



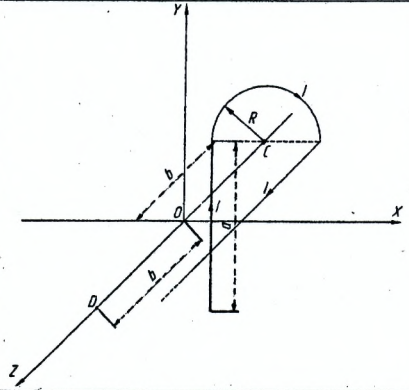
Вариант 22



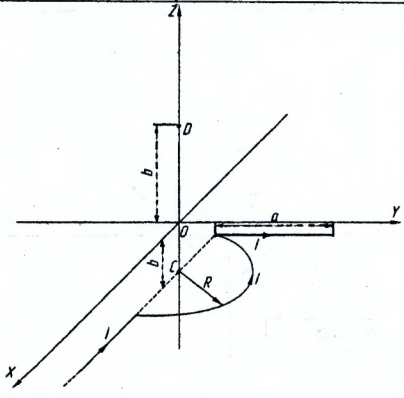
Вариант 23



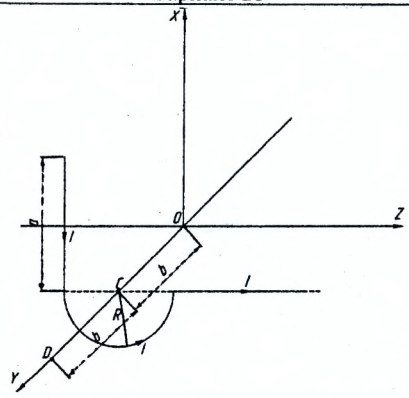
Вариант 24



Вариант 25

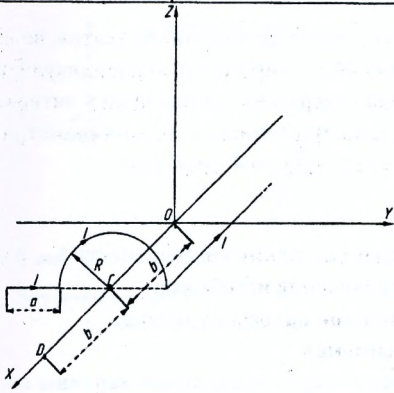


Вариант 26

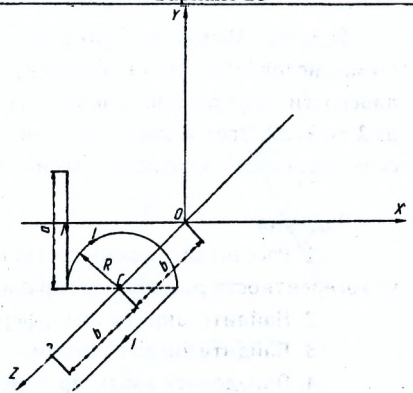




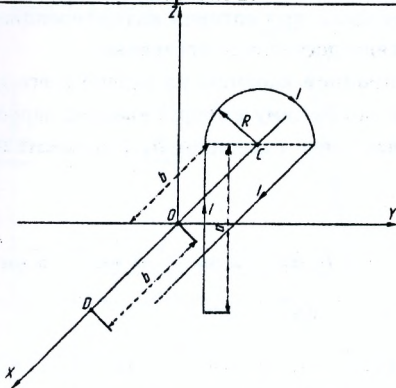
Вариант 27



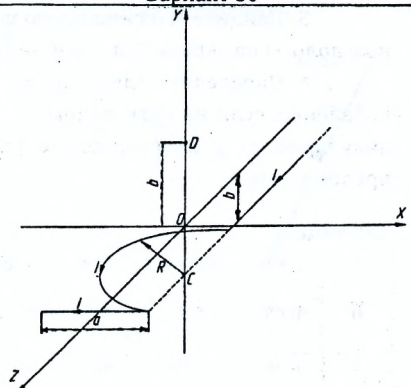
Вариант 28



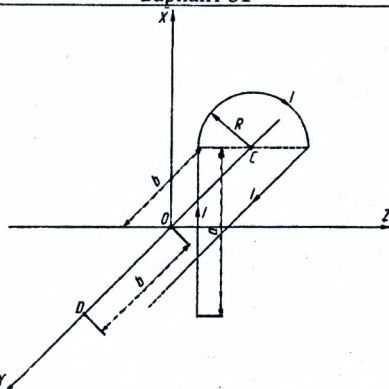
Вариант 29



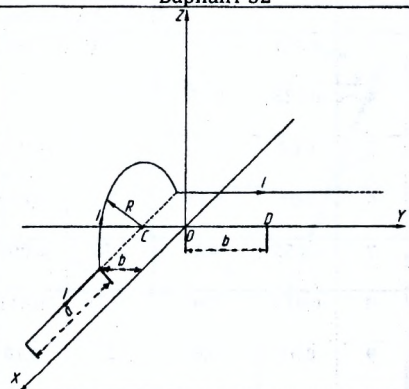
Вариант 30



Вариант 31



Вариант 32



## Задача 8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

**Условие:** На рисунке показаны схемы интерференционных опытов. Во всех схемах источником света является длинная щель шириной  $\delta$ , перпендикулярная плоскости рисунка. В излучении источника содержатся длины волн в интервале от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$ . Угол  $\gamma$  задается самостоятельно. Численные значения геометрических параметров, обозначенных на рисунках 8, заданы в таблице 8.

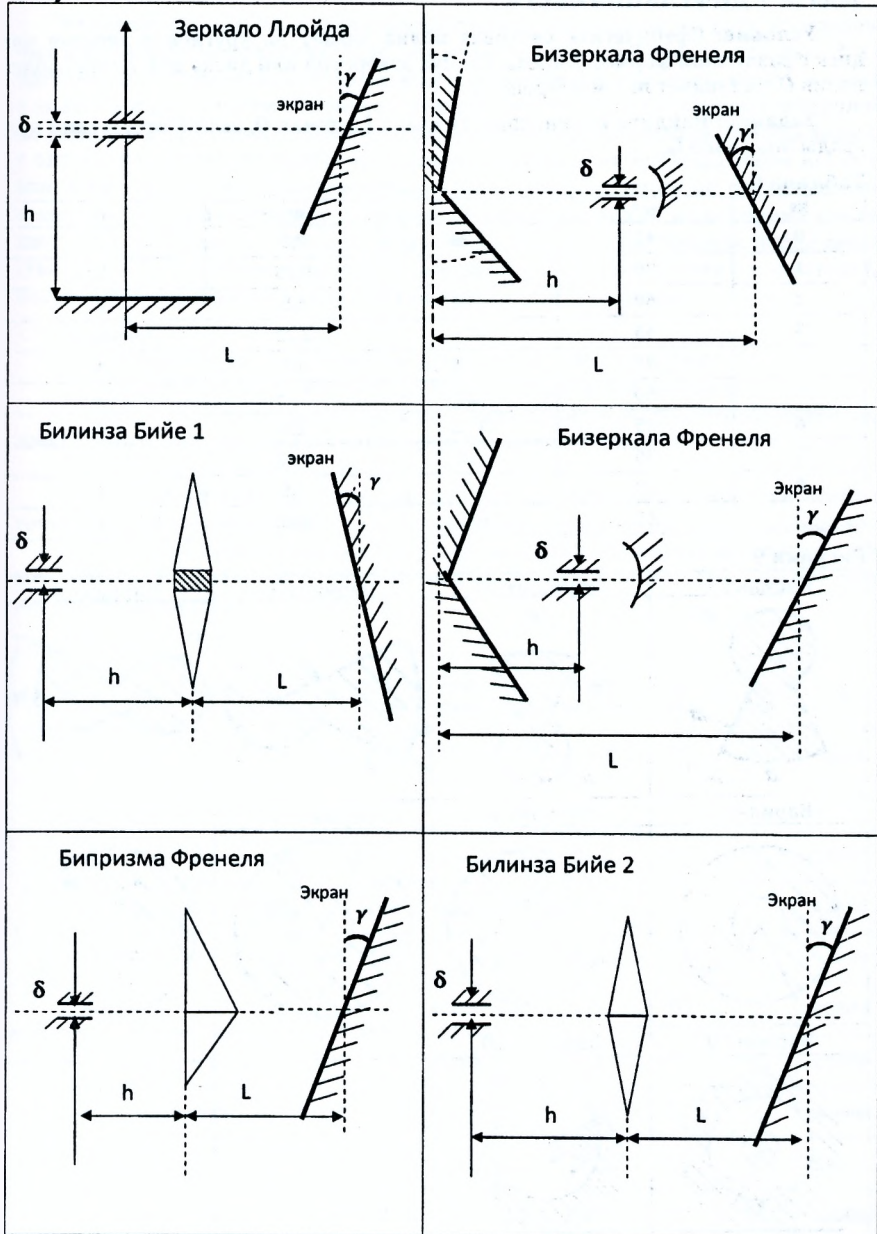
### Задания:

1. Рассчитайте время когерентности  $\tau_{\text{ког}}$ , длину когерентности  $l_{\text{ког}}$ , радиус когерентности  $\rho_{\text{ког}}$  вблизи экрана для излучения источника.
2. Найдите ширину интерференционной полосы на экране.
3. Найдите число возможных максимумов.
4. Определите характер изменения интерференционной картины на экране при смещении щели на  $\delta h$ , направление которого показано на рисунках.
5. Найдите максимальную ширину щели, при которой интерференционные полосы на экране будут наблюдаться ещё достаточно отчетливо.
6. Определите сдвиг интерференционной картины на экране и его направление, если на пути одного из лучей (по Вашему выбору) введена перпендикулярно лучу плоскопараллельная пластинка толщиной  $h_1$  с показателем преломления  $n$ .

Таблица 8

№	$\delta$ , мм	$\delta h$ , мм	L, м	$\gamma$ , рад	n	$h_1$ , мм	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	h, мм
0	0,05	0,5	4,5	0,004	1,5	0,8	500	10	4
1	0,04	0,75	4,25	0,002	1,62	1	550	15	3,5
2	0,045	1,000	4,25	0,002	1,62	1	550	15	4,5
3	0,035	0,2	3,75	0,005	1,52	0,95	575	20	5
4	0,025	0,25	3,5	0,006	1,75	0,9	725	5	5,5
5	0,02	0,3	5	0,001	1,7	1,05	650	20	3
6	0,03	0,35	3	0,009	1,65	1,01	700	15	2,5
7	0,055	0,4	2,75	0,007	1,6	0,75	675	10	2
8	0,015	0,6	2,5	0,011	1,8	0,7	625	25	1,5
9	0,01	0,8	2	0,10	1,85	1,15	600	10	1

Рисунки 8



### Задача 9. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

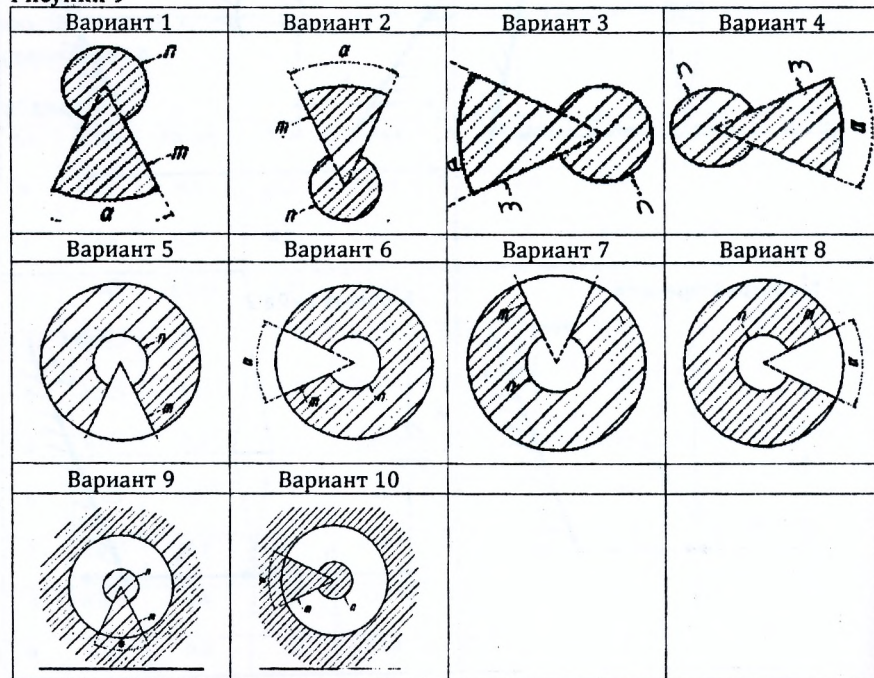
**Условие:** Сферическая световая волна падает на круглое отверстие или диск с различной формой выреза. Радиус отверстия или диска для точки наблюдения  $O$  составляет  $m$  – зон Френеля.

**Задание:** Найдите интенсивность света  $I$  в точке  $O$ , если в отсутствии преграды она равна  $I_0$ .

Таблица 9

№	$\alpha, ^\circ$	$m$	$m_1$	$n$
0	45	1,25	2,5	2
1	30	0,5	0,25	3
2	60	2,25	1,5	4
3	45	0,5	2,25	1
4	30	1,25	1,5	4
5	60	2,5	0,25	3
6	45	1,25	2,5	2
7	30	0,5	0,25	3
8	60	2,25	1,5	4
9	45	0,5	0,25	2

Рисунки 9





### Задача 10. ПОЛЯРИЗАЦИЯ

**Условие:** На рисунках изображена система, состоящая из трёх поставленных друг за другом поляризаторов, два из которых – 1 и 2 – несовершенны, 3-й – идеальный. Несовершенные поляризаторы в отдельности пропускают в своей плоскости –  $\beta_1, \beta_2$  – части интенсивности соответственно, а в перпендикулярной плоскости –  $\alpha_1, \alpha_2$  – части интенсивности соответственно, а в перпендикулярной плоскости –  $\beta_1, \beta_2$ . Между двумя из этих поляризаторов помещена тонкая ампула с оптически активным право- или левовращающим не поглощающим веществом, а так же ампула с положительным или отрицательным не поглощающим веществом внутри соленоида длиной  $L$ , с числом витков  $N$ , по которому протекает ток  $I$ , направление которого указано на рисунках. Постоянная Верде вещества равна  $V$ . На систему падает слева естественный свет с интенсивностью  $I_0$ . Постоянную вращения и длину ампулы задать самостоятельно.

#### Задания:

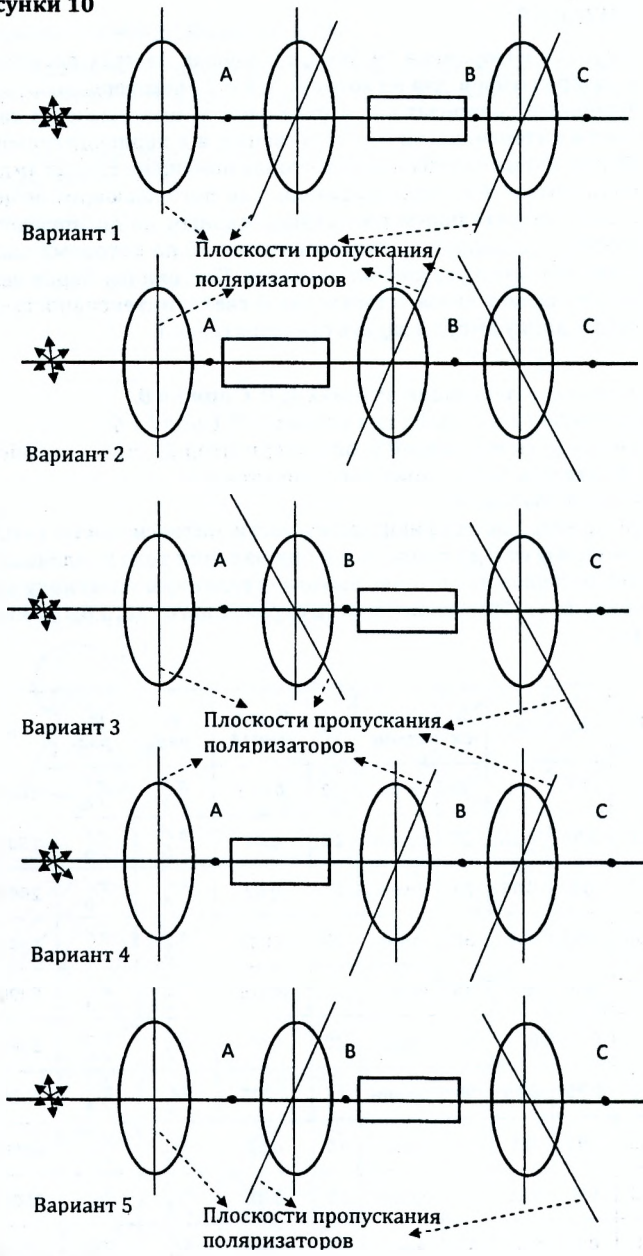
1. Найдите степень поляризации в точках  $A, B, C$  при  $I = 0$ .
2. Определите интенсивность света в точках  $A, B, C$  при  $I = 0$ .
3. Как надо повернуть и на какой угол поляризатор 2, чтобы интенсивность света в точке  $C$  осталась той же при включении тока  $I$ ?
4. То же для поляризатора 3.
5. Постройте примерные графики зависимости интенсивности света в точке при изменении угла  $\psi$  от 0 до  $\pi$  при  $I = 0$  и при наличии тока в соленоиде.
6. Как следует расположить в точке выхода стеклянную пластинку с показателем преломления  $n$ , чтобы интенсивность отражённого света была минимальна? Максимальна?

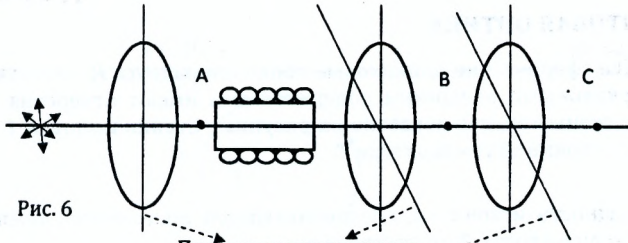
Таблица 10

№	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$L$ , см	Тип вращ.	$I$ , А	$V$ , угл. мин/А	$\varphi$ , рад	$\psi$ , рад	$N$
0	0.95	0.05	0.9	0.1	30	лево-	20	0.015	$\pi/3$	$\pi/6$	10000
1	0.9	0.1	0.95	0.15	25	право-	15	0.01	$\pi/6$	$\pi/3$	15000
2	0.85	0.15	0.8	0.05	25	право-	10	0.02	$\pi/4$	$\pi/6$	20000
3	0.8	0.05	0.85	0.1	30	лево-	25	0.025	$\pi/3$	$\pi/4$	45000
4	0.95	0.15	0.8	0.1	35	право-	15	0.015	$\pi/2$	$\pi/3$	50000
5	0.9	0.1	0.95	0.15	40	лево-	20	0.01	$\pi/2$	$\pi/6$	30000
6	0.85	0.05	0.75	0.15	50	право-	15	0.025	$\pi/2$	$\pi/4$	25000
7	0.8	0.15	0.95	0.1	55	лево-	10	0.02	$\pi/4$	$\pi/6$	60000
8	0.9	0.05	0.8	0.15	60	право-	15	0.01	$\pi/4$	$\pi/3$	55000
9	0.95	0.1	0.9	0.05	45	лево-	25	0.015	$\pi/4$	$\pi/2$	55000



Рисунки 10





Плоскости пропускания  
поляризаторов

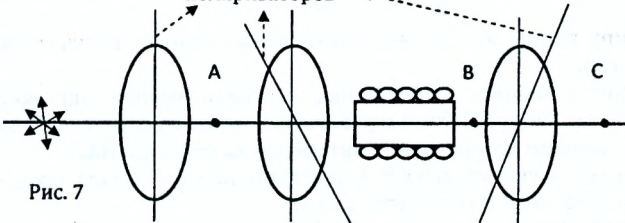


Рис. 7

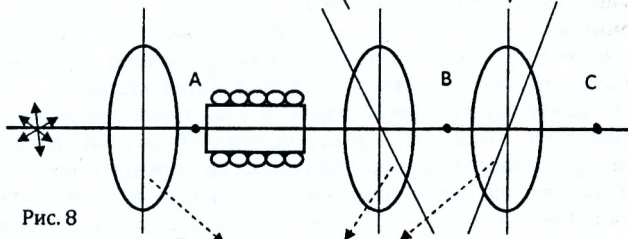


Рис. 8

Плоскости пропускания  
поляризаторов

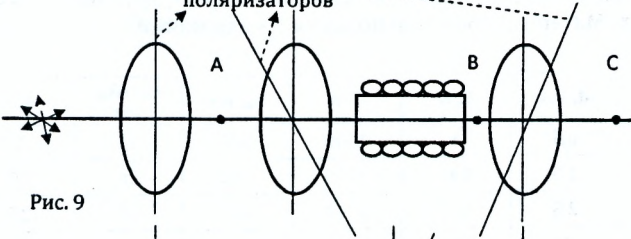


Рис. 9

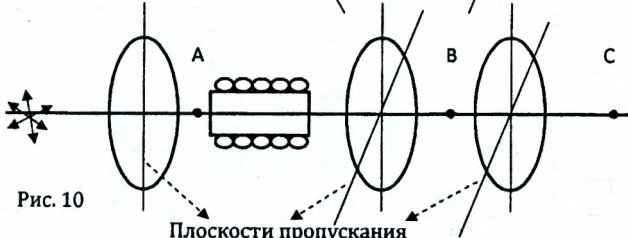


Рис. 10

Плоскости пропускания  
поляризаторов

## Задача 11. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

**Условие:** Две сферические одинаковые оболочки радиуса  $R$  с абсолютно отражающими зеркальными внешними поверхностями имеют отверстия диаметром  $d$  и расположены так, как показано на рисунках. Стенки полости 1 поддерживаются при постоянной температуре  $T$ .

**Задания:**

1. Найти мощность источника, обеспечивающего постоянство температуры в полости 1, если полость 2 отсутствует.
2. Найти давление излучения в полости 1 на достаточном удалении от отверстия.
3. Найти длину волны  $\lambda_m$  соответствующую максимуму излучательной способности отверстия.
4. Как изменится мощность источника, обеспечивающего постоянство температуры в полости 1 в отсутствии полости 2, если отверстие закрыть светофильтром, пропускающим длины волн в интервале  $\lambda_m$  от до  $\lambda_m + \Delta\lambda_m$ ?
5. Сколько фотонов указанного в п. 4 спектрального интервала находится в полости? Сколько их вылетает из полости за 1 с?
6. Какова будет температура в полости 2?
7. Как изменится мощность источника, обеспечивающего постоянство температуры в полости 1 при наличии полости 2 по сравнению со случаем её отсутствия? Разработать случаи отсутствия и наличия светофильтра.
8. Найти силу давления излучения полости 1 на площадку полости 2, расположенную симметрично отверстию этой полости относительно линии, соединяющей центры двух полостей. Размеры площадки те же, что и у отверстия.
9. Найти поток энергии через указанную площадку в обоих случаях, среднюю плотность потока фотонов и среднюю концентрацию вблизи площадки при наличии светофильтра.
10. Сколько фотонов, способных вызвать фотоэффект, достигает указанной площадки за 1 с? Материал оболочки полости 2 – алюминий.

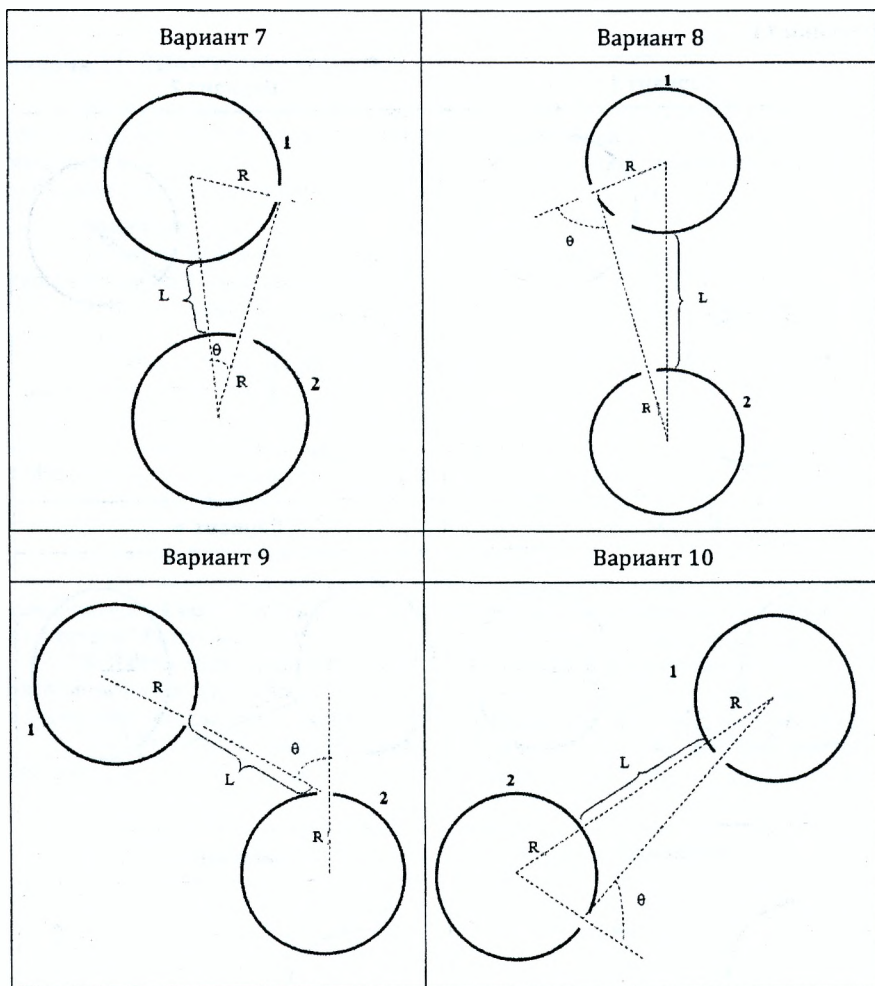
**Таблица 11**

№	R, м	d, мм	L, м	T, К	$\lambda_m$ , нм	$\lambda_m + \Delta\lambda_m$ , нм	$\theta$ , °
0	0.3	0.5	1	1500	500	10	5
1	0.25	1.5	0.45	1700	550	20	15
2	0.4	2.5	0.12	1900	550	25	25
3	0.5	2	0.5	1650	575	35	18
4	0.6	4	1.5	1950	725	5	12
5	0.65	3.5	1.1	1850	650	25	14
6	0.55	2.5	0.7	1750	700	20	16
7	0.45	3	2	2000	675	30	8
8	0.35	2	0.3	1800	625	15	20
9	0.2	1	0.6	1600	600	5	10

Рисунки 11

Вариант 1	Вариант 2
Вариант 3	Вариант 4
Вариант 5	Вариант 6





### Задача 12. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

**Условие:** На рисунках I.3.0 – I.3.9 представлены пространственно-временные диаграммы, построенные для некоторой ИСО  $K$ , события в которой происходят на оси  $X$ .

**Задания:**

1. Пусть  $I$  – мировая линия начала координат ИСО  $K'$ , оси которой параллельны осям ИСО  $K$ . Пусть в ИСО  $K'$  имеется равносторонний треугольник со стороной  $a$ , одна из которых направлена вдоль оси  $X$ . Найти периметр и углы этого треугольника в ИСО  $K$ . Рассмотрите предельные случаи:  $V \rightarrow C$  и  $V \ll C$ .



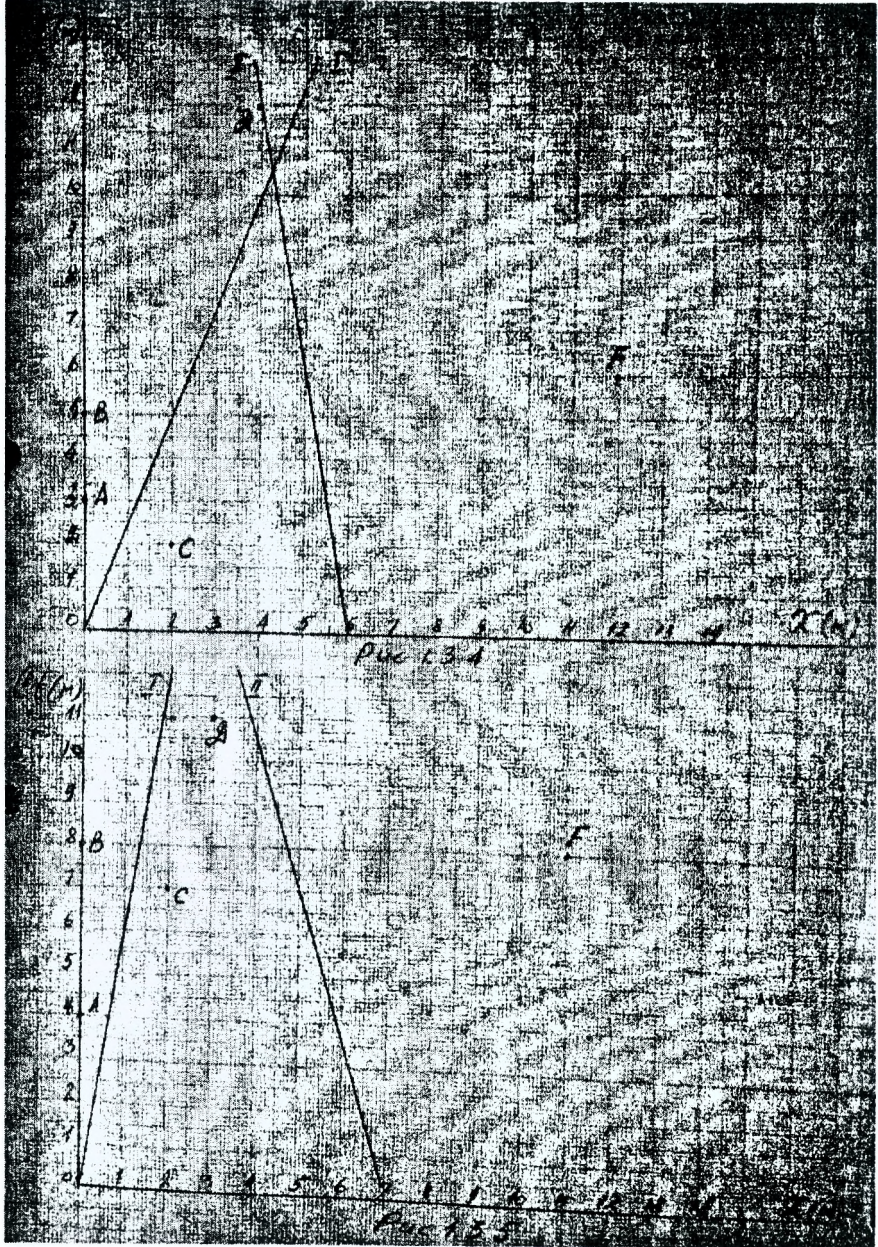
- При наблюдении из ИСО  $K$  длина некоторого стержня, покоящегося в ИСО  $K'$  из п. 1, равна  $L$ , и он составляет угол  $\alpha$  с осью  $X$ . Найдите собственную длину стержня;
- Нарисуйте мировую линию часов, которые за время  $t$  в ИСО  $K$  отстают на  $\Delta t$ ;
- Пусть  $A$  и  $B$  – события, состоящие в том, что мимо начала координат ИСО  $K$  пролетают концы стержня, ориентированного вдоль оси  $X$  ИСО  $K$ . Известно, что в  $CO$ , связанной со стержнем, промежуток времени между этими событиями в  $n$  раз больше. Найдите собственную длину стержня. Изобразите мировые линии его концов в ИСО  $K$ .
- Пусть  $C$  и  $D$  – события рождения и распада некоторой нестабильной частицы. Найдите собственное время жизни частицы и путь, который она пройдет от рождения до распада с "её точки зрения".
- Выясните, существует ли ИСО  $K''$ , в которой события  $C$  и  $F$  произошли одновременно. Какова скорость этой ИСО  $K''$  относительно ИСО  $K$ ? На каком расстоянии произошли эти события в ИСО  $K''$ ? Постройте пространственно-временную диаграмму для ИСО  $K''$  и покажите на ней события  $B, A, C, D, F$ .
- Пусть  $\Pi$  – мировая линия начала некоторой ИСО  $K'''$ . Какова скорость сближения ИСО  $K'$  и ИСО  $K'''$ ? Чему равна их относительная скорость?
- Положение концов стержня из п. 4 фиксируется одновременно в  $CO$ , связанной со стержнем. Чему равна разность отсчетов в ИСО  $K'$ ?
- Пусть  $\Pi$  – мировая линия частицы с кинетической энергией  $T$ . Чему равна энергия покоя частицы? Чему равен её импульс в ИСО  $K$ ? Чему будет равна кинетическая энергия и импульс частицы в ИСО  $K'$ ?
- Частица с массой покоя из п. 9 налетает на частицу с той же массой, мировая линия которой в ИСО  $K$  имеет уравнение  $x = l$  (м). Найдите массу покоя и скорость составной частицы, образовавшейся в результате соударения. Нарисуйте её мировую линию.

Численные значения выбираются по таблице 11.

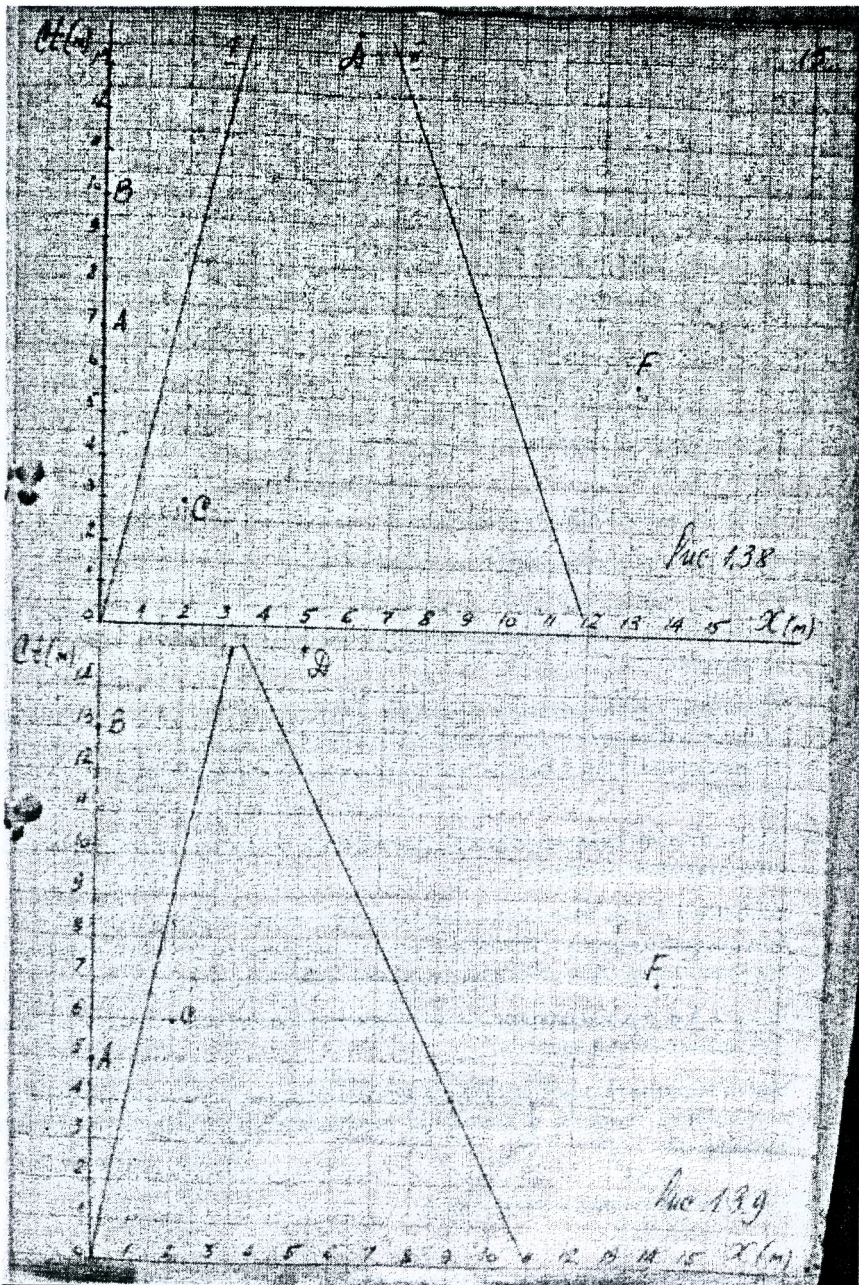
Таблица 12

№	$a, м$	$l, м$	$\alpha^\circ$	$n$	$T \cdot 10^{10}, эВ$	$l$	$t, мкс$	$\Delta t, мкс$
0	0,1	0,5	30	1,1	1	1	10	2
1	0,3	1,5	60	1,3	3	3	20	4
2	0,5	2,5	135	1,5	5	0	30	6
3	0,7	3,5	30	1,7	7	0,5	40	8
4	0,9	4,5	60	1,9	8	1,5	45	9
5	1,0	5,0	45	2,0	10	3,5	35	10
6	0,8	4,0	120	1,8	9	2	50	7
7	0,6	3,0	150	1,6	6	3	25	5
8	0,4	2,0	120	1,4	4	2,5	15	3
9	0,2	1,0	45	1,2	2	2	5	1









## РАЗДЕЛ II

### Задача 1. КИНЕМАТИКА, ДИНАМИКА И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Система, показанная на рисунках 1.0 – 1.9, состоит из следующих элементов. Грузы массами  $m_1$  и  $m_2$  движутся поступательно. К грузам прикреплены невесомые нерастяжимые нити, перекинутые или намотанные на блоки массами  $m_3$  и  $m_4$ , которые могут без трения вращаться вокруг горизонтальных осей. Блок массой  $m_3$  – сплошной цилиндр, а блок массой  $m_4$  – ступенчатый цилиндр с радиусами степеней  $r_3$  и  $R_4$  и одинаковой высотой (рисунок 1.10). При движении нити по блокам не проскальзывают, участки нитей для тел на наклонных плоскостях параллельны этим плоскостям, коэффициент трения тел о любую плоскость равен  $\mu$ . Система начинает движение из состояния покоя. Считать, что все нити и участки плоскостей имеют достаточную длину.

**Выполнить следующие задания:**

1. Найти ускорения грузов массами  $m_1$  и  $m_2$  и угловые ускорения блоков  $\epsilon_3$ ,  $\epsilon_4$ . Принять  $r_3 = r_4$ .
2. Найти силы натяжения всех нитей.
3. Найти силы реакции осей обоих блоков.
4. Используя кинематические формулы, найти скорости грузов, угловые скорости блоков и пути, пройденные грузами спустя время  $t$  после начала движения.
5. Используя кинематические формулы, найти ускорение точки на внешнем радиусе блока  $m_4$  спустя время  $t$  после начала движения по величине и направлению, если в начале эта точка находится в крайнем нижнем положении.
6. Найти относительную скорость грузов  $m_1$  и  $m_2$  по величине и направлению в указанный момент.
7. Используя закон изменения механической энергии, найти другим способом скорости грузов и угловые скорости блоков в тот момент, когда пути, пройденные грузами, составят значения, найденные в п. 4.
8. Приняв в п. 4  $\mu = 0$ , убедиться, что в системе выполняется закон сохранения механической энергии.
9. Найти горизонтальное ускорение центра масс системы и убедиться в выполнении теоремы о движении центра масс в проекции на горизонтальную ось.

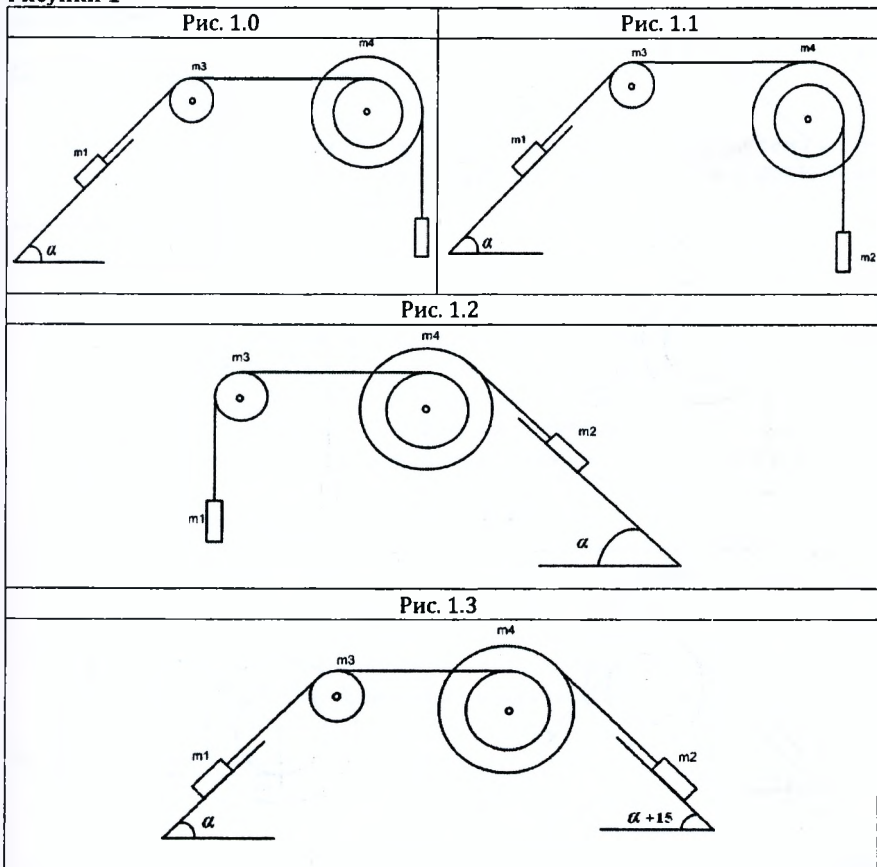
*Численные значения выбрать из таблицы 1.*



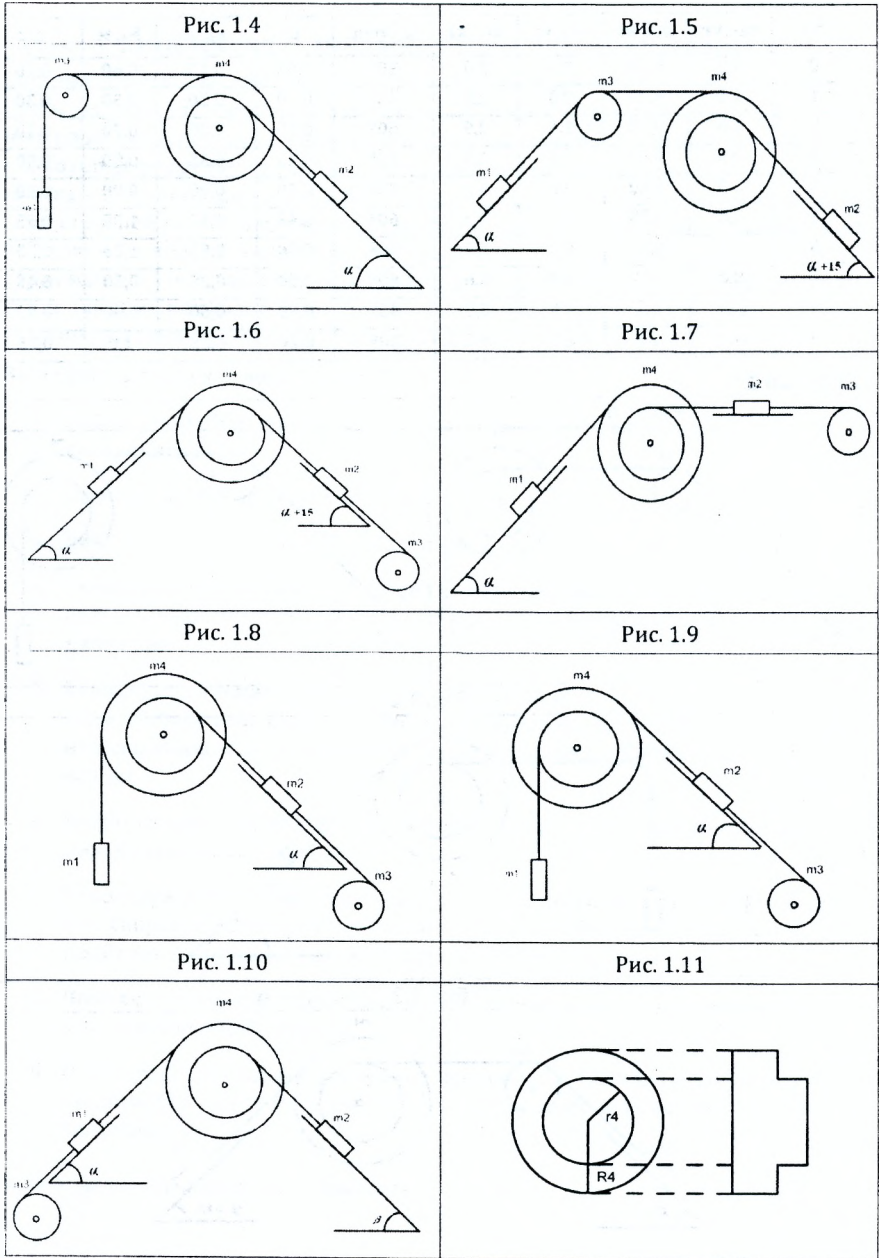
Таблица 1

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$m_3$ , кг	$m_4$ , кг	$\alpha$ , град.	$\mu$	$r_4$ , м	$R_4$ , м	$\tau$ , с
0	4,0	0,50	0,5	3,0	$30^\circ$	0,05	0,15	0,40	0,20
1	2,5	0,25	2,0	2,8	$45^\circ$	0,10	0,20	0,50	0,30
2	1,0	0,10	1,5	2,9	$60^\circ$	0,15	0,30	0,70	0,40
3	3,5	0,40	2,5	2,5	$45^\circ$	0,25	0,35	0,80	0,50
4	5,0	0,60	3,0	4,2	$30^\circ$	0,35	0,40	0,90	0,60
5	6,0	0,75	3,5	3,2	$60^\circ$	0,45	0,45	1,05	0,65
6	7,0	0,80	5,5	3,4	$30^\circ$	0,40	0,55	1,25	0,55
7	8,0	1,0	4,0	3,6	$60^\circ$	0,50	0,25	0,50	0,45
8	12,0	1,5	4,5	3,8	$45^\circ$	0,30	0,50	0,90	0,35
9	16,0	2,0	6,0	4,0	$30^\circ$	0,20	0,55	1,0	0,25

Рисунки 1







## Задача 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Физический маятник на рисунках 2.0 – 2.9 состоит из четырех элементов:

**а)** тонкого стержня длиной  $l$ ; **б)** сделанной из такого же по толщине и из такого же материала стержня полуокружности с диаметром или без него; **в)** плоской пластинки в виде полукруга радиусом  $\frac{l}{K_1}$ ; **д)** тонкого стержня из того же материала и той же толщины, но с длиной  $\frac{l}{K_2}$  (величины  $K_1, K_2$  заданы в таблице к задаче).

Массы первых трех элементов одинаковы. Место прикрепления короткого стержня задайте самостоятельно. Система может колебаться вокруг горизонтальной оси  $O$ , показанной на рисунке. С помощью тонкой нити, привязанной к концу короткого стержня, систему можно тянуть под углом  $\alpha$  к горизонту влево или вправо в зависимости от расположения стержня на рисунке с силой  $\frac{mg}{K_3}$ , где  $m = 2 \text{ кг}$  – общая масса системы, а величина  $K_3$  задана в таблице к задаче.

**Выполнить следующие задания:**

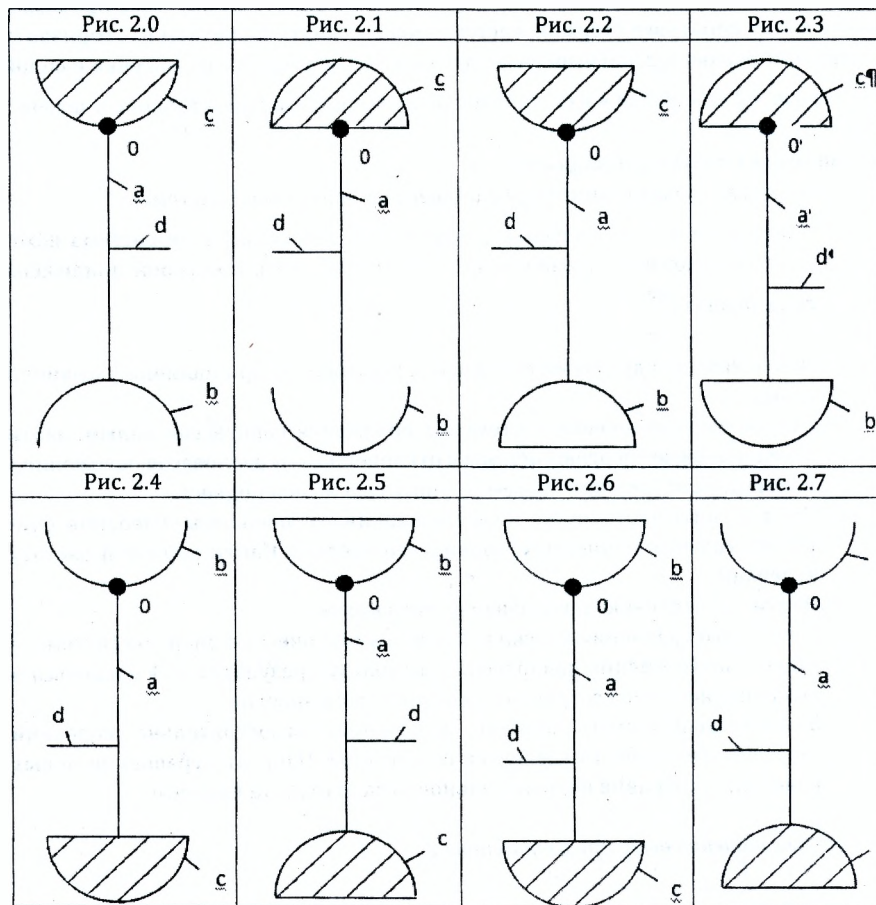
1. Определить расстояние от оси подвеса до центра масс системы.
2. Найти угол между стержнем длиной  $l$  и вертикалью, если система находится в положении равновесия в отсутствие нити, к которой приложена сила, равная  $\frac{mg}{K_2}$ .
3. Найти угол между тем же стержнем и вертикалью при наличии указанной силы.
4. Считая угол отклонения системы от положения равновесия малым, найти потенциальную энергию системы в отклоненном от равновесия положении.
5. Найти момент инерции системы относительно оси подвеса.
6. При  $t = 0$  нить пережигают, и система начинает совершать колебания. Считая их малыми, написать уравнение колебаний. Найти период и частоту колебаний.
7. Найти приведенную длину физического маятника.
8. С помощью уравнения колебаний найти кинетическую энергию системы в момент прохождения равновесия и используя результат п. 4 убедиться в выполнении закона сохранения механической энергии.
9. В некоторый момент времени, задаваемый самостоятельно, короткий стержень без толчка отделяется от системы. Написать уравнение новых колебаний, сохранив первоначальное начало отсчета времени.

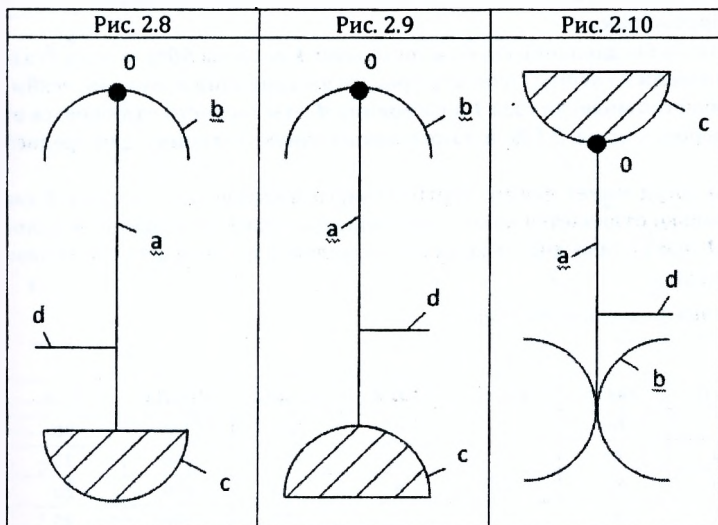
*Численные значения выбрать из таблицы 2.*

Таблица 2

№	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$l, m$
0	4	2	10	1,0
1	5	3	12	1,1
2	6	4	8,5	1,9
3	8	2,5	9	1,6
4	10	3,5	9,5	1,8
5	4,5	4,5	10,5	2,0
6	5,5	5	11	1,7
7	6,5	5,5	11,5	1,5
8	7,5	8	12,5	1,2
9	8,5	6	14	1,4

Рисунки 2





### Задача 3. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

На рисунках 3.0 - 3.9 показан цикл, осуществляемый со смесью, состоящей из газа **1** массой  $m_1$  и газа **2** массой  $m_2$ , которые считаются идеальными. Цикл состоит из четырех процессов: **a** - изотерма, **b** - изобара, **c** - изохора, **d** - адиабата. Цикл показан на ( $pV$ )-диаграмме, значения  $p_1$ ,  $p_2$  и  $V_1$  заданы в таблице.

Выполнить следующие задания:

1. Найти кажущуюся молярную массу смеси и эквивалентное число степеней свободы молекул смеси, а также показатель адиабаты смеси.
2. Записать уравнение всех процессов цикла и в соответствии с видом цикла найти или задать недостающие значения объема и давление в остальных угловых точках цикла.
3. Найти парциальные давления компонентов во всех угловых точках цикла.
4. Найти термодинамические температуры во всех угловых точках цикла и построить примерные графики цикла на ( $p, T$ ) и ( $V, T$ )-диаграммах.
5. Найти изменения внутренней энергии, работу газа и количество теплоты, полученное газом во всех процессах цикла.
6. Вычислить КПД цикла и сравнить его с КПД цикла Карно, для которого температура нагревателя равна максимальной температуре в цикле, а температура охладителя - минимальной.
7. Найти КПД холодильной машины, работающей по циклу, проходимому против часовой стрелки.
8. Найти средние, наиболее вероятные и среднеквадратичные скорости компонентов в каком-нибудь (по Вашему выбору) состоянии газа.
9. Какова была бы средняя длина свободного пробега молекул и среднее число столкновений за  $1$  с в состоянии **1**, если бы в сосуде находился только газ **1**



массой ( $m_1+m_2$ )? Каковы были бы при этом коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности?

10. Как изменилось бы давление смеси в состоянии **4**, если бы **50%** молекул газа **2** диссоциировали на атомы? Считать процесс диссоциации изотермическим.
11. Найти количество молекул газа **1** в состоянии **4**, чьи скорости отличаются от наиболее вероятной на **0,1%**, а также аналогичную величину для средней скорости.
12. Считая, что сосуд имеет форму вертикального цилиндра диаметром **5 см**, найти насколько отличается количество молекул газа **1** в состоянии **4** в слое толщиной **1 мм** вблизи дна от количества молекул в таком же слое вблизи крышки сосуда.

Численные значения выбрать из таблицы 3.

Таблица 3

№	$m_1$ , г	газ 1	$m_2$ , г	газ 2	$P_1$ , кПа	$P_2$ , кПа	$V_1$ , л
0	8	He	4	H <sub>2</sub>	500	300	30
1	40	Ar	48	O <sub>2</sub>	450	250	25
2	40	Ne	42	N <sub>2</sub>	400	150	20
3	84	Kr	70	Cl <sub>2</sub>	350	200	35
4	131	Xe	8	H <sub>2</sub>	300	100	40
5	88	CO <sub>2</sub>	64	O <sub>2</sub>	475	175	45
6	34	NH <sub>3</sub>	28	N <sub>2</sub>	600	275	50
7	54	H <sub>2</sub> O	35	Cl <sub>2</sub>	375	125	55
8	30	CH <sub>3</sub>	6	H <sub>2</sub>	550	350	60
9	52	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	64	O <sub>2</sub>	600	375	65

Рисунки 3

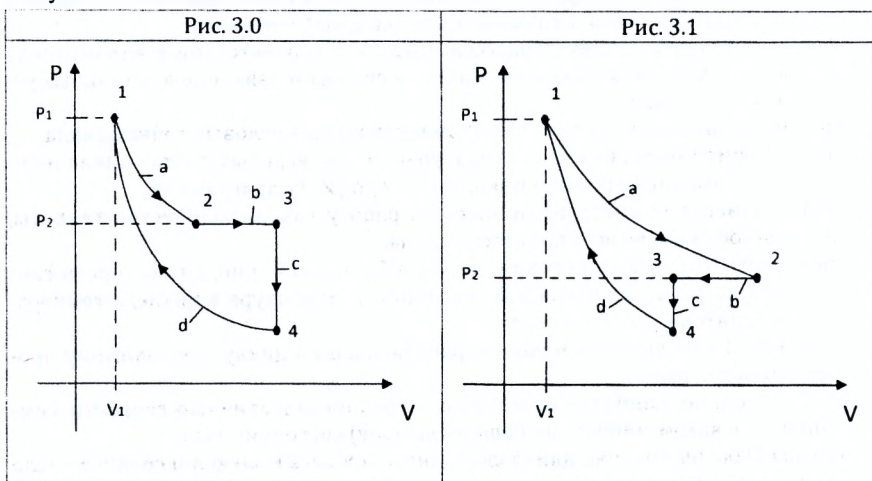




Рис. 3.2

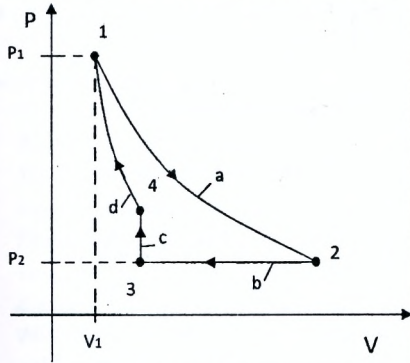


Рис. 3.3

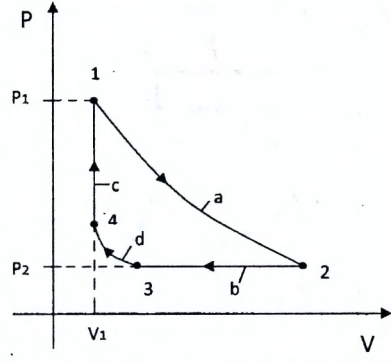


Рис. 3.4

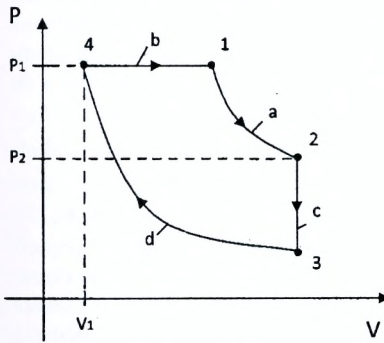


Рис. 3.5

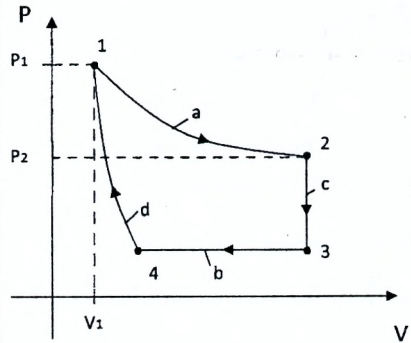


Рис. 3.6

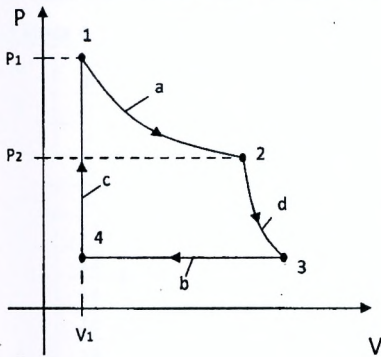


Рис. 3.7

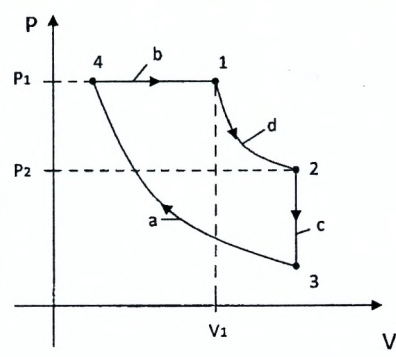


Рис. 3.8

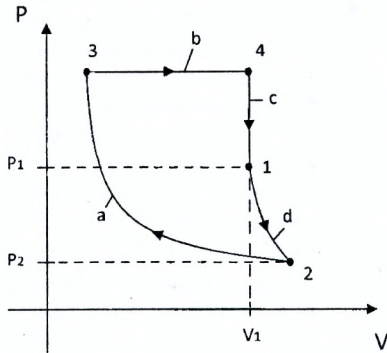


Рис. 3.9

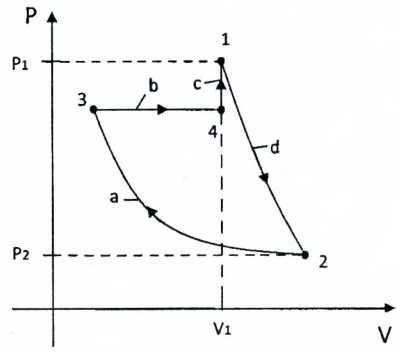
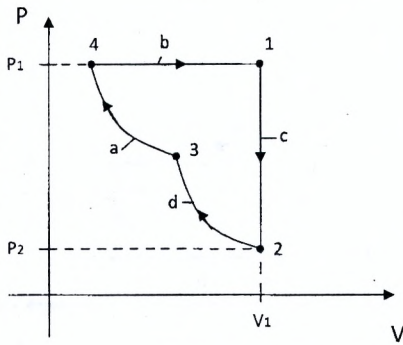


Рис. 3.10



#### Задача 4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

На рисунках 4.0 – 4.9 (таблицы 4.1, 4.2) изображены электрические схемы с источниками тока и резисторами.

Выполнить следующие задания:

1. Вычислить эквивалентные сопротивления между точками  $a$  и  $b$  схемы,  $R_{ab}$ .
2. Начертить эквивалентную схему замещения с элементом  $R_{ab}$  и, используя законы Кирхгофа, найти токи во всех резисторах и всех источниках ЭДС.
3. Найти напряжения на зажимах любого источника (по вашему выбору).
4. Проверить выполнение баланса мощностей.
5. Между указанными в таблице 4.2 точками схемы включены два последовательно соединенных конденсатора, типы которых также указаны в таблице. Плоский конденсатор имеет квадратные пластины с длиной стороны  $l_1$  и расстоянием между ними  $l_2$ ; сферический имеет внутренний радиус  $l_1$  и разность радиусов  $l_2$ ; цилиндрический имеет внутренний радиус  $l_1$ , разность радиусов  $l_2$  и длину  $20l_1$ . Конденсаторы полностью заполнены двумя слоями однородного диэлектрика равной толщины с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . Найти заряд на той обкладке, которая присоединена к первой из указанных точек.
6. Найти энергию электрического поля второго конденсатора.
7. Найти среднюю объёмную плотность энергии в этом конденсаторе.
8. Найти поверхностную плотность поляризационных зарядов на всех границах раздела диэлектриков во втором конденсаторе.
9. Получить формулы для электрического смещения, поляризованности и напряжённости электрического поля в зависимости от расстояния, отсчитываемого от указанной в п. 5 обкладки, и построить примерные графики этих зависимостей.
10. Найти силу взаимодействия обкладок между собой.

Численные значения выбрать из таблицы 4.1. и 4.2

Таблица 4.1

№	$E_1,$ В	$E_2,$ В	$E_3,$ В	$\Gamma_1,$ Ом	$\Gamma_2,$ Ом	$\Gamma_3,$ Ом	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом
0	2	4	6	-	1	2	120	210	320	640	100
1	4	10	12	2	-	1	1400	2900	5100	1700	6800
2	6	7	3	-	2	2	3200	4700	5600	8200	1000
3	8	12	5	-	-	3	620	470	1000	1200	750
4	10	2	7	-	2	2	240	150	760	430	900
5	12	18	9	2	3	5	370	600	790	590	300
6	14	16	11	4	2	-	540	860	320	350	1000
7	16	12	13	1	3	5	890	360	790	250	500
8	18	8	15	4	-	3	1000	3700	960	2440	3400
9	20	4	17	2	3	1	3000	4000	5000	6000	7000

Таблица 4.2

Параметры конденсатора и способ его подключения

№	Точки соединения	Типы конденсаторов	$l_1$ , см	$l_2$ , см	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$
0	de	плоский, сферический	1,0	0,5	2,0	3,0
1	cb	сферический, цилиндрический	2,0	0,1	3,0	4,0
2	cd	цилиндрический, плоский	1,0	0,2	2,5	6,0
3	bd	плоский, цилиндрический	0,5	0,5	3,5	8,0
4	ad	сферический, цилиндрический	1,5	0,2	4,0	10,0
5	ca	цилиндрический, плоский	2,5	0,3	4,5	14,0
6	ed	плоский, сферический	2,0	0,3	5,0	6,0
7	ae	сферический, цилиндрический	3,0	0,2	5,5	2,0
8	de	цилиндрический, плоский	3,0	0,1	6,0	3,0
9	cd	плоский, сферический	1,0	0,2	7,0	4,0

Рисунки 4

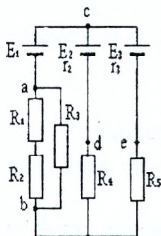


Рис. 4.0

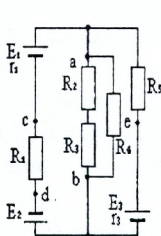


Рис. 4.1

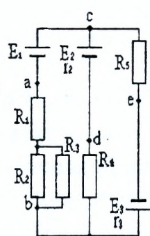


Рис. 4.2

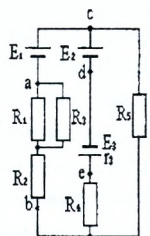


Рис. 4.3

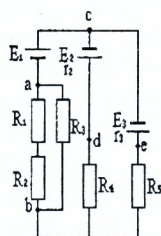


Рис. 4.4

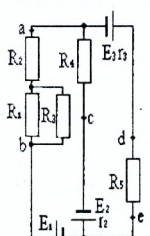


Рис. 4.5

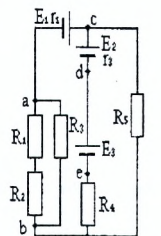


Рис. 4.6

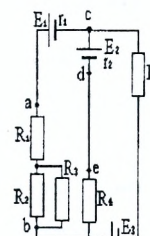


Рис. 4.7

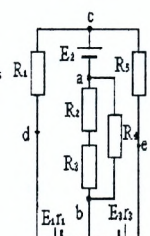


Рис. 4.8

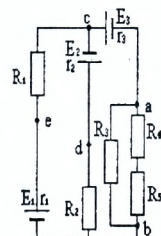


Рис. 4.9

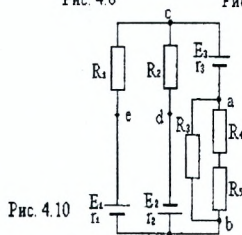


Рис. 4.10



## Задача 5. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

На рис. 5.0 – 5.9 показан замкнутый контур из тонкого провода, состоящий из четверти окружности радиусом  $R$  и трех прямолинейных участков, два из которых с длинами  $R$  и  $l$  параллельны осям координат. По контуру течёт постоянный ток  $I$ , подводимые провода, расположенные вплотную друг к другу, также показаны на рисунке. Точка наблюдения  $P$  лежит на той координатной оси, которая является осью симметрии окружности, и её координата в таблице обозначена  $\xi_P$  (для рисунка 5.5, например, это  $y_P$ ).

Выполнить следующие задания:

1. Найти проекции на координатные оси магнитной индукции в точке  $P$ , создаваемой отдельными участками контура, а также проекции магнитной индукции общего поля контура в этой точке. Найти также модуль магнитной индукции  $B_P$  общего поля и углы между осями координат и этим вектором.
2. Найти проекции магнитного момента рассматриваемого контура на оси координат, модуль магнитного момента и его углы с осями координат.
3. Маленький круглый виток радиусом  $r$  с током  $I_1$  помещен в точку  $P$  так, что его плоскость совпадает с одной из координатных плоскостей (по вашему выбору). Найти вращающий момент относительно точки  $P$ , действующий на виток со стороны магнитного поля. Указать с помощью углов с осями координат направление оси, вокруг которой будет поворачиваться виток, если он будет свободен.
4. Используя результаты п. 3 найти, какую работу нужно совершить, чтобы квазистатически повернуть виток вокруг любой из осей координат (по вашему выбору) на некоторый угол (направление поворота и угол задайте самостоятельно).
5. Считая поле в окрестности точки  $P$  однородным и вычисляя магнитный поток в начальном и конечном положении витка, получить снова выражение для работы из п.4:

$A_{\text{внеш}} = I_1(\Phi_{\text{нач}} - \Phi_{\text{кон}})$ , где  $\Phi_{\text{нач}}$  и  $\Phi_{\text{кон}}$  – магнитные потоки в начальном и конечном состоянии.

6. Заряженная частица массой  $m$  с зарядом  $q$ , прошедшая предварительно в другой области пространства ускоряющую разность потенциалов  $U$ , влетает в точку  $P$  в рассматриваемую область пространства параллельно одной из осей координат (по вашему выбору). Электрическое поле в рассматриваемой области пространства отсутствует. Найти проекции ускорения частицы на оси координат, модуль ускорения и радиус кривизны траектории в точке  $P$ .
7. Считая поле в окрестности точки  $P$  однородным, найти радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться частица.

8. В точку  $P$  помещается тот же виток, что и в п. 3, но ток в нём отсутствует. Виток поворачивают равномерно внешние силы так же, как в п. 4 за время  $\tau$ . Написать выражение для ЭДС индукции, возникающей в контуре, как функцию времени  $t$ .
9. Проволока, из которой сделан виток, имеет удельное сопротивление  $\rho$ , плотность  $\rho_1$  и массу  $m_1$ . Какой заряд протечет по витку за время  $\tau$ ?
10. На отдельном рисунке указать направление индукционного тока (если оно различно в разные промежутки времени, то указать моменты времени, когда направление индукционного тока изменяется).

Численные значения выбрать из таблицы 5.

Таблица 5

№	$I, A$	$R, м$	$l, м$	$\xi_p, м$	$I_1, A$	$m \cdot 10^{-22}, кг$	$q, мкКл$	$\tau, мс$	$r, мм$	$\rho \cdot 10^8, Ом \cdot м$	$\rho_1 \cdot 10^{-3}, кг/м^3$	$m_1, мг$
0	100	0,50	1,00	1,10	5,0	1,0	2,0	50	1,0	2,7	3,0	8,0
1	150	0,60	0,90	-0,70	4,0	2,0	1,0	60	2,0	3,0	3,5	8,5
2	200	0,70	0,80	1,00	3,0	3,0	4,0	70	1,5	1,5	4,0	9,0
3	250	0,75	0,60	0,50	2,0	4,0	3,0	80	2,5	3,5	4,5	9,5
4	300	0,80	0,70	-0,60	1,0	8,5	10,0	90	3,0	4,0	5,0	10,0
5	350	0,85	0,75	0,60	4,5	7,5	9,0	100	3,5	4,5	6,0	11,0
6	400	0,90	0,85	-0,70	3,5	6,5	8,0	150	4,0	5,0	7,0	11,5
7	450	0,95	0,95	1,10	2,5	5,5	7,0	200	5,0	5,5	7,5	12,0
8	500	1,00	0,50	-0,80	6,0	5,0	6,0	250	5,5	6,0	8,0	12,5
9	550	1,10	0,60	-0,50	8,0	4,5	5,0	300	6,0	6,5	8,5	14,0

Рисунки 5

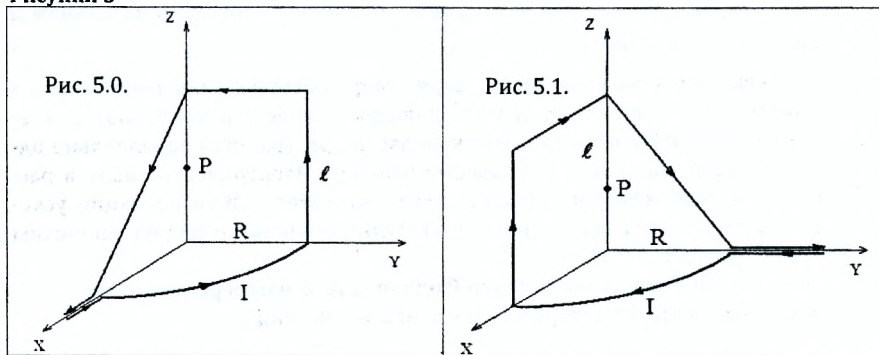


Рис. 5.2.

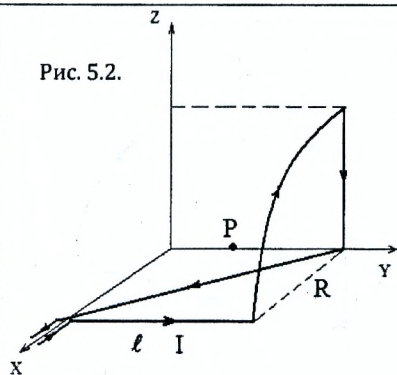


Рис. 5.3.

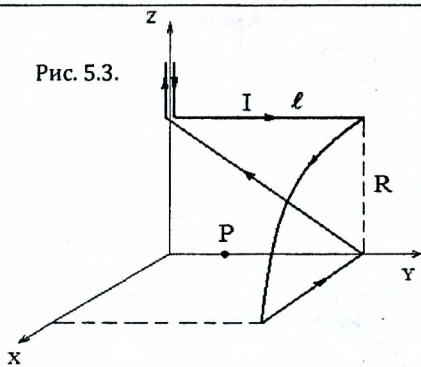


Рис. 5.4.

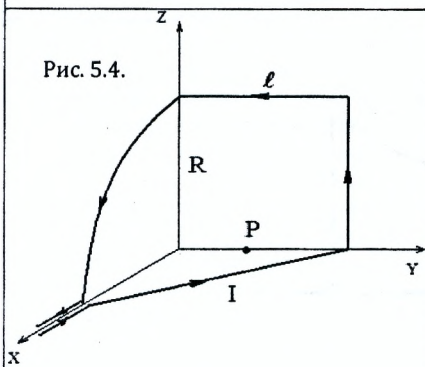


Рис. 5.5.

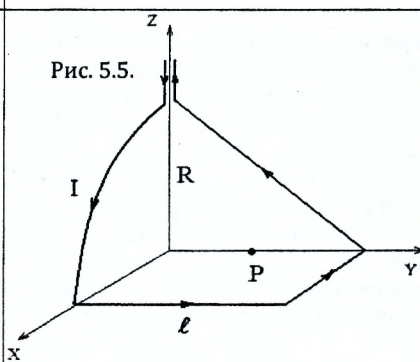


Рис. 5.6.

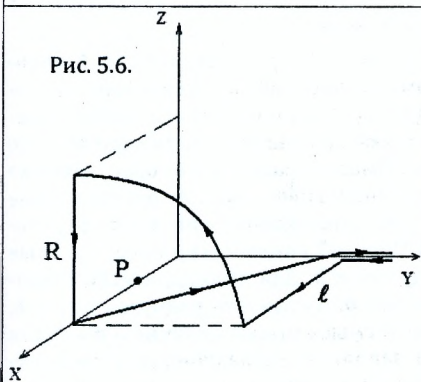
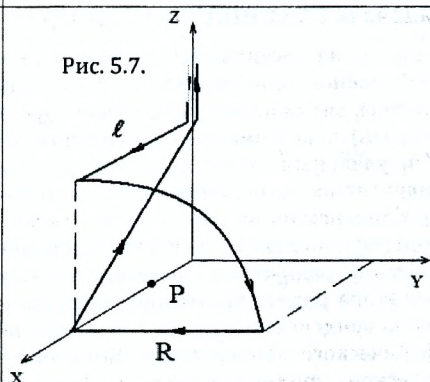
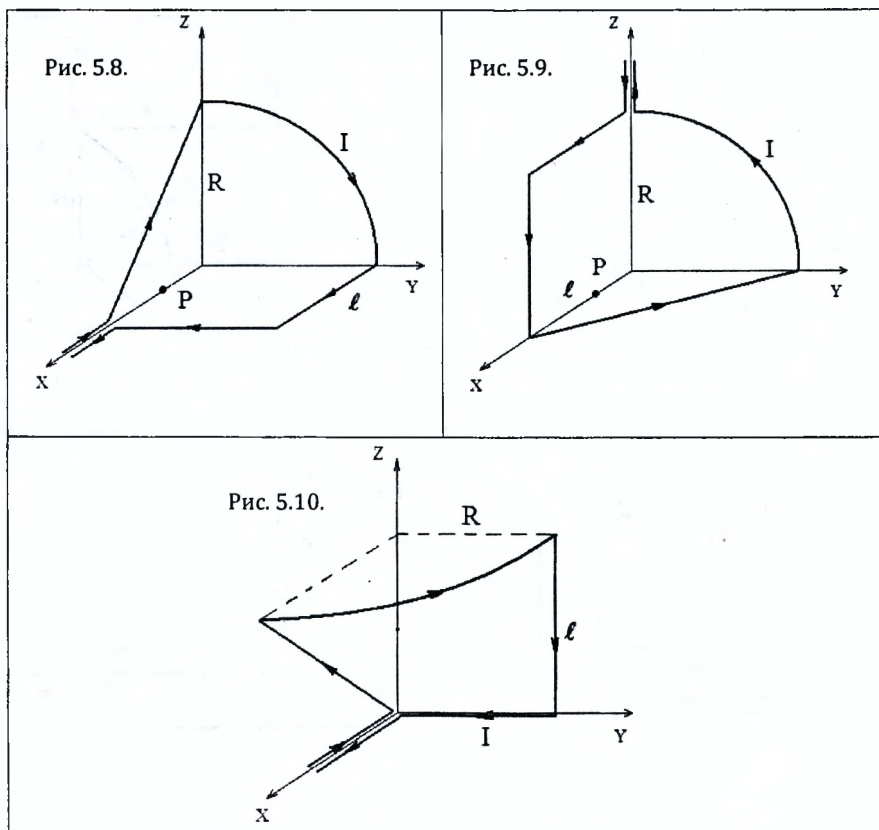


Рис. 5.7.





### Задача 6. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

В схемах на рисунках 6.1 катушка индуктивности  $L$ , представляет собой длинный соленоид с немагнитным сердечником длиной  $l$ ; обмотка соленоида однослойная, витки плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции можно пренебречь), общее число витков равно  $N$ . Обмотка сделана из металла плотностью  $\rho'$  и удельным сопротивлением  $\rho$ , масса обмотки равна  $m$ . Вторая катушка индуктивности является тороидом и имеет индуктивность  $L_2$  и сопротивление  $R_2$ . Конденсатор на схемах либо плоский, либо цилиндрический либо сферический (тип конденсатора указан в таблице). Плоский конденсатор имеет круглые пластины радиусом  $a$  с расстоянием между ними  $b$ . Для цилиндрического конденсатора радиус внутренней обкладки равен  $a$ , а разность радиусов равна  $b$ , длина конденсатора равна  $l$ . Аналогичный смысл имеют величины  $a$  и  $b$  для сферического конденсатора. Конденсатор заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Предполагается, что схема функционирует длительное время и при  $t = 0$  ключ  $K$  размыкают.



**Выполнить следующие задания:**

1. Найти индуктивность  $L_1$  соленоида и его сопротивление  $R_1$ .
2. Найти ёмкость конденсатора  $C$ .
3. Найти токи во всех ветвях до размыкания ключа и указать их направления. Найти также заряд конденсатора с указанием знаков зарядов обкладок.
4. Найти магнитную индукцию внутри соленоида, собственный магнитный поток, потокоцепление и магнитный момент соленоида. Найти также электрические смещения внутри конденсатора в любой выбранной вами точке.
5. Записать формулу, определяющую зависимость от времени заряда какой-нибудь (по вашему выбору) обкладки конденсатора после размыкания ключа  $K$  и зависимость от времени разности потенциалов между выбранной обкладкой и другой.
6. Написать формулу, определяющую зависимость от времени силы тока в цепи после размыкания ключа  $K$ , указав условно положительное направление тока.
7. Построить примерные графики зависимостей п. п. 5, 6, указывая характерные моменты времени (нули, максимумы, точки перегиба). Ограничиться интервалом времени, в течение которого соответствующие величины уменьшаются в 5 раз.
8. Написать формулу, выражающую зависимость от времени электрического смещения внутри конденсатора в любой выбранной вами точке.
9. Найти плотность тока смещения и ток смещения внутри конденсатора.
10. На рис. 6.2. показаны сечения тороида с немагнитным сердечником плоскостью, проходящей через ось симметрии. Найти геометрические характеристики тороида и характеристики катушки (удельное сопротивление проволоки, диаметр и т.д.), при которых обеспечиваются заданная индуктивность  $L_2$  и сопротивление  $R_2$ .

Численные значения выбрать из таблицы 6.

**Таблица 6**

№	$l, м$	$N \cdot 10^3$	$\rho' \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	$\rho \cdot 10^{-8}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$m, \text{ кг}$	$L_2, \text{ мГн}$	$R_2, \text{ Ом}$	$a, \text{ см}$	$b, \text{ мм}$	$\varepsilon$
0	0,60	1,00	8,1	3,0	0,9	1,0	50,0	10	0,80	2
1	0,70	1,10	8,5	4,0	1,0	1,2	70,0	14	0,60	2,2
2	0,80	1,20	8,9	5,0	1,10	1,4	90,0	18	0,90	2,4
3	0,90	1,30	7,4	6,0	1,20	1,6	110	15	0,40	2,6
4	1,0	1,40	7,8	7,0	1,30	1,8	130	19	0,85	2,8
5	1,1	1,50	8,0	8,0	1,35	1,9	140	11	0,95	2,9
6	0,65	1,60	8,2	9,0	1,25	1,7	120	17	0,30	2,7
7	0,95	1,70	8,4	10	1,15	1,5	100	20	1,0	2,5
8	0,85	1,80	8,6	11	1,05	1,3	80,0	16	0,50	2,3
9	0,75	1,90	7,6	12	0,95	1,1	60,0	12	0,70	2,1

Рисунки 6.1

Рис. 6.0

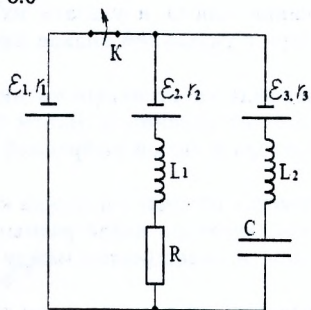


Рис. 6.1

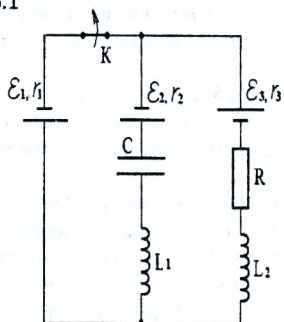


Рис. 6.2

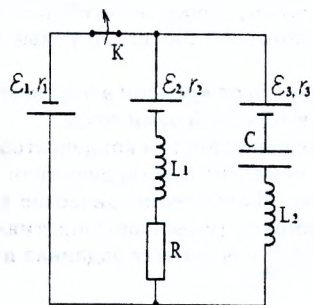


Рис. 6.3

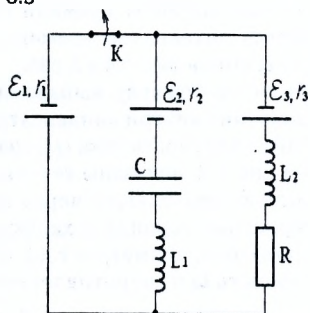


Рис. 6.4

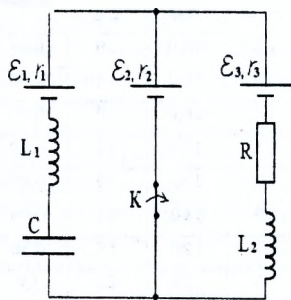


Рис. 6.5

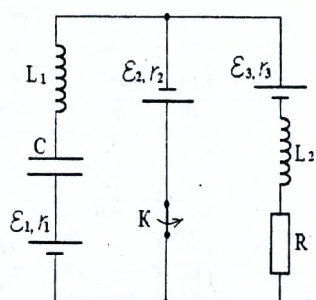


Рис. 6.6

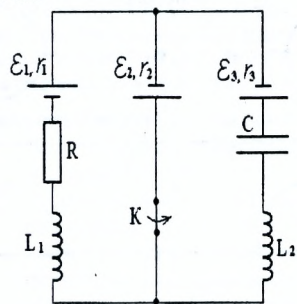


Рис. 6.7

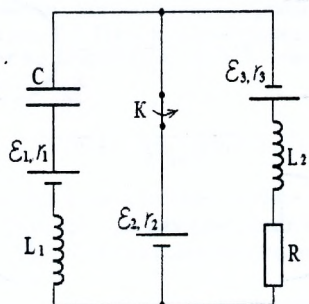


Рис. 6.8

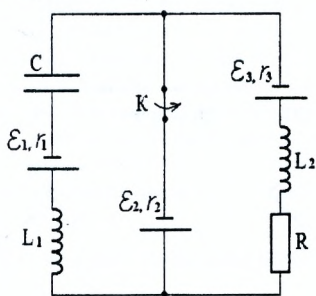


Рис. 6.9

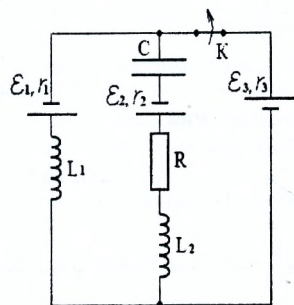
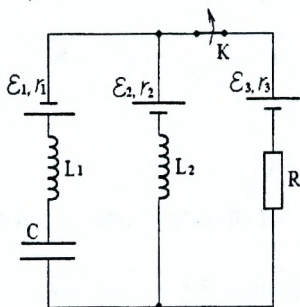
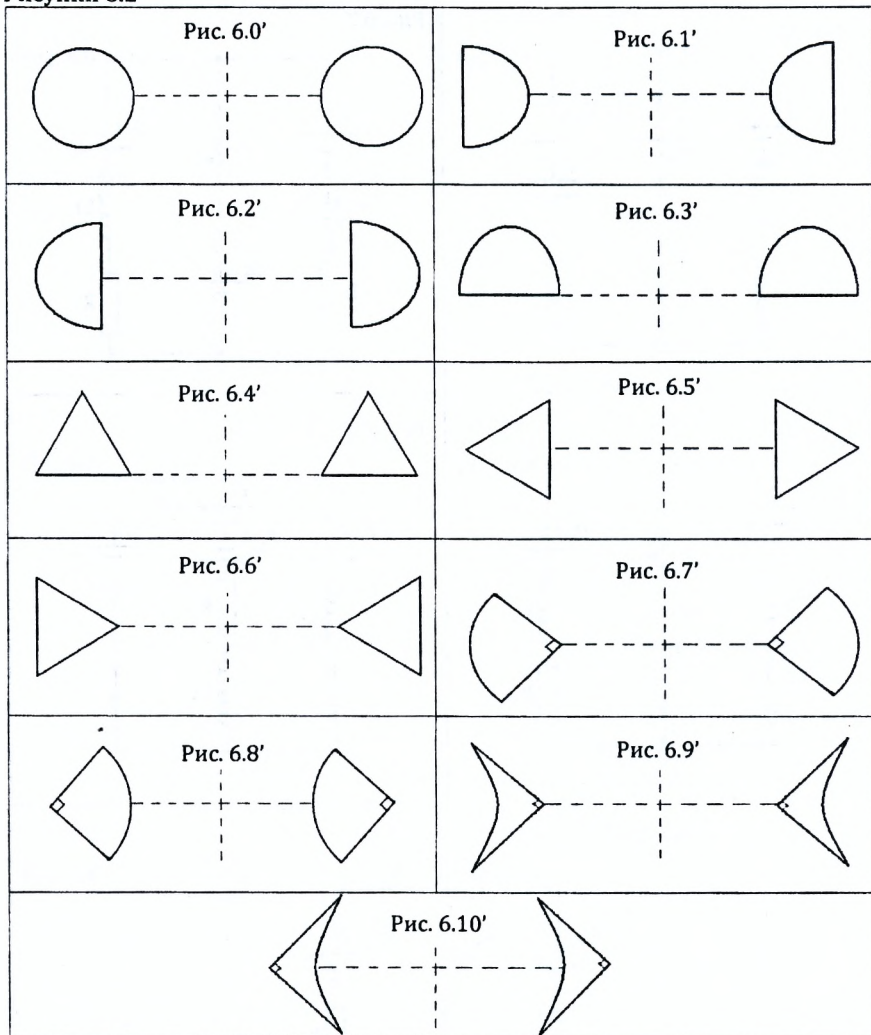


Рис. 6.10



**Рисунки 6.2**



**Задача 7. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ТОНКИЕ ЛИНЗЫ.**

**ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА**

В схемах на рисунках 7.0 – 7.9 цифрой 1 обозначена двояковыпуклая сферическая линза из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$  и радиусами ограничивающих сфер  $R_1$  и  $1,2R_1$ . Цифрой 2 обозначена аналогичная линза с радиусами сфер  $R_2$  и  $\frac{2}{3}R_2$ , цифрой 3 – двояковогнутая сферическая линза из того же стекла с радиуса-



ми сфер  $R_3$  и  $0,8 R_3$ , цифрой 4 – также двояковогнутая линза с радиусами сфер  $R_4$  и  $1,25 R_4$ . Цифрой 5 обозначена плоскопараллельная круглая пластинка с тем же показателем преломления и толщиной  $h$ . Диаметры всех элементов одинаковы и равны  $D$ , расстояния между ними показаны на рис. 7.0. На оси симметрии системы находится точечный источник  $S$ , расстояние от которого до крайнего левого элемента системы равно  $b$  и также показано на рис. 7.0.

**Выполнить следующие задания:**

1. Найти фокусные расстояния и оптические силы линз вашей оптической системы.
2. Найти положение изображения источника в оптической системе, указав расстояние от крайнего правого элемента до изображения, тип изображения (действительное, мнимое) и схематично показать его положение. Использовать параксиальное приближение.
3. На расстоянии  $l$  от крайнего правого элемента находится перпендикулярный оси симметрии системы экран. Найти диаметр светлого пятна на экране.
4. Если на месте точечного источника находится небольшой предмет, то каково будет поперечное и продольное увеличение, даваемое системой? Изображение предмета, перпендикулярного оси, будет прямым или перевернутым?
5. Если предмет расположен под углом  $\alpha$  к оси симметрии, то под каким углом  $\beta$  будет расположено его изображение?
6. В системе оставляют одну собирающую линзу (если их в системе две, то любую по вашему выбору). Из этой линзы делают билинзу путем распиливания по диаметру на две половины и:
  - 6а) раздвигание частей симметрично относительно оси на расстояние  $\epsilon$  друг от друга;
  - 6б) сошлифовывание на каждой из половин слоя стекла шириной  $\frac{\epsilon}{2}$  и последующего склеивания половин.

Вариант изготовления билинзы указан в таблице. Источник монохроматического света с длиной  $\lambda$  находится на оси симметрии билинзы. Задавая самостоятельно расстояние от источника до билинзы и расстояние от билинзы до экрана, перпендикулярного оси симметрии, найти ширину интерференционных полос на экране.

7. Найти количество полос на экране, определяемое геометрией системы.
8. В излучении источника с постоянной спектральной плотностью энергии представлены все длины волн в интервале  $(\lambda, \lambda + \Delta \lambda)$ . Найти реально наблюдаемое на экране количество полос.
9. Копию исходной собирающей линзы из п.б разрезают перпендикулярно главной оптической оси на две части и одну часть кладут на:
  - 9а) другую часть выпуклостями друг к другу;
  - 9б) на плоскую пластинку выпуклой частью (часть любая);
  - 9в) на рассеивающую линзу выпуклой частью вниз.

Во всех случаях в месте контакта образуется воздушная прослойка толщиной  $\Delta$ . Система освещается сверху светом с длиной волны  $\lambda$ , падающим параллельно главной оптической оси, и наблюдение ведется в отраженном свете. Найти радиусы всех темных колец.

10. Каково будет число наблюдаемых тёмных колец, если источник немонохроматичен и в его излучении присутствует свет из спектрального интервала  $(\lambda, \lambda + \Delta \lambda)$ ?

Численные значения выбрать из таблицы 7

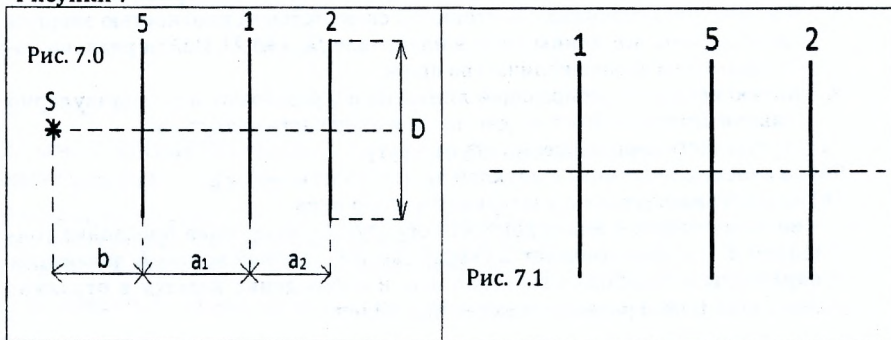
Таблица 7

№	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$R_3, \text{ м}$	$R_4, \text{ м}$	$h, \text{ см}$	$D, \text{ мм}$	$a_1, \text{ см}$	$a_2, \text{ см}$	$b, \text{ см}$
0	0,10	0,15	0,40	0,60	3,5	2,0	5,0	5,5	20
1	0,20	0,25	0,45	0,65	4,0	2,5	5,5	4,5	30
2	0,30	0,35	0,55	0,75	4,5	3,0	6,0	6,5	40
3	0,40	0,45	0,60	0,80	5,0	3,5	7,0	5,0	50
4	0,50	0,55	0,65	0,70	5,5	4,5	8,0	7,5	25
5	0,60	0,45	0,70	0,75	6,0	5,5	9,0	9,5	35
6	0,55	0,35	0,80	0,85	6,5	6,5	10,0	8,5	45
7	0,45	0,25	0,50	0,55	7,0	6,0	8,5	6,5	55
8	0,35	0,60	0,75	0,80	8,0	5,0	7,5	3,5	60
9	0,25	0,55	0,65	0,85	8,5	4,0	6,5	4,5	65

Продолжение таблицы 7

№	$\alpha$	Тип билинзы	$\epsilon, \text{ мм}$	$\lambda, \text{ нм}$	$\Delta\lambda, \text{ нм}$	$\Delta, \text{ нм}$	к.п.9
0	30°	6а	0,10	440	100	400	9а
1	45°	6б	0,15	460	110	500	9б
2	60°	6а	0,20	500	90	750	9в
3	120°	6б	0,30	480	115	850	9а
4	135°	6а	0,40	520	105	450	9б
5	150°	6б	0,32	560	130	550	9в
6	45°	6а	0,24	550	135	900	9а
7	30°	6б	0,18	450	140	800	9б
8	60°	6а	0,35	470	125	700	9в
9	120°	6б	0,25	490	95	600	9а

Рисунки 7



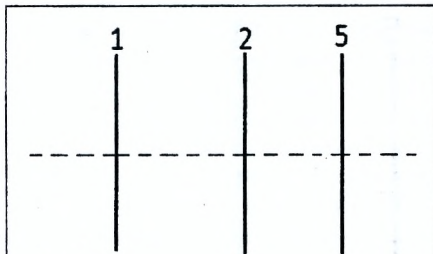


Рис. 7.2

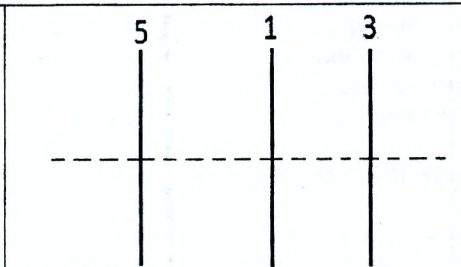


Рис. 7.3

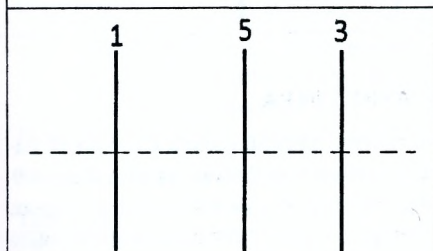


Рис. 7.4

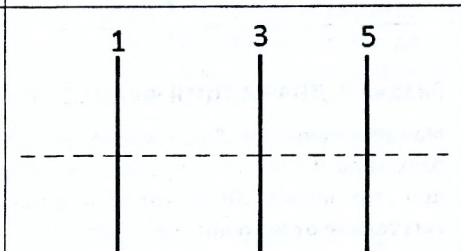


Рис. 7.5

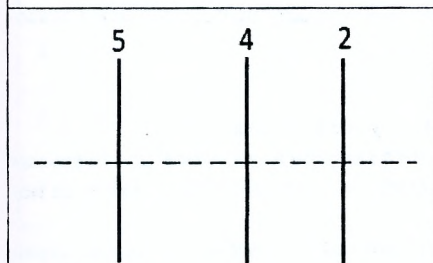


Рис. 7.6

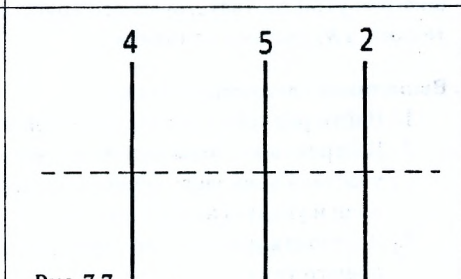


Рис. 7.7

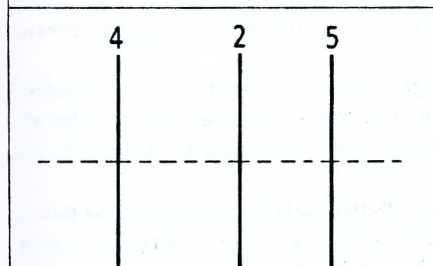


Рис. 7.8

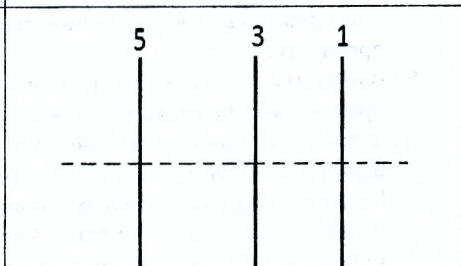


Рис. 7.9

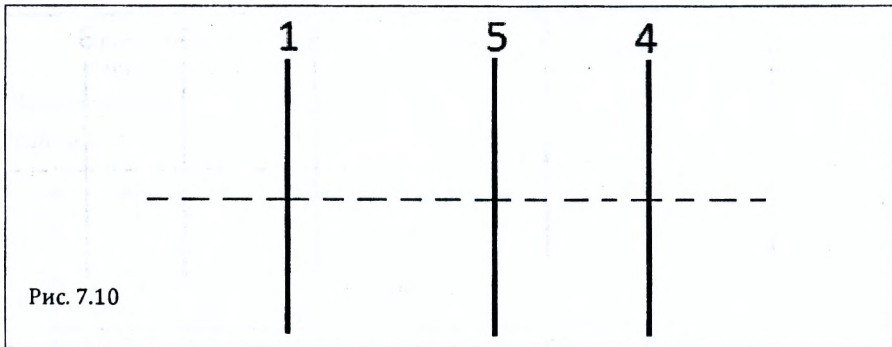


Рис. 7.10

### Задача 8. ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ И ФРАУНГОФЕРА

Между источником  $S$  монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  и точкой наблюдения  $P$  находится препятствие, форма которого показана на рис. 8.0 – 8.9, при этом прямая  $SP$  проходит через центр системы окружностей на рисунках. Расстояние от источника до препятствия равно  $a$ , расстояние от препятствия до точки наблюдения равно  $b$ . Радиусы окружностей  $R_1, R_2, R_3$  на рисунках заданы в виде  $(N+N_1)$  зон, т.е. выражены в количестве зон Френеля для точки  $P$ , уместающихся внутри соответствующего круга. Здесь  $N$  – целое число, которое вы задаёте сами, а  $N_1$  указано в таблице.

**Выполнить следующие задания:**

1. Найти радиусы всех окружностей на рисунке в метрах.
2. Построить векторы амплитуд светового вектора для точки  $P$  от отдельных участков волнового фронта, проходящего через препятствие, найти их модули и указать направление.
3. Построить и найти амплитуду светового вектора в точке  $P$  при наличии препятствия.
4. Найти отношение интенсивности света в точке наблюдения  $P$  при наличии препятствия к интенсивности  $I_0$  света в той же точке в отсутствие препятствия.
5. В открытую часть, находящуюся внутри первой окружности, вставляется прозрачная пластинка толщиной  $h$  с показателем преломления  $n$ . Пренебрегая изменением интенсивности света при прохождении пластинки, выполнить задание 4 для этого случая.
6. На систему из двух длинных прямоугольных щелей, показанных на рис. 8, падает нормально свет с длиной волны  $\lambda$ . Пусть  $I_0'$  – интенсивность света, наблюдаемого в направлении первоначального распространения в отсутствие среднего непрозрачного промежутка шириной  $b_1$ . Найти отношение



интенсивности света, наблюдаемого в направлении, определяемом углом  $\varphi$ , к  $I_0'$ . При  $\varphi < 0$  угол откладывается от вертикали по часовой стрелке.

7. Пусть  $I_0''$  – интенсивность света, наблюдаемого в направлении первоначального распространения при наличии среднего непрозрачного промежутка шириной  $b$ . Найти отношение интенсивности света, наблюдаемого в этом случае в направлении угла  $\varphi$ , к  $I_0''$ .
8. В одну из щелей (по вашему выбору) вставляется пластинка из п. 5. Найти те же отношения, что и в п.п. 6 - 7 в этом случае.
9. На дифракционную решетку, содержащую  $n$  штрихов на  $m$  мм длины падает нормально свет с длиной волны  $\lambda$ . Расстояние от решётки до экрана равно  $L$ . Найти общее число наблюдаемых максимумов и расстояние от центрального максимума до последнего наблюдаемого. Пусть на решётку падает белый свет с длинами волн в интервале (450+700) нм. Найти длину спектра второго порядка. Начиная со спектров каких порядков наблюдается их перекрытие?

Выполнить задание п. 9 при падении света под углом  $\alpha$  к нормали к решетке.

Численные значения выбрать из таблицы 8

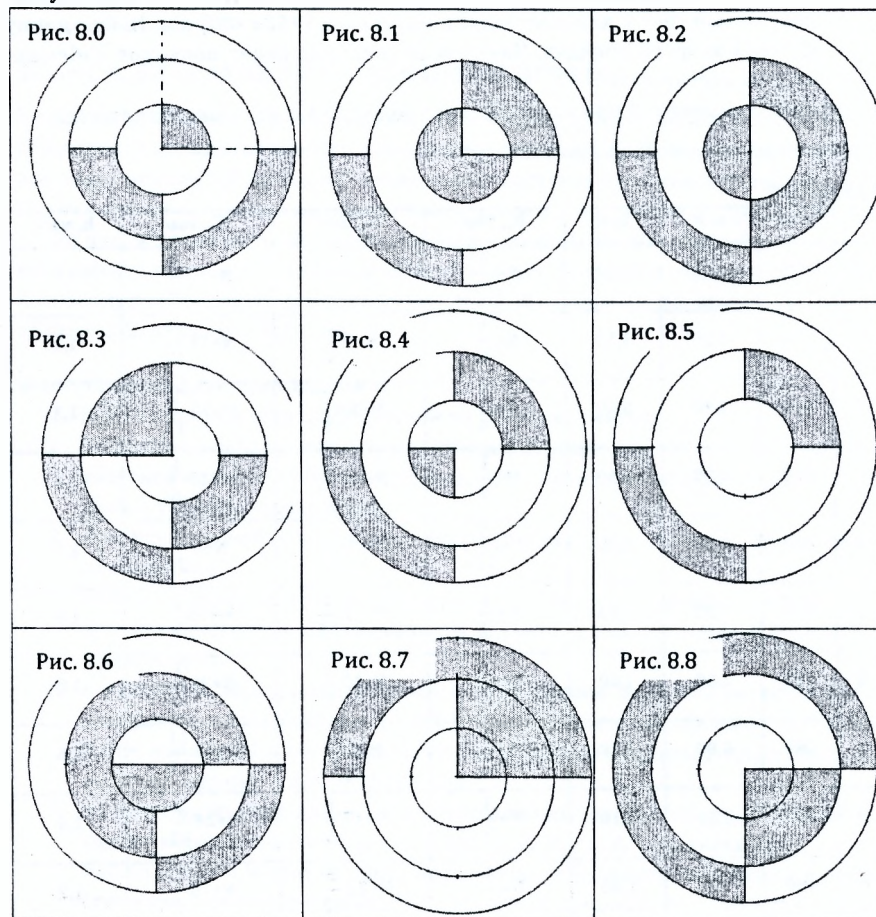
Таблица 8

№	$\lambda$ , нм	$a$ , м	$b$ , м	$R_1$ , зон	$R_2$ , зон	$R_3$ , зон	$h$ , мкм
0	450	1,10	1,30	$N + \frac{1}{12}$	$N + 7\frac{5}{6}$	$N + 12\frac{3}{4}$	1,0
1	500	1,20	1,50	$N + \frac{1}{6}$	$N + 9\frac{3}{4}$	$N + 14\frac{11}{12}$	1,1
2	550	1,40	0,80	$N + \frac{1}{4}$	$N + 10\frac{2}{3}$	$N + 15\frac{7}{12}$	1,3
3	600	0,90	1,60	$N + \frac{1}{3}$	$N + 12\frac{5}{12}$	$N + 17\frac{1}{6}$	1,5
4	650	1,00	1,30	$N + \frac{5}{12}$	$N + 5\frac{1}{12}$	$N + 8\frac{1}{3}$	1,7
5	620	1,30	0,90	$N + \frac{1}{2}$	$N + 11\frac{7}{12}$	$N + 16\frac{2}{3}$	1,9
6	680	1,60	1,00	$N + \frac{7}{12}$	$N + 15\frac{2}{3}$	$N + 20\frac{1}{6}$	1,8
7	580	0,80	1,20	$N + \frac{2}{3}$	$N + 5\frac{3}{4}$	$N + 18\frac{11}{12}$	1,6
8	520	1,50	1,10	$N + \frac{3}{4}$	$N + 17\frac{1}{6}$	$N + 24\frac{7}{12}$	1,4
9	480	1,30	1,40	$N + \frac{5}{6}$	$N + 22\frac{5}{12}$	$N + 28\frac{1}{3}$	1,2

Продолжение таблицы 8

№	N	φ, град	a <sub>1</sub> , мкм	b <sub>1</sub> , мкм	c <sub>1</sub> , мкм	n, мм <sup>-1</sup>	L, м	α, град
0	1,80	2,0	5,0	6,0	7,0	200	0,50	10
1	1,90	4,0	8,0	10,0	9,0	220	0,70	30
2	1,75	6,0	10,0	11,0	12,0	260	0,90	45
3	1,95	8,0	7,0	8,0	10,0	300	1,1	50
4	1,70	10	6,0	5,0	9,0	340	1,3	25
5	1,75	1	9,0	10,0	8,0	400	1,4	35
6	1,60	9,0	5,0	11,0	12,0	360	1,2	55
7	1,55	7,0	6,0	12,0	11,0	320	1,0	60
8	1,85	5,0	7,0	14,0	8,0	280	0,80	40
9	1,50	3,0	8,0	5,0	12,0	240	0,60	20

Рисунки 8



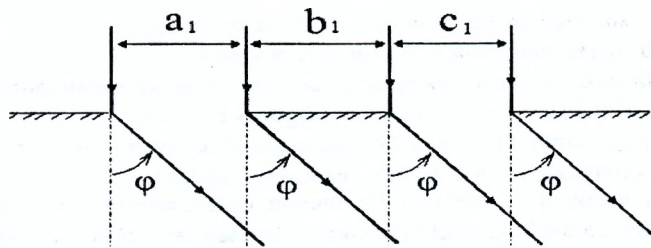
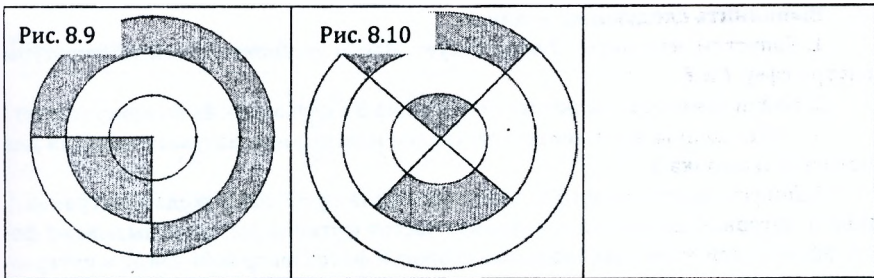


Рисунок 8'

**Задача 9. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ТЕПЛОВЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА**

На рис. 9.0 – 9.9 показаны две находящиеся в вакууме зеркальные сферы **1** и **2** радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , расстояние между центрами которых равно  $r_{12}$ . Кроме них, имеется ещё маленький шарик **3** диаметром  $d_3$ , который является абсолютно серым телом с коэффициентом поглощения  $a_3$ . Углы  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{13}$  студент задаёт самостоятельно в соответствии с радиусом и указаниями к нему. В сферах сделаны маленькие отверстия  $S_1$  и  $S_2$  диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  так, что они находятся в пределах видимости друг друга и шарика **3**. Как этого добиться, показано на рис. 9. Проводятся внешние касательные к окружностям в плоскости  $XY$  (прямые  $AB$  и  $CD$ , перпендикулярные соответствующим радиусам окружностей). Затем из точки **3** проводятся касательные  $ZE$  и  $ZF$  к тем же окружностям, которые касаются окружностей в ближних друг к другу частях. Участки окружностей  $AE$  и  $BF$  находятся в пределах видимости друг друга и шарика **3**. Отверстие  $S_1$  выбирается в любом месте участка  $AE$  (его положение задается углом  $\varphi_1$ ), а отверстие  $S_2$  в любом месте участка  $BF$  (его положение задается углом  $\varphi_2$ ). *Для того, чтобы не ошибиться с заданием углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , сделайте свой рисунок в масштабе, используя указанные в таблице размеры и заданные вами углы  $\varphi_{12}$ ,  $\varphi_{13}$ .*

В сфере **1** внутри находится резистор сопротивлением  $R$ , подсоединённый к источнику с электродвижущей силой  $\epsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ , находящимся далеко снаружи (на рисунке эти элементы не показаны; сопротивлением проводов пренебречь).



**Выполнить следующие задания:**

1. Допустим, что шарик **З** отсутствует. Найти установившиеся температуры внутри сфер **1** и **2**.

2. Найти температуры полостей и шарика **З** в случае, когда он присутствует.

3. Найти длины волн, соответствующие максимумам излучательностей для полостей и шарика **З**.

4. Допустим, что шарик **З** сделан из металла с работой выхода электронов  $A$ . Найти интервал длин волн и интервал частот фотонов, которые вызывают фотоэффект и при этом максимальные скорости фотоэлектронов лежат в интервале  $(V_1, V_1 + \Delta V)$ .

5. Какое количество фотонов, вылетающих из отверстия  $S_1$  и достигающих шарика **З**, обладает свойством, описанным в пункте 4.

6. Какой максимальный импульс передается шарiku таким фотоном, для которого максимальная скорость фотоэлектронов равна  $V_1$ ?

7. Найти суммарную силу давления на шарик **З** излучения отверстий  $S_1$  и  $S_2$ .

8. Найти силу давления излучения на каждую из сфер.

9. Пусть шарик **З** отсутствует. На прямой, соединяющей отверстия  $S_1$  и  $S_2$  перпендикулярно этой прямой установлен несовершенный поляризатор с коэффициентами пропускания по интенсивности в главных плоскостях  $\alpha_{||}$  и  $\alpha_{\perp}$ . Считая, что энергия, поглощаемая в поляризаторе, отводится из системы, найти установившиеся температуры полостей. Какова будет интенсивность и степень поляризации света на выходе из поляризатора?

10. Считая, что поглощаемая в поляризаторе энергия из системы не отводится и принимая поляризатор за серое тело с коэффициентом поглощения  $a_n$ , выполнить задание п. 9.

*Численные значения выбрать из таблицы 9*

**Таблица 9**

№	$R_1$ , см	$R_2$ , см	$r_{12}$ , см	$r_{13}$ , см	$d_3$ , мм	$a_3$	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$R$ , Ом	$r$ , Ом	$\epsilon$ , В
0	10	8,0	40	70	0,5	0,30	1,0	0,80	4,0	1,0	10,0
1	12	10	55	80	1,0	0,70	1,2	0,60	5,5	1,5	11,0
2	14	12	60	75	2,0	0,60	1,4	0,70	1,0	3,0	12,0
3	16	10	65	70	0,75	0,45	1,3	1,0	1,5	0,5	13,0
4	15	11	50	40	0,90	0,85	1,8	2,0	0,4	0,6	14,0
5	17	12	65	55	1,80	0,65	1,1	1,4	0,8	1,2	14,5
6	18	14	70	40	0,80	0,55	1,5	1,2	2,7	0,8	13,5
7	19	15	75	45	1,90	0,40	1,6	1,8	8,5	4,0	12,5
8	20	16	80	50	1,75	0,80	1,7	1,9	8,0	3,5	11,5
9	22	18	90	70	1,5	0,90	2,0	0,80	8,5	2,0	10,5



Продолжение таблицы 9

№	A, эВ	$V_1 \cdot 10^{-6}$ , м/с	$\Delta V \cdot 10^{-6}$ , м/с	$\alpha_{II}$	$\alpha_{\perp}$	$a_{II}$
0	1,00	1,00	1000	0,9025	0,01	0,10
1	1,20	1,20	990	0,8100	0,04	0,20
2	1,15	1,15	1100	0,7225	0,09	0,30
3	1,40	1,35	1200	0,4900	0,02	0,40
4	4,00	1,45	1400	0,4225	0,03	0,50
5	5,00	1,50	1600	0,3600	0,05	0,60
6	4,50	1,40	1800	0,3025	0,06	0,45
7	1,35	1,25	1700	0,9409	0,07	0,35
8	1,25	1,30	1500	0,7921	0,10	0,25
9	1,10	1,10	1300	0,6084	0,08	0,15

Рисунки 9

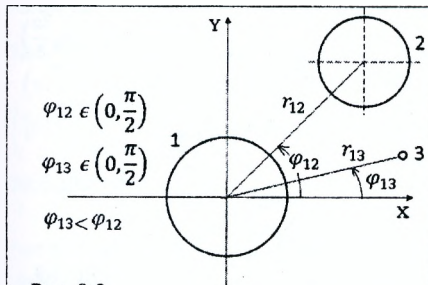


Рис. 9.0

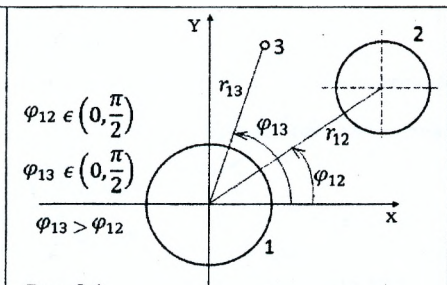


Рис. 9.1

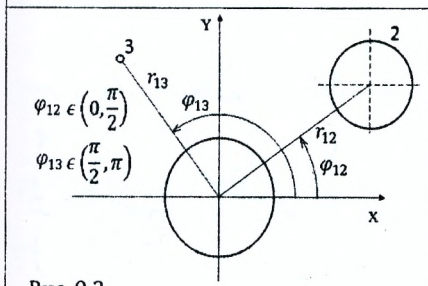


Рис. 9.2

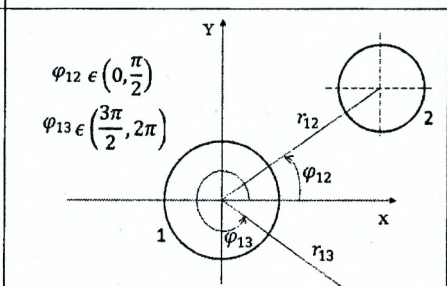
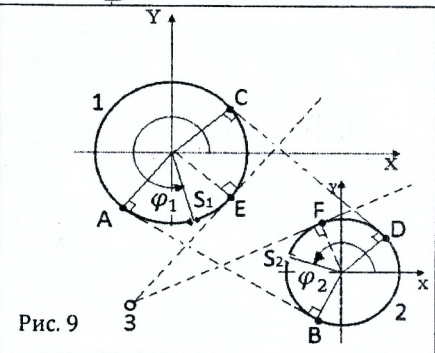
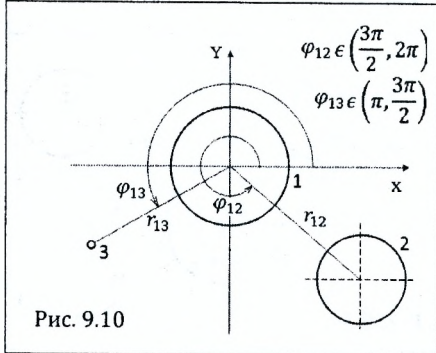
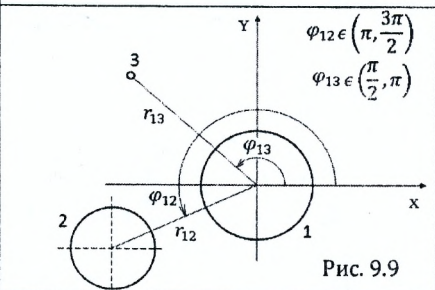
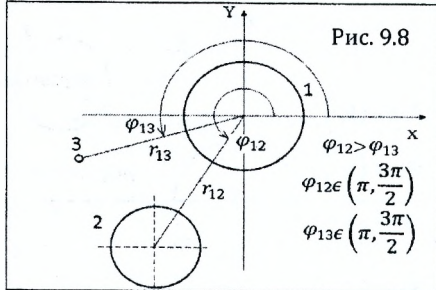
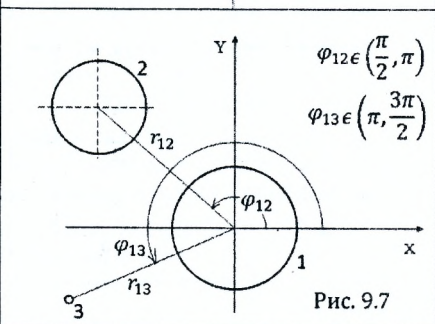
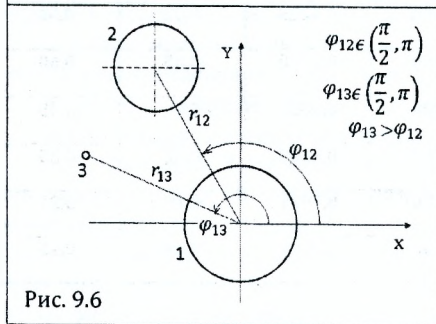
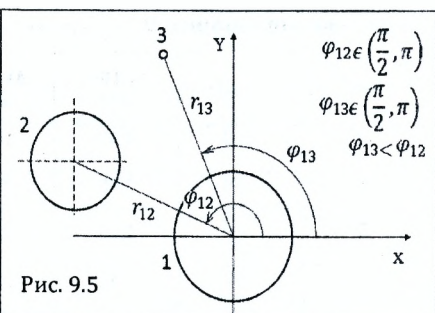
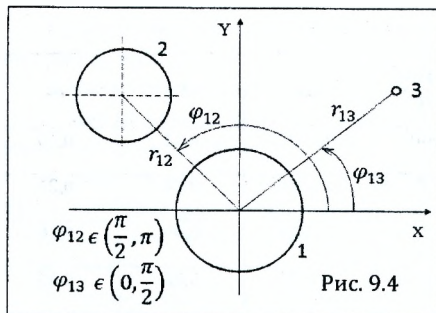


Рис. 9.3



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Молекулярная физика и термодинамика. Основные понятия и формулы

Все вещества состоят из некоторых структурных единиц, например, молекул. Здесь имеется в виду, что в некотором диапазоне внешних условий (температуры, давления) структурные единицы при взаимодействиях между собой и с внешней средой остаются неизменными. Например, при не слишком высоких температурах вода состоит из молекул  $H_2O$ , но с повышением температуры молекула воды диссоциирует, и тогда мы говорим, что вещество состоит из атомов (молекул) водорода и кислорода, а при дальнейшем повышении температуры атомы ионизируются, и вещество состоит из ионов и электронов и т.д. Термодинамика и статистическая физика изучают поведение макроскопических объемов вещества, содержащих большое количество структурных единиц. Наряду с механическими единицами в международной системе единиц (СИ) в этом разделе вводится новая единица – единица количества вещества: *моль*. Один *моль* любого вещества содержит  $6,02 \cdot 10^{23}$  структурных единиц. Это число называется числом Авогадро:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ . Основным объектом изучения будет далее идеальный газ, для которого структурными единицами мы будем считать молекулы. Необходимо отметить, что молекула может состоять из одного атома, например для инертных газов *He, Ne, Ar, Kr, Xe*.

Количества вещества в некоторой системе определяется соотношением

$$\nu = \frac{N}{N_A},$$

где  $N$  – число структурных единиц в системе.

Масса моля вещества называется молярной массой и обозначается  $M$  ( $[M] = \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ). Для химически однородного вещества она может быть вычислена по формуле

$$M = 10^{-3} M_r,$$

где  $M_r$  – относительная молекулярная масса в *а. е. м.*, которая находится с помощью периодической системы элементов Д. И. Менделеева по известной химической формуле соединения. Масса молекулы в *кг* находится тогда из соотношения

$$m_{\text{мол}} = \frac{M}{N_A}.$$

Тогда количество вещества может быть найдено также по следующей формуле

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{\rho V}{M},$$

где  $m$  – масса вещества;  $\rho$  – плотность;  $V$  – объём.

Количество структурных единиц (молекул)

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A = \frac{\rho V}{M} N_A.$$

Концентрация молекул  $n$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{M} N_A, [n] = \text{м}^{-3}.$$

Удельный объём (объём, приходящийся на одну молекулу)

$$v = \frac{N}{V} = \frac{1}{n} = \frac{M}{\rho N_A}, [v] = \text{м}^3.$$

В твёрдых телах и жидкостях молекулы располагаются достаточно плотно (расстояние между ними порядка размеров самих молекул), поэтому если мысленно заключить каждую молекулу в куб с размером  $a$ , то с другой стороны  $V = a^3$ , так что величина  $a = \sqrt[3]{v}$  может служить оценкой размера молекулы

$$a = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}.$$

Для газов ситуация иная: расстояние между молекулами в десятки раз превышает размеры самих молекул, поэтому величина  $a$  является оценкой среднего расстояния между молекулами.

Для смеси веществ количество вещества определяется формулой

$$v = v_1 + v_2 + \dots = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots$$

Кажущаяся молярная масса смеси

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \dots}{v} = \frac{m_1 + m_2 + \dots}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots}.$$

Величины  $\kappa_i = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + \dots} = \frac{m_i}{m_{\text{см}}}$ , где  $m_{\text{см}}$  - масса смеси, называется массовыми долями компонентов ( $\sum \kappa_i = 1$ ). Тогда

$$M = \frac{1}{\frac{\kappa_1}{M_1} + \frac{\kappa_2}{M_2} + \dots}.$$

С макроскопической точки зрения состояние идеального газа описывается с помощью пяти величин ( $p, V, T, m, M$ ), называемых термодинамическими (макроскопическими) параметрами. Здесь  $p$  - давление газа ( $[p] = \text{Па}$ ),  $V$  - объём сосуда, в котором находится газ ( $[V] = \text{м}^3$ ),  $T$  - термодинамическая температура ( $[T] = \text{К}$ ):  $T(\text{К}) = t^\circ\text{C} + 273,15$ . Параметры  $p, T, M$  называются экстенсивными, ибо они одинаковы в состоянии равновесия во всех частях системы, а параметры  $V, m$  - интенсивными, ибо для всей системы они равны сумме их для подсистем.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT,$$

где  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  - универсальная газовая постоянная.



Его можно записать также в виде

$$pV = NkT,$$

где  $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К - постоянная Больцмана. Разделив обе части на объем, получим уравнение

$$p = nkT.$$

Последние два уравнения иногда называются основными уравнениями молекулярно-кинетической теории идеального газа. Если термодинамические параметры не изменяются с течением времени, то с макроскопической точки зрения с газом ничего не происходит, хотя на молекулярном уровне молекулы все время движутся, меняются их положения, векторы скоростей и т.д. Если происходит изменение термодинамических параметров, то говорят, что с газом происходит процесс. Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что невозможны процессы, в которых изменяется один параметр, ибо он может быть выражен через четыре остальные, и если они постоянны, то пятый тоже изменяться не будет. Таким образом, в простейших процессах изменяется два параметра из пяти. Всего таких простейших процессов 10. Традиционно рассматриваются лишь три из этих процессов, в которых масса газа и молярная масса не изменяются, они называются изопроцессами, ибо кроме  $m$ ,  $M$  в этих процессах постоянен ещё один параметр.

а) *изотермический*, в котором  $p$ ,  $V$  - изменяются, а  $T$  - постоянна. Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что при этом

$$pV = \frac{m}{M} RT = C_1, \text{ где } C_1 - \text{ постоянная величина.}$$

Для состояний газа 1 ( $p_1, V_1$ ) и 2 ( $p_2, V_2$ ) имеем

$$p_1V_1 = p_2V_2.$$

Эти соотношения выражают закон Бойля-Мариотта.

Разумеется, можно осуществить бесконечное множество изотермических процессов, выбрав для их проведения ту или иную температуру. В конфигурационном пространстве термодинамических параметров ( $p, V, T$ ), которые могут изменяться при неизменных  $m$  и  $M$ , уравнение состояния определяет поверхность с уравнением  $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R = B$ , где  $B$  - некоторая постоянная. График изотермического процесса представляет собой кривую, лежащую на этой поверхности. Проекции графиков процессов на координатные плоскости ( $p, V$ ), ( $p, T$ ), ( $V, T$ ) называются термодинамическими диаграммами. Диаграммы для изотермических процессов при двух температурах  $T_2 > T_1$  для одной и той же массы газа показаны на рис. 1.

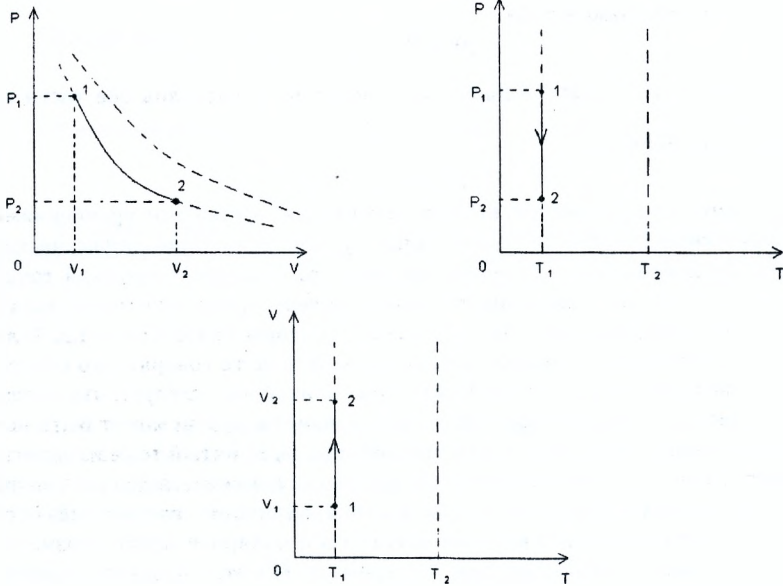


Рисунок 1

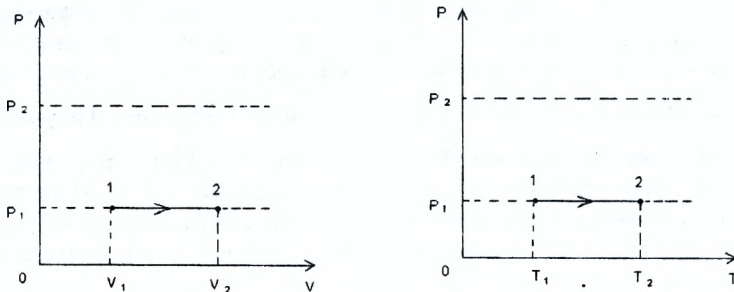
б) *изобарный процесс*, в котором  $V, T$  – изменяются, а  $p$  – постоянно. Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что при этом

$$\frac{V}{T} = \frac{m R}{M p} = C_2, \text{ где } C_2 - \text{ постоянная величина.}$$

Для двух состояний 1 ( $V_1, T_1$ ) и 2 ( $V_2, T_2$ ) имеем

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Эти соотношения выражают закон Гей-Люссака. Задавая различные  $p$ , можно осуществить множество изобарных процессов. Термодинамические диаграммы для двух различных давлений  $p_2 > p_1$  показаны на рис. 2.



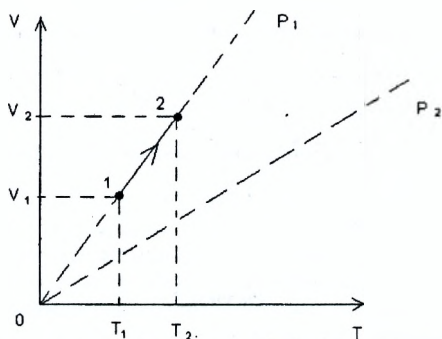


Рисунок 2

Здесь показан процесс изобарного нагрева при давлении  $p_1$  или, что то же самое, изобарного расширения. Обратный процесс  $2 \rightarrow 1$  – это изобарное охлаждение или изобарное сжатие.

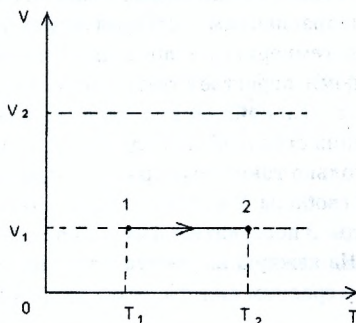
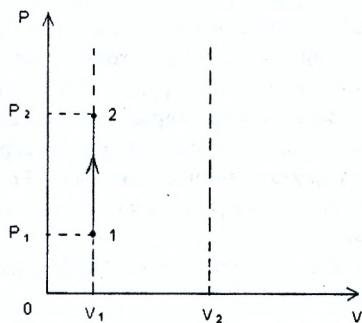
в) изохорный процесс, в котором  $p, T$  – изменяются, а  $V$  – постоянен. Из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что при этом

$$\frac{p}{T} = \frac{m R}{M T} = C_3, C_3 - \text{некоторая постоянная.}$$

Для двух состояний 1 ( $p_1, T_1$ ) и 2 ( $p_2, T_2$ ) имеем

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Эти соотношения выражают закон Шарля. Задавая различные значения объема, можно осуществить множество изохорных процессов с данной массой газа.



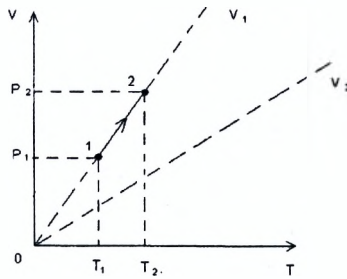


Рисунок 3

Термодинамические диаграммы для двух различных значений объёма  $V_2 > V_1$  показаны на рис. 3. Здесь показан процесс изохорного нагрева при объёме  $V_1$ . Если в сосуде находится несколько газов, то давление смеси газов на стенки сосуда определяется законом Дальтона:

$$P_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots,$$

где  $p_i$  – парциальное давление  $i$ -го компонента (газа), т.е. то давление, которое оказывал бы на стенки сосуда  $i$ -й газ в отсутствие остальных.

*Число степеней свободы* молекул газа называется количество величин, которые необходимо задать, чтобы однозначно определить положение молекулы. Молекулы одноатомных газов всегда имеют  $i = 3$  степени свободы, и все они поступательные. Молекулы двухатомных газов при обычных (не слишком высоких и не слишком низких) температурах имеют  $i = 5$  степеней свободы (3 поступательных и 2 вращательных). При низких температурах вращательные степени свободы отсутствуют (образно говоря, «вымерзают» или не возбуждаются), и у молекул остаётся три поступательных степени свободы. При высоких температурах возбуждается так называемая колебательная степень свободы. Моделью двухатомной молекулы при обычных температурах является жёсткая гантель (две частицы, соединённые жёсткой связью), центр которой может двигаться по всем направлениям и которая может вращаться относительно этого центра. При низких температурах вращение отсутствует, а при высоких расстояние между частицами перестаёт быть постоянным – они колеблются друг относительно друга. В дальнейшем эти типично квантовые эффекты «вымерзания» или возбуждения степеней свободы рассматриваться не будут, т.е. мы будем рассматривать только такие температуры, при которых у двухатомной молекулы  $i = 5$  степеней свободы. У молекул трехатомных газов при тех же условиях  $i = 6$  степеней свободы: 3 поступательных и 3 вращательных.

На каждую из поступательных и вращательных степеней свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная

$$\langle E_k \rangle_1 = \frac{1}{2} kT.$$



Поэтому средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна

$$\langle E_k \rangle_{\text{пост}} = \frac{3}{2} kT,$$

а полная кинетическая энергия молекул газа равна

$$\langle E_k \rangle = \frac{i}{2} kT.$$

Скорость теплового движения каждой молекулы в результате соударений с другими молекулами и со стенками сосуда изменяется по величине и направлению, однако при неизменных внешних условиях количество молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $(v + dv)$ , не изменяется и равно

$$dN = Nf(v)dv,$$

$$\text{где } f(v) = \left( \frac{m_{\text{мол}}}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_{\text{мол}}v^2}{2kT}} 4\pi v^2 dv = \left( \frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{Mv^2}{2RT}} 4\pi v^2 dv.$$

Функция  $f(v)$  называется функцией распределения Максвелла молекул газа по скоростям. Если выполнено условие  $\Delta v \ll v$ , т.е. рассматривается число молекул, имеющих скорости в достаточно узком интервале от  $v_1$  до  $(v + \Delta v)$ , то можно приближенно полагать

$$\Delta N = Nf(v)\Delta v.$$

Различают три характерные скорости теплового движения: среднюю арифметическую или просто среднюю скорость

$$\langle v \rangle = \frac{\sum v_i}{N} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_{\text{мол}}}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8pV}{\pi m}},$$

среднюю квадратичную

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{мол}}}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3pV}{m}},$$

и наиболее вероятно, соответствующую максимуму функции  $f(v)$ , т.е. такую, что доля молекул, чьи скорости лежат в некотором узком интервале вблизи этой скорости, максимальна по сравнению с долей молекул, имеющих скорости в таком же узком интервале вблизи любой другой скорости:

$$v_e = \sqrt{\frac{2kT}{m_{\text{мол}}}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2pV}{m}}.$$

Влияние силы тяжести (или других консервативных сил) на концентрацию молекул газа описывает распределение Больцмана

$$n = n_0 e^{-\frac{E_n}{kT}} = n_0 e^{-\frac{m_{\text{мол}}gz}{kT}} = n_0 e^{-\frac{Mgz}{RT}},$$

где  $E_n = m_{\text{мол}}gz$  – потенциальная энергия молекулы,  $z$  – вертикальная координата,  $n$  – концентрация молекул,  $n_0$  – концентрация при  $z = 0$ .

Число ударов молекул об единицу поверхности стенки за единицу времени

$$\langle z_o \rangle = \frac{1}{4} n \langle v \rangle,$$

где  $n$  – концентрация.

Среднее число соударений молекулы за единицу времени с другими молекулами

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle,$$

где  $d$  – эффективный диаметр молекулы (задаётся в таблицах). Средняя длина свободного пробега молекул, т.е. среднее расстояние, проходимое молекулой от одного столкновения до другого

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}.$$

Внутренней энергией  $U$  системы называется сумма кинетических энергий молекул в системе отсчета, в которой центр инерции системы покоится, и потенциальных энергий взаимодействия молекул между собой. Во внутреннюю энергию, следовательно, не включаются кинетические энергии внутренних движений в молекуле и потенциальная энергия внутримолекулярных взаимодействий, а также потенциальная энергия взаимодействия молекул с внешними силовыми полями.

Для идеального газа потенциальная энергия взаимодействия молекул между собой считается равной нулю, поэтому внутренняя энергия идеального газа с учетом выражения для средней кинетической энергии молекулы равна

$$U = N \frac{i}{2} kT = \frac{m}{M} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT = \frac{i}{2} PV.$$

Существует два основных способа изменения внутренней энергии: работа и теплопередача. В курсе рассматриваются только так называемые равновесные процессы, при которых перепады экстенсивных параметров газа и окружающей среды бесконечно малы. Такие процессы будут бесконечно медленными (квазистатическими) и в этих процессах работа газа  $A$  и работа внешних сил  $A'$  отличаются знаком. Работа газа выражается в этом случае формулой

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV.$$

Здесь подразумевается, что зависимость  $p(V)$  известна. Работа совершается при макроскопическом перемещении стенок сосуда. На  $(pV)$ -диаграмме работа газа при расширении положительна и равна площади под графиком процесса, а при сжатии отрицательна и равна площади со знаком минус. Для циклических процессов, в которых цикл проходит по часовой стрелке, работа газа равна площади внутри цикла, а если цикл проходит против часовой стрелки, то площади со знаком минус. Если цикл имеет самопересечения, то работа равна алгебраической сумме соответствующих площадей (рис. 4).

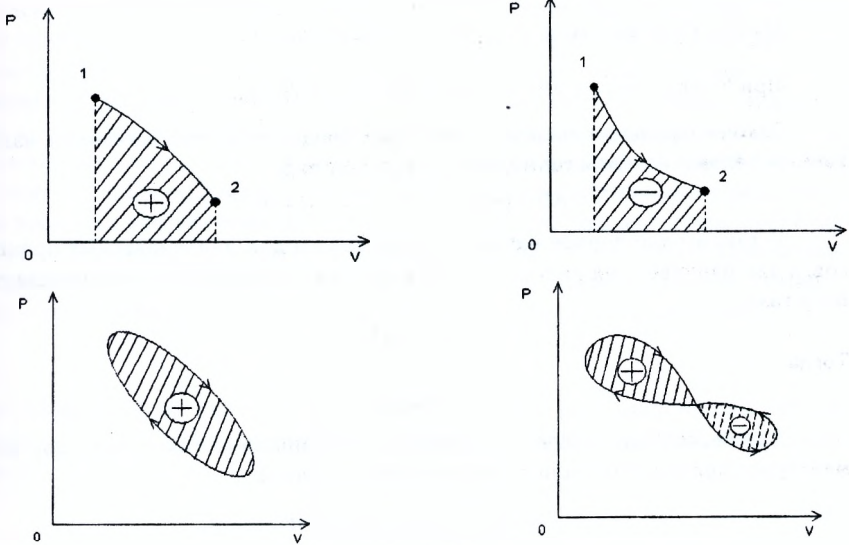


Рисунок 4

При  $T = const$  имеем  $P = \frac{m}{M} \frac{RT}{V}$  и работа  $A_T$  равна

$$A_T = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{M} RT \frac{dV}{V} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

В изохорном процессе работа, очевидно, равна нулю:  $A_V = 0$ . В изобарном процессе работа равна

$$A_P = P(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Под теплопередачей понимают способ изменения внутренней энергии, не сопровождающийся макроскопическим движением стенок. При этом способе вследствие отличия температур газа и стенок сосуда (которое подразумевается малым) происходит индивидуальный обмен энергиями между молекулами стенки и молекулами газа, т.е. процесс происходит на микроскопическом уровне. Под количеством теплоты  $Q$  понимают изменение внутренней энергии в результате теплопередачи. Количество теплоты  $Q$  – алгебраическая величина. При  $Q > 0$  газ тепло получает, при  $Q < 0$  – отдаёт.

Изменение внутренней энергии всегда можно записать в виде

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \nu \frac{i}{2} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1).$$

При  $T = const$  имеем  $\Delta U_T = 0$ , ибо  $T_2 = T_1$ .

При  $P = const$  имеем  $\Delta U_p = \frac{i}{2} p(V_2 - V_1)$ , где  $p = p_2 = p_1$ .

При  $V = const$  имеем  $\Delta U_v = \frac{i}{2} V(p_2 - p_1)$ , где  $V = V_2 = V_1$ .

Закон сохранения энергии в тепловых процессах в термодинамике, называемый первым началом термодинамики, имеет вид

$$\Delta U = Q + A' \text{ или } U_2 - U_1 = Q + A'.$$

В таком виде первое начало справедливо и для неравновесных процессов, а для равновесных вместо работы внешних сил  $A'$  обычно используют работу газа

$$A = -A'$$

Тогда

$$Q = \Delta U + A.$$

Для бесконечно малого изменения термодинамических параметров элементарное количество теплоты можно записать в виде

$$\delta Q = dU + \delta A = \nu \frac{i}{2} R dT + p dV.$$

Смысл различия в обозначениях  $\delta Q$ ,  $\delta A$  и  $\delta U$  состоит в том, что  $dU$  – это дифференциал функции  $U = \nu \frac{i}{2} RT$ , а  $\delta Q$  и  $\delta A$  не есть дифференциалы каких-либо функций. Ту же мысль можно выразить и иначе. Если известны  $(P, V, T, m, M)$ , то известна и внутренняя энергия газа, и она не зависит от того, какими были эти параметры раньше. Говорят, что внутренняя энергия – функция состояния. А вот вопрос о том, например, какую работу совершил газ, придя в состояние с заданными  $(p, V, T, m, M)$ , неправиломчен: работа зависит от того, какими были эти параметры в процессе перехода в это состояние. Аналогично дело обстоит и с  $Q$ . Поэтому говорят, что  $A$  и  $Q$  – функционалы процесса.

При  $T = const$  имеем  $\Delta U_T = 0$ , поэтому количество теплоты, полученное газом в изотермическом процессе, равно

$$Q_T = A_T = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

В изохорном процессе  $A_V = 0$ , поэтому

$$Q_V = \Delta U_V = \nu \frac{i}{2} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} V(p_2 - p_1).$$

В изобарном процессе

$$Q_P = \nu \frac{i}{2} R(T_2 - T_1) + p(V_2 - V_1) = \nu \frac{i+2}{2} R(T_2 - T_1) = \frac{i+2}{2} p(V_2 - V_1).$$



Наряду с изопроцессами важный практический и теоретический интерес представляет адиабатный процесс, при котором теплообмен с окружающей средой отсутствует:  $\delta Q = 0$  и  $Q = 0$ . Что касается практической реализации адиабатного процесса, то, вообще говоря, он требует тепловой изоляции газа от окружающей среды (говорят об адиабатной оболочке), т.е., образно говоря, сосуд с газом в этом случае представляет собой термос, давление в котором можно изменить. Практически, однако, процессы теплообмена с окружающей средой – это относительно медленные процессы, а, например, процессы выравнивания давления – это процессы, протекающие значительно быстрее, так что, например, процессы сжатия – разрежение воздуха в поле звуковой волны можно считать адиабатными, несмотря на то, что каждый отдельный элемент объёма воздуха не изолирован от соседей. Из первого начала термодинамики следует, что при этом

$$0 = U_2 - U_1 + A_Q,$$

где значок  $A_Q$  в обозначении работы отмечает, что речь идет об адиабатном процессе, в котором  $Q = 1$ . Тогда работа газа в адиабатном процессе может быть расписана в виде

$$A_Q = U_1 - U_2 = \nu \frac{i}{2} R(T_1 - T_2) = \frac{i}{2} (p_1 V_1 - p_2 V_2).$$

При адиабатном расширении  $A_Q > 0$  и при этом  $T_1 > T_2$  – газ охлаждается, ибо он совершает работу за счет запаса внутренней энергии. При адиабатном сжатии  $A_Q < 0$  и  $T_1 < T_2$  – газ нагревается, ибо за счет работы внешних сил ( $A' > 0$ ) его внутренняя энергия увеличивается. Используя первое начало термодинамики, можно получить уравнение адиабатного процесса в одном из следующих трёх видов

$$pV^\gamma = C_1, \quad pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = C_2, \quad TV^{\gamma-1} = C_3,$$

где  $\gamma = \frac{i+2}{2} > 1$  – показатель адиабаты, а  $C_1, C_2, C_3$  – постоянные, определяемые начальным состоянием (например,  $C_1 = p_1 V_1^\gamma$ ). Первое из этих уравнений называют уравнением Пуассона. Схематические графики адиабатного процесса в различных парах осей показаны на рис. 5.

Уравнения адиабатного процесса, выписанные выше, позволяют получить и другие выражения для работы в адиабатном процессе. Например, используя уравнение Пуассона, имеем  $pV^\gamma = p_1 V_1^\gamma$ , так что  $p = \frac{p_1 V_1^\gamma}{V^\gamma}$  и

$$A_Q = p_1 V_1^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} = p_1 V_1^\gamma \frac{V^{-\gamma+1}}{1-\gamma} \Big|_{V_1}^{V_2} = \frac{p_1 V_1^\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{1}{V_1^{\gamma-1}} - \frac{1}{V_2^{\gamma-1}} \right)$$

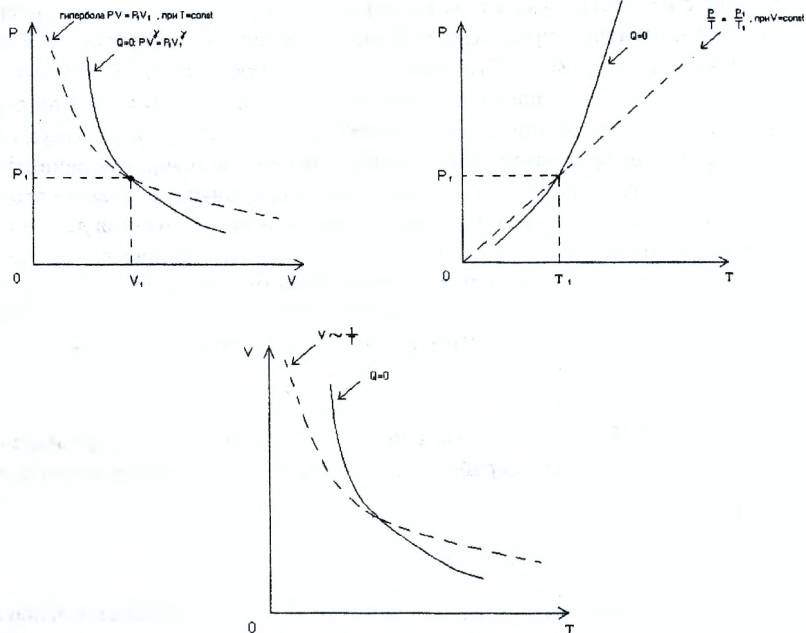


Рисунок 5

Для сравнения на том же рисунке показаны графики изотермы в осях  $(p, V)$ , изохоры в осях  $(p, T)$  и график процесса, изображаемого гиперолой в осях  $(V, T)$  – график адиабаты в точке пересечения с указанными графиками идет круче.

К числу простейших процессов можно отнести также процесс, в котором  $p$  линейно зависит от  $V$  ( $pV$  – линейные процессы):

$$p = aV + b.$$

Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, получим следующую зависимость температуры от объема и давления

$$T = \frac{(aV + b)V}{\nu R}, \quad T = \frac{p(p - b)}{\nu Ra}.$$

Графики таких процессов при  $a > 0$  схематично показаны на рис. 6.

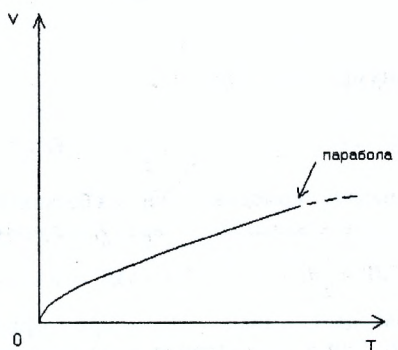
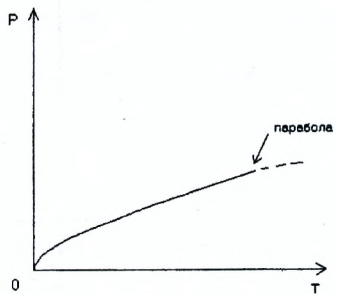
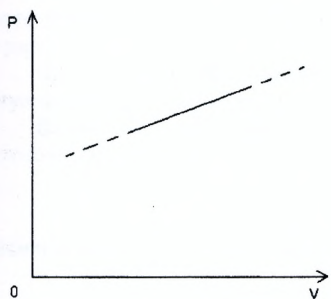
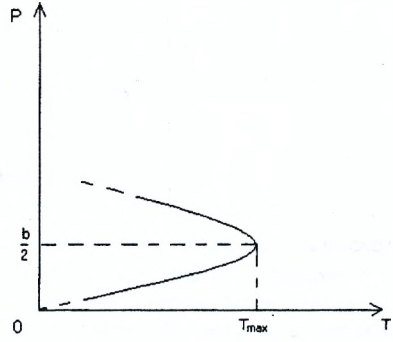
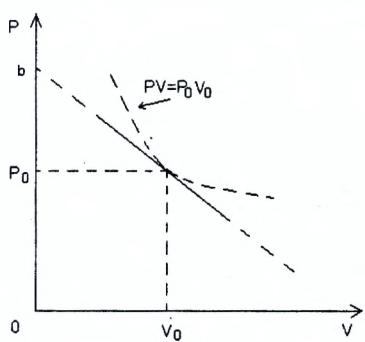


Рисунок 6

При  $a < 0$  функции  $T(p)$  и  $T(V)$  достигают максимума при давлении и объёме, равных соответственно  $p_0 = \frac{b}{2}$  и  $V_0 = -\frac{b}{2a}$ . Максимальная температура выражается формулой  $T_{\max} = -\frac{b^2}{4\nu Ra}$ .

Графики таких процессов показаны схематически на рис. 7.



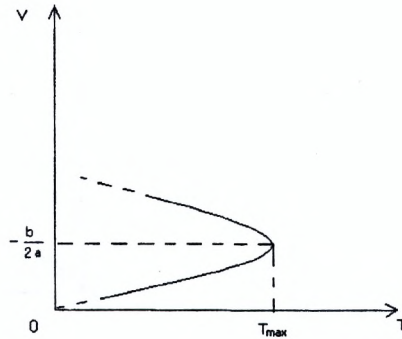


Рисунок 7

Работа газа в таких процессах равна

$$A = \int_{V_1}^{V_2} (aV + b) = \left( \frac{aV^2}{2} + bV \right) \Big|_{V_1}^{V_2} = \frac{a}{2}(V_2^2 - V_1^2) + b(V_2 - V_1).$$

Запишем первое начало термодинамики для бесконечно малых изменений параметров в таких процессах, выражая  $\delta Q$  через  $V$ , получим

$$\delta Q = \nu \frac{i}{2} R dT + P dV = \frac{i}{2} d(aV^2 + bV) + (aV + b) dV = \left[ (i+1)aV + \frac{i+2}{2}b \right] dV.$$

При  $a > 0$  знак совпадает со знаком  $dV$ , т.е. при возрастании  $V$  газ получает тепло ( $dV > 0$  и  $\delta Q > 0$ ). При  $a < 0$  ситуация иная. Например, при возрастании объёма ( $dV > 0$ ) при  $V = V^* = -\frac{(i+2)b}{2(i+1)a}$  имеем  $\delta Q = 0$  и при  $V < V^*$ ,  $\delta Q < 0$ , т.е. газ тепло отдаёт. Геометрическая интерпретация этого обстоятельства показана на рис. 8.

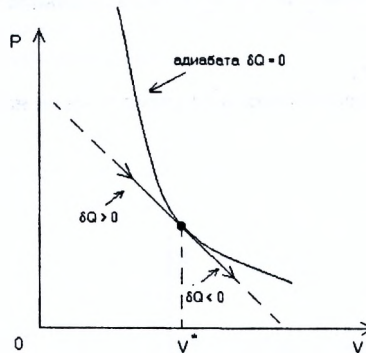


Рисунок 8



тепло отдаёт. Геометрическая интерпретация этого обстоятельства показана на рис. 8.

При  $V = V^*$  адиабата касается графика процесса. При уменьшении объёма ситуация, конечно, обратная: при  $V > V^*$ ,  $\delta Q > 0$  и при  $V < V^*$ ,  $\delta Q < 0$ .

Важным понятием является понятие теплоёмкости, которое определяется соотношением

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

и измеряется в  $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ . Обычно используют молярную или удельную теплоёмкость:

$$C_\mu = \frac{C}{\nu} = \frac{\delta Q}{\nu dT}, \quad C_{\text{уд}} = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{m dT}.$$

Для изотермического процесса  $dT = 0$  ибо  $T = \text{const}$ , поэтому при изотермическом расширении  $C_T = +\infty$ , а при сжатии  $-C_T = -\infty$ . Используя первое начало термодинамики, легко получить выражение например, для молярной теплоёмкости при  $V = \text{const}$  и  $p = \text{const}$  в виде

$$C_{\mu V} = \frac{i}{2} R, \quad C_{\mu p} = \frac{i+2}{2} R,$$

так что показатель адиабаты  $\gamma$  представляет собой отношение теплоёмкостей:

$$\gamma = \frac{C_{\mu V}}{C_{\mu p}} = \frac{i+2}{2}.$$

В адиабатном процессе  $\delta Q = 0$  и  $C_Q = 0$ . Для PV-линейных процессов имеем

$$C_\mu = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{i}{2} R + (aV + b) \frac{dV}{dT}.$$

Дифференцируя уравнение состояния для одного моля

$$(aV + b)V = RT,$$

получим

$$(2aV + b)dV = R dT.$$

Откуда

$$\frac{dV}{dT} = \frac{R}{2aV + b}.$$

Тогда выражение для  $C_\mu$  преобразуется к виду:

$$C_\mu = \frac{2(i+1)aV + (i+2)b}{2aV + b}.$$

Разумеется, при  $a < 0$  и при  $V = V^*$  имеем  $C_\mu = 0$  и, как следует из последнего выражения, при различных значениях  $V$  знаки  $C_\mu$  могут быть различными.

Тепловой машиной называется устройство, совершающее работу за счёт теплоты, сообщаемой рабочему телу от нагревателя. В качестве рабочего тела

обычно используется газ, ибо жидкости и твёрдые тела, если только они не находятся под большим внешним давлением, совершают очень малую работу вследствие малого изменения объёма при изменении температуры.

Идеальной тепловой машиной однократного действия является машина, использующая изотермический процесс. В этом случае  $A_T = Q_T$ , т.е. все подведённое тепло превращается в работу. Такая машина, однако, не представляет интереса, поскольку объём сосуда, в котором находится газ, для постоянного совершения работы должен возрасти до бесконечности. Интерес представляют машины циклического действия, в которых газ на этапе расширения совершает положительную работу, а затем газ сжимают до исходного состояния внешние силы (работа газа отрицательна). Как показано выше, для того, чтобы в целом работа газа за цикл была положительна, на  $pV$ -диаграмме цикл должен проходить по часовой стрелке, т.е. кривая расширения должна идти выше кривой сжатия, а это, в свою очередь, означает, что температура на этапе расширения должна быть при одном и том же объёме выше, чем температура на этапе сжатия. Принципиальная блок-схема тепловой машины циклического действия показана на рис. 9.

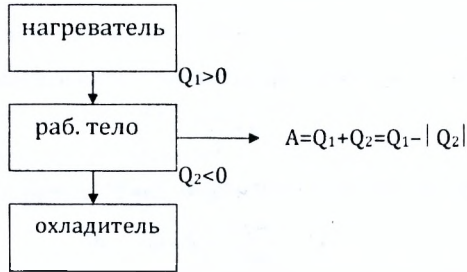


Рисунок 9

На этапе расширения рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1 > 0$ , на этапе сжатия – отдаёт охладителю количество теплоты  $Q_2 < 0$  и, поскольку изменение внутренней энергии рабочего тела в цикле равно нулю (газ возвращается в исходное состояние), то согласно первому началу термодинамики для цикла имеем

$$Q_1 + Q_2 = A.$$

Удобно отрицательный знак  $Q_2$  выделить явно и записать

$$A = Q_1 - |Q_2|.$$

Под КПД тепловой машины понимают выражение

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

Идеальной тепловой машиной, имеющей максимальное значение  $\eta$  при заданных температурах нагревателя  $T_1$  и охладителя  $T_2$  является машина, работающая по так называемому циклу Карно. На нестрогом уровне понять природу этой идеальности можно следующим образом. При заданных темпе-

ратурах нагревателя  $T_1$  и охладителя  $T_2$  есть один процесс, который является необратимым и которого в идеальной тепловой машине допускать нельзя – это процесс теплообмена двух тел с различной температурой: в этом процессе теплота самопроизвольно и бесполезно перетекает от более горячего тела к более холодному, а работа при этом не совершается, но для обратного перехода требуется работа внешних сил, так как он самопроизвольно не происходит. С другой стороны, в идеальной тепловой машине следует использовать изотермический процесс, ибо в соответствии с первым началом термодинамики в этом процессе все полученное газом количество теплоты превращается в работу. Предположим, следовательно, что газ, находящийся при температуре нагревателя  $T_1$  и имеющий с ним тепловой контакт, вначале изотермически расширяется от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ . При этом газ получает количество теплоты  $Q_{12}$  и совершает работу  $A_{12}$

$$Q_{12} = A_{12} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Поскольку в конце расширения (состояние 2) газ имеет температуру  $T_1$ , а чтобы его начать сжимать, он должен иметь температуру охладителя  $T_2$  (чтобы сжимать его было легко, затрачивая малую работу), нужно газ охладить, не приводя в контакт с охладителем, как это сказано выше. Это можно сделать с помощью адиабатного расширения, т.е. далее происходит процесс, в котором  $Q_{23} = 0$  и работа газа равна:

$$A_{23} = \nu \frac{i}{2} R(T_1 - T_2).$$

После этого газ приводят в контакт с охладителем и изотермически сжимают. При этом газ отдает теплоту и совершает отрицательную работу:

$$Q_{34} = A_{34} = \nu RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}.$$

Чтобы вернуть газ в исходное состояние с температурой  $T_1$  (не приводя в контакт с нагревателем!), его адиабатно сжимают, и он нагревается. При этом

$$Q_{41} = 0 \text{ и } A_{41} = \nu \frac{i}{2} R(T_2 - T_1) = -A_{23}.$$

По определению КПД этого цикла, называемого циклом Карно, равен

$$\eta = \frac{A}{Q_{12}} = \frac{A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}}{Q_{12}} = \frac{A_{12} + A_{34}}{Q_{12}} = \frac{\nu RT_1 \left( \ln \frac{V_2}{V_1} + T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \right)}{\nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Записывая уравнение адиабатных процессов 2-3 и 4-1, получим

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \text{ и } T_2 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}.$$

Отсюда находим

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

Тогда для КПД цикла Карно имеем

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

С учетом того, что теплоту газ получает в процессе 1-2, а отдает в процессе 3-4, полезно записать следующие выражения, полученные путем сравнения двух выражений для КПД

$$\frac{|A_{34}|}{A_{12}} = \frac{|Q_{34}|}{Q_{12}} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{и} \quad \frac{|Q_{34}|}{A + |Q_{34}|} = \frac{T_2}{T_1}$$

Они связывают работу внешних сил в изотермическом сжатии ( $|A_{34}|$ ) с работой  $A_{12}$  газа в изотермическом расширении и соответствующие теплоты. График цикла Карно в осях  $(pV)$  показан на рис. 10.

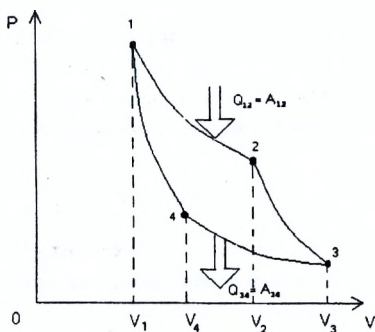


Рисунок 10

Если тот же цикл осуществить в обратном порядке 1-4-3-2-1, то получим холодильную машину, которая в процессе изотермического расширения 4-3 забирает теплоту у охладителя при температуре  $T_2$  и в процессе изотермического сжатия 2-1 отдает теплоту нагревателю при температуре  $T_1$ . Процесс осуществляется за счет работы внешних сил  $A' > 0$ , которая геометрически изображается площадью внутри графика процесса КПД холодильной машины, работающей по циклу Карно, определяется соотношением

$$\eta_x = \frac{Q_{43}}{A'_x} = \frac{|Q_{34}|}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

где  $A'_x$  – работа внешних сил в холодильном цикле, равная работе газа в цикле тепловой машины.

Если различные части газа движутся с различными макроскопическими скоростями, что имеет место, например, при течении газа по трубам или при движе-



нии в газе твердых тел, то за счет обмена молекулами в результате теплового их движения между различными слоями происходит замедление более быстрых слоев и ускорение более медленных. Иначе говоря, между слоями газа, движущимися с различными скоростями, действуют силы внутреннего или вязкого трения.

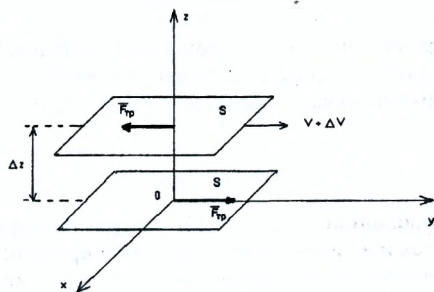


Рисунок 11

В простейшей ситуации движения в газе двух параллельных пластин площадью  $S$ , находящихся на небольшом расстоянии  $\Delta z$  друг от друга, силы вязкого трения, действующие на пластины, равны (закон Ньютона)

$$F_{\text{тр}} = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta z} \right| \cdot S,$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости газа,  $([\eta] = \text{Па} \cdot \text{с})$ .

Молекулярно-кинетическая теория дает следующее выражение для коэффициента вязкости

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho,$$

где  $\rho$  – плотность газа, а остальные обозначения введены выше.

Явлением взаимной диффузии называется происходящее вследствие теплового движения частиц перемешивание двух различных газов, жидкостей или твердых тел. При этом подразумевается, например, что в случае газов давление везде одинаково, т.е. макроскопическое движение отсутствует.

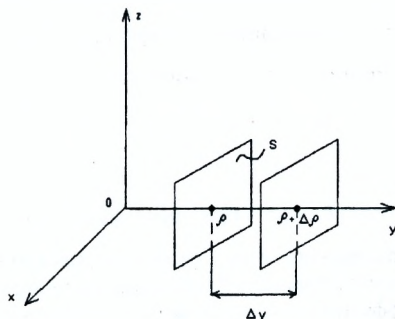


Рисунок 12

Если плотность некоторого газа  $\rho$  является функцией координаты  $y$  (рис. 12.), то возникает диффузионный поток этого газа в среде другого газа, описываемый соотношением:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = D \left| \frac{\Delta \rho}{\Delta y} \right| \cdot S,$$

где  $\Delta m$  – масса газа, проходящего через площадку площадью  $S$  (см. рис.) за время  $\Delta t$ ;  $D$  – коэффициент взаимной диффузии газов ( $D = \text{м}^2\text{с}^{-1}$ ).

Молекулярно-кинетическая теория дает следующее выражение для коэффициента диффузии

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle.$$

Явление теплопроводности возникает, когда температура в различных точках различна. В газах и жидкостях явление теплопроводности, приводящее к выравниванию температур, может сопровождаться конвекцией – перемешиванием частей с различной температурой вследствие макроскопического движения. Явление теплопроводности описывается уравнением

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa \frac{\Delta T}{\Delta y} \cdot S,$$

где  $\Delta Q$  – количество теплоты, проходящее за время  $\Delta t$  через площадку  $S$  (рис. 13).

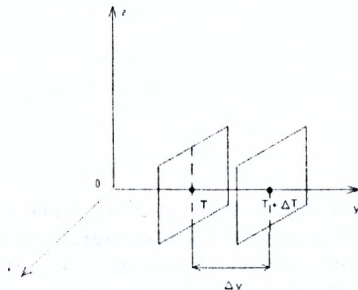


Рисунок 13

Коэффициент  $\kappa$  (каппа) называется коэффициентом теплопроводности ( $[\kappa] = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ). Молекулярно-кинетическая теория дает следующее выражение для  $\kappa$  для идеального газа:

$$\kappa = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho \cdot C_V,$$

где  $C_V = \frac{i R}{2 M}$  – удельная теплоёмкость при постоянном объёме.

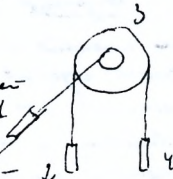
Все три явления объединяются под общим названием «явления переноса», ибо явление вязкости связано с переносом импульса в результате теплового движения молекул, явление диффузии – с переносом массы, а теплопроводности – с переносом энергии. Коэффициенты  $\eta$ ,  $D$  и  $\kappa$  называются коэффициентами переноса.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Варианты экзаменационных заданий

Задание  
 для индивидуального задания по  
 физике для студентов ФЭИС

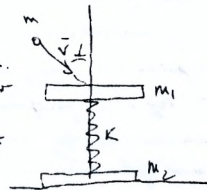
Вариант 79

1. На рисунке изображен механизм с двумя ступнями блок 3 с двумя ветвями ступней имеет вращение вокруг горизонтальной оси. Считаю, что система начинает движение из состояния покоя и движется без трения в вертикальном направлении, когда груз 4 пройдет путь  $0,8 \text{ м}$ . Найти также относительную скорость грузов 3 и 4 в этот момент

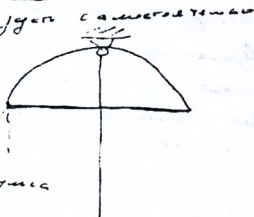


2. Написать закон изменения механической энергии для этой же системы и найти закон изменения кинетической энергии системы

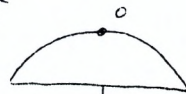
3. Два груза вертикально ступенька грузы, между которыми находится пружина. В некоторый момент времени пружина сжимается и удерживает в равновесии грузы. При этом пружина сжимается и система движется вверх. В какой момент времени система начинает двигаться от опоры? Написать закон сохранения энергии



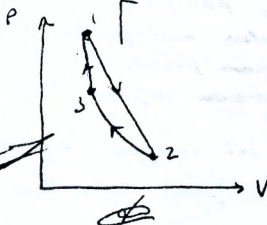
4. В какой момент времени ступенька, выходящая в вертикальном направлении, начинает двигаться вверх и удерживает в равновесии грузы. Написать закон сохранения энергии и найти закон сохранения момента импульса для груза



5. Конструкция из ступней движется в точке O и находится в равновесии. Написать закон сохранения энергии. Написать уравнение функции колебаний



6. На PV-диаграмме 1-2-3-4-1 найти работу, найти КПД цикла и среднюю кинетическую энергию молекул газа в равновесии из состояния цикла

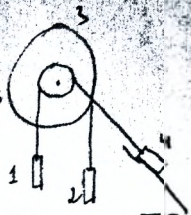


Зав. кафедрой физики  
 Протокол № 5 от 24.11.09

Задача

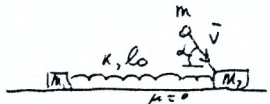
Задача по теме "Электрические цепи" из учебника  
 по электротехнике ФЭЛ  
 Вариант 67

1. На рисунке изображены цепи ступенчатых линий  
 в каждой цепи ступенчатая линия является  
 частью разветвленной цепи. Считаю, что схема  
 является линейной и составлена из  
 элементов линейных и нелинейных элементов, с  
 тем же условием, что и в первой цепи, когда  
 цепь 4 имеет 0,1 мс. Сеть  
 такая относительно цепи 1 - цепи 2. Тогда сеть



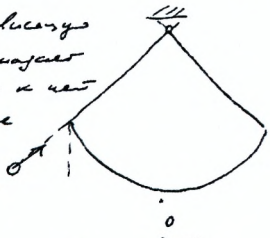
2. Длинная линия является идеальной линией  
 цепи с частотой и тем же условием - сеть  
 линейная система

3. В цепи из элементов с  
 идеальной линией цепи



идеальной цепи и частоты в ней. Тогда условие  
 идеальной цепи, если считать частоту сети  
 идеальной линией

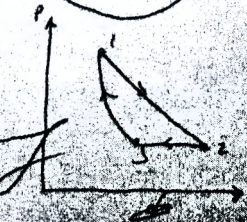
4. В цепи из элементов, линейных  
 в линейной цепи, идеальной  
 идеальной цепи и частоты в ней  
 Тогда идеальная цепь является  
 идеальной цепью, идеальной цепью  
 идеальной цепи и частоты в ней



5. В цепи из элементов идеальной  
 цепи 0 и частоты в идеальной  
 идеальной цепи идеальной цепи  
 идеальной цепи идеальной цепи



6. На рисунке изображены цепи  
 идеальной цепи идеальной цепи  
 идеальной цепи идеальной цепи



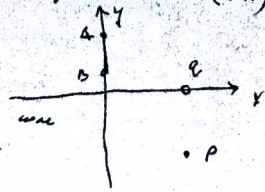
Итого по варианту 67  
 Прислать 15 и 16.10.1987



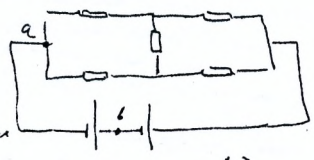


Задача  
 на тему: Тепловая машина на рабочем газе (Т.К.)  
 на бесконечном цикле Карно 40

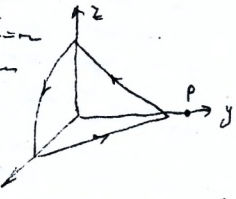
1. да пружина  $AB$  - идеална пружина  
 изведен  $\rho$  - тежина  $\rho$  д.м.:
- а) пружина деформисана максимално или  
 време  $P$ , а изгуби и грама  $\rho$  остане  
 коефициент
- б) Промени  $t$  време  $P$
- в) Изгуби време деформисана пружина мин, симетрично додека  
 коефициент и време  $P$



2. Напој  $\rho$  време  $a$  и  $b$  време  
 класичан  $\rho$  максимално  
 с  $\rho$  време  $\rho$  деформисана.  
 да се изгуби време  
 изгуби време  $\rho$  да  $\rho$  време  
 деформисана

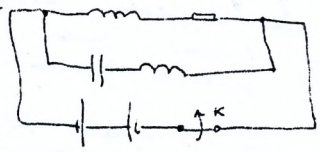


3. да се  $\rho$  време  $\rho$  време  $P$ . да се  
 време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 $\rho$  време  $P$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана или  $\rho$  време  $\rho$

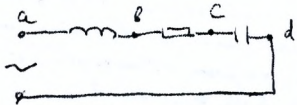


4. да пружина  $\rho$  време  $\rho$  време  $P$   
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време

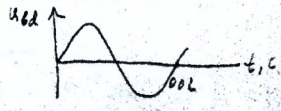
5. да се  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време



6. да се  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време



Изгуби време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време



Изгуби време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  
 деформисана  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време  $\rho$  време

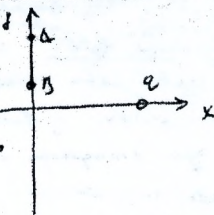


Лабораторна

визначення коефіцієнта трансформації по струму для трансформатора ВКД(ТН)

№. час роботи виконавця імена групи курсовиків

1) да струмом АБ - фазовий зсув  
визначити коефіцієнт,  $\rho$  - коефіцієнт зсуву  $\rho$ .



Дано:

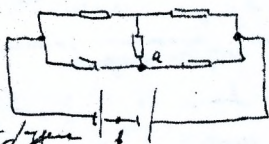
1) струм первинним і вторинним  
вони в разі  $\rho$ , де  $\rho$  зсув у градусах  
коефіцієнт

2) струм в разі  $\rho$

3) струм первинним і вторинним струмів, коефіцієнт трансформації

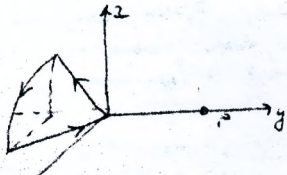
4) струм в разі  $\rho$  і в разі  $\rho$

Коефіцієнт трансформації визначити  
згідно з формулою коефіцієнта трансформації  
для трансформатора з струмом  
первинним і вторинним струмів  
визначити коефіцієнт



5) дано струм первинним і вторинним

дані струм первинним і вторинним струмів  
визначити коефіцієнт трансформації  
згідно з формулою коефіцієнта трансформації

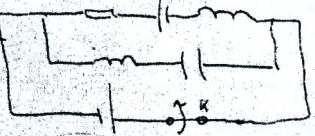


6) да струмом  $\rho$  і струм  $\rho$

дані струм первинним і вторинним струмів  
визначити коефіцієнт трансформації  
згідно з формулою коефіцієнта трансформації

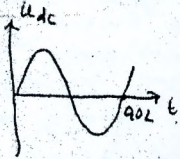
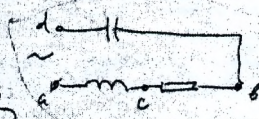
7) дано струм первинним і вторинним

дані струм первинним і вторинним струмів  
визначити коефіцієнт трансформації  
згідно з формулою коефіцієнта трансформації



8) дано струм первинним і вторинним

дані струм первинним і вторинним струмів  
визначити коефіцієнт трансформації  
згідно з формулою коефіцієнта трансформації



Зробити да струм первинним і вторинним  
визначити коефіцієнт трансформації згідно з формулою

Зробити да струм первинним і вторинним  
визначити коефіцієнт трансформації згідно з формулою



Задача

Для нахождения скорости в точке  $P$  коэффициента II кривой ФЭИС

Задача 27

1. Выводимая дуга

Из конструктивных соображений длина дуги должна быть максимальной. Дуга должна быть касательной к окружности, проходящей через точку  $P$  и касательной к дуге в начальной точке.



2. Проверка правильности дуги

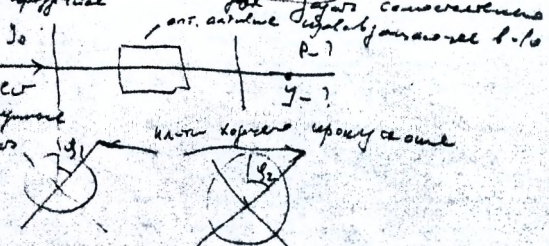
Проверить правильность дуги можно, построив касательную к дуге в начальной точке и проверив, что она касается дуги в одной точке.



дуги. Относительная численная погрешность в точке  $P$  должна быть не более 1%.

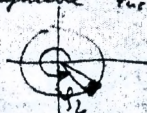
3. В точке  $P$  скорость

направление скорости  $v$  должно быть перпендикулярно радиусу-вектору  $r$  в точке  $P$ . Если это не так, то дуга построена неправильно.



4. Проверка правильности

Проверить правильность дуги можно, построив касательную к дуге в начальной точке и проверив, что она касается дуги в одной точке.



5. Форма с гонимой волной

Формула для угла  $\alpha$  до начала дуги. Если известны диаметр  $d$  и радиус  $r$  дуги, то можно найти угол  $\alpha$ .



Выводимая дуга должна касаться окружности в одной точке. Если это не так, то дуга построена неправильно.

где  $r_0$  - радиус дуги

Здесь коэффициент  $\alpha$



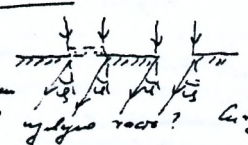
Задача  
 За минимума сигнала на сигнал  
 за сигнал II уровня ФДК

Рисунок 39

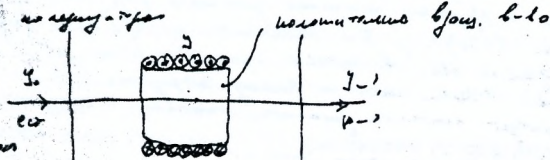
3. Квадратура для сигнала и частоты сигнала оптимально  
 импеданс системы передатчика передатчика. Когда из теории информации  
 в теории антенн, направлено в направлении волны в антенну на деле

Диаграмма Фурье-тока в двух целях

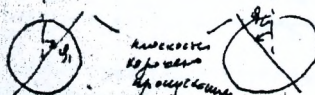
Поэтому наша задача  
 оптимизировать антенну. Как  
 антенна взаимодействует в антенне  
 она 3, если антенна направлена в направлении волны? Квадратура антенны-



В антенне на фоне антенны  
 антенны. Антенна  
 антенны антенны антенны  
 антенны, антенны антенны  
 антенны антенны антенны  
 антенны антенны



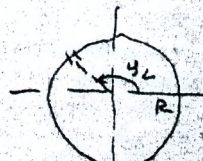
3. Квадратура антенны с  
 антенны в антенны  
 антенны антенны антенны  
 антенны  $T_1 = 2000 \text{ K}$



Антенна антенны антенны антенны,  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны



3. Антенна антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны



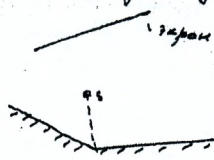
3. Антенна антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны

Антенна антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны  
 антенны антенны антенны антенны

А. Д. Д. Д.

Задача по оптике  
 II курса ФЭИС  
 Вариант 1

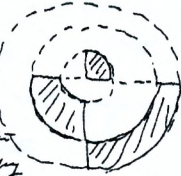
1. Сфера изотропного материала с коэффициентом Френеля. Задан угол падения луча  $\theta$ , найти:



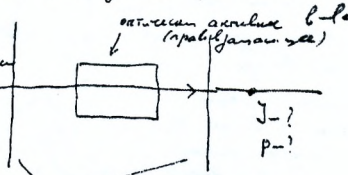
- а) число отраженных и преломленных лучей
- б) угол отражения  $\theta_r$
- в) коэффициент отражения  $R$

2. Дифракция Френеля.

Задан радиус  $r$  от источника до точки наблюдения, радиус отверстия  $\rho$  в нем и длина волны  $\lambda$ . Найти  $\beta$  (число Френеля), где  $\beta$  — интегральный параметр Френеля.

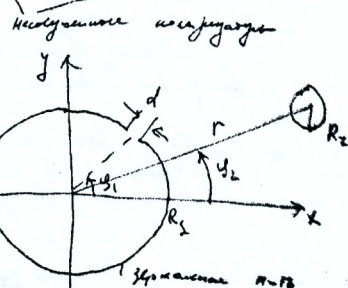


3. Задан коэффициент отражения  $R$  и коэффициент преломления  $n$ . Найти  $n$  и  $R$  для диэлектрика.



4. Точка зрения

Воздух имеет показатель преломления  $n$ . Найти  $n$  и  $R$  для диэлектрика.



5. Задан коэффициент отражения  $R$  и коэффициент преломления  $n$ . Найти  $n$  и  $R$  для диэлектрика.

6. Задан коэффициент отражения  $R$  и коэффициент преломления  $n$ . Найти  $n$  и  $R$  для диэлектрика.

Зад. сов. преломн. Ф. Онег

## **ОТЗЫВ**

### **на комплексные задачи по физике [Чопчица Н.И.]**

В современной высшей школе самостоятельная работа студентов, направленная на развитие их творческих способностей, представляет собой одно из наиболее существенных направлений образовательного процесса. При этом целесообразно и необходимо развивать у студентов умения и навыки самостоятельного выбора, постановки и формулировки заданий с последующим их выполнением и анализом результатов. Для развития именно таких умений и навыков предназначено данное пособие – сборник, содержащий набор комплексных задач по общей физике.

Представленные в сборнике комплексные задачи дают возможность рассматривать разнообразие физических ситуации, характеризующиеся большим числом физических и геометрических параметров в широких диапазонах их значений. Это позволяет давать студентам индивидуальные задания различной сложности, причём студент имеет возможность самостоятельно выбрать уровень сложности задания, соответствующий уровню его теоретической подготовки.

Задачи сборника являются авторскими, отличаются оригинальностью, разнообразием, чёткой формулировкой условия. Они сопровождаются многовариантным иллюстративным материалом и таблицами численных значений физических параметров, фигурирующих в условиях задач.

Сборник комплексных задач [Чопчица Н.И.] оригинален по содержанию и структуре, охватывает все основные разделы курса общей физики и, несомненно, может быть полезен для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов по общей физике, как в инженерно-технических вузах, так и в классических университетах.

Считаю, что данный сборник представляет собой несомненный интерес для преподавателей и студентов, физических и инженерно-технических специальностей вузов.

Заведующий кафедрой теоретической физики Учреждения образования «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина», кандидат физико-математических наук, доцент

***В.С. Секрежский***



Учебное издание

Автор:

**Чопиц Николай Игнатьевич**

# КОМПЛЕКСНЫЕ ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ

Ответственный за выпуск: Янусик И.С.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Янусик И.С., Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

ISBN 978-985-493-285-9



9 789854 932859

Издательство БрГТУ. Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/235 от 24.03.2014 г.

Подписано к печати 05.04.2014 г. Формат 60х84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Гарнитура Cambria. Бумага «Снегурочка». Усл. п. л. 6,25.

Уч. изд. 6,75. Заказ № 256. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Брестский государственный технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



## Невозможно привыкнуть к уходу из жизни близких людей...

Это был человек с высочайшей внутренней культурой и настоящий профессионал своего дела. Долгие годы Николай Игнатъевич преподавал сначала в Брестском инженерно-строительном институте, а затем в созданном на его базе Политехническом университете. Иногда мне казалось, что он в физике знает и умеет всё... Но это была лишь «верхняя часть айсберга». Он был настоящим философом науки, таких сегодня можно перечислить лишь по пальцам руки. Образ его мышления никогда не вписывался в настоящее время. Он всегда был вне времени, может быть, потому, что всю жизнь занимался Общей Теорией Относительности. Впрочем, он бы уже немедленно вступил бы со мною в спор...

Николая Игнатъевича, несомненно, можно отнести к людям, на «которых держится земля», и его отношение к людям, близким к физике и далёким от неё, было всегда откровенно честным. Он умел генерировать идеи и находил собственные методы решений, красота которых иногда поражала воображение весьма компетентных людей. Физика интересовала его ещё на школьной скамье, он успешно выступал на республиканских олимпиадах, и эта любовь сохранилась в нём и в зрелые годы. Почти 20 лет он был членом жюри республиканских олимпиад по физике и относился к этому столь же ответственно, как и к научной работе. Можно сказать, что он переживал мысли, как чувства, а внутренняя красота и внешнее совершенство были для него естественной формой жизни.

Он был великолепным собеседником и умел слушать и слышать как-то особенно чутко. Он был своего рода эталоном порядочности и чистоты. В каждом человеке он видел равного и к любому был предельно внимателен. Его культурно-образовательный уровень был так высок, что люди после разговора с ним ощущали его нравственную высоту, сами поднимались выше нравственно. Главной же его чертой была доброта. Он любил людей и умел прощать им их недостатки. В любое время каждый студент мог задать ему вопрос в полной уверенности, что будет выслушан и получит дельный совет и профессионально чёткое объяснение.

Николай Игнатъевич только своим присутствием умел создавать особую атмосферу везде, и в частности на кафедре физики. Его любили и относились к нему в высшей степени уважительно. Его влияние на людей было магнетическим. Он полностью соответствовал формуле: *мягко в словах - твердо в поступках*.

Николай Игнатъевич Чопциц был настоящим интеллигентом. Говорят, что умер тот, кто забыт. Николай Игнатъевич Чопциц будет жить с нами всегда, ибо память о нем сохранится навечно...

*Учитель физики Койфман Ю.Г. (США, Калифорния)*



## Чопчиц Николай Игнатьевич

*Николай Игнатьевич Чопчиц родился 14.08.1949 г. в д. Боровая Лунинецкого района, БССР, г. Брест, физик, доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.*

Уже в 5 лет он пошёл в начальную школу в д. Боровая, где проучился до 1958 г. Затем, до 1960 г., он учился в 7-летней школе д. Черба-сово. В 1961 г. продолжил учёбу в Синкевичской средней школе, которую закончил в 1965 году с золотой медалью. Николай Игнатьевич регулярно становился победителем областных, республиканских и всесоюзных олимпиад по физике и математике. В 1965 году поступил в Ленинградский государственный университет на механико-математический факультет в группу подготовки специалистов по гравитации, которую курировал знаменитый академик Я.Б. Зельдович, а затем, в связи с расформированием специальности, получил предложение на продолжение учебы в Московском физико-техническом институте (МФТИ). Однако строгий отбор по здоровью не позволил Николаю Игнатьевичу стать студентом одного из известных вузов СССР. Далее он продолжил учёбу в Белорусском государственном университете в г. Минске на физическом факультете, который закончил в 1972 году по специальности «Физика», получив квалификацию физика-теоретика. После окончания учёбы он был оставлен в аспирантуре при БГУ, которую окончил в 1975 году, подготовив диссертационную работу по гравитации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Николай Игнатьевич был направлен после окончания учёбы в 1975 году на работу в Брестский инженерно-строительный институт (БИСИ, ныне БрГТУ) на кафедру физики. Пройдя путь от ассистента до доцента, Николай Игнатьевич был генератором многих идей в области методики преподавания физики, разработал оригинальные теоретические основы лабораторного физпрактикума. Многократно участвовал в работе жюри областных и республиканских этапов олимпиады школьников по физике, составлял задачи для международных туров физических олимпиад. Николай Игнатьевич стал автором 4 изобретений и более 170 научных и научно-методических работ. На кафедре физики он проработал 38 лет.

Научная деятельность Николая Игнатьевича была посвящена исследованиям в области общей теории относительности и гравитации, а также в других областях прикладной физики.

Николай Игнатьевич ушел из жизни 12 июля 2013 г. Все, кто его знал, и кто имел счастье с ним общаться, сохранят теплые воспоминания о нём на долгие годы.