

22.10

3-15

В. Б. ЛИДСКИЙ, Л. В. ОВСЯННИКОВ  
А. Н. ТУЛАЙКОВ, М. И. ШАБУНИН

ЗАДАЧИ  
ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ  
МАТЕМАТИКЕ

ФИЗМАТГИЗ • 1962

22.1  
3-15

В. Б. ЛИДСКИЙ, Л. В. ОВСЯННИКОВ,  
А. Н. ТУЛАЙКОВ, М. И. ШАБУНИН

711211

# ЗАДАЧИ ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ МАТЕМАТИКЕ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,  
СТЕРЕОТИПНОЕ



ADIB SO'PB TERMIZY NOMDAGI  
SURXONDARYO VILOYATI AXBOROT  
KUTUBXONA MARKAZI  
Kel. № 60247  
142777 200 18



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1962

## АННОТАЦИЯ

Книга представляет собой сборник задач (повышенной трудности) по элементарной математике, снабженных указаниями и решениями. Может быть использована в работе юношеских математических школ и школьных математических кружков, а также при подготовке к приемным экзаменам в такие высшие учебные заведения, где предъявляются повышенные требования по математике.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	4	
		Задачи Решения

### АЛГЕБРА

1. Арифметическая и геометрическая прогрессии (1—20)	7	99
2. Алгебраические уравнения и системы уравнений (21—82)	10	110
3. Алгебраические неравенства (83—104)	19	155
4. Логарифмические и показательные уравнения, тождества и неравенства (105—161)	23	164
5. Комбинаторика и бином Ньютона (162—177)	30	186
6. Составление уравнений (178—217)	33	193
7. Разные задачи (218—268)	41	218

### ГЕОМЕТРИЯ

#### А. Планиметрия

1. Задачи на вычисление (269—298)	50	244
2. Задачи на построение (299—312)	54	261
3. Задачи на доказательство (313—376)	56	269
4. Геометрические места точек (377—388)	64	304
5. Нахождение наибольших и наименьших значений (389—397)	66	314

#### Б. Стереометрия

1. Задачи на вычисление (398—461)	68	321
2. Задачи на доказательство (462—483)	76	371
3. Геометрические места точек (484—490)	79	387
4. Наибольшие и наименьшие значения (491—492)	80	392

### ТРИГОНОМЕТРИЯ

1. Преобразование выражений, содержащих тригонометрические функции (493—508)	82	395
2. Тригонометрические уравнения и системы уравнений (509—569)	84	402
3. Обратные тригонометрические функции (570—579)	91	442
4. Тригонометрические неравенства (580—592)	93	446
5. Разные задачи (593—603)	94	454



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга имеет целью помочь тому, кто желает углубить свои знания по элементарной математике.

В книге собраны задачи, предлагавшиеся на приемных экзаменах поступавшим в Московский физико-технический институт в течение последних десяти — двенадцати лет. Авторы, руководившие в разные годы приемными испытаниями, обработали и систематизировали накопившийся большой материал и снабдили избранные задачи указаниями и решениями.

Для решения задач, содержащихся в данной книге, требуются знания в объеме средней школы. Те немногие сведения, которые иногда не включаются в программы средних школ, приводятся отдельно мелким шрифтом.

Тем не менее следует отметить, что большинство предлагаемых задач являются задачами повышенной трудности.

По мысли авторов, книга может быть использована в работе юношеских математических школ и школьных математических кружков. Кроме того, она окажется полезной при подготовке к приемным испытаниям в такие высшие учебные заведения, где предъявляются повышенные требования по математике.

Книга состоит из трех разделов: «Алгебра», «Геометрия» и «Тригонометрия», каждый из которых разбит на подразделы. Внутри каждого подраздела задачи расположены в порядке возрастающей трудности.

В подборе и составлении задач, собранных в настоящей книге, помимо авторов, принимали участие работавшие в разные годы или ныне работающие на кафедре высшей математики МФТИ профессора и преподаватели А. А. Абрамов, И. А. Бочек, М. А. Евграфов, А. А. Зыков, В. И. Карабегов, Х. Х. Каримова, Л. Д. Кудрявцев, А. Д. Кутасов, М. Р. Шура-Бура, М. П. Щеглов и другие.

Значительную помощь в работе над книгой авторам оказала ст. лаборант кафедры Г. Е. Пономарева, которой авторы приносят благодарность.

*Авторы*

## АЛГЕБРА

### 1. Арифметическая и геометрическая прогрессии

#### Предварительные замечания

Если  $a_n$  есть  $n$ -й член,  $d$  — разность и  $S_n$  — сумма  $n$  первых членов арифметической прогрессии, то

$$a_n = a_1 + d(n-1), \quad (1)$$

$$S_n = \frac{(a_1 + a_n)n}{2} = \frac{[2a_1 + d(n-1)]n}{2}. \quad (2)$$

Если  $u_n$  есть  $n$ -й член,  $q$  — знаменатель и  $S_n$  — сумма  $n$  первых членов геометрической прогрессии, то

$$u_n = u_1 q^{n-1}, \quad (3)$$

$$S_n = \frac{u_n q - u_1}{q-1} = \frac{u_1(q^n - 1)}{q-1}. \quad (4)$$

Если, наконец,  $S$  есть сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии ( $|q| < 1$ ), то

$$S = \frac{u_1}{1-q}. \quad (5)$$

1. Доказать, что если положительные числа  $a$ ,  $b$ ,  $c$  образуют арифметическую прогрессию, то числа

$$\frac{1}{\sqrt{b} + \sqrt{c}}, \quad \frac{1}{\sqrt{c} + \sqrt{a}}, \quad \frac{1}{\sqrt{a} + \sqrt{b}}$$

также образуют арифметическую прогрессию.

2. Положительные числа  $a_1, a_2, \dots, a_n$  образуют арифметическую прогрессию. Доказать, что

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} + \frac{1}{\sqrt{a_2} + \sqrt{a_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{a_{n-1}} + \sqrt{a_n}} = \\ = \frac{n-1}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_n}}. \end{aligned}$$

3. Доказать, что если числа  $a_1, a_2, \dots, a_n$  отличны от нуля и образуют арифметическую прогрессию, то

$$\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} + \frac{1}{a_3 a_4} + \dots + \frac{1}{a_{n-1} a_n} = \frac{n-1}{a_1 a_n}.$$

4. Доказать, что всякая последовательность чисел  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , удовлетворяющих при любом  $n \geq 3$  условию

$$\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} + \frac{1}{a_3 a_4} + \dots + \frac{1}{a_{n-1} a_n} = \frac{n-1}{a_1 a_n},$$

образует арифметическую прогрессию.

5. Показать, что для всякой арифметической прогрессии  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  имеют место равенства

$$\begin{aligned} a_1 - 2a_2 + a_3 &= 0, \\ a_1 - 3a_2 + 3a_3 - a_4 &= 0, \\ a_1 - 4a_2 + 6a_3 - 4a_4 + a_5 &= 0 \end{aligned}$$

и вообще при всяком  $n > 2$  имеем:

$$a_1 - C_n^1 a_2 + C_n^2 a_3 - \dots + (-1)^{n-1} C_n^{n-1} a_n + (-1)^n C_n^n a_{n+1} = 0.$$

Указание. В этой и следующей задачах полезно воспользоваться легко проверяемым тождеством

$$C_n^k = C_{n-1}^k + C_{n-1}^{k-1}.$$

6. Доказать, что для всякой арифметической прогрессии  $a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots$  при  $n \geq 3$  имеют место равенства

$$a_1^2 - C_n^1 a_2^2 + \dots + (-1)^n C_n^n a_{n+1}^2 = 0.$$

7. Доказать, что если числа  $\lg_k x, \lg_m x, \lg_n x$  ( $x \neq 1$ ) образуют арифметическую прогрессию, то

$$n^2 = (kn)^{\lg_k m}.$$

8. Найти такую арифметическую прогрессию, у которой отношение суммы первых  $n$  членов к сумме  $kn$  последующих не зависит от  $n$ .

9. Числа  $x_1, x_2, \dots, x_n$  образуют арифметическую прогрессию. Найти эту прогрессию, если

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = a, \quad x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = b^2.$$

Указание. В этой и следующей задачах полезно воспользоваться равенством

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

10. Ряд чисел 1, 4, 10, 19, ... обладает тем свойством, что разности двух соседних чисел образуют арифметическую прогрессию. Найти  $n$ -й член и сумму первых  $n$  членов этой последовательности чисел.

11. Составим таблицу

1
2, 3, 4
3, 4, 5, 6, 7
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
<del>5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12</del>

Доказать, что сумма членов каждой горизонтальной строки равна квадрату нечетного числа.

12. В геометрической прогрессии  $a_1, a_2, a_3, \dots$  даны члены  $a_{m+n} = A, a_{m-n} = B$ . Найти  $a_m$  и  $a_n$  ( $A \neq 0$ ).

13. Пусть  $S_n$  есть сумма первых  $n$  членов геометрической прогрессии  $S_n \neq 0, q \neq 0$ . Доказать, что

$$\frac{S_n}{S_{2n} - S_n} = \frac{S_{2n} - S_n}{S_{3n} - S_{2n}}.$$

14. Зная сумму  $S_n$  первых  $n$  членов геометрической прогрессии и сумму  $\bar{S}_n$  обратных величин этих членов, найти произведение  $\prod_n$  первых  $n$  членов прогрессии.

15. Найти сумму

$$1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + \dots + (n+1)x^n.$$

16. Доказать, что числа 49, 4489, 444889, ..., получаемые вставкой 48 в середину предыдущего числа, являются точными квадратами.

17. Доказать, что можно найти бесконечно убывающую геометрическую прогрессию

$$1, q, q^2, \dots, q^n, \dots$$

каждый член которой отличается от суммы всех следующих за ним членов заданным постоянным множителем  $k$ . При каких  $k$  задача возможна?

18. Бесконечная последовательность чисел  $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n, \dots$  ( $x_1 \neq 0$ ) при любом  $n \geq 3$  удовлетворяет условию

$$(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n-1}^2)(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) = \\ = (x_1 x_2 + x_2 x_3 + \dots + x_{n-1} x_n)^2.$$

Доказать, что  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$  являются последовательными членами геометрической прогрессии.

Указание. Можно применить метод полной индукции.

19. Даны арифметическая прогрессия с общим членом  $a_n$  и геометрическая прогрессия с общим членом  $b_n$ , причем  $a_1 = b_1$ ,  $a_2 = b_2$ ,  $a_1 \neq a_2$  и  $a_n > 0$  для всех натуральных чисел  $n$ . Доказать, что  $a_n < b_n$  при  $n > 2$ .

20. Доказать, что если для геометрической прогрессии  $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$  и арифметической прогрессии  $b_1, b_2, \dots, b_n, \dots$  выполняются неравенства

$$a_1 > 0, \frac{a_2}{a_1} > 0, b_2 - b_1 > 0,$$

то существует такое число  $\alpha$ , что  $\lg_\alpha a_n - b_n$  не зависит от  $n$ .

## 2. Алгебраические уравнения и системы уравнений

### Предварительные замечания

При решении предлагаемых ниже систем уравнений исходная система упрощающими преобразованиями сводится к равносильной системе, все решения которой либо известны, либо могут быть найдены известными приемами. В некоторых случаях приходится переходить к системам, которые заведомо удовлетворяются всеми решениями исходной системы, однако, вообще говоря, не только ими. В этих случаях определяемые наборы значений неизвестных следует проверять подстановкой в исходную систему.

В отдельных задачах используются формулы Виета, связывающие коэффициенты уравнения третьей степени

$$x^3 + px^2 + qx + r = 0 \quad (1)$$

с его корнями  $x_1, x_2, x_3$ . Они имеют вид:

$$x_1 + x_2 + x_3 = -p, \quad x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_3 x_1 = q, \quad x_1 x_2 x_3 = -r. \quad (2)$$

Формулы (2) находятся приравниванием коэффициентов при одинаковых степенях  $x$  в тождестве

$$x^3 + px^2 + qx + r = (x - x_1)(x - x_2)(x - x_3).$$

21. Найти все вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned} x^3 + y^3 &= 1, \\ x^2y + 2xy^2 + y^3 &= 2. \end{aligned}$$

22. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} x^2 + xy + y^2 &= 4, \\ x + xy + y &= 2. \end{aligned}$$

√ 23. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} x + y &= a + b, \\ x^2 + y^2 &= a^2 + b^2. \end{aligned}$$

24. Найти вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned} x^3 + y^3 &= 5a^3, \\ x^2y + xy^2 &= a^3 \end{aligned}$$

при условии, что  $a$  вещественно и не равно 0.

25. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{y} + \frac{y^2}{x} &= 12, \\ \frac{1}{x} + \frac{1}{y} &= \frac{1}{3}. \end{aligned}$$

26. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} x^4 + x^2y^2 + y^4 &= 91, \\ x^2 - xy + y^2 &= 7. \end{aligned}$$

27. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} x^3 - y^3 &= 19(x - y), \\ x^3 + y^3 &= 7(x + y). \end{aligned}$$

28. Найти все вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned} 2(x + y) &= 5xy, \\ 8(x^3 + y^3) &= 65. \end{aligned}$$

29. Найти вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned}(x+y)(x^2-y^2) &= 9, \\ (x-y)(x^2+y^2) &= 5.\end{aligned}$$

30. Найти все вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned}x+y &= 1, \\ x^4+y^4 &= 7.\end{aligned}$$

31. Найти вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned}x^4+y^4-x^2y^2 &= 13, \\ x^2-y^2+2xy &= 1,\end{aligned}$$

удовлетворяющие условию

$$xy \geq 0.$$

32. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}(x^2+1)(y^2+1) &= 10, \\ (x+y)(xy-1) &= 3.\end{aligned}$$

Указание. Положить  $xy = u$ ,  $x+y = v$ .

33. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}(x^2+y^2)\frac{x}{y} &= 6, \\ (x^2-y^2)\frac{y}{x} &= 1.\end{aligned}$$

34. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x^2+y^2 &= axy, \\ x^4+y^4 &= bx^2y^2.\end{aligned}$$

35. Решить уравнение (разлагая левую часть на множители)

$$\left(\frac{x+a}{x+b}\right)^2 + \left(\frac{x-a}{x-b}\right)^2 - \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) \frac{x^2-a^2}{x^2-b^2} = 0.$$

36. Решить уравнение

$$\frac{x^2}{3} + \frac{48}{x^2} = 10 \left( \frac{x}{3} - \frac{4}{x} \right).$$

37. Решить систему уравнений

$$\frac{x+y}{xy} + \frac{xy}{x+y} = a + \frac{1}{a},$$

$$\frac{x-y}{xy} + \frac{xy}{x-y} = b + \frac{1}{b}.$$

38. Найти все решения уравнения

$$(x-4,5)^2 + (x-5,5)^2 = 1.$$

39. Решить систему уравнений:

$$|x-1| + |y-5| = 1,$$

$$y = 5 + |x-1| *).$$

40. Выяснить, при каких вещественных  $x$  и  $y$  имеет место равенство

$$5x^2 + 5y^2 + 8xy + 2y - 2x + 2 = 0.$$

41. Найти все вещественные значения  $x$  и  $y$ , удовлетворяющие уравнению

$$x^2 + 4x \cos(xy) + 4 = 0.$$

42. Найти вещественные решения системы

$$x + y + z = 2,$$

$$2xy - z^2 = 4.$$

48. Выяснить, при каком значении  $a$  система

$$x^2 + y^2 = z,$$

$$x + y + z = a$$

имеет единственное вещественное решение, и найти это решение.

---

\*) Абсолютной величиной числа  $x$  (обозначается через  $|x|$ ) называется неотрицательное число, определяемое следующими условиями:

$$|x| = \begin{cases} -x, & \text{если } x < 0; \\ x, & \text{если } x \geq 0. \end{cases}$$



49. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}u^2 + v^2 + w &= 2, \\v^2 + w^2 + u &= 2, \\w^2 + u^2 + v &= 2.\end{aligned}$$

50. Решить систему уравнений

$$\frac{x_2 x_3 \dots x_n}{x_1} = a_1, \quad \frac{x_1 x_3 \dots x_n}{x_2} = a_2, \quad \frac{x_1 x_2 \dots x_{n-1}}{x_n} = a_n,$$

предполагая, что числа  $a_1, \dots, a_n$  и  $x_1, \dots, x_n$  положительны.

51. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}(x + y + z)(ax + y + z) &= k^2, \\(x + y + z)(x + ay + z) &= l^2, \\(x + y + z)(x + y + az) &= m^2,\end{aligned}$$

предполагая, что  $a, k, l, m$  — действительные числа и  $k^2 + l^2 + m^2 > 0$ .

52. Найти вещественные решения системы уравнений

$$\begin{aligned}x + y + z &= 6, \\x^2 + y^2 + z^2 &= 14, \\xz + yz &= (xy + 1)^2.\end{aligned}$$

53. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x^2 + xy + xz + yz &= a, \\y^2 + xy + xz + yz &= b, \\z^2 + xy + xz + yz &= c,\end{aligned}$$

предполагая, что  $abc \neq 0$ .

54. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x(y + z) &= a^2, \\y(z + x) &= b^2, \\z(x + y) &= c^2,\end{aligned}$$

предполагая, что  $abc \neq 0$ .

55. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}y + 2x + z &= a(x + y)(z + x), \\z + 2y + x &= b(y + z)(x + y), \\x + 2z + y &= c(z + x)(y + z).\end{aligned}$$

56. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x + y + z &= 9, \\ \frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} &= 1, \\ xy + xz + yz &= 27.\end{aligned}$$

57. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x + y + z &= a, \\ xy + yz + xz &= a^2, \\ xyz &= a^3.\end{aligned}$$

58. Показать, что единственным решением системы уравнений

$$\begin{aligned}2x + y + z &= 0, \\ yz + zx + xy - y^2 &= 0, \\ xy + z^2 &= 0\end{aligned}$$

является решение  $x = y = z = 0$ .

59. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x + y + z &= a, \\ x^2 + y^2 + z^2 &= a^2, \\ x^3 + y^3 + z^3 &= a^3.\end{aligned}$$

60. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x + y + z &= 2, \\ (x + y)(y + z) + (y + z)(z + x) + (z + x)(x + y) &= 1, \\ x^2(y + z) + y^2(z + x) + z^2(x + y) &= -6.\end{aligned}$$

61. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x^2 + (y - z)^2 &= a, \\ y^2 + (x - z)^2 &= b, \\ z^2 + (x - y)^2 &= c.\end{aligned}$$

62. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}xy + yz + zx &= 47, \\ x^2 + y^2 &= z^2, \\ (z - x)(z - y) &= 2.\end{aligned}$$

63. Найти вещественные решения системы уравнений

$$2x_2 = x_1 + \frac{2}{x_1},$$

$$2x_3 = x_2 + \frac{2}{x_2},$$

.....

$$2x_n = x_{n-1} + \frac{2}{x_{n-1}},$$

$$2x_1 = x_n + \frac{2}{x_n}.$$

64. Показать, что если  $a, b, c, d$  — попарно неравные вещественные числа и  $x, y, z$  — решение системы уравнений

$$\begin{aligned} 1 + x + y + z &= 0, \\ a + bx + cy + dz &= 0, \\ a^2 + b^2x + c^2y + d^2z &= 0, \end{aligned}$$

то произведение  $xyz$  положительно.

В предлагаемых ниже уравнениях в случае корней четной степени рассматриваются лишь такие значения неизвестных, при которых подкоренное выражение неотрицательно; при этом берется только неотрицательное значение корня. В случае корней нечетной степени подкоренное выражение может быть любым вещественным числом (в этом случае знак корня совпадает со знаком подкоренного выражения).

65. Решить уравнение

$$\sqrt[3]{(a+x)^2} + 4\sqrt[3]{(a-x)^2} = 5\sqrt[3]{a^2 - x^2}$$

66. Решить уравнение

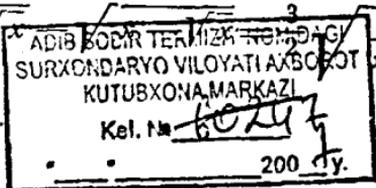
$$\sqrt[m]{(1+x)^2} - \sqrt[m]{(1-x)^2} = \sqrt[m]{1-x^2}.$$

67. Решить уравнение

$$\sqrt{y-2} + \sqrt{2y-5} + \sqrt{y+2} + 3\sqrt{2y-5} = 7\sqrt{2}.$$

68. Решить уравнение

$$\sqrt{x} + \sqrt{\frac{x}{x+1}}$$



142777

69. Решить уравнение

$$\frac{\sqrt{x^2+8x}}{\sqrt{x+1}} + \sqrt{x+7} = \frac{7}{\sqrt{x+1}}.$$

70. Найти все вещественные корни уравнения

$$\sqrt[3]{x-1} + \sqrt[3]{x+1} = x\sqrt[3]{2}.$$

71. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \sqrt{1-16y^2} - \sqrt{1-16x^2} &= 2(x+y), \\ x^2 + y^2 + 4xy &= \frac{1}{5}. \end{aligned}$$

72. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} x - y &= \frac{7}{2} \left( \sqrt[3]{x^2y} - \sqrt[3]{xy^2} \right), \\ \sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{y} &= 3. \end{aligned}$$

73. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{x}{y}} - \sqrt{\frac{y}{x}} &= \frac{3}{2}, \\ x + yx + y &= 9. \end{aligned}$$

74. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{y+1}{x-y}} + 2\sqrt{\frac{x-y}{y+1}} &= 3, \\ x + xy + y &= 7. \end{aligned}$$

75. Найти все вещественные решения системы

$$x + y - \sqrt{\frac{x+y}{x-y}} = \frac{12}{x-y}, \quad xy = 15.$$

76. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} y + \frac{2\sqrt{x^2-12y+1}}{3} &= \frac{x^2+17}{12}, \\ \frac{x}{8y} + \frac{2}{3} &= \sqrt{\frac{x}{3y} + \frac{1}{4}} - \frac{y}{2x}. \end{aligned}$$

77. Решить систему уравнений

$$\frac{x + \sqrt{x^2 - y^2}}{x - \sqrt{x^2 - y^2}} + \frac{x - \sqrt{x^2 - y^2}}{x + \sqrt{x^2 - y^2}} = \frac{17}{4},$$

$$x(x + y) + \sqrt{x^2 + xy + 4} = 52.$$

78. Решить систему уравнений

$$y^2 + \sqrt{3y^2 - 2x + 3} = \frac{2}{3}x + 5,$$

$$3x - 2y = 5.$$

79. Найти вещественные решения системы уравнений

$$y + \frac{4}{3}\sqrt{x^2 - 6y + 1} = \frac{x^2 + 17}{6},$$

$$\frac{x^2 y - 5}{49} = \frac{2}{y} - \frac{12}{x^2} + \frac{4}{9}.$$

80. Решить систему уравнений

$$(x - y)\sqrt{y} = \frac{\sqrt{x}}{2},$$

$$(x + y)\sqrt{x} = 3\sqrt{y}.$$

81. Решить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{x + y} - \sqrt{x - y} &= a, \\ \sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{x^2 - y^2} &= a^2. \end{aligned} \right\} \quad (a > 0)$$

82. Решить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} x\sqrt{x} - y\sqrt{y} &= a(\sqrt{x} - \sqrt{y}), \\ x^2 + xy + y^2 &= b^2 \end{aligned} \right\} \quad (a > 0, b > 0).$$

### 3. Алгебраические неравенства

#### Предварительные замечания

Приведем некоторые неравенства, которые используются при решении предлагаемых ниже задач.

Для любых вещественных  $a$  и  $b$

$$a^2 + b^2 \geq 2|ab|. \quad (1)$$

Неравенство (1) есть следствие очевидного неравенства  $(a \pm b)^2 \geq 0$ .

Если  $ab > 0$ , то, разделив обе части неравенства (1) на  $ab$ , получим:

$$\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \geq 2. \quad (2)$$

Если  $u \geq 0$ ,  $v \geq 0$ , то, положив в (1)  $u = a^2$ ,  $v = b^2$ , получим:

$$\frac{u+v}{2} \geq \sqrt{uv}. \quad (3)$$

Отметим, кроме того, некоторые свойства квадратного трехчлена

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (4)$$

которые ниже используются в ряде задач.

Из представления трехчлена (4) по формуле

$$y = a \left( x + \frac{b}{2a} \right)^2 - \frac{b^2 - 4ac}{4a} \quad (5)$$

следует, что в случае, когда дискриминант трехчлена

$$D = b^2 - 4ac < 0$$

(в этом случае корни трехчлена не вещественны), трехчлен при всех  $x$  принимает значения одного и того же знака, совпадающего со знаком коэффициента  $a$  при старшем члене.

В случае  $D = 0$  трехчлен также сохраняет постоянный знак, обращаясь в нуль при единственном значении  $x = -\frac{b}{2a}$ .

Наконец, в случае  $D > 0$  (в этом случае трехчлен имеет вещественные и различные корни  $x_1$  и  $x_2$ ) из разложения

$$y = a(x - x_1)(x - x_2)$$

вытекает, что лишь при условии

$$x_1 < x < x_2$$

трехчлен принимает значения, знак которых противоположен знаку  $a$ . Для всех же остальных значений  $x$ , отличных от  $x_1$  и  $x_2$ , трехчлен имеет тот же знак, что и  $a$ .

Таким образом, трехчлен всегда сохраняет знак коэффициента при старшем члене, за исключением лишь того случая, когда корни его вещественны и

$$x_1 \leq x \leq x_2.$$

83. Доказать, что выражение

$$3 \left( \frac{x^2}{y^2} + \frac{y^2}{x^2} \right) - 8 \left( \frac{x}{y} + \frac{y}{x} \right) + 10$$

неотрицательно при любых вещественных  $x$  и  $y$ , не равных нулю.

84. При каких значениях  $a$  система неравенств

$$-3 < \frac{x^2 + ax - 2}{x^2 - x + 1} < 2$$

удовлетворяется при всех значениях  $x$ ?

85. Найти все значения  $a$ , при которых смешанная система

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + 2x &\leq 1, \\ x - y + a &= 0 \end{aligned}$$

имеет единственное решение. Найти соответствующие решения.

86. Найти пары целых чисел  $x$  и  $y$ , удовлетворяющие системе неравенств

$$\begin{aligned} y - |x^2 - 2x| + \frac{1}{2} &> 0, \\ y + |x - 1| &< 2. \end{aligned}$$

87. Показать, что при всяком целом  $n > 1$  справедливо неравенство

$$\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \dots + \frac{1}{2n} > \frac{1}{2}.$$

88. Доказать, что при всяком целом положительном  $m$  справедливо неравенство

$$\frac{1}{m+1} + \frac{1}{m+2} + \dots + \frac{1}{m+(2m+1)} > 1.$$

89. Показать, что при любом натуральном  $n$

$$\frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots + \frac{1}{n^2} < \frac{n-1}{n}.$$

90. Доказать, что при  $n > 2$

$$(n!)^2 > n^n.$$

91. Доказать, что из трех отрезков с длинами  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$  можно построить треугольник тогда и только тогда, когда

$$ra^2 + qb^2 > rqc^2$$

для любых чисел  $r$  и  $q$ , связанных соотношением

$$r + q = 1.$$

92. Доказать, что при любых вещественных  $x, y, z$  имеет место неравенство

$$4x(x+y)(x+z)(x+y+z) + y^2z^2 \geq 0.$$

93. Доказать, что при любых вещественных  $x$  и  $y$  имеет место неравенство

$$x^2 + 2xy + 3y^2 + 2x + 6y + 4 \geq 1.$$

94. Доказать, что при условии  $2x + 4y = 1$  выполняется неравенство

$$x^2 + y^2 \geq \frac{1}{20}.$$

95. Каким условиям должно удовлетворять число  $d > 0$  для того, чтобы при  $R \geq r > 0$  имело место неравенство

$$0 < \frac{d^2 + R^2 - r^2}{2dr} \leq 1.$$

96. Доказать неравенство

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \geq \frac{9}{a+b+c}$$

( $a, b, c$  положительны).

97. Доказать, что если  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  положительны и  $a_1 a_2 a_3 \dots a_n = 1$ , то

$$(1 + a_1)(1 + a_2)(1 + a_3) \dots (1 + a_n) \geq 2^n.$$

98. Доказать, что если  $a + b = 1$ , то

$$a^3 + b^3 \geq \frac{1}{8}.$$

99. Доказать, что многочлен

$$x^6 - x^5 + x^2 - x + 1$$

положителен при всех вещественных  $x$ .

100. Доказать, что если  $|x| < 1$ , то при любом целом  $n \geq 2$  выполняется неравенство

$$(1 - x)^n + (1 + x)^n < 2^n.$$

101. Доказать, что

$$|x_1 a_1 + x_2 a_2 + \dots + x_n a_n| \leq \frac{1}{\varepsilon} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) + \frac{\varepsilon}{4} (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n, a_1, a_2, \dots, a_n$  и  $\varepsilon$  — произвольные вещественные числа, причем  $\varepsilon > 0$ .

102. Доказать неравенство

$$\frac{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2 + \sqrt{2 + \dots + \sqrt{2}}}}}{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2 + \dots + \sqrt{2}}}} > \frac{1}{4}$$

при условии, что числитель левой части неравенства содержит  $n$  знаков радикала, а знаменатель —  $n - 1$  знаков.

103. Доказать, что для любых вещественных чисел  $a_1, a_2, \dots, a_n$  и  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , удовлетворяющих соотношениям

$$\begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2 &= 1, \\ b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2 &= 1, \end{aligned}$$

справедливо неравенство

$$|a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n| \leq 1.$$

104. Доказать, что если числа  $x_1, x_2, \dots, x_n$  положительны и удовлетворяют соотношению

$$x_1 x_2 \dots x_n = 1,$$

то

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n \geq n.$$

#### 4. Логарифмические и показательные уравнения, тождества и неравенства

##### Предварительные замечания

По определению логарифма числа  $N$  по основанию  $a$  имеем:

$$a^{\lg_a N} = N. \quad (1)$$

В этой формуле  $N$  — любое положительное число,  $a$  — произвольное основание, причем  $a > 0, a \neq 1$ .

Ниже при решении ряда задач используется следующая формула перехода от логарифмов по основанию  $a$  к логарифмам по основанию  $b$  и обратно:

$$\lg_a N = \frac{\lg_b N}{\lg_b a} \quad (2)$$

(формула доказывается логарифмированием тождества (1) по основанию  $b$ ). Из формулы (1) при  $N=b$ , в частности, следует:

$$\lg_a b = \frac{1}{\lg_b a}. \quad (3)$$

105. Решить уравнение

$$4^x - 3^{x-\frac{1}{2}} = 3^{x+\frac{1}{2}} - 2^{2x-1}.$$

106. Решить уравнение

$$\frac{\lg_2 x}{\lg_2^2 a} - \frac{2 \lg_a x}{\lg_1 a} = \lg_3 \sqrt{\frac{1}{a}} x \lg_a x.$$

107. Решить уравнение

$$\lg_x 2 \lg_x 2 = \lg_x \frac{2}{16}.$$

108. Решить уравнение

$$\lg_2 (9^{x-1} + 7) = 2 + \lg_2 (3^{x-1} + 1).$$

109. Решить уравнение

$$\lg_{3x} \left( \frac{3}{x} \right) + \lg_3^2 x = 1.$$

110. Показать, что уравнение

$$\lg_{2x} \left( \frac{2}{x} \right) \lg_2^2 x + \lg_2^4 x = 1$$

имеет лишь один корень, удовлетворяющий неравенству  $x > 1$ , и найти этот корень.

111. Решить уравнение

$$\lg_{\frac{3}{a}} a + \lg_a x = 1.$$

112. Решить уравнение

$$\lg_x a + \lg_{x^{1/4}} x^2 \sqrt{a} = 4.$$

113. Решить уравнение

$$2(\lg_b x \lg_{a^2} 3 + \lg_a x \lg_b a) = \lg_a x \lg_b x.$$

114. Решить уравнение

$$\frac{\lg_{a^2} \sqrt{x} a}{\lg_{2x} a} + \lg_{ax} a \lg_{\frac{1}{a}} 2x = 0.$$

115. Решить уравнение

$$(1 + \lg_c a) \lg_a x \lg_b c = \lg_b x \lg_c x \lg_a c.$$

116. Каким условиям должны удовлетворять числа  $a$  и  $b$  для того, чтобы уравнение

$$1 + \lg_b (2 \lg a - x) \lg_x b = \frac{2}{\lg_b x}$$

имело хотя бы одно решение? Найти затем все решения этого уравнения.

117. Решить уравнение

$$\lg_x 2 \lg_{2x} 2 = \lg_{4x} 2.$$

118. Решить уравнение

$$\lg_{xa^2} x^3 + \lg_{\frac{x}{\sqrt{a}}} \sqrt{x} = 2.$$

119. Решить уравнение

$$2 \lg_x a + 3 \lg_{a^2 x} a + \frac{\lg_x a}{\lg_x ax} = 0.$$

120. Решить уравнение \*)

$$\sqrt{\lg_a \sqrt[4]{ax} + \lg_x \sqrt[4]{ax}} + \sqrt{\lg_a \sqrt[4]{\frac{x}{a}} + \lg_x \sqrt[4]{\frac{a}{x}}} = a.$$

121. Решить уравнение

$$\frac{\lg(\sqrt{x+1}+1)}{\lg \sqrt[3]{x-40}} = 3.$$

\*) Здесь и ниже корни понимаются в том смысле, как это оговорено на стр. 17.

122. Решить уравнение

$$\sqrt{\lg_x \sqrt{3x}} \lg_3 x = -1.$$

123. Решить уравнение

$$1 + \frac{\lg_a(p-x)}{\lg_a(x+q)} = \frac{2 - \lg_{p-q} 4}{\lg_{p-q}(x+q)} \quad (p > q > 0).$$

124. Решить уравнение

$$\sqrt{\lg_x 5 \sqrt{5} + \lg_{\sqrt{3}} 5 \sqrt{5}} \lg_{\sqrt{5}} x = -\sqrt{6}.$$

125. Решить уравнение

$$(0,4)^{\lg^2 x + 1} = (6,25)^{2 - \lg x^3}.$$

126. Решить уравнение

$$1 + \lg_x \frac{4-x}{10} = (\lg \lg n - 1) \lg_x 10.$$

Сколько корней имеет уравнение при данном значении  $n$ ?

127. Решить уравнение

$$\lg_{\sin x} 2 \cdot \lg_{\sin^2 x} a + 1 = 0.$$

128. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} 3^x 2^y &= 576, \\ \lg_{\sqrt{2}}(y-x) &= 4. \end{aligned}$$

129. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \lg_2(x+y) - \lg_3(x-y) &= 1, \\ x^2 - y^2 &= 2. \end{aligned}$$

130. Решить систему уравнений

$$x^a = y^b, \quad \lg_c \frac{x}{y} = \frac{\lg_c x}{\lg_c y} \quad (a \neq b, ab \neq 0).$$

131. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \lg_5 x + 3 \lg_5 y &= 7, \\ x^y &= 5^{12}. \end{aligned}$$

132. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}yx^{\lg_y x} &= x^{\frac{5}{2}}, \\ \lg_4 y \lg_y (y - 3x) &= 1.\end{aligned}$$

133. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}a^x b^y &= ab, \\ 2 \lg_a x &= \lg_{\frac{1}{b}} y \lg_{\sqrt{a}} b.\end{aligned}$$

134. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}3(2 \lg_{y^2} x - \lg_{\frac{1}{x}} y) &= 10, \\ xy &= 81.\end{aligned}$$

135. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}\lg_{12} x \left( \frac{1}{\lg_x 2} + \lg_2 y \right) &= \lg_2 x, \\ \lg_2 x \lg_3 (x + y) &= 3 \lg_3 x.\end{aligned}$$

136. Решить систему уравнений

$$100 \cdot 2^x = 5^y, \lg_{\sqrt{2}} (2x + 1) + \frac{4}{\lg_{\frac{1}{4}} y} = 0.$$

137. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x \lg_2 y \lg_{\frac{1}{x}} 2 &= y \sqrt{y} (1 - \lg_x 2), \\ \lg_y 2 \lg_{\sqrt{2}} x &= 1.\end{aligned}$$

138. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}\lg_y x - 3 \lg_x y &= 2, \\ \lg_2 x &= 4 - \lg_2 y.\end{aligned}$$

139. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}2 \lg_x 2 + 3 \lg_y 2 &= 0, \\ x^3 - 4y^2 &= 0.\end{aligned}$$

140. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \lg_2 x + \lg_4 y + \lg_4 z &= 2, \\ \lg_2 y + \lg_2 z + \lg_2 x &= 2, \\ \lg_4 z + \lg_{16} x + \lg_{16} y &= 2. \end{aligned}$$

141. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \lg_{0,5}(y-x) + \lg_2 \frac{1}{y} &= -2, \\ x^2 + y^2 &= 25. \end{aligned}$$

142. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} xy &= a, \\ \lg^2 x + \lg^2 y &= \frac{5}{2} \lg^2 a. \end{aligned}$$

143. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} x^{x+y} &= y^{x-y}, \\ x^2 y &= 1, \end{aligned}$$

предполагая, что  $x > 0$  и  $y > 0$ .

144. Решить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} a^{2x} + a^{2y} &= 2b, \\ a^{x+y} &= c \end{aligned} \right\} \quad (a > 0).$$

Каким условиям должны удовлетворять  $b$  и  $c$ , чтобы решение было возможно?

145. Найти решения системы уравнений

$$\begin{aligned} x^{x+y} &= y^n, \\ y^{x+y} &= x^{2n} y^n, \end{aligned}$$

предполагая, что  $x > 0$ ,  $y > 0$  и  $n > 0$ .

146. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} (3x + y)^{x-y} &= 9, \\ x^{-y} \sqrt[3]{324} &= 18x^2 + 12xy + 2y^2. \end{aligned}$$

147. Решить систему уравнений

$$x^y = y^x, \quad x^p = y^q,$$

предполагая, что  $x > 0$ ,  $y > 0$  и  $pq > 0$ .

148. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned}x^y &= y^x, \\ p^x &= q^y,\end{aligned}$$

предполагая, что  $x > 0$ ,  $y > 0$ ,  $p > 0$ ,  $q > 0$ .

149. Доказать, что

$$\lg_{c+b} a + \lg_{c-b} a = 2 \lg_{c+b} a \lg_{c-b} a,$$

если  $a^2 + b^2 = c^2$  и  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$ .

150. Упростить выражение

$$(\lg_b a - \lg_a b)^2 + (\lg_{\frac{1}{2}} a - \lg_{a^2} b)^2 + \dots + (\lg_{\frac{1}{b^{2^n}}} a - \lg_{a^{2^n}} b)^2.$$

151. Упростить выражение  $a^{\frac{\lg \lg a}{\lg a}}$ , предполагая, что все логарифмы взяты по одному и тому же основанию  $b$ .

152. Дано:  $\lg_a b = A$ ,  $\lg_q b = B$  и  $n > 0$  целое. Вычислить  $\lg_c b$ , где  $c$  равняется произведению  $n$  членов геометрической прогрессии с первым членом  $a$  и знаменателем  $q$ .

153. Доказать, что если при некотором положительном  $N \neq 1$  для трех положительных чисел  $a$ ,  $b$ ,  $c$  выполняется соотношение

$$\frac{\lg_a N}{\lg_c N} = \frac{\lg_a N - \lg_b N}{\lg_b N - \lg_c N},$$

то  $b$  есть средняя пропорциональная между  $a$  и  $c$  и соотношение выполняется при любом положительном  $N \neq 1$ .

154. Доказать тождество

$$\lg_a N \lg_b N + \lg_b N \lg_c N + \lg_c N \lg_a N = \frac{\lg_a N \lg_b N \lg_c N}{\lg_{abc} N}.$$

155. Доказать тождество

$$\frac{\lg_a x}{\lg_{ab} x} = 1 + \lg_a b.$$

156. Решить неравенство

$$\lg_{\frac{1}{2}} x + \lg_3 x > 1.$$

157. Решить неравенство

$$x^{\lg_a x + 1} > a^2 x \quad (a > 1).$$

158. Решить неравенство

$$\lg_a x + \lg_a (x + 1) < \lg_a (2x + 6) \quad (a > 1).$$

159. Решить неравенство

$$x^{2 - \lg_2^2 x - \lg_2 x^2} - \frac{1}{x} > 0.$$

160. При каких вещественных  $x$  и  $\alpha$  имеет место неравенство

$$\lg_2 x + \lg_x 2 + 2 \cos \alpha \leq 0?$$

161. Решить неравенство

$$\lg_{\frac{1}{3}} [\lg_3 (\sin x + 2\sqrt{2} \cos x)] > 0.$$

## Б. Комбинаторика и бином Ньютона

### Предварительные замечания

Число размещений из  $n$  элементов по  $m$  определяется формулой

$$A_n^m = n(n-1)\dots(n-m+1). \quad (1)$$

Число перестановок из  $n$  элементов определяется формулой

$$P_n = 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots n = n! \quad (2)$$

Для числа сочетаний из  $m$  элементов по  $n$  справедлива формула

$$C_n^m = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-m+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots m} = \frac{A_n^m}{P_m}. \quad (3)$$

Имеет место равенство

$$C_n^m = C_n^{n-m}.$$

Для целых положительных  $n$  и любых  $x$  и  $a$  справедливо разложение

$$(x+a)^n = x^n + C_n^1 a x^{n-1} + C_n^2 a^2 x^{n-2} + \dots \\ \dots + C_n^{n-2} a^{n-2} x^2 + C_n^{n-1} a^{n-1} x + a^n; \quad (4)$$

общий член данного разложения равен

$$T_{k+1} = C_n^k a^k x^{n-k}. \quad (5)$$

Из разложения (4) следуют равенства

$$1 + C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^{n-2} + C_n^{n-1} + 1 = 2^n,$$

$$1 - C_n^1 + C_n^2 - C_n^3 + \dots + (-1)^n = 0.$$

162. Найти  $m$  и  $n$ , зная, что

$$C_{n+1}^{m+1} : C_{n+1}^m : C_{n+1}^{m-1} = 5 : 5 : 3.$$

163. Найти коэффициент при  $x^9$  в разложении

$$(1 + x^2 - x^3)^9.$$

164. Найти коэффициент при  $x^m$  в разложении по степеням  $x$  выражения

$$(1 + x)^k + (1 + x)^{k+1} + \dots + (1 + x)^n.$$

Разобрать при этом случаи  $m < k$ ,  $m \geq k$ .

165. В разложении  $\left(x\sqrt{x} + \frac{1}{x^2}\right)^n$  биномиальный коэффициент третьего члена на 44 больше коэффициента второго члена. Найти член, не содержащий  $x$ .

166. При каком значении  $k$  член  $T_{k+1}$  разложения по формуле бинома Ньютона

$$(1 + \sqrt{3})^{100}$$

будет одновременно больше предыдущего и больше последующего членов этого разложения?

167. Найти число различных не подобных между собой членов разложения

$$(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)^2,$$

получающихся после возведения в степень.

168. Пусть  $p_1, p_2, \dots, p_n$  — различные простые числа. Сколько делителей имеет число  $q = p_1 p_2 \dots p_n$ , включая 1 и  $q$ ?

169. Показать, что если каждый коэффициент в разложении  $x(1+x)^n$  разделить на показатель степени  $x$ , при

которой этот коэффициент стоит, то сумма полученных частных будет равна  $\frac{2^{n+1} - 1}{n + 1}$ .

170. Каким числом способом можно разделить колоду из 36 карт пополам так, чтобы в каждой пачке было по 2 туза?

171. Сколько можно составить телефонных номеров из пяти цифр так, чтобы в каждом отдельно взятом номере все цифры были различны?

172. Даны  $2n$  элементов. Рассматриваются всевозможные разбиения их на пары, причем разбиения, отличающиеся только порядком элементов внутри пар и порядком расположения пар, считаются совпадающими. Сколько существует таких различных разбиений?

173. Сколько можно сделать из  $n$  элементов перестановок, в которых два элемента  $a$  и  $b$  не стоят рядом?

174. В вещевой лотерее разыгрывается 8 предметов. Первый подошедший к урне вынимает из нее 5 билетов. Каким числом способов он может их вынуть, чтобы: 1) ровно два из них оказались выигрышными; 2) по крайней мере, два из них оказались выигрышными. Всего в урне 50 билетов.

175. Параллелограмм пересекается двумя рядами прямых, параллельных его сторонам; каждый ряд состоит из  $m$  прямых. Сколько параллелограммов можно выделить в образовавшейся сетке?

176. На одной из двух параллельных прямых выбрано  $m$  точек, на другой —  $n$  точек. Каждая из  $m$  точек на первой прямой соединена прямой линией с каждой из  $n$  точек на второй прямой. Найти, сколько раз пересекаются все отрезки, соединяющие точки, если известно, что нет ни одной точки, в которой пересекались бы три и более отрезков одновременно.

177. Некоторый алфавит состоит из шести букв, которые для передачи по телеграфу кодированы так:

·; —; ··; ——; ·—; —·

При передаче одного слова не сделали промежутков, отделяющих букву от буквы, так что получилась сплошная цепочка точек и тире, содержащая 12 знаков. Сколькими способами можно прочитать переданное слово?

## 6. Составление уравнений

178. При перемножении чисел, из которых одно на 10 больше другого, ученик допустил ошибку, уменьшив на 4 цифру десятков в произведении. При делении (для проверки ответа) полученного произведения на меньший из множителей он получил в частном 39, а в остатке 22. Найти множители.

179. Два велосипедиста, выехав одновременно из пункта  $A$ , едут с разными, но постоянными скоростями в пункт  $B$  и, достигнув его, сейчас же поворачивают обратно. Первый велосипедист, обогнав второго, встречает его на обратном пути на расстоянии  $a$  км от  $B$ , затем, достигнув  $A$  и снова повернув обратно к  $B$ , он встречает второго велосипедиста, пройдя  $k$ -ю часть расстояния от  $A$  до  $B$ . Найти расстояние от  $A$  до  $B$ .

180. Две автомашины выехали одновременно из одного пункта в одном и том же направлении. Одна машина идет со скоростью 50 км/час, другая — 40 км/час. Спустя полчаса из того же пункта в том же направлении выехала третья машина, которая обогнала первую машину на 1,5 часа позже, чем вторую. Найти скорость третьей машины.

181. Из пунктов  $A$  и  $B$  навстречу друг другу одновременно отправились пешеход и велосипедист. После встречи пешеход продолжал свой путь в  $B$ , велосипедист же повернул назад и тоже поехал в  $B$ . Пешеход, вышедший из  $A$ , пришел в  $B$  на  $t$  часов позже велосипедиста. Сколько времени прошло до встречи, если известно, что скорость пешехода в  $k$  раз меньше скорости велосипедиста?

182. Почтальон, идя безостановочно из пункта  $A$  через пункт  $B$  в пункт  $C$ , проходил путь от  $A$  до  $B$  со скоростью  $3,5$  км/час и от  $B$  до  $C$  со скоростью  $4$  км/час. Чтобы успеть за такое же время вернуться из  $C$  в  $A$ , идя по той же дороге, он должен был проходить по  $3,75$  км в час в течение всего пути. Однако, дойдя на обратном пути с указанной скоростью до  $B$ , он задержался в этом пункте на  $14$  минут и, чтобы успеть в назначенное время вернуться в  $A$ , должен был от  $B$  до  $A$  проходить уже по  $4$  км в час. Найти расстояние между  $A$  и  $B$  и между  $B$  и  $C$ .

183. Дорога от  $A$  до  $B$  длиной  $11,5$  км идет сначала в гору, потом по ровному месту и потом под гору. Пешеход, идя из  $A$  в  $B$ , прошел всю дорогу за  $2$  часа  $54$  минуты, а на обратную дорогу затратил  $3$  часа  $6$  минут. Скорость ходьбы: в гору  $3$  км/час, по ровному месту  $4$  км/час, под гору  $5$  км/час. На каком протяжении дорога идет по ровному месту?

184. Для испытания мотоциклов разных систем два мотоциклиста выехали одновременно из  $A$  в  $B$  и из  $B$  в  $A$ . Каждый ехал с постоянной скоростью и, приехав в конечный пункт, тут же поворачивал обратно. Первый раз они встретились в  $p$  км от  $B$ , второй раз — в  $q$  км от  $A$  через  $t$  часов после первой встречи. Найти расстояние между  $A$  и  $B$  и скорости обоих мотоциклов.

185. Самолет летел из  $A$  в  $B$  по прямой. Через некоторое время вследствие встречного ветра он уменьшил скорость до  $v$  км/час, в силу чего опоздал на  $t_1$  минут. Во время второго рейса самолет по той же причине уменьшил свою скорость до той же величины, но на  $d$  км дальше от  $A$ , чем в первый рейс, и опоздал на  $t_2$  минут. Найти первоначальную скорость самолета.

186. От двух кусков сплава с различным процентным содержанием меди, весящих  $m$  кг и  $n$  кг, было отрезано по куску равного веса. Каждый из отрезанных кусков был сплавлен с остатком другого куска, после чего процентное содержание меди в обоих сплавах стало одинаковым. Сколько весил каждый из отрезанных кусков?

187. Имеются два куска сплава серебра с медью. Один из них содержит  $p\%$  меди, другой —  $q\%$  меди. В каком отношении нужно брать сплавы от первого и второго кусков, чтобы получить новый сплав, содержащий  $r\%$  меди? При каких соотношениях между  $p$ ,  $q$ ,  $r$  задача возможна и какой максимальный вес нового сплава можно получить, если первый кусок весил  $P$  г, второй —  $Q$  г.

188. Рабочие  $A$  и  $B$  работали одинаковое число дней. Если бы  $A$  работал на один день меньше, а  $B$  — на 7 дней меньше, то  $A$  заработал бы 720 руб., а  $B$  — 648 руб. Если бы, наоборот,  $A$  работал на 7 дней меньше, а  $B$  — на один день меньше, то  $B$  заработал бы на 324 руб. больше  $A$ . Сколько заработал каждый в действительности?

189. По окружности в противоположных направлениях движутся два тела: первое равномерно с линейной скоростью  $v$ , а второе равноускоренно с линейным ускорением  $a$ . В начальный момент времени оба тела находились в одной точке  $A$  и скорость второго была равна нулю. Через какое время произойдет первая встреча этих тел, если вторая встреча будет снова в точке  $A$ ?

190. Бассейн наполняется водой из двух кранов. Сначала первый кран был открыт одну треть того времени, которое требуется для наполнения бассейна только через один второй кран. Затем, наоборот, второй кран был открыт одну треть того времени, которое требуется для наполнения бассейна через один первый кран. После этого оказалось наполненным  $\frac{13}{18}$  бассейна. Вычислить, сколько времени нужно для наполнения бассейна каждым краном в отдельности, если оба крана, открытых вместе, наполняют бассейн за 3 часа 36 минут.

191. Цилиндрическая трубка с поршнем погружена в резервуар с водой; между поршнем и водой находится столб воздуха в  $h$  м при атмосферном давлении. Затем поршень поднимают на  $b$  м над уровнем воды в резервуаре. Вычислить высоту воды в трубке, зная, что высота столба жидкости в водяном барометре при атмосферном давлении равна  $c$  м.

192. Цилиндрическая трубка, в которой ходит поршень, погружена в чашку со ртутью. Ртуть в трубке стоит на 12 см выше ее уровня в чашке, а высота столбика воздуха в трубке над ртутью (до поршня)  $29\frac{3}{4}$  см. Поршень опускают на 6 см. Какова будет в таком случае высота столбика ртути, если наружное давление воздуха эквивалентно 76 см ртутного столба?

193. Часы показывают в некоторый момент на 2 минуты меньше, чем следует, хотя и идут вперед. Если бы они показывали на 3 минуты меньше, чем следует, но уходили бы в сутки вперед на  $\frac{1}{2}$  минуты больше, чем уходят, то верное время они показали бы на сутки раньше, чем покажут. На сколько минут в сутки спешат эти часы?

194. Два вкладчика положили в сберкассу одинаковые суммы. Первый из них взял вклад по истечении  $m$  месяцев и получил  $p$  руб., а второй, взяв вклад по истечении  $n$  месяцев, получил  $q$  руб. Сколько каждый из них положил в сберкассу и сколько процентов выплачивает сберкасса?

195. По окружности радиуса  $R$  равномерно и в одном направлении движутся две точки. Одна из них делает полный круг на  $t$  сек быстрее второй. Время между двумя последовательными встречами точек равно  $T$ . Определить скорости этих точек.

196. В колбе имеется раствор поваренной соли. Из колбы в пробирку отливают  $\frac{1}{n}$ -ю часть раствора и выпаривают до тех пор, пока процентное содержание соли в пробирке не повысится вдвое. После этого выпаренный раствор выливают обратно в колбу. В результате содержание соли в колбе повышается на  $p$  процентов. Определить исходное процентное содержание соли.

197. В двух одинаковых сосудах, объемом по 30 л каждый, содержится всего 30 л спирта. Первый сосуд доливают доверху водой и полученной смесью дополняют второй сосуд,

затем из второго сосуда отливают в первый 12 л новой смеси. Сколько спирта было первоначально в каждом сосуде, если во втором сосуде оказалось на 2 л спирта меньше, чем в первом?

198. Трое путешественников  $A$ ,  $B$  и  $C$  переправляются через водохранилище шириной  $s$  км:  $A$  — вплавь со скоростью  $v$  км/час, а  $B$  и  $C$  пользуются для этой цели моторной лодкой, скорость которой  $v_1$  км/час. Через некоторое время после начала переправы  $C$  решает оставшийся участок пути преодолеть вплавь (он плывет с той же скоростью, что и  $A$ ).  $B$  тем временем поворачивает назад, чтобы взять с собой  $A$ ;  $A$  садится в лодку и продолжает путь вместе с  $B$ . На противоположном берегу все трое оказываются одновременно. Определить продолжительность переправы.

199. Поезд вышел со станции  $A$  по направлению к  $B$  в 13.00. В 19.00 он вынужден был остановиться из-за снежного заноса. Через 2 часа путь удалось расчистить, и, чтобы наверстать потерянное время, машинист повел поезд на остальном пути со скоростью, превышающей скорость поезда до остановки на  $20\%$ . В результате поезд пришел в  $B$  с опозданием лишь на 1 час. На следующий день поезд, шедший из  $A$  в  $B$  по тому же расписанию, попал в занос на 150 км дальше от  $A$ , чем первый поезд. Простояв 2 часа, он тоже пошел со скоростью на  $20\%$  выше прежней, но смог наверстать лишь полчаса и опоздал в  $B$  на 1 час 30 минут. Найти расстояние между  $A$  и  $B$ .

200. Пристань  $A$  находится на расстоянии  $a$  км вниз по течению от пристани  $B$ . Моторная лодка совершает рейс от  $A$  до  $B$  и обратно (не задерживаясь в  $B$ ) за  $T$  часов. Найти скорость лодки в стоячей воде и скорость течения, если известно, что в один из рейсов при возвращении из  $B$  в  $A$  моторная лодка потерпела аварию на расстоянии  $b$  км от  $A$ , задержавшую лодку на  $T_0$  часов и уменьшившую в дальнейшем ее скорость вдвое, в результате чего путь от  $B$  к  $A$  был пройден за такое же время, как и путь из  $A$  в  $B$ .

201. Бак объемом  $425 \text{ м}^3$  наполнился водой из двух кранов, причем первый кран был открыт на 5 часов дольше

второго. Если бы первый кран был открыт столько времени, сколько на самом деле был открыт второй, а второй кран был бы открыт столько времени, сколько был открыт первый, то из первого крана вытекло бы вдвое меньше воды, чем из второго; если открыть оба крана одновременно, то бак наполнится через 17 часов.

Учитывая все указанные условия, определить, сколько времени был открыт второй кран.

202. По графику поезд должен проходить перегон  $AB$  в 20 км с постоянной скоростью. Первый раз поезд прошел полпути с этой скоростью и остановился на 3 минуты; чтобы во время прийти в  $B$ , ему пришлось остальные полпути идти на 10 км/час быстрее. Второй раз поезд застрял на полпути уже на 5 минут. С какой скоростью он должен был идти оставшуюся часть пути, чтобы прибыть в  $B$  по расписанию?

203. Два самолета вылетают одновременно из пунктов  $A$  и  $B$  навстречу друг другу и встречаются на расстоянии  $a$  км от середины  $AB$ . Если бы первый самолет вылетел на  $b$  часов позже второго, то они встретились бы на середине  $AB$ . Если же, наоборот, второй самолет вылетел бы на  $b$  часов позже первого, то они встретились бы на четверти пути от  $B$ . Найти расстояние  $AB$  и скорости самолетов.

204. От пристани  $A$  одновременно отправились вниз по течению катер и плот. Катер спустился вниз по течению на 96 км, затем повернул обратно и вернулся в  $A$  через 14 часов. Найти скорость катера в стоячей воде и скорость течения, если известно, что катер встретил плот на обратном пути на расстоянии 24 км от  $A$ .

205. Два тела начали двигаться одновременно в одном и том же направлении из двух мест, расстояние между которыми равно 20 м. Одно из них, находящееся позади, движется равноускоренно и проходит в первую секунду 25 м, а в следующую секунду на  $\frac{1}{3}$  м более; другое тело, двигаясь равномерно, проходит в первую секунду 30 м,

а в следующую на  $\frac{1}{2} m$  менее. Через сколько секунд первое тело нагонит второе?

206. Лодка спускается по течению реки на расстояние 10 км, а затем поднимается против течения на расстояние 6 км. Скорость течения реки равна 1 км/час. В каких пределах должна лежать собственная скорость лодки, чтобы вся поездка заняла от 3 до 4 часов?

207. Вместимости трех кубических сосудов  $A$ ,  $B$  и  $C$  относятся как 1:8:27, а объемы налитой в них воды — как 1:2:3. После переливания из  $A$  в  $B$  и из  $B$  в  $C$  получили во всех трех сосудах слой воды одинаковой глубины. Затем перелили из  $C$  в  $B$   $128\frac{4}{7}$  л, а после этого из  $B$  в  $A$  столько, что глубина воды в  $A$  стала вдвое больше, чем в  $B$ . При этом оказалось, что в  $A$  имеется на 100 л воды меньше, чем было первоначально. Сколько воды было вначале в каждом сосуде?

208. Найти четырехзначное число по следующим условиям: сумма квадратов крайних цифр равна 13; сумма квадратов средних цифр равна 85; если же из искомого числа вычесть 1089, то получится число, записываемое теми же цифрами, что искомое, но в обратном порядке.

209. По окружности, длина которой равна  $l$  м, двигаются две точки со скоростями  $v$  и  $w < v$ . Через сколько времени от начала движения будут происходить последовательные встречи точек, если эти точки двигаются по одному и тому же направлению и первая начала двигаться на  $t$  секунд раньше второй, отставая в начальный момент на расстояние  $a$  м от второй по ходу движения ( $a < l$ ).

210. Сплав весом  $P$  кг из двух металлов теряет в воде  $A$  кг. Кусок первого из двух металлов, составляющих сплав, весом  $P$  кг теряет в воде  $B$  кг, а второго —  $C$  кг. Найти вес составляющих сплав металлов и исследовать возможность решения задачи в зависимости от величин  $P$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

211. Плоты шли из пункта  $A$  до устья реки вниз по течению. В устье реки их взял на буксир пароход и через  $17\frac{1}{8}$  суток после выхода плотов из  $A$  доставил их по озеру в пункт  $B$ . Сколько времени пароход вел плоты от устья реки по озеру до  $B$ , если известно, что пароход тратил на рейс (без буксировки) от  $A$  до  $B$  61 час и от  $B$  до  $A$  — 79 часов и что его скорость во время буксировки уменьшается вдвое?

212. На участке реки от  $A$  до  $B$  течение так слабо, что им можно пренебречь; на участке от  $B$  до  $C$  течение уже достаточно сильное. Лодка покрывает расстояние вниз по течению от  $A$  до  $C$  за 6 часов, а от  $C$  до  $A$ , вверх по течению, за 7 часов. Если бы на участке от  $A$  до  $B$  течение было таким же, как на участке от  $B$  до  $C$ , то весь путь от  $A$  до  $C$  занял бы 5,5 часа. Сколько времени в этом случае понадобилось бы на то, чтобы подняться вверх от  $C$  до  $A$ ?

213. Сосуд содержит  $p\%$ -й раствор кислоты. Из него отлили  $a$  л и добавили то же количество  $q\%$ -го раствора кислоты ( $q < p$ ). Затем, после перемешивания, эту операцию повторили еще  $k-1$  раз, добавляя в сосуд тем же самым  $q\%$ -м раствором кислоты, после чего получился раствор крепостью  $r\%$ . Найти объем сосуда.

214. Вклад в  $A$  рублей положен в сберегательную кассу из  $p\%$  годовых. В конце каждого года вкладчик берет  $B$  рублей. Через сколько лет после взятия соответствующей суммы остаток будет втрое больше первоначального вклада? При каких условиях задача имеет решение?

215. На лесной делянке ежегодный прирост древесины равен  $p\%$ . Каждую зиму спиливается некоторое количество  $x$  древесины. Каково должно быть  $x$  для того, чтобы через  $n$  лет количество древесины на участке возросло в  $q$  раз, если начальное количество древесины равно  $a$ ?

216. Первый из  $n$  одинаковых цилиндрических сосудов налит доверху спиртом, а остальные — до половины смесью спирта с водой, причем концентрация спирта в каждом со-

суде в  $k$  раз меньше, чем в предыдущем. Содержимым первого сосуда долили доверху второй, затем содержимым второго — третий и т. д. до последнего. Найти полученную концентрацию спирта в последнем сосуде.

217. Рассматривается дробь (отношение двух целых чисел), знаменатель которой меньше квадрата числителя на единицу. Если к числителю и знаменателю прибавить по 2, то значение дроби будет больше, чем  $\frac{1}{3}$ , если же от числителя и знаменателя отнять по 3, то дробь останется положительной, но будет меньше  $\frac{1}{10}$ . Найти эту дробь.

## 7. Разные задачи

### *Алгебраические преобразования*

218. Подсчитать сумму

$$\frac{1}{n(n+1)} + \frac{1}{(n+1)(n+2)} + \dots + \frac{1}{(n+k-1)(n+k)}.$$

219. Упростить выражение

$$(x+a)(x^2+a^2)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}}).$$

220. Упростить выражение

$$(x^2-ax+a^2)(x^4-a^2x^2+a^4)\dots(x^{2^n}-a^{2^{n-1}}x^{2^{n-1}}+a^{2^n}).$$

221. Даны два ряда чисел:

$$\begin{aligned} a_1, a_2, \dots, a_n, \\ b_1, b_2, \dots, b_n; \end{aligned}$$

полагая  $S_k = b_1 + b_2 + \dots + b_k$ , показать, что

$$\begin{aligned} a_1b_1 + a_2b_2 + \dots + a_nb_n = (a_1 - a_2)S_1 + (a_2 - a_3)S_2 + \dots \\ \dots + (a_{n-1} - a_n)S_{n-1} + a_nS_n. \end{aligned}$$

222. Показать, что из равенства

$$a^2 + b^2 + c^2 = bc + ca + ab,$$

где  $a, b, c$  — вещественные числа, следует, что  $a = b = c$ .

223. Показать, что если  $a^3 + b^3 + c^3 = 3abc$ , то или  $a^2 + b^2 + c^2 = bc + ca + ab$ , или  $a + b + c = 0$ .

224. Показать, что если

$$a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2 = p^2,$$

$$b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2 = q^2,$$

$$a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n = pq$$

и  $pq \neq 0$ , то  $a_1 = \lambda b_1$ ,  $a_2 = \lambda b_2$ , ...,  $a_n = \lambda b_n$ , где  $\lambda = \frac{p}{q}$ . (Все величины предполагаются вещественными.)

225. Известно, что последовательность чисел  $a_1, a_2, a_3, \dots$  удовлетворяет при всяком  $n$  соотношению

$$a_{n+1} - 2a_n + a_{n-1} = 1.$$

Выразить  $a_n$  через  $a_1, a_2$  и  $n$ .

*Теорема Безу, свойства корней многочленов*

226. Корни  $x_1$  и  $x_2$  уравнения  $x^2 - 3ax + a^2 = 0$  таковы, что  $x_1^3 + x_2^3 = 1,75$ . Определить  $a$ .

227. Дано уравнение  $x^2 + px + q = 0$ . Составить квадратное уравнение, корнями которого были бы

$$y_1 = x_1^3 + x_2^2, \quad y_2 = x_1^2 + x_2^3.$$

228. Пусть  $x_1$  и  $x_2$  — корни уравнения

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (ac \neq 0).$$

Не решая уравнения, выразить через его коэффициенты величины:

$$1) \frac{1}{x_1^2} + \frac{1}{x_2^2}; \quad 2) x_1^4 + x_1^2 x_2^2 + x_2^4.$$

229. Каким условиям должны удовлетворять вещественные коэффициенты  $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ , чтобы выражение

$$(a_1 + b_1 x)^2 + (a_2 + b_2 x)^2 + (a_3 + b_3 x)^2$$

было квадратом многочлена первой степени относительно  $x$  с вещественными коэффициентами?

230. При любом положительном  $\lambda$  все корни уравнения

$$ax^2 + bx + c + \lambda = 0$$

вещественны и положительны. Доказать, что в этом случае  $a = 0$ . (Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  предполагаются вещественными.)

231. Система уравнений

$$\begin{aligned} a(x^2 + y^2) + x + y - \lambda &= 0, \\ x - y + \lambda &= 0 \end{aligned}$$

имеет вещественные решения при любом  $\lambda$ . Доказать, что  $a = 0$ .

232. Доказать, что при любых вещественных значениях  $a$ ,  $p$ ,  $q$  уравнение

$$\frac{1}{x-p} + \frac{1}{x-q} = \frac{1}{a^2}$$

имеет вещественные корни.

233. Доказать, что квадратное уравнение

$$a^2x^2 + (b^2 + a^2 - c^2)x + b^2 = 0$$

не может иметь вещественных корней, если  $a + b > c$  и  $|a - b| < c$ .

234. Известно, что  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  — корни уравнения

$$x^3 - 2x^2 + x + 1 = 0.$$

Составить новое уравнение, корнями которого были бы числа

$$y_1 = x_2x_3, \quad y_2 = x_3x_1, \quad y_3 = x_1x_2.$$

235. Известно, что  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  — корни уравнения

$$x^3 - x^2 - 1 = 0.$$

Составить новое уравнение, корнями которого были бы числа

$$y_1 = x_2 + x_3, \quad y_2 = x_3 + x_1, \quad y_3 = x_1 + x_2.$$

236. Выразить свободный член  $c$  кубического уравнения

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0$$

через коэффициенты  $a$  и  $b$ , зная, что корни уравнения образуют арифметическую прогрессию.

237. Пусть известно, что все корни некоторого уравнения

$$x^3 + px^2 + qx + r = 0$$

положительны. Какому дополнительному условию должны удовлетворять его коэффициенты  $p$ ,  $q$ ,  $r$  для того, чтобы из отрезков, длины которых равны этим корням, можно было составить треугольник?

Указание. Рассмотреть выражение

$$(x_1 + x_2 - x_3)(x_2 + x_3 - x_1)(x_3 + x_1 - x_2).$$

238. Уравнения

$$x^3 + p_1x + q_1 = 0,$$

$$x^3 + p_2x + q_2 = 0$$

( $p_1 \neq p_2$ ,  $q_1 \neq q_2$ ) имеют общий корень. Найти этот корень, а также остальные корни обоих уравнений.

239. Найти все значения  $\lambda$ , при которых два уравнения

$$\lambda x^3 - x^2 - x - (\lambda + 1) = 0,$$

$$\lambda x^2 - x - (\lambda + 1) = 0$$

имеют общий корень, и найти этот корень.

240. Все корни многочлена

$$P(x) = x^3 + px + q$$

с действительными коэффициентами и  $q \neq 0$  вещественны. Доказать, что  $p < 0$ .

241. Доказать, что уравнение

$$x^3 + ax^2 - b = 0,$$

где  $a$  и  $b$  вещественны и  $b > 0$ , имеет один и только один положительный корень.

242. Найти все вещественные значения  $a$  и  $b$ , при которых уравнения

$$x^3 + ax^2 + 18 = 0,$$

$$x^3 + bx + 12 = 0$$

имеют два общих корня, и определить эти корни.

243. Доказать, что

$$\sqrt[3]{20 + 14\sqrt{2}} + \sqrt[3]{20 - 14\sqrt{2}} = 4.$$

244. Пусть  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — попарно не равные между собой числа.

Доказать, что выражение

$$a^2(c - b) + b^2(a - c) + c^2(b - a)$$

не равно нулю.

245. Разложить на множители выражение

$$(x + y + z)^3 - x^3 - y^3 - z^3.$$

246. Доказать, что если три вещественных числа  $a$ ,  $b$ ,  $c$  связаны соотношением

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} = \frac{1}{a + b + c},$$

то обязательно какие-либо два из этих чисел равны по абсолютной величине и противоположны по знаку.

247. Выяснить, при каких комплексных значениях  $p$  и  $q$  двучлен  $x^2 - 1$  делится на квадратный трехчлен  $x^2 + px + q$ .

248. При каких значениях  $a$  и  $n$  многочлен  $x^n - ax^{n-1} + ax - 1$  делится на  $(x - 1)^2$ ?

249. Многочлен  $p(x)$  дает при делении на  $x - a$  остаток  $A$ , при делении на  $x - b$  — остаток  $B$ , при делении на  $x - c$  — остаток  $C$ . Найти многочлен, получающийся в остатке при делении  $p(x)$  на  $(x - a)(x - b)(x - c)$ , предполагая, что среди чисел  $a$ ,  $b$  и  $c$  нет равных.

*Метод математической индукции*

В предлагаемых ниже четырех задачах полезно воспользоваться методом полной математической индукции. Чтобы доказать, что некоторое утверждение верно для всякого натурального  $n$ , достаточно доказать, что: а) это утверждение справедливо при  $n=1$ ; б) если это утверждение справедливо для какого-нибудь натурального числа  $n$ , то оно справедливо также и для следующего числа  $n+1$ .

250. Доказать, что

$$1 + 3 + 6 + 10 + \dots + \frac{(n-1)n}{2} + \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n(n+1)(n+2)}{6}.$$

251. Доказать, что

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

252. Доказать, что

$$\frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 4} + \dots + \frac{1}{n(n+1)(n+2)} = \frac{n(n+3)}{4(n+1)(n+2)}.$$

253. Обобщенная  $n$ -я степень любого числа  $a$ , обозначаемая символом  $(a)_n$ , определяется для целых неотрицательных  $n$  так: если  $n=0$ , то  $(a)_n=1$ , если  $n>0$ , то  $(a)_n = a(a-1)\dots(a-n+1)$ . Доказать, что для обобщенной степени суммы двух чисел справедлива формула биннома Ньютона

$$(a+b)_n = C_n^0(a)_0(b)_n + C_n^1(a)_1(b)_{n-1} + \dots + C_n^n(a)_n(b)_0.$$

*Наибольшие и наименьшие значения*

Для того чтобы найти *наименьшее* значение квадратного трехчлена

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

в случае  $a > 0$ , представляют трехчлен в виде

$$y = a \left( x + \frac{b}{2a} \right)^2 - \frac{b^2 - 4ac}{4a}. \quad (2)$$

Так как первое слагаемое в правой части неотрицательно при любом  $x$ , а второе от  $x$  вообще не зависит, то трехчлен принимает наименьшее значение при условии, что первое слагаемое равно нулю. Таким образом, наименьшее значение трехчлена равно

$$y_0 = -\frac{b^2 - 4ac}{4a}. \quad (3)$$

Оно достигается при

$$x_0 = -\frac{b}{2a}. \quad (4)$$

Аналогично исследуется вопрос о *наибольшем* значении трехчлена в случае  $a < 0$ .

254. Две прямые железные дороги  $AA'$  и  $BB'$  перпендикулярны друг к другу и пересекаются в пункте  $C$ , причем расстояния  $AC$  и  $BC$  равны соответственно  $a$  и  $b$ . Из пунктов  $A$  и  $B$  по направлению к  $C$  одновременно выходят два поезда со скоростями соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . Через сколько времени после отправления расстояние между поездами будет наименьшим? Чему равно это наименьшее расстояние?

255. Пункты  $A$  и  $B$  расположены на прямолинейной магистрали, идущей с запада на восток. Пункт  $B$  находится восточнее  $A$  на 9 км. Из пункта  $A$  на восток выходит автомашина, двигающаяся равномерно со скоростью 40 км/час. Одновременно из  $B$  в том же направлении с постоянным ускорением 32 км/час<sup>2</sup> выходит мотоцикл. Определить наибольшее расстояние между автомашиной и мотоциклом в течение первых двух часов движения.

*Указание.* Полезно начертить график зависимости от времени расстояния между автомашиной и мотоциклом.

256. Найти наибольшее значение выражения

$$\lg_2^4 x + 12 \lg_2^2 x \cdot \lg_2 \frac{8}{x},$$

полагая, что  $x$  изменяется между 1 и 64.

257. Найти наибольшее значение функции

$$y = \frac{x}{ax^2 + b} \quad (a > 0, b > 0).$$

258. Найти наименьшее значение функции

$$\varphi(x) = |x - a| + |x - b| + |x - c| + |x - d|,$$

где  $a < b < c < d$  — фиксированные вещественные числа, а  $x$  принимает произвольные вещественные значения.

*Указание.* Рассуждения удобно проводить, отметив числа  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  на числовой оси.

## Комплексные числа

259. Найти все значения  $z$ , удовлетворяющие равенству

$$z^2 + |z| = 0,$$

( $|z|$  — модуль комплексного числа  $z$ .)

260. Найти комплексное число  $z$ , удовлетворяющее равенствам

$$\left| \frac{z-12}{z-8i} \right| = \frac{5}{3} \text{ и } \left| \frac{z-4}{z-8} \right| = 1.$$

261. Вычислить произведение

$$\left[ 1 + \left( \frac{1+i}{2} \right) \right] \left[ 1 + \left( \frac{1+i}{2} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{1+i}{2} \right)^{2^2} \right] \dots \\ \dots \left[ 1 + \left( \frac{1+i}{2} \right)^{2^n} \right].$$

262. Среди комплексных чисел  $z$ , удовлетворяющих условию

$$|z - 25i| \leq 15,$$

найти число, имеющее наименьший аргумент. Сделать чертеж.

263. Какому условию должно удовлетворять комплексное число  $a + bi$  для того, чтобы его можно было представить в виде

$$a + bi = \frac{1 - ix}{1 + ix},$$

где  $x$  — число вещественное.

264. Какое наибольшее значение может принимать модуль комплексного числа  $z$ , если

$$\left| z + \frac{1}{z} \right| = 1?$$

265. Через точку  $A$  проведены  $n$  лучей под углами  $\frac{2\pi}{n}$ . На одном из них на расстоянии  $d$  от  $A$  взята точка  $B$ , из нее опущен перпендикуляр на соседний луч, из основания этого перпендикуляра снова опущен перпендикуляр на сле-

дующий луч и т. д. до бесконечности. Найти длину  $L$  получаемой таким образом бесконечно завивающейся вокруг  $A$  ломаной, а также выяснить, как будет изменяться  $L$  при увеличении числа  $n$ , в частности при неограниченном его увеличении.

266. Шестизначное число начинается слева цифрой 1. Если эту цифру перенести с первого места на последнее, сохранив порядок остальных пяти цифр, то вновь полученное число будет втрое больше первоначального. Найти первоначальное число.

267. 120 одинаковых шаров плотно уложены в виде правильной треугольной пирамиды. Сколько шаров лежит в основании?

268. В ящик вложили  $k$  ящиков. В каждый из этих  $k$  ящиков либо опять вложили  $k$  ящиков, либо не вложили ни одного и т. д. Найти число пустых ящиков, если наполненных оказалось  $m$ .

---

## ГЕОМЕТРИЯ

### А. ПЛАНИМЕТРИЯ

#### Предварительные замечания

Укажем на следующие соотношения между элементами треугольника со сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и соответственно противолежащими углами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

1. Теорема синусов:

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} = 2R,$$

где  $R$  — радиус описанного круга.

2. Теорема косинусов:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A.$$

Для вычисления площади  $S$  треугольника наряду с формулой

$$S = \frac{1}{2} ah_a,$$

где  $a$  — одна из сторон треугольника, а  $h_a$  — опущенная на нее высота, ниже используются следующие формулы:

формула Герона

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)},$$

где  $p = \frac{a+b+c}{2}$  — полупериметр;

$$S = \frac{1}{2} ab \sin C; S = rp,$$

где  $r$  — радиус круга вписанного в треугольник, а  $p$  — полупериметр.

#### 1. Задачи на вычисление

269. В треугольнике  $ABC$  угол  $A$  вдвое больше угла  $B$ . По данным сторонам  $b$  и  $c$  найти  $a$ .

270. Катеты прямоугольного треугольника равны  $b$  и  $c$ . Найти длину биссектрисы прямого угла.

271. Найти третью сторону треугольника, если даны две стороны его  $a$  и  $b$  и известно, что медианы, соответствующие этим сторонам, пересекаются под прямым углом. При каких условиях такой треугольник существует?

272. Угол при вершине треугольника, боковые стороны которого равны  $a$  и  $b$  ( $a < b$ ), разделен на три равные части прямыми, отрезки которых внутри треугольника относятся как  $m:n$  ( $m < n$ ). Найти длины этих отрезков.

273. Данный треугольник  $ABC$  пересечь прямой  $DE$ , параллельной  $BC$ , так, чтобы площадь треугольника  $BDE$  равнялась заданной величине  $k^2$ . При каком соотношении между  $k^2$  и площадью треугольника  $ABC$  задача разрешима и сколько она имеет решений?

274. Через некоторую точку, взятую внутри треугольника, проведены три прямые, соответственно параллельные его сторонам. Эти прямые разделяют площадь треугольника на шесть частей, три из которых суть треугольники с площадями, равными  $S_1, S_2, S_3$ . Найти площадь данного треугольника.

275. Даны стороны  $b$  и  $c$  треугольника. Найти третью сторону  $x$ , зная, что она равна опущенной на нее высоте. При каком соотношении между  $b$  и  $c$  треугольник существует?

276. В треугольнике  $ABC$  проведены высоты  $AA_1, BB_1, CC_1$ , основания которых соединены между собой. Определить отношение площади треугольника  $A_1B_1C_1$  к площади треугольника  $ABC$ , если углы треугольника  $ABC$  известны.

277. В треугольнике  $ABC$  через точку пересечения биссектрис углов  $B$  и  $C$  проведена параллельно  $BC$  прямая  $MN$  до пересечения в точках  $M$  и  $N$  соответственно со сторонами  $AB$  и  $AC$ . Найти зависимость между отрезками  $MN, BM, CN$ .

Разобрать случаи:

- 1) обе биссектрисы внутренние;
- 2) обе биссектрисы внешние;

3) одна из биссектрис внутренняя, другая внешняя.  
Когда  $M$  и  $N$  совпадут?

278. Внутри правильного треугольника  $ABC$  взята произвольная точка  $P$ , из которой опущены перпендикуляры  $PD$ ,  $PE$  и  $PF$  соответственно на  $BC$ ,  $CA$  и  $AB$ . Вычислить

$$\frac{PD + PE + PF}{BD + CE + AF}.$$

279. Найти отношение площади треугольника  $ABC$  к площади другого треугольника, стороны которого равны медианам треугольника  $ABC$ .

280. В треугольник со сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  вписан полукруг с диаметром, лежащим на стороне  $c$ . Найти радиус этого полукруга.

281. Определить углы прямоугольного треугольника, зная, что радиус описанного около него круга относится к радиусу вписанного круга как 5:2.

282. Около данного прямоугольника описать новый прямоугольник, который имел бы заданную площадь  $m^2$ . При каком  $m$  задача разрешима?

283. На стороне  $AB$  прямоугольника  $ABCD$  найти такую точку  $E$ , из которой стороны  $AD$  и  $DC$  были бы видны под равными углами. При каком соотношении между сторонами прямоугольника задача разрешима?

284. Найти площадь равнобедренной трапеции, если ее высота равна  $h$ , а боковая сторона видна из центра описанной окружности под углом  $\alpha$ .

285. Даны верхнее и нижнее основания трапеции  $a$  и  $b$ . Найти длину отрезка, соединяющего середины диагоналей трапеции.

286. Каждая вершина параллелограмма соединена с серединами двух противоположных сторон. Какую часть площади

параллелограмма составляет площадь фигуры, ограниченной проведенными линиями?

287. Точки  $P, Q, R, S$  суть, соответственно, середины сторон  $AB, BC, CD, DA$  параллелограмма  $ABCD$ . Найти площадь фигуры, ограниченной прямыми  $AQ, BR, CS, DP$ , зная, что площадь параллелограмма равна  $a^2$ .

288. Зная хорды двух дуг круга радиуса  $R$ , найти хорду дуги, равной сумме этих дуг или их разности.

289. Расстояние между центрами двух пересекающихся кругов радиусов  $R$  и  $r$  равно  $d$ . Найти площадь их общей части.

290. Три окружности радиусов  $r, r_1$  и  $R$  касаются попарно внешним образом. Найти длину хорды, отсекаемой третьей окружностью от общей внутренней касательной первых двух окружностей.

291. Круга радиуса  $r$  касаются внешним образом три одинаковых окружности, касающиеся, кроме того, попарно между собой. Найти площади трех криволинейных треугольников, образованных указанными окружностями.

292. Даны две параллельные прямые и точка  $A$  между ними. Найти стороны прямоугольного треугольника, вершина прямого угла которого лежит в точке  $A$ , а вершины острых углов — на заданных параллельных прямых, зная, что площадь треугольника равна заданной величине  $k^2$ .

293. Внутри правильного  $n$ -угольника со стороной  $a$  вписано  $n$  равных кругов так, что каждый круг касается двух смежных сторон многоугольника и двух других кругов. Найти площадь «звездочки», образующейся в центре многоугольника.

294. Через одну из точек  $C$  дуги  $AB$  окружности проведены две произвольные прямые, пересекающие хорду  $AB$  в точках  $D$  и  $E$ , а окружность в точках  $F$  и  $G$ . При каком

положении точки  $C$  на  $AB$  вокруг четырехугольника  $DEGF$  можно описать круг?

295. Внутри острого угла вписываются круги, касающиеся друг друга. Показать, что радиусы этих кругов образуют геометрическую прогрессию. Найти зависимость между знаменателем прогрессии и величиной острого угла.

296. В точке  $A$  плоскости  $P$  расположен источник света. Над плоскостью помещено полусферическое зеркало радиуса  $l$ , обращенное внутренней зеркальной поверхностью к плоскости, причем так, что ось симметрии зеркала перпендикулярна к плоскости  $P$  в точке  $A$ . Зная, что наименьший угол между лучами, отраженными зеркалом и плоскостью  $P$ , равен  $15^\circ$ , определить расстояние от зеркала до плоскости и радиус освещенного на плоскости  $P$  круга.

297. Центры четырех кругов радиуса  $r$  расположены в вершинах квадрата со стороной  $a$ . Найти площадь  $S$  общей части всех четырех кругов, заключенной внутри квадрата.

298. Выразить диагонали вписанного четырехугольника через его стороны. Получить отсюда теорему Птолемея: произведение диагоналей вписанного четырехугольника равно сумме произведений противоположных сторон.

## 2. Задачи на построение

299. Даны две окружности разных радиусов, лежащие одна вне другой, и точка  $A$  на одной из них. Провести третью окружность, касающуюся двух данных и проходящую через точку  $A$ . Разобрать различные возможные случаи положения точки  $A$  на заданной окружности.

300. Даны окружность, прямая и точка  $A$  на прямой. Построить новую окружность, касающуюся данных прямой и окружности и проходящую через точку  $A$ . Разобрать подробно, в каких случаях сколько решений имеет задача.

301. Даны прямая, окружность и точка  $A$  на окружности. Построить новую окружность, касающуюся данных прямой и

окружности и проходящую через точку  $A$ . Разобрать подробно, в каких случаях сколько решений имеет задача.

302. Построить прямоугольный треугольник по данной гипотенузе  $c$  и высоте  $h$ , опущенной на гипотенузу. Найти длины катетов и выяснить, при каком соотношении между  $h$  и  $c$  задача разрешима.

303. Даны длины сторон  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  и  $DA$  некоторого плоского четырехугольника. Построить этот четырехугольник, если известно, что диагональ  $AC$  делит угол  $A$  пополам.

304. Построить треугольник по точкам пересечения продолжений биссектрисы, медианы и высоты, выходящих из одной вершины, с окружностью описанного круга.

305. Описать из вершин данного треугольника, как из центров, окружности так, чтобы они попарно касались друг друга. Разобрать случаи как внешнего, так и внутреннего касания.

306. Вписать в данную окружность треугольник  $ABC$ , если известны вершина  $A$ , направление высоты  $h_A$  и точка пересечения высоты  $h_B$  с окружностью.

307. Пересечь трапецию прямой, параллельной основанию так, чтобы ее отрезок внутри трапеции делился диагоналями на три равные части.

308. Построить квадрат по заданной вершине и двум точкам, которые лежат на двух сторонах или их продолжениях, не проходящих через эту вершину.

309. Через точку  $M$ , лежащую на основании  $AC$  треугольника  $ABC$ , провести прямую  $MN$ , отсекающую от треугольника такую часть, площадь которой равна  $\frac{1}{k}$  площади всего треугольника. Сколько решений имеет задача?

310. В данный треугольник вписать с помощью циркуля и линейки прямоугольник, имеющий заданную диагональ.

311. Около данной окружности описать треугольник с данным углом и данной стороной, противолежащей этому углу. Найти условие разрешимости этой задачи.

312. Дана прямая  $CD$  и две точки  $A$  и  $B$ , не лежащие на ней. Найти на данной прямой точку  $M$  такую, что

$$\angle AMC = 2 \angle BMD.$$

### 3. Задачи на доказательство

313. Доказать, что медиана треугольника меньше полусуммы сторон, ее заключающих, и больше разности между этой полусуммой и половиной третьей стороны.

314. Доказать, что в любом треугольнике  $ABC$  расстояние от центра описанного круга до стороны треугольника  $BC$  вдвое меньше расстояния от точки пересечения высот до вершины  $A$ .

315. Доказать, что сумма расстояний какой-либо точки, взятой внутри правильного треугольника, до сторон этого треугольника есть величина постоянная, не зависящая от положения точки.

316. Доказать, что во всяком треугольнике большей стороне соответствует меньшая биссектриса.

317. Доказать, что если  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  суть, соответственно, точки пересечения сторон  $BC$ ,  $CA$ ,  $AB$  (или их продолжений) треугольника  $ABC$  с некоторой прямой, то

$$\frac{PB}{PC} \frac{QC}{QA} \frac{RA}{RB} = 1.$$

318. В прямоугольном треугольнике  $ABC$  катет  $AC$  в 3 раза больше катета  $AB$ . Точками  $K$  и  $F$  катет  $AC$  разделен на три равные части. Доказать, что

$$\angle AKB + \angle AFB + \angle ACB = \frac{\pi}{2}.$$

319. Пусть  $a$ ,  $b$  — катеты прямоугольного треугольника,  $c$  — гипотенуза,  $h$  — высота, опущенная из вершины прямого

угла на гипотенузу. Доказать, что треугольник со сторонами  $h$ ,  $c+h$ ,  $a+h$  является прямоугольным.

320. В равнобедренном треугольнике с основанием  $a$  и боковой стороной  $b$  угол при вершине равен  $20^\circ$ . Доказать, что  $a^2 + b^2 = 3ab^2$ .

321. Доказать, что угол треугольника будет острым, прямым или тупым, смотря по тому, будет ли противоположная сторона меньше, равна или больше удвоенной соответствующей медианы.

322. В равнобедренном треугольнике  $ABC$  угол при вершине  $B$  равен  $20^\circ$ . На боковых сторонах  $AB$  и  $BC$  взяты, соответственно, точки  $Q$  и  $P$  так, что  $\angle ACQ = 60^\circ$ , а  $\angle CAP = 50^\circ$ . Доказать, что  $\angle APQ = 80^\circ$ .

323. Доказать, что если между сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  треугольника существует зависимость  $a^2 = b^2 + bc$ , то углы  $A$  и  $B$ , противолежащие сторонам  $a$  и  $b$ , удовлетворяют равенству  $\angle A = 2\angle B$ .

324. Доказать, что сумма произведений высот остроугольного треугольника на отрезки их от ортоцентра до вершины равна полусумме квадратов сторон. Обобщить это предложение на случай тупоугольного треугольника.

325. Пусть длины  $a$ ,  $b$ ,  $c$  сторон треугольника удовлетворяют неравенствам  $a < b < c$ , образуя арифметическую прогрессию. Доказать, что  $ac = 6Rr$ , где  $R$  — радиус описанного, а  $r$  — радиус вписанного в треугольник круга.

326. Доказать, что квадрат биссектрисы, проведенной через вершину произвольного треугольника, равен произведению боковых сторон без произведения отрезков основания. Выяснить смысл указанного равенства в случае равнобедренного треугольника.

327. На сторонах  $AB$  и  $AC$  треугольника  $ABC$  отложено в противоположных направлениях два равных отрезка  $BD = CE$ .

Доказать, что отрезок  $DE$  делится стороной  $BC$  в отношении, обратном отношению сторон  $AB$  и  $AC$ .

328. Доказать, что во всяком треугольнике биссектриса лежит между медианой и высотой, проведенными из той же вершины.

329. Доказать, что прямая, симметричная с медианой относительно биссектрисы внутреннего угла треугольника, делит противоположную сторону на части, пропорциональные квадратам прилежащих сторон.

330. На сторонах треугольника  $ABC$  взяты точки  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  так, что три прямые  $AP$ ,  $BQ$  и  $CR$  пересекаются в одной точке. Доказать, что

$$AR \cdot BP \cdot CQ = RB \cdot PC \cdot QA.$$

331. Доказать, что в любом треугольнике отношение радиуса вписанной окружности к радиусу описанной не превосходит  $\frac{1}{2}$ .

332. Доказать, что для любого прямоугольного треугольника справедливо неравенство

$$0,4 < \frac{r}{h} < 0,5,$$

где  $r$  — радиус вписанного круга,  $h$  — высота, опущенная на гипотенузу.

333. Доказать, что в любом остроугольном треугольнике  $k_a + k_b + k_c = r + R$ , где  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$  — перпендикуляры, опущенные из центра описанной окружности на соответствующие стороны;  $r$  и  $R$  — радиусы вписанной и описанной окружностей.

Указание. Можно выразить левую и правую части искомого равенства через стороны и углы треугольника.

334. Вершины  $A$ ,  $B$  и  $C$  треугольника соединены с точками  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ , расположенными произвольно на противоположных сторонах (но не в вершинах). Доказать, что середины отрезков  $AA_1$ ,  $BB_1$ ,  $CC_1$  не лежат на одной прямой.

335. Через произвольную точку  $O$ , взятую внутри треугольника  $ABC$ , проведены прямые  $DE$ ,  $FK$ ,  $MN$ , параллельные, соответственно,  $AB$ ,  $AC$ ,  $BC$ , причем  $F$  и  $M$  лежат на  $AB$ ,  $E$  и  $K$  — на  $BC$ ,  $N$  и  $D$  — на  $AC$ . Доказать, что

$$\frac{AF}{AB} + \frac{BE}{BC} + \frac{CN}{CA} = 1.$$

336. В треугольник вписан квадрат так, что одна из его сторон лежит на наибольшей стороне треугольника. Доказать неравенство  $\sqrt{2}r < x < 2r$ , где  $x$  — длина стороны квадрата,  $r$  — радиус круга, вписанного в данный треугольник.

337. Доказать, что середины сторон треугольника, основания высот и середины отрезков высот, заключенных между каждой из вершин и точкой пересечения высот, представляют собой девять точек, лежащих на одной окружности. Показать, что центр этой окружности лежит на середине отрезка, соединяющего точку пересечения высот данного треугольника с центром описанного круга, а радиус равен половине радиуса описанного круга.

338. В треугольнике из основания каждой высоты опущены перпендикуляры на две другие стороны. Доказать, что: 1) основания этих перпендикуляров являются вершинами шестиугольника, три из сторон которого параллельны сторонам треугольника; 2) вокруг этого шестиугольника можно описать окружность.

339. Доказать, что в прямоугольном треугольнике сумма катетов равна сумме диаметров вписанной и описанной окружностей.

340. Доказать, что в прямоугольном треугольнике биссектриса прямого угла делит пополам угол между медианой и высотой, опущенными на гипотенузу.

341. Два треугольника  $ABC$  и  $A_1B_1C_1$  расположены симметрично друг другу относительно центра их общего вписанного круга радиуса  $r$ . Доказать, что произведение площадей  $ABC$ ,  $A_1B_1C_1$  и шести треугольников, получившихся при пересечении сторон  $\triangle ABC$  и  $\triangle A_1B_1C_1$ , равно  $r^6$ .

342. Доказать, что разность между суммой квадратов расстояний произвольной точки  $M$  плоскости до двух противоположных вершин параллелограмма  $ABCD$  и суммой квадратов расстояний от той же точки до двух других вершин есть величина постоянная.

343. На сторонах  $AB$ ,  $AC$ ,  $BC$  треугольника  $ABC$ , как на основаниях, построены три равнобедренных подобных треугольника  $ABP$ ,  $ACQ$ ,  $BCR$ , два первых вне данного треугольника, третий — по ту же сторону, что и данный треугольник. Доказать, что  $APRQ$  — параллелограмм (или что точки  $A$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $Q$  лежат на одной прямой).

344. Некоторая точка  $O$  плоскости соединена с вершинами параллелограмма  $ABCD$ . Доказать, что площадь треугольника  $AOC$  равна сумме или разности площадей двух смежных треугольников, образованных двумя из прямых  $OA$ ,  $OB$ ,  $OC$ ,  $OD$  и соответствующей стороной параллелограмма. Разобрать случаи, когда точка  $O$  находится внутри и вне параллелограмма.

345. В трапеции  $ABCD$  сумма углов при основании  $AD$  равна  $\frac{\pi}{2}$ . Доказать, что отрезок, соединяющий середины оснований, равен полуразности оснований.

346. Доказать, что сумма квадратов диагоналей трапеции равна сумме квадратов боковых сторон с удвоенным произведением оснований.

347. Доказать, что прямая, соединяющая середины параллельных сторон трапеции, пройдет через точку пересечения диагоналей.

348. Доказать, что если диагонали двух четырехугольников соответственно равны и пересекаются под равными углами, то четырехугольники равновелики.

349. Доказать, что по крайней мере одно из оснований перпендикуляров, опущенных из произвольно взятой внутрен-

ней точки выпуклого многоугольника на его стороны, лежит на самой стороне, а не на ее продолжении.

**350.** Доказать, что биссектрисы внутренних углов параллелограмма в пересечении образуют прямоугольник, диагонали которого равны разности соседних сторон параллелограмма.

**351.** Доказать, что прямые, соединяющие последовательно центры квадратов, построенных на сторонах параллелограмма и примыкающих к нему извне, образуют также квадрат.

**352.** Доказать, что если в произвольном четырехугольнике  $ABCD$  провести внутренние биссектрисы, то четыре точки пересечения биссектрис углов  $A$  и  $C$  с биссектрисами углов  $B$  и  $D$  лежат на окружности.

**353.** Доказать, что основания перпендикуляров, опущенных из произвольной точки окружности на стороны вписанного в нее треугольника, лежат на одной прямой.

**354.** Две окружности касаются друг друга внутренним образом в точке  $A$ . Отрезок  $AB$  является диаметром большей окружности. Хорда  $BK$  большей окружности касается меньшей окружности в точке  $C$ . Доказать, что  $AC$  является биссектрисой треугольника  $ABK$ .

**355.** В сектор круга радиуса  $R$  вписана окружность радиуса  $r$ . Хорда сектора равна  $2a$ . Доказать, что

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} + \frac{1}{a}.$$

**356.** Доказать, что произведение отрезков, отсекаемых подвижной касательной к окружности на двух неподвижных параллельных касательных, есть величина постоянная.

**357.** Доказать, что сумма квадратов длин двух взаимноперпендикулярных пересекающихся хорд окружности больше квадрата ее диаметра, а сумма квадратов отрезков, на которые точка пересечения делит хорды, равна квадрату диаметра.

358. Доказать, что если разделить хорду окружности на три равные части и соединить с центром окружности концы хорды и точки деления, то соответствующий центральный угол разделится на три части, одна из которых больше двух других.

359. Доказать, что если из концов диаметра круга провести две пересекающиеся хорды, то сумма произведений каждой хорды на ее отрезок от конца диаметра до точки пересечения есть величина постоянная.

360. Из двух точек прямой проведены по две касательные к окружности. В образованные углы с вершинами в этих точках вписаны окружности равного радиуса. Доказать, что их линия центров параллельна данной прямой.

361. Доказать, что если диаметр полукруга разделить на две произвольные части и на каждой из них описать полукруг внутри данного полукруга, то площадь, заключенная между тремя полуокружностями, будет равна площади круга, диаметр которого равен длине перпендикуляра, восстановленного внутри исходного полукруга из точки деления его диаметра.

362. Доказать, что если две точки лежат вне окружности и прямая, их соединяющая, не пересекает окружности, то расстояние между этими двумя точками больше разности длин касательных к окружности, проведенных из данных точек, и меньше суммы их. Показать, что одно или другое из этих неравенств не будет выполнено, если прямая пересекает окружность.

363. Через середину  $S$  произвольной хорды  $AB$  окружности проведены две хорды  $KL$  и  $MN$  ( $K$  и  $M$  находятся по одну сторону от  $AB$ ),  $Q$  — точка пересечения  $AB$  и  $KN$ ,  $P$  — точка пересечения  $AB$  и  $ML$ . Доказать, что  $QC = CP$ .

364. Окружность разделена произвольным образом на четыре части, и середины получающихся дуг соединены отрезками прямых. Показать, что среди этих отрезков два будут перпендикулярны между собой.

365. Доказать, что для любой замкнутой не пересекающей себя ломаной линии в плоскости существует круг,

радиус которого составляет  $\frac{1}{4}$  периметра ломаной линии и вне которого нет ни одной точки ломаной.

366. Может ли быть правильным треугольник, расстояния вершин которого до двух данных взаимно-перпендикулярных прямых выражаются целыми числами?

367. В точках  $A$  и  $B$  прямой, по одну сторону от нее, восстановлены два перпендикуляра  $AA_1 = a$  и  $BB_1 = b$ . Доказать, что при сохранении величин  $a$  и  $b$  точка пересечения прямых  $AB_1$  и  $A_1B$  будет находиться на одном и том же расстоянии от прямой  $AB$  независимо от положения точек  $A$  и  $B$ .

368. В прямой угол с вершиной  $A$  вписана окружность;  $B$  и  $C$  — точки касания. Доказать, что если к данной окружности провести касательную, пересекающую стороны  $AB$  и  $AC$  в точках  $M$  и  $N$ , то она отсечет на этих сторонах отрезки  $MB$  и  $NC$ , сумма длин которых больше, чем  $\frac{1}{3}(AB + AC)$ , и меньше, чем  $\frac{1}{2}(AB + AC)$ .

369. Окружность радиуса, равного высоте некоторого равнобедренного треугольника, катится по основанию этого треугольника. Доказать, что величина дуги, отсекаемой на окружности боковыми сторонами треугольника, остается при этом постоянной. Будет ли это предложение верно для неравнобедренного треугольника?

370. Доказать, что диагонали вписанного в круг четырехугольника относятся между собой как суммы произведений сторон, сходящихся в концах диагоналей.

371. Доказать, что сумма квадратов расстояний какой-нибудь точки окружности до вершин правильного вписанного треугольника есть величина постоянная, не зависящая от положения точки на окружности.

372. Доказать, что если окружность касается изнутри трех сторон четырехугольника и пересекает четвертую

сторону, то сумма этой последней и противоположной стороны больше суммы двух других сторон четырехугольника.

**373.** Доказать, что если окружность касается изнутри трех сторон четырехугольника, четвертая сторона которого не пересекает окружности, то сумма четвертой и противоположной сторон меньше суммы двух других сторон четырехугольника.

**374.** Даны два равных полукруга, касающихся друг друга так, что диаметры их лежат на одной прямой. Проводим к ним общую касательную и вписываем первый круг, касающийся этой прямой и двух данных кругов; затем вписываем второй круг, касающийся первого и двух данных, затем третий круг, касающийся второго и двух данных, и т. д. до бесконечности. Пользуясь этим построением, доказать, что сумма дробей

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 4} + \frac{1}{4 \cdot 5} + \dots + \frac{1}{n(n+1)}$$

при безграничном возрастании  $n$  стремится к 1, т. е.

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} + \dots = 1.$$

**375.** В точке  $A$ , находящейся на расстоянии  $a$  от центра круглого бильярда радиуса  $R$ , лежит упругий шарик, размерами которого можно пренебречь. В какую точку  $B$  борта нужно его направить, чтобы, дважды отразившись от борта, он снова вернулся в точку  $A$ ?

**376.** Из точки  $A$ , расположенной внутри угла с зеркальными сторонами, исходит луч света. Доказать, что число отражений, которое испытывает этот луч от сторон угла, всегда конечно. Найти это число, если данный угол равен  $\alpha$ , а луч направлен под углом  $\beta$  к одной из его сторон. Выяснить условия, при которых луч снова пройдет через точку  $A$ .

#### 4. Геометрические места точек

**377.** На окружности даны две неподвижные точки  $A$  и  $B$  и подвижная точка  $M$ . На продолжении отрезка  $AM$  вне окружности откладывается отрезок  $MN = MB$ . Найти геометрическое место точек  $N$ .

378. Даны две параллельные прямые и точка  $O$ , лежащая между ними. Через эту точку проводят произвольную секущую, которая пересекает параллельные прямые в точках  $A$  и  $A'$ . Найти геометрическое место концов перпендикуляра к секущей, восстановленного из точки  $A'$  и имеющего длину  $OA$ .

379. Найти геометрическое место точек, для которых сумма расстояний до двух данных прямых  $m$  и  $l$  равна длине  $a$  данного отрезка. Разобрать случаи пересекающихся и параллельных прямых.

380. Найти геометрическое место точек, для которых разность расстояний до двух данных прямых  $m$  и  $l$  равна отрезку данной длины. Разобрать случаи параллельных и пересекающихся прямых.

381. На плоскости даны два отрезка  $AB$  и  $CD$ . Найти геометрическое место точек  $M$ , обладающих тем свойством, что сумма площадей треугольников  $AMB$  и  $CMD$  равна некоторой постоянной  $a^2$ .

382. Даны окружность  $K$  и ее хорда  $AB$ . Рассматриваются все треугольники, вписанные в окружность и имеющие основанием данную хорду. В каждом треугольнике взята точка пересечения высот. Найти геометрическое место этих точек.

383. Внутри данной окружности фиксирована точка  $A$ , не совпадающая с центром. Через  $A$  проведена произвольная хорда и в ее концах — касательные к окружности, пересекающиеся в точке  $M$ . Найти геометрическое место точек  $M$ .

384. Доказать, что геометрическое место точек  $M$ , расстояния которых до двух данных точек  $A$  и  $B$  находятся в данном отношении

$$\frac{p}{q} \neq 1,$$

есть окружность с центром на прямой  $AB$ .

Выразить диаметр этой окружности через длину  $a$  отрезка  $AB$ . Исследовать также случай

$$\frac{p}{q} = 1.$$

385. Даны отрезок  $AB$  и на нем точка  $C$ . Каждая пара равных окружностей, одна из которых проходит через точки  $A$  и  $C$ , а другая — через точки  $C$  и  $B$ , имеет, кроме  $C$ , еще одну общую точку  $D$ . Найти геометрическое место точек  $D$ .

386. Стороны деформирующегося многоугольника остаются соответственно параллельными заданным направлениям, в то время как все вершины, кроме одной, скользят по заданным прямым. Найти геометрическое место положений последней вершины.

387. Даны окружность  $K$  радиуса  $r$  и ее хорда  $AB$  длиной  $2a$ . Пусть  $CD$  — подвижная хорда той же окружности, имеющая постоянную длину  $2b$ . Найти геометрическое место точек пересечения прямых  $AC$  и  $BD$ .

388. Через точку  $P$ , лежащую на данной окружности, и точку  $Q$ , лежащую на данной прямой, проводится произвольная окружность, пересекающая второй раз данную окружность в точке  $R$ , данную прямую — в точке  $S$ . Доказать, что получаемые этим построением всевозможные прямые  $RS$  пересекаются в одной точке, лежащей на данной окружности.

### Б. Нахождение наибольших и наименьших значений

389. Даны две параллельные прямые и точка  $A$  между ними, лежащая на расстоянии  $a$  от одной прямой и на расстоянии  $b$  от другой. Точка  $A$  служит вершиной прямых углов прямоугольных треугольников, две другие вершины которых лежат на каждой из параллельных прямых. Какой из треугольников имеет наименьшую площадь?

390. Дан прямоугольный треугольник, один из острых углов которого равен  $\alpha$ . Найти отношение радиусов описанной и вписанной окружностей и определить, при каком  $\alpha$  это отношение будет наименьшим.

391. От прямоугольника со сторонами  $a$  и  $b$  отрезан треугольник с катетами  $a_1$  и  $b_1$ . Как надо обрезать оставшуюся часть, чтобы получить прямоугольник наибольшей площади со сторонами, параллельными сторонам исходного прямоугольника.

392. На одной из сторон острого угла взяты две точки  $A$  и  $B$ . Найти на другой стороне угла точку  $C$  такую, чтобы угол  $ACB$  был наибольшим. Построить точку  $C$  с помощью циркуля и линейки.

393. Найти на данной прямой  $l$  такую точку, чтобы разность расстояний ее от двух данных точек  $A$  и  $B$ , находящихся по одну сторону от прямой, была наименьшей, а также такую точку, чтобы эта разность была наибольшей.

394. Через точку  $A$ , лежащую внутри угла, проведена прямая, отсекающая от этого угла наименьший по площади треугольник. Доказать, что отрезок этой прямой, заключенный между сторонами угла, делится в точке  $A$  пополам.

395. Доказать, что из всех треугольников с общим углом  $\varphi$  при вершине и данной суммой длин боковых сторон  $a + b$  равнобедренный треугольник имеет наименьшее основание.

396. Из всех треугольников с одинаковым основанием и одним и тем же углом при вершине найти треугольник с наибольшим периметром.

397. В треугольнике  $ABC$  на основании  $BC$  или на его продолжении взята произвольным образом точка  $D$  и около треугольников  $ACD$  и  $BCD$  описаны окружности. Доказать, что отношение радиусов этих окружностей есть величина постоянная. Найти такое положение точки  $D$ , для которого эти радиусы будут иметь наименьшую величину.

## Б. СТЕРЕОМЕТРИЯ

### Предварительные замечания

Приведем ряд формул для вычисления объемов и поверхностей многогранников и тел вращения, полагая, что  $V$  — объем тела,  $S_6$  — боковая поверхность,  $S$  — площадь основания,  $H$  — высота.

$$\text{Пирамида: } V = \frac{SH}{3}.$$

*Усеченная пирамида:*  $V = \frac{H}{3}(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2})$ , где  $S_1$  и  $S_2$  — площади верхнего и нижнего оснований пирамиды.

*Конус (прямой круговой):*  $V = \frac{\pi R^2 H}{3}$ , где  $R$  — радиус основания конуса;  $S_6 = \pi R l$ , где  $l$  — образующая.

*Цилиндр (прямой круговой):*  $V = \pi R^2 H$ , где  $R$  — радиус основания;  $S_6 = 2\pi R H$ .

*Усеченный конус:*  $V = \frac{\pi H}{3}(R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2)$ , где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы оснований конуса;  $S_6 = \pi(R_1 + R_2)l$ , где  $l$  — образующая.

*Шар:*  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ ,  $S = 4\pi R^2$ , где  $R$  — радиус шара.

*Шаровой сектор:*  $V = \frac{2\pi R^2 h}{3}$ , где  $R$  — радиус шара,  $h$  — высота соответствующего сегмента или шарового слоя.

*Шаровой сегмент:*  $V = \frac{1}{3}\pi R^2(3R - h)$ ,  $S_6 = 2\pi R h$ , где  $R$  — радиус шара,  $h$  — высота сегмента.

### 1. Задачи на вычисление

398. Объем правильной треугольной призмы равен  $V$ , угол между диагоналями двух граней, проведенными из одной и той же вершины, равен  $\alpha$ . Найти сторону основания призмы.

399. Из вершины  $S$  правильной четырехугольной пирамиды на основание опущен перпендикуляр  $SB$ . Из середины  $O$  отрезка  $SB$  опущены перпендикуляр  $OM$  длиной  $h$  на боковое ребро и перпендикуляр  $OK$  длиной  $b$  на боковую грань. Найти объем пирамиды.

400. Найти поверхность правильной  $n$ -угольной пирамиды объема  $V$ , если радиус круга, вписанного в основание, равен радиусу круга, описанного вокруг сечения, параллельного основанию и отстоящего от основания на расстоянии  $h$ .

401. Правильная пятиугольная пирамида  $SABCDE$  пересечена плоскостью, проходящей через вершины  $A$  и  $C$  основания и середины ребер  $DS$  и  $ES$ . Найти площадь сечения, если  $q$  есть длина стороны основания пирамиды, а  $b$  — длина бокового ребра.

402. Правильная треугольная пирамида пересечена плоскостью, проходящей через вершину основания и середины двух боковых ребер. Найти отношение боковой поверхности пирамиды к площади основания, если известно, что секущая плоскость перпендикулярна к боковой грани.

403. От правильной четырехугольной призмы плоскостью, проходящей через диагональ нижнего основания и одну из вершин верхнего основания, отсечена пирамида с полной поверхностью  $S$ . Найти полную поверхность призмы, зная, что угол при вершине треугольника, получающегося в сечении, равен  $\alpha$ .

404. Вычислить объем правильной треугольной пирамиды, зная, что плоский угол при вершине равен  $\alpha$ , а радиус окружности, описанной около боковой грани, равен  $r$ .

405. Правильная четырехугольная пирамида со стороной основания, равной  $a$ , и двугранным углом при основании, равным  $2\alpha$ , пересечена плоскостью, делящей пополам двугранный угол при основании. Найти площадь сечения.

406. Над плоским потолком зала, имеющего форму квадрата со стороной  $a$ , сделана крыша, построенная следующим образом: каждая пара смежных вершин квадрата, образующего потолок зала, соединена прямыми с серединой противоположной стороны, на каждом из получившихся четырех треугольников, как на основании, построена пирамида, вершина которой проектируется в середину соответствующей стороны квадрата. Расположенные выше других части граней этих четырех пирамид образуют крышу. Найти объем чердака (т. е. пространства между потолком и крышей), если высота каждой из пирамид равна  $h$ .

407. Найти объем правильной  $n$ -угольной пирамиды, если ее полная поверхность равна  $S$ , а радиусы кругов, описанных вокруг всех граней, равны.

408. В правильной треугольной пирамиде  $SABC$  плоский угол при вершине равен  $\alpha$ , а кратчайшее расстояние между боковым ребром и противоположной стороной основания равно  $d$ . Найти объем этой пирамиды.

409. Основанием пирамиды служит равнобедренная трапеция, в которой параллельные стороны равны  $a$  и  $b$  ( $a > b$ ), а неравные отрезки диагоналей образуют угол  $\varphi$ . Найти объем пирамиды, зная, что высота пирамиды, опущенная из вершины, проходит через точку пересечения диагоналей основания, а двугранные углы, прилежащие к параллельным сторонам основания, относятся как 2:1.

410. В правильной шестиугольной пирамиде с углом между боковыми ребрами, равным  $\alpha$ , проведено сечение через наибольшую диагональ основания под углом  $\beta$  к нему. Найти отношение площади сечения к площади основания.

411. Все три плоских угла некоторого трехгранного угла являются острыми. Один из них равен  $\alpha$ ; двугранные углы, прилежащие к этому плоскому углу, равны, соответственно,  $\beta$  и  $\gamma$ . Найти два других плоских угла.

412. Вычислить объем правильной пирамиды высоты  $h$ , зная, что в ее основании лежит многоугольник, сумма внутренних углов которого равна  $1\pi$ , а отношение боковой поверхности пирамиды к площади основания равно  $k$ .

413. Через каждые три вершины куба с ребром  $a$ , лежащие в концах каждой тройки ребер, сходящихся в одной вершине, проведена плоскость. Найти объем тела, ограниченного этими плоскостями.

414. Через каждое ребро тетраэдра проведена плоскость, параллельная противоположному ребру. Найти отношение объема полученного параллелепипеда к объему тетраэдра.

415. На боковых гранях правильной четырехугольной пирамиды построены, как на основаниях, правильные тетраэдры. Найти расстояние между наружными вершинами двух смежных тетраэдров, если сторона основания пирамиды равна  $a$ .

416. Через некоторую точку диагонали куба с ребром  $a$  перпендикулярно к этой диагонали проведена плоскость.

1) Выяснить, какая фигура получается в сечении этой плоскости с гранями куба.

2) Найти длины отрезков, получающихся в сечении плоскости с гранями куба, в зависимости от расстояния  $x$  секущей плоскости от центра симметрии куба  $O$ .

417. Рассматривается проекция куба с ребром  $a$  на плоскость, перпендикулярную к одной из диагоналей куба. Во сколько раз площадь проекции будет больше площади сечения куба плоскостью, проходящей через середину диагонали куба перпендикулярно к ней?

418. В правильном тетраэдре  $SABC$  с ребром основания  $a$  проведены три плоскости, каждая из которых проходит через одну из вершин основания тетраэдра  $ABC$  и середины  $K, M, N$  боковых ребер. Найти объем части тетраэдра, расположенной над всеми секущими плоскостями.

419. В правильной четырехугольной призме проведены два параллельных сечения: одно проходит через середины двух смежных сторон основания и середину оси, другое делит ось в отношении  $1:3$ . Зная, что площадь первого сечения равна  $S$ , найти площадь второго.

420. Найти объем треугольной пирамиды, если площади ее граней равны  $S_0, S_1, S_2, S_3$ , а двугранные углы, прилежащие к грани с площадью  $S_0$ , равны между собой.

421. Через середины двух параллельных ребер куба, не лежащих на одной грани, проведена прямая, и куб повернут вокруг нее на  $90^\circ$ . Определить объем общей части исходного куба и повернутого, зная, что ребро куба имеет длину  $a$ .



422. Через вершину конуса проведена плоскость под углом  $\alpha$  к основанию конуса. Эта плоскость пересекает основание по хорде  $AB$  длины  $a$ , стягивающей дугу основания конуса, которой соответствует центральный угол  $\beta$ . Найти объем конуса.

423. Конус и цилиндр имеют общее основание, а вершина конуса находится в центре другого основания цилиндра. Чему

равен угол между осью конуса и его образующей, если известно, что полная поверхность цилиндра относится к полной поверхности конуса как 7:4.

424. В конус вписан цилиндр, высота которого равна радиусу основания конуса. Найти угол между осью конуса и его образующей, зная, что полная поверхность цилиндра относится к площади основания конуса как 3:2.

425. В конус, образующая которого  $l$  наклонена к плоскости основания под углом  $\alpha$ , вписана правильная  $n$ -угольная призма, все ребра которой равны между собой. Найти полную поверхность призмы.

426. Четыре стороны равнобокой трапеции касаются цилиндра, ось которого перпендикулярна к параллельным сторонам трапеции. Найти угол, образуемый плоскостью трапеции с осью цилиндра, зная, что длины оснований трапеции равны  $a$  и  $b$ , а высота трапеции равна  $h$ .

427. В правильную  $n$ -угольную пирамиду со стороной основания  $a$  и боковым ребром  $b$  вписан шар. Найти его радиус.

428. Около шара радиуса  $r$  описана правильная  $n$ -угольная пирамида, у которой двугранный угол при основании равен  $\alpha$ . Найти отношение объема шара к объему пирамиды.

429. Найти отношение объема правильной  $n$ -угольной пирамиды к объему вписанного в нее шара, зная, что окружности, описанные около основания и боковых граней пирамиды, равны между собой.

430. Найти высоту правильной четырехугольной пирамиды, если известно, что объем шара, описанного вокруг пирамиды, равен  $V$ , а перпендикуляр, опущенный из центра шара на ее боковую грань, образует с высотой пирамиды угол  $\alpha$ .

431. В правильную треугольную пирамиду вписан шар. Определить угол наклона боковой грани пирамиды к плоскости

основания, зная, что отношение объема пирамиды к объему шара равно  $\frac{27\sqrt{3}}{4\pi}$ .

432. Шар вписан в прямую призму, в основании которой лежит прямоугольный треугольник. В этом треугольнике перпендикуляр длины  $h$ , опущенный из вершины прямого угла на гипотенузу, составляет с одним из катетов угол  $\alpha$ . Найти объем призмы.

433. Шар радиуса  $R$  вписан в пирамиду, в основании которой лежит ромб с острым углом  $\alpha$ . Боковые грани пирамиды наклонены к плоскости основания под углом  $\phi$ . Найти объем пирамиды.

434. Две правильные  $n$ -угольные пирамиды с одинаковыми основаниями сложены этими основаниями. Найти радиус шара, вписанного внутрь получившегося многогранника, зная, что сторона общего основания пирамид равна  $a$ , а высоты пирамид равны  $h$  и  $H$ .

435. Две правильные  $n$ -угольные пирамиды с одинаковыми основаниями, но разными высотами, сложены этими основаниями, и около получившегося многогранника описан шар радиуса  $R$ . Найти высоты пирамид, зная, что сторона основания равна  $a$ . При каком соотношении между  $a$  и  $R$  задача разрешима?

436. В правильную  $n$ -угольную призму вписан шар, касающийся всех граней призмы. Вокруг призмы также описан шар. Найти отношение объемов двух шаров.

437. В шар вписан правильный тетраэдр, затем в тетраэдр снова вписан шар. Найти отношение поверхностей двух шаров.

438. В правильный тетраэдр вписан шар, касающийся граней тетраэдра. В шар вписан новый правильный тетраэдр. Найти отношение объемов двух тетраэдров.

439. Взяты две противоположные вершины куба и через середины ребер, не проходящих через эти вершины, проведена

секущая плоскость, которая делит куб на две части. В каждую из этих частей помещен шар, касающийся трех граней куба и секущей плоскости. Во сколько раз объем каждого из этих шаров будет меньше объема куба?

440. Из точки сферы радиуса  $R$  проведены три равные хорды под углом  $\alpha$  друг к другу. Определить длину этих хорд.

441. В треугольной пирамиде  $SABC$  ребра  $SA$ ,  $SC$  и  $SB$  попарно перпендикулярны,  $AB=BC=a$ ,  $BS=b$ . Найти радиус вписанного в пирамиду шара.

442. Найти двугранный угол  $\varphi$  между основанием и боковой гранью правильной четырехугольной пирамиды, зная, что радиус описанного около пирамиды шара в 3 раза больше радиуса вписанного в нее шара.

443. В сферу радиуса  $R$  вписан правильный тетраэдр, и все его грани продолжены до пересечения со сферой. Линии пересечения граней тетраэдра со сферой вырезают из ее поверхности четыре сферических треугольника и несколько сферических двуугольников. Вычислить площадь каждого из этих двуугольников и треугольников.

444. В конус вписан шар. Поверхность шара относится к площади основания конуса как 4:3. Найти угол при вершине конуса.

445. В конус вписана полусфера, большой круг которой лежит на основании конуса. Определить угол при вершине конуса, зная, что поверхность конуса относится к поверхности полусферы как 18:5.

446. В шар радиуса  $R$  вписан конус, боковая поверхность которого в  $k$  раз больше площади основания. Найти объем конуса.

447. Отношение высоты конуса к радиусу описанного около него шара равно  $q$ . Найти отношение объемов этих тел.

При каких  $q$  задача разрешима?

448. Найти отношение объема шара к объему описанного около него прямого конуса, если полная поверхность конуса в  $n$  раз больше поверхности шара.

449. Вычислить радиусы основания усеченного конуса, описанного около шара радиуса  $R$ , зная, что отношение полной поверхности усеченного конуса к поверхности шара равно  $m$ .

450. В конус вписан шар радиуса  $r$ . Найти объем конуса, зная, что плоскость, касающаяся шара и перпендикулярная к одной из образующих конуса, отстоит от вершины конуса на расстоянии  $d$ .

451. В конус, у которого угол осевого сечения при вершине равен  $\alpha$ , вписан шар радиуса  $R$ . Найти объем части конуса, расположенной над шаром.

452. Определить радиусы двух шаров, которые, пересекаясь, образуют двояковыпуклую линзу, если известны толщина линзы  $2a$ , полная ее поверхность  $S$  и диаметр  $2R$ .

453. В конус вписан шар, причем отношение их объемов равно  $k$ . Найти отношение объемов шаровых сегментов, отсекаемых от шара плоскостью, проходящей через линию касания шара с конусом.

454. В сферу  $S$  радиуса  $R$  вписаны восемь сфер меньшего радиуса, каждая из которых касается двух соседних, а все вместе касаются сферы  $S$  по окружности большого круга. Затем в пространство между сферами вписана еще одна сфера  $S_1$ , которая касается всех восьми сфер меньшего радиуса и сферы  $S$ . Найти радиус  $\rho$  этой последней сферы.

455. В сферу  $S$  радиуса  $R$  вписано восемь равных сфер, каждая из которых касается трех соседних сфер и сферы  $S$ . Найти радиус вписанных сфер, зная, что их центры лежат в вершинах некоторого куба.

456. В шар вписаны два одинаковых конуса, оси которых совпадают, а вершины находятся в противоположных концах

диаметра шара. Найти отношение объема общей части этих двух конусов к объему шара, зная, что отношение высоты конуса  $h$  к радиусу шара  $R$  равно  $k$ .

457. Площади параллельных сечений шара, расположенных по одну сторону от его центра, равны  $S_1$  и  $S_2$ , а расстояние между этими сечениями равно  $d$ . Найти площадь сечения, параллельного данным и делящего пополам расстояние между ними.

458. На плоскости  $P$  лежат три равных шара радиуса  $R$  касающихся друг друга. Прямой круговой конус расположен так, что его плоскость основания совпадает с  $P$ , а данные шары касаются конуса и лежат вне его. Найти радиус основания конуса, если его высота задана и равна  $qR$ .

459. Даны четыре равных шара радиуса  $R$ , из которых каждый касается трех других. Пятый шар касается каждого из данных шаров внешним образом, шестой — внутренним образом. Найти отношение объема шестого шара  $V_6$  к объему пятого  $V_5$ .

460. На плоскости лежат три равных шара радиуса  $R$ , попарно касающихся друг друга. Четвертый шар касается плоскости и каждого из первых трех шаров. Найти радиус четвертого шара.

461. На плоскости лежат четыре равных шара радиуса  $R$ , причем три из них касаются попарно друг друга, а четвертый касается двух из этих трех. На эти шары сверху положены два равных шара меньшего радиуса, касающихся друг друга, причем каждый из них касается трех больших шаров. Найти отношение радиусов большого и малого шаров.

## 2. Задачи на доказательство

462. Дан усеченный конус, боковая поверхность которого равна площади круга, имеющего своим радиусом образующую усеченного конуса. Доказать, что в данный конус можно вписать шар.

463. Дан усеченный конус, у которого высота есть среднее пропорциональное между диаметрами оснований. Доказать, что в конус можно вписать шар.

464. Доказать, что при соединении трех вершин правильного тетраэдра с серединой высоты, опущенной из четвертой вершины, получаются три попарно перпендикулярные прямые.

465. Пусть  $R$  — радиус шара, описанного около правильной четырехугольной пирамиды,  $r$  — радиус шара, вписанного в эту пирамиду. Доказать, что

$$\frac{R}{r} \geq \sqrt{2} + 1.$$

Указание. Выразить  $\frac{R}{r}$  через  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , где  $\alpha$  — двугранный угол между основанием и боковой гранью.

466. Из точки  $O$ , лежащей в основании  $ABC$  треугольной пирамиды  $SABC$ , проведены прямые  $OA'$ ,  $OB'$  и  $OC'$ , соответственно параллельные ребрам  $SA$ ,  $SB$ ,  $SC$ , до пересечения их соответственно с гранями  $SBC$ ,  $SCA$ ,  $SAB$  в точках  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ .

Доказать, что

$$\frac{OA'}{SA} + \frac{OB'}{SB} + \frac{OC'}{SC} = 1.$$

467. Рассматриваются два треугольника  $ABC$  и  $A_1B_1C_1$ , которые лежат в непараллельных плоскостях и имеют попарно непараллельные стороны. При этом прямые, соединяющие соответственные вершины, пересекаются в одной точке  $O$ . Доказать, что продолжения соответственных сторон треугольников попарно пересекаются и точки их пересечения лежат на одной прямой.

468. Показать, что отрезки, соединяющие вершины некоторой треугольной пирамиды с центрами тяжести противолежащих граней, пересекаются в одной точке и делятся этой точкой в отношении 1:3.

**469.** Показать, что площадь любого треугольного сечения произвольной треугольной пирамиды не превосходит площади хотя бы одной из ее граней.

**470.** Одна из двух треугольных пирамид с общим основанием расположена внутри другой. Доказать, что сумма плоских углов при вершине внутренней пирамиды больше, чем сумма плоских углов при вершине внешней.

**471.** Четыре шара, центры которых не лежат в одной плоскости, касаются попарно друг друга. Каждые два из них определяют плоскость, перпендикулярную к их линии центров и касающуюся обоих шаров. Доказать, что возникающие таким образом шесть плоскостей имеют общую точку.

**472.** Доказать, что если в треугольной пирамиде сумма длин любой пары противоположных ребер одна и та же, то вершины этой пирамиды являются центрами четырех шаров, попарно касающихся друг друга.

**473.** Какому условию должны удовлетворять радиусы трех шаров, попарно касающихся друг друга, для того, чтобы к этим шарам можно было провести общую касательную плоскость?

**474.** Доказать, что если точка перемещается в плоскости основания правильной пирамиды, оставаясь внутри этого основания, то сумма расстояний этой точки от боковых граней постоянна.

**475.** Доказать, что две плоскости, проведенные через концы двух троек ребер параллелепипеда, исходящих из концов диагонали параллелепипеда, рассекают эту диагональ на три равные части.

**476.** Показать, что если плоскость, проведенная через концы трех ребер параллелепипеда, исходящих из одной вершины, отсекает от параллелепипеда правильный тетраэдр, то параллелепипед можно пересечь плоскостью так, чтобы в сечении получился правильный шестиугольник.

477. Доказать, что всякая плоскость, проходящая через середины двух противоположных ребер тетраэдра, делит этот тетраэдр на две равновеликие части.

478. Доказать, что если все двугранные углы некоторой треугольной пирамиды равны, то и все ребра этой пирамиды также равны.

479. На двух параллельных плоскостях расположены отрезки  $AB$  и  $CD$ . Концы этих отрезков являются вершинами некоторой треугольной пирамиды. Доказать, что объем пирамиды сохраняется, если отрезки перемещать в этих плоскостях параллельно самим себе.

480. Доказать, что прямая, пересекающая две грани двугранного угла, образует с ними равные углы тогда и только тогда, когда точки пересечения одинаково удалены от ребра.

481. В пространстве рассматриваются два отрезка  $AB$  и  $CD$ , не лежащих в одной плоскости. Пусть  $MN$  — отрезок, соединяющий их середины. Доказать, что

$$\frac{AD + BC}{2} > MN$$

(здесь  $AD$ ,  $BC$  и  $MN$  — длины соответствующих отрезков).

482. Доказать, что любой плоский угол произвольного четырехгранного угла меньше суммы трех других плоских углов.

483. Доказать, что любой выпуклый четырехгранный угол можно пересечь плоскостью так, чтобы в сечении получился параллелограмм.

### 3. Геометрические места точек

484. Найти геометрическое место проекций данной точки пространства на плоскости, проходящие через другую данную точку.

485. Найти геометрическое место центров сечений шара плоскостями, проходящими через данную прямую  $l$ . Разобрать

случаи, когда прямая пересекает шар, касается его или не имеет с ним общих точек.

486. Найти геометрическое место центров сечений шара плоскостями, проходящими через данную точку  $C$ . Разобрать случаи, когда данная точка находится вне шара, на поверхности шара или внутри шара.

487. Найти геометрическое место точек, из которых можно провести к данному шару радиуса  $R$  три касательные, образующие трехгранный угол с тремя прямыми плоскими углами.

488. Найти геометрическое место оснований перпендикуляров, опущенных из данной точки пространства на прямые, лежащие в заданной плоскости и пересекающиеся в одной точке.

489. Дана плоскость  $P$  и две точки  $A$  и  $B$  вне ее. Через  $A$  и  $B$  проводятся всевозможные сферы, касающиеся плоскости  $P$ . Найти геометрическое место точек касания.

490. Трехгранный угол пересекается плоскостью по треугольнику  $ABC$ . Найти геометрическое место центров тяжести треугольников  $ABC$  при условии, что:

- а) вершины  $A$  и  $B$  закреплены;
- б) вершина  $A$  закреплена.

#### 4. Наибольшие и наименьшие значения

491. Куб пересекается плоскостью, проходящей через одну из его диагоналей. Как должна быть проведена эта плоскость, чтобы площадь сечения получилась наименьшей?

492. В треугольной пирамиде проводятся сечения, параллельные двум ее непересекающимся ребрам. Найти сечение с наибольшей площадью.

---

## ТРИГОНОМЕТРИЯ

### Предварительные замечания

Приведем некоторые формулы, встречающиеся в предложенных ниже задачах.

1. Тригонометрические функции сумм и разностей двух углов:

$$\sin(x+y) = \sin x \cos y + \cos x \sin y, \quad (1)$$

$$\sin(x-y) = \sin x \cos y - \cos x \sin y, \quad (2)$$

$$\cos(x+y) = \cos x \cos y - \sin x \sin y, \quad (3)$$

$$\cos(x-y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y. \quad (4)$$

2. Двойные и тройные углы:

$$\sin 2x = 2 \sin x \cos x, \quad (5)$$

$$\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x, \quad (6)$$

$$\sin 3x = 3 \sin x - 4 \sin^3 x, \quad (7)$$

$$\cos 3x = 4 \cos^3 x - 3 \cos x. \quad (8)$$

3. Сумма и разность тригонометрических функций:

$$\sin x + \sin y = 2 \sin \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}, \quad (9)$$

$$\sin x - \sin y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \sin \frac{x-y}{2}, \quad (10)$$

$$\cos x + \cos y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}, \quad (11)$$

$$\cos x - \cos y = 2 \sin \frac{x+y}{2} \sin \frac{y-x}{2}. \quad (12)$$

4. Произведение тригонометрических функций:

$$\sin x \sin y = \frac{1}{2} [\cos(x-y) - \cos(x+y)], \quad (13)$$

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2} [\cos(x-y) + \cos(x+y)], \quad (14)$$

$$-\sin x \cos y = \frac{1}{2} [\sin(x-y) - \sin(x+y)], \quad (15)$$

$$\sin^2 x = \frac{1 - \cos 2x}{2}, \quad (16)$$

$$\cos^2 x = \frac{1 + \cos 2x}{2}, \quad (17)$$

б. Выражение  $\sin x$ ,  $\cos x$ ,  $\operatorname{tg} x$  через  $\operatorname{tg} \frac{x}{2}$ :

$$\sin x = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{x}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{x}{2}}, \quad (18)$$

$$\cos x = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{x}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{x}{2}}, \quad (19)$$

$$\operatorname{tg} x = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{x}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{x}{2}}. \quad (20)$$

б. Обратные тригонометрические функции.

а) Главные значения обратных тригонометрических функций:

$$y = \operatorname{arcsin} x, \text{ если } x = \sin y \text{ и } -\frac{\pi}{2} \leq y \leq \frac{\pi}{2}, \quad (21)$$

$$y = \operatorname{arccos} x, \text{ если } x = \cos y \text{ и } 0 \leq y \leq \pi, \quad (22)$$

$$y = \operatorname{arctg} x, \text{ если } x = \operatorname{tg} y \text{ и } -\frac{\pi}{2} < y < \frac{\pi}{2}, \quad (23)$$

$$y = \operatorname{arccotg} x, \text{ если } x = \operatorname{ctg} y \text{ и } 0 < y < \pi. \quad (24)$$

б) Многозначные обратные тригонометрические функции:

$$\operatorname{Arcsin} x = (-1)^n \operatorname{arcsin} x + \pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (25)$$

$$\operatorname{Arccos} x = \pm \operatorname{arccos} x + 2\pi n, \quad (26)$$

$$\operatorname{Arctg} x = \operatorname{arctg} x + \pi n, \quad (27)$$

$$\operatorname{Arccotg} x = \operatorname{arccotg} x + \pi n. \quad (28)$$

Формулы (25) — (28) определяют общий вид углов, соответствующих данному значению тригонометрической функции.

### 1. Преобразование выражений, содержащих тригонометрические функции

493. Доказать, что

$$\sin(\alpha + 2\beta) = \sin \alpha,$$

если

$$\operatorname{ctg}(\alpha + \beta) = 0.$$

494. Доказать, что

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = 2 \operatorname{tg} \alpha,$$

если

$$3 \sin \beta = \sin (2\alpha + \beta).$$

495. Доказать, что если  $|A| < 1$  и

$$\sin \alpha = A \sin (\alpha + \beta),$$

то

$$\operatorname{tg} (\alpha + \beta) = \frac{\sin \beta}{\cos \beta - A}.$$

496. Показать, что если углы  $\alpha$  и  $\beta$  связаны соотношением

$$\frac{\sin \beta}{\sin (2\alpha + \beta)} = \frac{n}{m} \quad (|m| > |n|),$$

то имеет место пропорция

$$\frac{1 + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}}{m + n} = \frac{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}{m - n}.$$

497. Доказать, что

$$\cos \frac{\pi}{5} - \cos \frac{2\pi}{5} = \frac{1}{2}.$$

498. Доказать, что

$$\cos \frac{2\pi}{7} + \cos \frac{4\pi}{7} + \cos \frac{6\pi}{7} = -\frac{1}{2}.$$

499. Доказать, что

$$\operatorname{tg} 20^\circ \operatorname{tg} 40^\circ \operatorname{tg} 80^\circ = \sqrt{3}.$$

500. Доказать, что если  $\cos x \neq 0$ , то из равенства  $\cos z = \cos x \cos y$  вытекает равенство

$$\operatorname{tg} \frac{z+x}{2} \operatorname{tg} \frac{z-x}{2} = \operatorname{tg}^2 \frac{y}{2}.$$

501. Преобразовать в произведение алгебраическую сумму

$$\operatorname{ctg}^2 2x - \operatorname{tg}^2 2x - 8 \cos 4x \operatorname{ctg} 4x.$$

502. Доказать тождество

$$\begin{aligned} \sin a + \sin b + \sin c - \sin (a + b + c) &= \\ &= 4 \sin \frac{a+b}{2} \sin \frac{b+c}{2} \sin \frac{c+a}{2}. \end{aligned}$$

503. Доказать, что если  $a, b, c$  — углы треугольника, то имеет место равенство

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{b}{2} + \operatorname{tg} \frac{b}{2} \operatorname{tg} \frac{c}{2} + \operatorname{tg} \frac{c}{2} \operatorname{tg} \frac{a}{2} = 1.$$

504. Найти алгебраические связи между углами  $A, B, C$ , если известно, что

$$\operatorname{tg} A + \operatorname{tg} B + \operatorname{tg} C = \operatorname{tg} A \operatorname{tg} B \operatorname{tg} C.$$

Найти затем при том же условии наименьшие положительные значения углов, если, кроме того, дано, что угол  $A$  равен полусумме  $B$  и  $C$ , а угол  $C$  — сумме  $A$  и  $B$ .

505. Доказать, что

$$\sin \alpha + \sin \beta + \sin \gamma = 4 \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \cos \frac{\gamma}{2},$$

если

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi.$$

506. Пусть  $x + y + z = \frac{\pi}{2}k$ . Для каких целых значений  $k$  сумма

$$\operatorname{tg} y \operatorname{tg} z + \operatorname{tg} z \operatorname{tg} x + \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y$$

не будет зависеть от  $x, y, z$ ?

507. Доказать, что при  $n$  целом и  $\alpha + \beta + \gamma = \pi$  имеет место тождество

$$\sin 2n\alpha + \sin 2n\beta + \sin 2n\gamma = (-1)^{n+1} 4 \sin n\alpha \sin n\beta \sin n\gamma.$$

508. Доказать тождество

$$\sin^3 x \cos^5 x = \frac{3}{64} \sin 2x + \frac{1}{64} \sin 4x - \frac{1}{64} \sin 6x - \frac{1}{128} \sin 8x.$$

## 2. Тригонометрические уравнения и системы уравнений

509. Решить уравнение

$$\operatorname{ctg}^2 x = \frac{1 + \sin x}{1 + \cos x}.$$

510. Решить уравнение

$$(\sin 2x + \sqrt{3} \cos 2x)^2 - 5 = \cos \left( \frac{\pi}{6} - 2x \right).$$

511. Решить уравнение

$$2 \operatorname{tg} 3x - 3 \operatorname{tg} 2x = \operatorname{tg}^2 2x \operatorname{tg} 3x.$$

512. Решить уравнение

$$\sin 3x + \sin 2x = a \sin x.$$

Исследовать, как влияет величина  $a$  на количество корней уравнения.

513. Подобрать в уравнении

$$\operatorname{ctg}(m \cos 2\pi x) = \sqrt{3}$$

коэффициент  $m > 0$  так, чтобы уравнение имело корнями  $x = \pm \frac{1}{6}$ , и затем отыскать при найденном значении  $m$  все остальные решения уравнения.

514. Решить уравнение

$$\sin^3 x - \cos^3 x = \frac{1}{\cos x} - \frac{1}{\sin x}.$$

515. Решить уравнение

$$\cos \pi \frac{x}{31} \cos 2\pi \frac{x}{31} \cos 4\pi \frac{x}{31} \cos 8\pi \frac{x}{31} \cos 16\pi \frac{x}{31} = \frac{1}{32}.$$

516. Решить уравнение

$$\operatorname{tg} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) \operatorname{tg} x \operatorname{tg} \left( x + \frac{\pi}{4} \right) = \frac{4 \cos^2 x}{\operatorname{tg} \frac{x}{2} - \operatorname{ctg} \frac{x}{2}}.$$

517. Решить уравнение

$$\sin^3 x + \cos^3 x = 1 - \frac{1}{2} \sin 2x.$$

518. Решить уравнение

$$\sin 2x - 12(\sin x - \cos x) + 12 = 0.$$

519. Найти  $\cos 2\alpha$ , зная, что  $\operatorname{tg}^2 \alpha - a \operatorname{tg} \alpha + 1 = 0$  ( $a > 0$ ) и угол  $\alpha$  лежит: 1) между  $0$  и  $45^\circ$ ; 2) между  $45$  и  $90^\circ$ .

520. Найти  $\operatorname{ctg} x$  из уравнения

$$\cos^2(\alpha + x) + \cos^2(\alpha - x) = a,$$

где  $0 < a < 2$ . В каких границах должен лежать угол  $\alpha$ , чтобы решение было возможно?

521. Решить уравнение

$$2 \operatorname{ctg} 2x - 3 \operatorname{ctg} 3x = \operatorname{tg} 2x.$$

522. Найти  $\cos \varphi$ , если

$$\sin \alpha + \sin(\varphi - \alpha) + \sin(2\varphi + \alpha) = \sin(\varphi + \alpha) + \sin(2\varphi - \alpha)$$

и угол  $\varphi$  лежит в третьей четверти.

523. Найти  $\operatorname{tg} 2x$ , если

$$1 + \sin x + \cos x + \sin 2x + \cos 2x = 0.$$

524. Решить уравнение

$$\sin^2 x (\operatorname{tg} x + 1) = 3 \sin x (\cos x - \sin x) + 3.$$

525. Найти  $\sin x$  и  $\cos x$ , если

$$a \cos x + b \sin x = c.$$

При каком условии относительно  $a$ ,  $b$  и  $c$  задача имеет решение?

526. Решить уравнение

$$2 - (7 + \sin 2x) \sin^2 x + (7 + \sin 2x) \sin^4 x = 0.$$

527. Решить уравнение

$$\frac{\operatorname{tg}_1}{4} (\sin^2 x + 5 \sin x \cos x + 5) = \frac{1}{9}.$$

528. Показать, что если  $x$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{\cos x - \cos \alpha}{\cos x - \cos \beta} = \frac{\sin^2 \alpha \cos \beta}{\sin^2 \beta \cos \alpha} \quad \text{и} \quad x \neq (2n + 1)\pi,$$

то

$$\operatorname{tg} \frac{x}{2} = \pm \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

529. Решить уравнение

$$\cos 7x - \sin 5x = \sqrt{3} (\cos 5x - \sin 7x).$$

530. Решить уравнение

$$6 \operatorname{tg} x + 5 \operatorname{ctg} 3x = \operatorname{tg} 2x.$$

531. Решить уравнение

$$\frac{a \sin x + b}{b \cos x + a} = \frac{a \cos x + b}{b \sin x + a}$$

( $a$  и  $b$  — вещественные числа, отличные от нуля).

532. Найти  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , если  $\sin \alpha + \cos \alpha = \frac{\sqrt{7}}{2}$  и угол  $\alpha$  лежит между  $0$  и  $45^\circ$ .

533. Решить уравнение

$$\sin 2x + \operatorname{tg} x = 2.$$

534. Решить уравнение

$$2 + \cos x = 2 \operatorname{tg} \frac{x}{2}.$$

535. Решить уравнение

$$1 + 2 \operatorname{cosec} x = -\frac{\sec^2 \frac{x}{2}}{2}.$$

536. Решить уравнение

$$2 \sec x \operatorname{cosec} x + 2 (\operatorname{cosec} x - \sec x) - 5 = 0.$$

537. Решить уравнение

$$1 - \operatorname{tg} x = \frac{1}{2} \cos 2x.$$

538. Решить уравнение

$$\operatorname{ctg} x - 2 \sin 2x = 1.$$

539. Найти  $\operatorname{tg} x$  из уравнения

$$2 \cos x \cos (\beta - x) = \cos \beta.$$

540. Решить уравнение

$$(1 + k) \frac{\cos x \cos (2x - a)}{\cos (x - a)} = 1 + k \cos 2x.$$

541. Решить уравнение

$$\sin ax \sin bx = \sin cx \sin dx,$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  — последовательные положительные члены арифметической прогрессии.

542. Решить уравнение

$$32 \cos^6 x - \cos 6x = 1.$$

543. Решить уравнение

$$\sin^4 \frac{x}{3} + \cos^4 \frac{x}{3} = \frac{5}{8}.$$

544. Решить уравнение

$$8 \sin^6 x + 3 \cos 2x + 2 \cos 4x + 1 = 0.$$

545. Решить уравнение

$$\cos 3x \cos^3 x + \sin 3x \sin^3 x = 0.$$

546. Решить уравнение

$$\sin^5 x + \cos^5 x = \frac{17}{32}.$$

547. Решить уравнение

$$\sin^{10} x + \cos^{10} x = \frac{29}{16} \cos^4 2x.$$

548. Решить уравнение

$$\sin^3 x + \sin^3 2x + \sin^3 3x = (\sin x + \sin 2x + \sin 3x)^3.$$

549. Решить уравнение

$$\sin^{2n} x + \cos^{2n} x = 1,$$

где  $n$  — целое положительное число.

550. Решить уравнение

$$(\cos 4x - \cos 2x)^2 = \sin 3x + 5.$$

551. Решить уравнение

$$(\sin x + \cos x) \sqrt{2} = \operatorname{tg} x + \operatorname{ctg} x.$$

552. Доказать, что уравнение

$$(\sin x + \sqrt{3} \cos x) \sin 4x = 2$$

не имеет решений.

553. Определить, в каких пределах можно изменять параметр  $\lambda$ , чтобы уравнение

$$\sec x + \operatorname{cosec} x = \lambda$$

имело корень  $x$ , удовлетворяющий неравенству  $0 < x < \frac{\pi}{2}$ .

554. Найти все решения системы уравнений

$$\sin(x + y) = 0, \quad \sin(x - y) = 0,$$

удовлетворяющие условиям:  $0 \leq x \leq \pi$ ,  $0 \leq y \leq \pi$ .

555. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \sin x &= \operatorname{cosec} x + \sin y, \\ \cos x &= \sec x + \cos y. \end{aligned}$$

556. Решить систему уравнений

$$\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y = 1, \quad \cos x \cos y = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

557. Решить систему уравнений

$$\sin x \sin y = \frac{1}{4\sqrt{2}}, \quad \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y = \frac{1}{3}.$$

558. Решить систему уравнений

$$x + y = \varphi, \quad \cos x \cos y = a.$$

559. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \cos(x - 2y) &= a \cos^2 y, \\ \sin(x - 2y) &= a \cos^2 y. \end{aligned}$$

При каком  $a$  решение возможно?

560. Найти  $\cos(x + y)$ , если  $x$  и  $y$  удовлетворяют системе уравнений

$$\sin x + \sin y = a, \quad \cos x + \cos y = b.$$

561. При каких значениях  $a$  система

$$\begin{aligned} x - y &= a, \\ 2(\cos 2x + \cos 2y) &= 1 + 4 \cos^2(x - y) \end{aligned}$$

имеет решение? Найти эти решения.

562. Найти все решения системы

$$\begin{aligned} 8 \cos x \cos y \cos(x - y) + 1 &= 0, \\ x + y &= a. \end{aligned}$$

При каких  $a$  решения возможны?

563. Найти  $\operatorname{tg} 2x + \operatorname{tg} 2y$ , если  $x$  и  $y$  удовлетворяют системе уравнений

$$\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y = a, \quad \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y = b.$$

564. Исключить  $x$  и  $y$  из системы уравнений

$$\begin{aligned} a \sin^2 x + b \cos^2 x &= 1, \\ a \cos^2 y + b \sin^2 y &= 1, \\ a \operatorname{tg} x &= b \operatorname{tg} y, \end{aligned}$$

предполагая, что система разрешима и  $a \neq b$ .

565. Выразить  $\cos \alpha$  и  $\sin \beta$  через  $A$  и  $B$  при условии, что

$$\sin \alpha = A \sin \beta, \quad \operatorname{tg} \alpha = B \operatorname{tg} \beta.$$

566. Решить систему уравнений

$$\operatorname{tg} x = \operatorname{tg}^2 y, \quad \sin x = \cos 2y.$$

567. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \sin x + \sin y &= \sin(x + y), \\ |x| + |y| &= 1. \end{aligned}$$

568. Решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \sin(y - 3x) &= 2 \sin^2 x, \\ \cos(y - 3x) &= 2 \cos^2 x. \end{aligned}$$

569. Выяснить, каким условиям должны удовлетворять числа  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для того, чтобы система уравнений

$$\begin{aligned} \sin x + \sin y &= 2a, \\ \cos x + \cos y &= 2b, \\ \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tg} y &= c \end{aligned}$$

имела хотя бы одно решение.

### 3. Обратные тригонометрические функции

570. Вычислить  $\arccos \left[ \sin \left( -\frac{\pi}{7} \right) \right]$ .

571. Вычислить  $\arcsin \left( \cos \frac{33}{5} \pi \right)$ .

572. Доказать, что

$$\operatorname{arctg} \frac{1}{3} + \operatorname{arctg} \frac{1}{5} + \operatorname{arctg} \frac{1}{7} + \operatorname{arctg} \frac{1}{8} = \frac{\pi}{4}.$$

573. Доказать формулу

$$\operatorname{arcsin} x + \operatorname{arccos} x = \frac{\pi}{2}.$$

574. Показать, что уравнение

$$(\operatorname{arcsin} x)^3 + (\operatorname{arccos} x)^3 = \alpha \pi^3$$

не имеет корней при  $\alpha < \frac{1}{32}$ .

575. Доказать формулу

$$\operatorname{arccos} x = \begin{cases} \operatorname{arcsin} \sqrt{1-x^2}, & \text{если } 0 \leq x \leq 1; \\ \pi - \operatorname{arcsin} \sqrt{1-x^2}, & \text{если } -1 \leq x \leq 0. \end{cases}$$

576. Доказать формулы

$$\begin{aligned} \operatorname{arcsin} (-x) &= -\operatorname{arcsin} x, \\ \operatorname{arccos} (-x) &= \pi - \operatorname{arccos} x. \end{aligned}$$

577. Доказать, что если  $-\frac{\pi}{2} + 2k\pi \leq x \leq \frac{\pi}{2} + 2k\pi$ ,  
то

$$\operatorname{arcsin} (\sin x) = x - 2k\pi.$$

578. Доказать, что если  $0 < x < 1$  и

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{1+x}{1-x}, \quad \beta = \operatorname{arcsin} \frac{1-x^2}{1+x^2},$$

то  $\alpha + \beta = \pi$ .

579. Найти соотношение между

$$\operatorname{arcsin} \operatorname{cosarcsin} x$$

и

$$\operatorname{arccos} \operatorname{sin} \operatorname{arccos} x.$$

4. Тригонометрические неравенства

580. Доказать справедливость неравенства

$$(\operatorname{ctg}^2 x - 1)(3 \operatorname{ctg}^2 x - 1)(\operatorname{ctg} 3x \cdot \operatorname{tg} 2x - 1) \leq -1$$

для всех значений  $x$ , при которых левая часть имеет смысл.

581. Полагая  $\operatorname{tg} \theta = n \operatorname{tg} \varphi$  ( $n > 0$ ), доказать, что

$$\operatorname{tg}^2 (\theta - \varphi) \leq \frac{(n-1)^2}{4n}.$$

582. Доказать неравенство

$$\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} > 1 + \operatorname{ctg} \varphi$$

при  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ .

583. При каких  $x$  выполняется неравенство

$$4 \sin^2 x + 3 \operatorname{tg} x - 2 \sec^2 x > 0?$$

584. Доказать справедливость неравенства

$$(1 - \operatorname{tg}^2 x)(1 - 3 \operatorname{tg}^2 x)(1 + \operatorname{tg} 2x \cdot \operatorname{tg} 3x) > 0$$

для всех значений  $x$ , при которых левая часть имеет смысл.

585. Решить неравенство

$$\cos^3 x \cos 3x - \sin^3 x \sin 3x > \frac{5}{8}.$$

586. Доказать, что если  $A, B, C$  — углы треугольника, то

$$\sin \frac{A}{2} \sin \frac{B}{2} \sin \frac{C}{2} \leq \frac{1}{8}.$$

587. Доказать, что при  $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$  выполняется неравенство

$$\cos \sin \varphi > \sin \cos \varphi.$$

588. Пусть  $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < \frac{\pi}{2}$ . Доказать, что тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 < \frac{\sin \alpha_1 + \dots + \sin \alpha_n}{\cos \alpha_1 + \dots + \cos \alpha_n} < \operatorname{tg} \alpha_n.$$

589. Найти все значения  $x$ , большие нуля, но меньшие  $2\pi$ , для которых выполняется неравенство

$$\cos x - \sin x - \cos 2x > 0.$$

590. Решить неравенство

$$\operatorname{tg} \frac{x}{2} > \frac{\operatorname{tg} x - 2}{\operatorname{tg} x + 2}.$$

591. Пусть  $n$  — целое положительное число, большее 1, и угол  $\alpha$  удовлетворяет неравенству

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{4(n-1)}.$$

Показать, пользуясь методом полной индукции, что тогда

$$\operatorname{tg} nx > n \operatorname{tg} \alpha.$$

592. Доказать, что при  $0 < x < \frac{\pi}{4}$  справедливо неравенство

$$\frac{\cos x}{\sin^2 x (\cos x - \sin x)} > 8.$$

### 5. Разные задачи

593. Известно, что

$$\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi = a.$$

Выразить через  $a$  все тригонометрические функции угла  $\varphi$ .

594. Вычислить

$$\sin \left( 2 \operatorname{arctg} \frac{1}{5} - \operatorname{arctg} \frac{5}{12} \right).$$

595. Доказать, что если

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{7}, \quad \sin \beta = \frac{1}{\sqrt{10}},$$

то  $\alpha + 2\beta = 45^\circ$  ( $\alpha$  и  $\beta$  — углы первой четверти).

596. При каких значениях  $a$  и  $b$  возможно равенство

$$\sin a + \sin b = \sin(a + b)?$$

597. Доказать, что

$$y = \frac{\sin x + \operatorname{tg} x}{\cos x + \operatorname{ctg} x}$$

принимает положительные значения при всех допустимых значениях  $x$ .

598. При каких целых значениях  $n$  функция

$$y = \cos nx \cdot \sin \frac{5}{n} x$$

имеет период  $3\pi$  \*)?

599. Доказать, что если сумма

$$a_1 \cos(\alpha_1 + x) + a_2 \cos(\alpha_2 + x) + \dots + a_n \cos(\alpha_n + x)$$

при  $x = 0$  и  $x = x_1 \neq k\pi$  ( $k$  целое) обращается в нуль, то она равна нулю при всяком  $x$ .

600. Доказать, что функция  $\cos \sqrt{x}$  не является периодической (т. е. не существует такого постоянного числа  $T \neq 0$ , чтобы при всех  $x$  было  $\cos \sqrt{x+T} = \cos \sqrt{x}$ ).

601. Найти наибольшее и наименьшее значения функции

$$\varphi(x) = \sin^6 x + \cos^6 x.$$

---

\*) Функция  $f(x)$  называется периодической, если существует число  $T \neq 0$  такое, что для всех допустимых значений  $x$  выполнено равенство  $f(x+T) = f(x)$ . Число  $T$  при этом называется периодом функции.

602. Вычислить сумму

$$\frac{\cos \frac{\pi}{4}}{2} + \frac{\cos \frac{2\pi}{4}}{2^2} + \dots + \frac{\cos \frac{n\pi}{4}}{2^n}.$$

603. Рассматривается функция

$$f(x) = A \cos x + B \sin x,$$

где  $A$  и  $B$  — некоторые постоянные.

Доказать, что если  $f(x)$  обращается в нуль при двух значениях аргумента  $x_1$  и  $x_2$  таких, что

$$x_1 - x_2 \neq k\pi$$

( $k$  — целое число), то функция  $f(x)$  тождественно равна нулю.

---

## РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ

## АЛГЕБРА

### 1. Арифметическая и геометрическая прогрессии

#### 1. По условию задачи

$$b - a = c - b = d \quad \text{и} \quad c - a = 2d.$$

Пусть

$$A_1 = \frac{1}{\sqrt{c} + \sqrt{a}} - \frac{1}{\sqrt{b} + \sqrt{c}}$$

и

$$A_2 = \frac{1}{\sqrt{a} + \sqrt{b}} - \frac{1}{\sqrt{c} + \sqrt{a}}.$$

Покажем, что  $A_1 = A_2$ . Если  $d = 0$ , то  $a = b = c$  и  $A_1 = A_2 = 0$ . Поэтому будем считать, что  $d \neq 0$ . Освобождаясь от иррациональности в знаменателях, получаем:

$$A_1 = \frac{\sqrt{c} - \sqrt{a}}{2d} + \frac{\sqrt{b} - \sqrt{c}}{d} = \frac{2\sqrt{b} - \sqrt{c} - \sqrt{a}}{2d}.$$

и

$$A_2 = \frac{\sqrt{b} - \sqrt{a}}{d} - \frac{\sqrt{c} - \sqrt{a}}{2d} = \frac{2\sqrt{b} - \sqrt{c} - \sqrt{a}}{2d}.$$

Таким образом,  $A_1 = A_2$ , что и требовалось доказать.

2. Если разность  $d$  заданной прогрессии равна нулю, то справедливость формулы очевидна. Поэтому будем считать  $d \neq 0$ .

Обозначим левую часть предлагаемого равенства через  $S$ . Освобождая знаменатели от иррациональности, получаем:

$$S = \frac{\sqrt{a_2} - \sqrt{a_1}}{a_2 - a_1} + \frac{\sqrt{a_3} - \sqrt{a_2}}{a_3 - a_2} + \dots + \frac{\sqrt{a_n} - \sqrt{a_{n-1}}}{a_n - a_{n-1}}.$$

Так как по условию  $a_2 - a_1 = a_3 - a_2 = \dots = a_n - a_{n-1} = d$ , то, очевидно,

$$S = \frac{\sqrt{a_n} - \sqrt{a_1}}{d}.$$

Имеем теперь

$$S = \frac{a_n - a_1}{(\sqrt{a_n} + \sqrt{a_1})d} = \frac{(n-1)d}{d(\sqrt{a_n} + \sqrt{a_1})} = \frac{n-1}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_n}},$$

что и требовалось доказать.

3. По условию задачи

$$a_2 - a_1 = a_3 - a_2 = \dots = a_n - a_{n-1} = d.$$

Если  $d=0$ , то предлагаемое равенство очевидно. Считая  $d \neq 0$ , будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} + \frac{1}{a_3 a_4} + \dots + \frac{1}{a_{n-1} a_n} &= \\ &= \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right) \frac{1}{d} + \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_3}\right) \frac{1}{d} + \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_4}\right) \frac{1}{d} + \dots \\ &\dots + \left(\frac{1}{a_{n-2}} - \frac{1}{a_{n-1}}\right) \frac{1}{d} + \left(\frac{1}{a_{n-1}} - \frac{1}{a_n}\right) \frac{1}{d} = \\ &= \frac{1}{d} \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_n}\right) = \frac{a_n - a_1}{d a_1 a_n} = \frac{n-1}{a_1 a_n}, \end{aligned}$$

что и требовалось доказать.

4. При  $n=3$  имеем  $\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} = \frac{2}{a_1 a_3}$ . Отсюда  $\frac{1}{a_1 a_2} - \frac{1}{a_1 a_3} = \frac{1}{a_1 a_3} - \frac{1}{a_2 a_3}$  и, следовательно,  $a_3 - a_2 = a_2 - a_1$ . Поэтому достаточно показать, что при любом  $n \geq 4$

$$a_n - a_{n-1} = a_{n-1} - a_{n-2}.$$

Выпишем последовательно равенство, указанное в условии, для случаев  $n-2$ ,  $n-1$  и  $n$ :

$$\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} + \dots + \frac{1}{a_{n-2} a_{n-1}} = \frac{n-3}{a_1 a_{n-2}}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} + \dots + \frac{1}{a_{n-2} a_{n-1}} = \frac{n-2}{a_1 a_{n-1}}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_2 a_3} + \dots + \frac{1}{a_{n-1} a_n} = \frac{n-1}{a_1 a_n}. \quad (3)$$

Вычитая почленно из равенства (3) равенство (2) и из (2) равенство (1), получаем:

$$\frac{1}{a_{n-1} a_n} - \frac{1}{a_1 a_n} = (n-2) \frac{a_{n-1} - a_n}{a_1 a_{n-1} a_n},$$

$$\frac{1}{a_{n-2} a_{n-1}} - \frac{1}{a_1 a_{n-1}} = (n-2) \frac{a_{n-2} - a_{n-1}}{a_1 a_{n-1} a_{n-2}}.$$

Приведя к общему знаменателю, после сокращения найдем:

$$a_1 - a_{n-1} = (n-2)(a_{n-1} - a_n),$$

$$a_1 - a_{n-1} = (n-2)(a_{n-2} - a_{n-1}).$$

Следовательно,  $a_{n-1} - a_n = a_{n-2} - a_{n-1}$ , что и требовалось доказать.

5. Доказательство проведем методом индукции. Заметим, что при  $n=2$  равенство имеет место, так как  $a_2 - a_1 = a_2 - a_1$  и, следовательно,  $a_1 - 2a_2 + a_3 = 0$ . Допустим, что предлагаемая формула справедлива для некоторого  $n$ ; иначе говоря, какова бы ни была арифметическая прогрессия  $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$ , справедливо равенство

$$x_1 - C_n^1 x_2 + C_n^2 x_3 - \dots + (-1)^{n-1} C_n^{n-1} x_n + (-1)^n C_n^n x_{n+1} = 0. \quad (1)$$

Переходя к  $n+1$ , используем тождество

$$C_n^k = C_{n-1}^k + C_{n-1}^{k-1}.$$

Тогда

$$a_1 - C_{n+1}^1 a_2 + C_{n+1}^2 a_3 - \dots + (-1)^n C_{n+1}^n a_{n+1} + (-1)^{n+1} C_{n+1}^{n+1} a_{n+2} = [a_1 - C_n^1 a_2 + \dots + (-1)^n C_n^n a_{n+1}] - [a_2 - C_n^1 a_3 + \dots + (-1)^{n-1} C_n^{n-1} a_{n+1} + (-1)^n C_n^n a_{n+2}].$$

По предположению индукции оба выражения, стоящие в квадратных скобках, равны нулю, так как они имеют вид (1). Поэтому предлагаемая формула справедлива и для  $n+1$ . Этим утверждение доказано.

6. Доказательство проведем по методу индукции. При  $n=3$  легко непосредственно проверить, что

$$a_1^2 - 3(a_1 + d)^2 + 3(a_1 + 2d)^2 - (a_1 + 3d)^2 = 0.$$

Пусть уже установлено, что при некотором  $n$  и любой арифметической прогрессии  $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$  имеет место тождество

$$x_1^2 - C_n^1 x_2^2 + \dots + (-1)^n C_n^n x_{n+1}^2 = 0.$$

Тогда, поступая в случае  $n+1$ , как и в предыдущей задаче, получаем:

$$\begin{aligned} a_1^2 - C_{n+1}^1 a_2^2 + C_{n+1}^2 a_3^2 + \dots + (-1)^n C_{n+1}^n a_{n+1}^2 + \\ + (-1)^{n-1} C_{n+1}^{n+1} a_{n+2}^2 = [a_1^2 - C_n^1 a_2^2 + \dots + (-1)^n C_n^n a_{n+1}^2] - \\ - (a_2^2 - C_n^1 a_3^2 + \dots + (-1)^n C_n^n a_{n+2}^2) = 0, \end{aligned}$$

что и требуется для доказательства.

Заметим, что для арифметической прогрессии  $a_1, a_2, \dots, a_n, a_{n+1}$  справедлива и более общая формула

$$a_1^k - C_n^1 a_2^k + C_n^2 a_3^k - \dots + (-1)^{n-1} C_n^{n-1} a_n^k + (-1)^n C_n^n a_{n+1}^k = 0,$$

где  $k \geq 1$  — целое число.

7. По известному свойству членов арифметической прогрессии имеем:

$$2 \lg_m x = \lg_n x + \lg_k x.$$

Отсюда (см. (3), стр. 24)  $\frac{2}{\lg_x m} = \frac{1}{\lg_x n} + \frac{1}{\lg_x k}$  и, следовательно,

$$2 = \frac{\lg_x m}{\lg_x n} + \frac{\lg_x m}{\lg_x k}.$$

Используя формулу (2), данную на стр. 24, получаем:

$$2 = \lg_n m + \lg_k m.$$

Имея в виду потенцировать это равенство по основанию  $n$ , запишем его следующим образом:

$$\lg_n n^2 = \lg_n m + \lg_n (n^{\lg_k m}).$$

Потенцируя, получаем  $n^2 = mn^{\lg_k m}$ , или

$$n^2 = (kn)^{\lg_k m},$$

что и требовалось доказать.

8. Пусть

$$\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+kn}} = c, \quad (1)$$

Обозначим через  $d$  разность прогрессии. Интерес представляет лишь тот случай, когда  $d \neq 0$ , так как при  $d = 0$  все члены прогрессии равны между собой и равенство (1) выполняется. Используя формулу для суммы членов арифметической прогрессии, из равенства (1) получаем:

$$\frac{n}{2} [a_1 + a_n + d(n-1)] = \frac{kn}{2} [a_1 + nd + a_1 + (n + kn - 1)d] c,$$

откуда после сокращения и перегруппировки членов находим:

$$(2a_1 - 2a_1 kc - d + cdk) + n(d - cdk^2 - 2cdk) = 0.$$

Так как это равенство имеет место при любом  $n$ , то

$$\begin{aligned} 2a_1 - 2a_1 kc - d + cdk &= 0, \\ d - cdk^2 - 2cdk &= 0. \end{aligned}$$

Сократив второе из этих равенств на  $d \neq 0$ , будем иметь:

$$c = \frac{1}{k(k+2)}. \quad (2)$$

Первое же равенство можно представить в виде

$$(2a_1 - d)(1 - ck) = 0.$$

В силу (2) второй множитель отличен от нуля и, следовательно,  $d = 2a_1$ .

Таким образом, при условии  $d \neq 0$  равенство (1) может иметь место при всех  $n$  лишь в случае прогрессии

$$a, 3a, 5a, \dots \quad (a \neq 0). \quad (3)$$

Теперь легко непосредственно проверить, что прогрессия (3) действительно удовлетворяет условию задачи. Итак, искомой является прогрессия (3).

9. Пусть  $d$  — разность прогрессии. Имеем:

$$\begin{aligned} b^2 &= x_1^2 + (x_1 + d)^2 + \dots + [x_1 + (n-1)d]^2 = \\ &= nx_1^2 + 2x_1d[1 + 2 + \dots + (n-1)] + \\ &\quad + d^2[1^2 + 2^2 + \dots + (n-1)^2] = \\ &= nx_1^2 + n(n-1)x_1d + \frac{n(n-1)(2n-1)}{6}d^2 \end{aligned}$$

и, кроме того,

$$a = nx_1 + \frac{n(n-1)}{2}d.$$

Исключая из этих уравнений  $x_1$ , после несложных преобразований получаем:

$$d^2 \frac{n(n^2-1)}{12} = b^2 - \frac{a^2}{n}.$$

Отсюда

$$d = \pm \sqrt{\frac{12(nb^2 - a^2)}{n^2(n^2-1)}};$$

$x_1$  затем определяется в каждом из двух случаев по формуле

$$x_1 = \frac{1}{n} \left[ a - \frac{n(n-1)}{2}d \right].$$

Таким образом, поставленным условиям при  $n^2b^2 - a^2 \neq 0$  удовлетворяют две прогрессии.

10. Пусть последовательность  $a_1, a_2, \dots, a_n$  обладает тем свойством, что

$$a_2 - a_1 = d, \quad a_3 - a_2 = 2d, \quad \dots, \quad a_n - a_{n-1} = (n-1)d.$$

Сложив эти равенства, находим:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = a_1 + a_2 + \dots + a_{n-1} + a_n + \\ + d(1 + 2 + \dots + n-1)$$

откуда

$$a_n = a_1 + d \frac{n(n-1)}{2}.$$

Пользуясь этой формулой, получаем:

$$S_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n = a_1 n + \left[ \frac{1 \cdot 2}{2} + \frac{2 \cdot 3}{2} + \dots + \frac{(n-1)n}{2} \right] d.$$

В задаче 250 доказано, что

$$\frac{1 \cdot 2}{2} + \frac{2 \cdot 3}{2} + \dots + \frac{(n-1)n}{2} = \frac{n(n^2-1)}{6}.$$

Следовательно,

$$S_n = a_1 n + \frac{n(n^2-1)}{6} d.$$

Для данной задачи  $d=3$ ,  $a_1=1$ . Поэтому

$$a_n = 1 + \frac{3}{2} n(n-1) \quad \text{и} \quad S_n = \frac{1}{2} n(n^2+1).$$

11. В  $n$ -й строке стоят числа  $n, n+1, \dots, 3n-3, 3n-2$  (всего  $2n-1$  чисел). Сумма этих чисел равна

$$\frac{(n+3n-2)(2n-1)}{2} = (2n-1)^2.$$

12. Пусть  $q$  — знаменатель прогрессии; тогда

$$\begin{aligned} a_{m+n} &= a_1 q^{m+n-1} = A, \\ a_{m-n} &= a_1 q^{m-n-1} = B. \end{aligned}$$

Отсюда  $q^{2n} = \frac{A}{B}$  и, следовательно,  $q = \sqrt[2n]{\frac{A}{B}}$ . Имеем теперь:

$$a_m = a_{m-n} q^n = B \left( \sqrt[2n]{\frac{A}{B}} \right)^n = \sqrt{AB},$$

$$a_n = a_{m+n} q^{-m} = A \left( \frac{A}{B} \right)^{-\frac{m}{2n}} = A^{\frac{2n-m}{2n}} B^{\frac{m}{2n}}.$$

13. Имеем:

$$\begin{aligned} S_n &= a_1 + a_1 q + \dots + a_1 q^{n-1}, \\ S_{2n} - S_n &= a_1 q^n + a_1 q^{n+1} + \dots + a_1 q^{2n-1} = q^n S_n \end{aligned}$$

и, далее,

$$S_{2n} - S_{2n} = a_1 q^{2n} + a_1 q^{2n+1} + \dots + a_1 q^{2n-1} = q^{2n} S_n.$$

Отсюда

$$\frac{1}{q^n} = \frac{S_n}{S_{2n} - S_n} = \frac{S_{2n} - S_n}{S_{2n} - S_{2n}},$$

что и требовалось доказать.

14. Имеем:

$$\prod_n = a_1 \cdot a_1 q_1 \cdot \dots \cdot a_1 q^{n-1} = a_1^n q^{\frac{n(n-1)}{2}} = \left(a_1 q^{\frac{n-1}{2}}\right)^n,$$

Заметив, что

$$\begin{aligned} S_n &= a_1 + a_1 q + \dots + a_1 q^{n-1} = a_1 \frac{q^n - 1}{q - 1}, \\ \tilde{S}_n &= \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_1 q} + \dots + \frac{1}{a_1 q^{n-1}} = \frac{1}{a_n} \frac{\left(\frac{1}{q}\right)^n - 1}{\frac{1}{q} - 1} = \\ &= \frac{1}{a_1 q^{n-1}} \frac{q^n - 1}{q - 1} \end{aligned}$$

и, следовательно,

$$\frac{S_n}{\tilde{S}_n} = a_1^2 q^{n-1} = \left(a_1 q^{\frac{n-1}{2}}\right)^2,$$

получаем:

$$\prod_n = \left(\frac{S_n}{\tilde{S}_n}\right)^{\frac{n}{2}}.$$

15. Обозначим рассматриваемую сумму через  $S_n$ . Умножим каждое слагаемое этой суммы на  $x$  и полученную величину вычтем из  $S_n$ ; в результате будем иметь:

$$S_n - xS_n = 1 + x + x^2 + \dots + x^n - (n+1)x^{n+1},$$

Суммируя входящую сюда геометрическую прогрессию, при  $x \neq 1$  найдем:

$$(1-x)S_n = \frac{1-x^{n+1}}{1-x} - (n+1)x^{n+1}.$$

Отсюда

$$S_n = \frac{1 - x^{n+1}}{(1-x)^2} - \frac{(n+1)x^{n+1}}{1-x} \quad (x \neq 1).$$

В случае  $x=1$  имеем:

$$S_n = \frac{(n+1)(n+2)}{2}.$$

16. Общий вид таких чисел следующий:

$$\overbrace{44 \dots 4}^n \cdot \overbrace{88 \dots 88}^{n-1} = 4 \cdot \overbrace{11 \dots 1}^n \cdot 10^n + 8 \cdot \overbrace{11 \dots 1}^n + 1.$$

Число  $\overbrace{11 \dots 1}^n$  можно записать в виде суммы членов геометрической прогрессии со знаменателем 10. Следовательно,

$$\overbrace{11 \dots 1}^n = 1 + 10 + 10^2 + \dots + 10^{n-1} = \frac{10^n - 1}{9}.$$

Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{4}{9}(10^n - 1)10^n + \frac{8}{9}(10^n - 1) + 1 &= \\ &= \frac{4}{9}10^{2n} + \frac{4}{9}10^n + \frac{1}{9} = \left(\frac{2 \cdot 10^n + 1}{3}\right)^2. \end{aligned}$$

17. По условию задачи  $|q| < 1$ , и мы имеем:

$$q^n = k(q^{n+1} + q^{n+2} + \dots) = kq^{n+1} \frac{1}{1-q}. \quad (1)$$

Отсюда  $1 - q = kq$  и, следовательно, если задача имеет решение, то

$$q = \frac{1}{k+1}. \quad (2)$$

Легко, однако, видеть, что если, наоборот, из равенства (2) следует, что  $|q| < 1$ , то равенство (2) влечет за собой равенство (1), и соответствующая прогрессия удовлетворяет условию задачи. Таким образом, задача разрешима при любом  $k$ , удовлетворяющем неравенству  $\left|\frac{1}{k+1}\right| < 1$ . Это последнее имеет место при  $k > 0$  или  $k < -2$ .

18. Доказательство проведем методом полной индукции. Рассмотрим сначала случай последовательности, состоящей из трех членов  $x_1, x_2, x_3$ . Раскрыв скобки в формуле

$$(x_1^2 + x_2^2)(x_2^2 + x_3^2) = (x_1x_2 + x_2x_3)^2,$$

мы обнаружим, что

$$x_1^4 + x_1^2x_3^2 - 2x_1x_2^2x_3 = 0,$$

откуда  $(x_2^2 - x_1x_3)^2 = 0$  и, следовательно,  $x_1x_3 = x_2^2$ . При условии  $x_1 \neq 0$  отсюда следует, что числа  $x_1, x_2, x_3$  образуют геометрическую прогрессию. Допустим теперь, что предлагаемое утверждение доказано для случая последовательности, состоящей из  $k$  ( $k \geq 3$ ) членов:

$$x_1, x_2, \dots, x_k, \quad (1)$$

и пусть  $q$  — соответствующий знаменатель прогрессии. Рассмотрим тогда последовательность, состоящую из  $k+1$  членов:

$$x_1, x_2, \dots, x_k, x_{k+1}. \quad (2)$$

Запишем соответствующее условие

$$(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{k-1}^2 + x_k^2)(x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_k^2 + x_{k+1}^2) = \\ = (x_1x_2 + x_2x_3 + \dots + x_{k-1}x_k + x_kx_{k+1})^2 \quad (3)$$

и положим для краткости  $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{k-1}^2 = a^2$ . Заметим, что  $a \neq 0$ , ибо  $x_1 \neq 0$ . По индуктивному допущению мы имеем:

$$x_2 = qx_1; \quad x_3 = qx_2; \quad \dots; \quad x_k = qx_{k-1}. \quad (4)$$

Поэтому равенство (3) можно переписать так:

$$(a^2 + x_k^2)(q^2a^2 + x_{k+1}^2) = (qa^2 + x_kx_{k+1})^2.$$

Раскрыв здесь скобки и сгруппировав члены, мы установим, что

$$(x_kq - x_{k+1})^2a^2 = 0.$$

Так как  $a \neq 0$ , то наряду с (4) мы получаем  $x_{k+1} = qx_k$ . Значит, последовательность  $x_1, x_2, \dots, x_k, x_{k+1}$  представ-

ляет собой геометрическую прогрессию с тем же знаменателем  $q = \frac{x_2}{x_1}$ .

На основании доказанного мы можем утверждать, что последовательность, составленная из  $n$  первых членов заданной последовательности, при любом натуральном  $n$  представляет собой геометрическую прогрессию. Поэтому и данная бесконечная последовательность образует прогрессию, что и требовалось доказать.

19. Пусть  $a_1 = b_1 = a$ ; тогда в силу условия  $a_2 = b_2$  имеем:

$$a + d = aq. \quad (1)$$

Здесь  $d$  и  $q$  — разность и знаменатель соответствующих прогрессий. Заметим, что в силу условия  $a_n > 0$  для всех  $n$  разность  $d$  должна быть неотрицательной. Так как, кроме того,  $a_1 \neq a_2$ , то  $d > 0$ .

Из формулы (1) ввиду этого следует:

$$q = 1 + \frac{d}{a} > 1.$$

Нам нужно доказать, что при  $n > 2$

$$a + (n-1)d < aq^{n-1}. \quad (2)$$

Так как в силу равенства (1)  $d = a(q-1)$ , то (2) равносильно неравенству

$$a(n-1)(q-1) < a(q^{n-1} - 1).$$

Деля обе части на положительную величину  $a(q-1)$ , получаем:

$$n-1 < 1 + q + \dots + q^{n-2}.$$

Так как  $q > 1$ , то это неравенство справедливо. Задача решена.

20. По условию задачи

$$a_1 > 0, \frac{a_2}{a_1} = q > 0 \text{ и } b_2 - b_1 = d > 0,$$

где, как обычно,  $q$  есть знаменатель геометрической прогрессии, а  $d$  — разность арифметической прогрессии. Пользуясь

тем, что  $a_n = a_1 q^{n-1}$  и  $b_n = b_1 + (n-1)d$ , получаем:

$$\lg_a a_n - b_n = (n-1)(\lg_a q - d) + \lg_a a_1 - b_1.$$

Для того чтобы рассматриваемая разность не зависела от  $n$ , необходимо и достаточно, чтобы  $\lg_a q - d = 0$ . Решив это уравнение, находим:

$$a = q^{\frac{1}{d}}. \quad (1)$$

Следовательно, искомое число  $a$  существует и определяется по формуле (1).

## 2. Алгебраические уравнения и системы уравнений

21. Записав данную систему в виде

$$(x + y)(x^2 - xy + y^2) = 1, \quad (1)$$

$$y(x + y)^2 = 2, \quad (2)$$

разделим почленно первое уравнение на второе, Освобождаясь от знаменателя и приводя затем подобные члены, получаем:

$$y^2 - 3xy + 2x^2 = 0. \quad (3)$$

Разрешив квадратное уравнение (3) относительно  $y$ , получаем  $y = x$  или  $y = 2x$ . Решая далее каждое из этих уравнений совместно с уравнением (2), находим вещественные решения соответствующих систем. Их всего два:

$$x_1 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{4}, \quad y_1 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{4};$$

$$x_2 = \frac{1}{3} \sqrt[3]{3}, \quad y_2 = \frac{2}{3} \sqrt[3]{3}.$$

Каждая из этих пар чисел удовлетворяет и исходной системе; в этом можно убедиться либо непосредственной подстановкой, либо проанализировав способ, которым они были найдены.

22. Преобразуем уравнения данной системы к виду

$$(x + y)^2 - xy = 4,$$

$$(x + y) + xy = 2.$$

Отсюда

$$(x + y)^2 + (x + y) = 6$$

и, следовательно,  $x + y = 2$  или  $x + y = -3$ . Сопоставляя каждое из этих уравнений со вторым уравнением исходной системы, мы приходим к следующим двум системам уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} x + y = 2 \\ xy = 0 \end{array} \right\} \quad (1) \qquad \left. \begin{array}{l} x + y = -3 \\ xy = 5. \end{array} \right\} \quad (2)$$

система (1) имеет два решения:

$$\begin{array}{l} x_1 = 2, \quad y_1 = 0; \\ x_2 = 0, \quad y_2 = 2. \end{array}$$

система (2) также имеет два решения:

$$\begin{array}{l} x_3 = -\frac{3}{2} + i\frac{\sqrt{11}}{2}, \quad y_3 = -\frac{3}{2} - i\frac{\sqrt{11}}{2}; \\ x_4 = -\frac{3}{2} - i\frac{\sqrt{11}}{2}, \quad y_4 = -\frac{3}{2} + i\frac{\sqrt{11}}{2}. \end{array}$$

очевидно, что каждое решение исходной системы содержится среди решений указанных систем. Простым анализом нетрудно оказать и обратное. Впрочем, в последнем еще проще убедиться непосредственной подстановкой. Таким образом, задача имеет четыре решения.

23. Возведя обе части первого уравнения в квадрат, получим:

$$x^2 + y^2 + 2xy = a^2 + b^2 + 2ab,$$

откуда, в силу второго уравнения, следует, что  $xy = ab$ . При определении  $x$  и  $y$  получаем систему

$$x + y = a + b, \quad xy = ab,$$

имеющую два решения:

$$x_1 = a, \quad y_1 = b; \quad x_2 = b, \quad y_2 = a.$$

оба эти решения удовлетворяют и исходной системе, которая, следовательно, имеет всего два решения.

24. Преобразуем уравнения данной системы к виду

$$\begin{aligned}(x+y)[(x+y)^2-3xy] &= 5a^3, \\ xy(x+y) &= a^3,\end{aligned}$$

после чего положим  $x+y=u$ ,  $xy=v$ . Подставив  $xy(x+y)$  из второго уравнения в первое, найдем  $u^3=8a^3$ . Так как нас интересуют лишь вещественные решения, то имеем  $u=2a$ . Из второго уравнения теперь находим:

$$v = \frac{a^3}{u} = \frac{1}{2}a^3.$$

Мы приходим, таким образом, к следующей системе относительно  $x$  и  $y$ :

$$x+y=2a, \quad xy=\frac{1}{2}a^3.$$

Решая эту систему, получаем:

$$\begin{aligned}x_1 &= a \frac{2+\sqrt{2}}{2}, & y_1 &= a \frac{2-\sqrt{2}}{2}; \\ x_2 &= a \frac{2-\sqrt{2}}{2}, & y_2 &= a \frac{2+\sqrt{2}}{2}.\end{aligned}$$

Эти числа удовлетворяют и исходной системе, которая, следовательно, имеет два вещественных решения.

25. Приведя данные уравнения к общему знаменателю, преобразуем систему к виду

$$\begin{aligned}(x+y)[(x+y)^2-3xy] &= 12xy, & (1) \\ 3(x+y) &= xy. & (2)\end{aligned}$$

Положим  $x+y=u$ ,  $xy=v$ . Подставив  $xy=v$  из второго уравнения в первое, получим:

$$u(u^2-9u)=36v. \quad (3)$$

Заметим, что  $u \neq 0$  (в противном случае из уравнения (2) следовало бы, что  $xy=0$ , а это противоречит исходному уравнению). Поэтому из уравнения (3) следует, что либо

$$u=12, \quad \text{либо} \quad u=-3.$$

В первом случае ( $u = 12$ ) получаем систему

$$x + y = 12, \quad xy = 36,$$

откуда  $x = y = 6$ .

Во втором случае ( $u = -3$ ) имеем:

$$x + y = -3, \quad xy = -9.$$

Эта система имеет два решения:

$$x = \frac{3}{2} (\pm \sqrt{5} - 1), \quad y = \frac{3}{2} (\mp \sqrt{5} - 1).$$

Все три найденных решения удовлетворяют и исходной системе. Таким образом, система имеет всего три решения.

26. Возводя второе уравнение в квадрат и вычитая его из первого, получаем:

$$xy(x^2 + y^2 - xy) = 21. \quad (1)$$

Отсюда, в силу второго уравнения заданной системы,

$$xy = 3.$$

Подставляя  $y$  во второе уравнение системы, приходим к биквадратному уравнению

$$x^4 - 10x^2 + 9 = 0.$$

Отсюда  $x_1 = 3, x_2 = -3, x_3 = 1, x_4 = -1$ , а соответствующие значения  $y$  таковы:  $y_1 = 1, y_2 = -1, y_3 = 3, y_4 = -3$ . Проверкой убеждаемся в том, что все четыре пары чисел являются решениями исходной системы. Следовательно, система имеет четыре решения:

$$\begin{array}{ll} x_1 = 3, & y_1 = 1; & x_2 = -3, & y_2 = -1; \\ x_3 = 1, & y_3 = 3; & x_4 = -1, & y_4 = -3. \end{array}$$

27. Преобразуем систему к виду

$$\begin{aligned} (x - y)(x^2 + y^2 + xy - 19) &= 0, \\ (x + y)(x^2 + y^2 - xy - 7) &= 0. \end{aligned}$$

Исходная система тем самым сводится к следующим четырем

системам уравнений:

$$1) \begin{cases} x - y = 0, \\ x + y = 0. \end{cases} \quad 2) \begin{cases} x - y = 0, \\ x^2 + y^2 - xy - 7 = 0. \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} x^2 + y^2 + xy - 19 = 0, \\ x + y = 0. \end{cases} \quad 4) \begin{cases} x^2 + y^2 + xy - 19 = 0, \\ x^2 + y^2 - xy - 7 = 0. \end{cases}$$

Первая система имеет единственное решение:  $x=0$ ,  $y=0$ . Вторая имеет два решения:  $x=\pm\sqrt{7}$ ,  $y=\pm\sqrt{7}$ . Третья также имеет два решения:  $x=\pm\sqrt{19}$ ,  $y=\mp\sqrt{19}$ . Переходя к четвертой системе, заметим, что, складывая оба уравнения и вычитая одно уравнение из другого, мы заменим эту систему следующей равносильной:

$$xy = 6, \quad x^2 + y^2 = 13.$$

Эта система имеет четыре решения:

$$x = \pm 2, \quad y = \pm 3 \quad \text{и} \quad y = \pm 2, \quad x = \pm 3.$$

Таким образом, предлагаемая в задаче система имеет девять решений:

$$(0, 0), (\sqrt{7}, \sqrt{7}), (-\sqrt{7}, -\sqrt{7}), (\sqrt{19}, -\sqrt{19}), (-\sqrt{19}, \sqrt{19}), (2, 3), (-2, -3), (3, 2), (-3, -2).$$

28. После простого преобразования будем иметь:

$$2(x+y) = 5xy,$$

$$8(x+y)[(x+y)^2 - 3xy] = 65.$$

Подставляя  $x+y$  из первого уравнения во второе и полагая  $xy = v$ , получим:

$$25v^2 - 12v - 13 = 0.$$

Это уравнение, очевидно, удовлетворяется при  $v=1$ . Деля левую часть на  $v-1$ , приходим к уравнению

$$25v^2 + 25v + 13 = 0.$$

Последнее не имеет вещественных корней. Таким образом, остается лишь одна возможность:  $v=1$ . Внося это значение в первое уравнение, приходим к системе

$$xy = 1, \quad x + y = \frac{5}{2}.$$

Отсюда  $x=2$ ,  $y=\frac{1}{2}$  и  $x=\frac{1}{2}$ ,  $y=2$ .

Обе пары чисел удовлетворяют и исходному уравнению. Таким образом, система имеет два и только два вещественных решения.

29. Складывая оба уравнения, а затем вычитая из первого уравнения второе, приходим к следующей равносильной системе:

$$\left. \begin{aligned} (x-y)(x^2+y^2+xy) &= 7, \\ (x-y)xy &= 2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Представив первое уравнение в виде

$$(x-y)^3 + 3xy(x-y) = 7,$$

найдем, что в силу второго уравнения  $(x-y)^3 = 1$ .

Так как нас интересуют лишь вещественные решения, то  $x-y=1$ . Учитывая это, легко обнаруживаем, что  $xy=2$ .

Решая, далее, систему

$$xy = 2, \quad x - y = 1,$$

найдем два ее решения:

$$x_1 = 2, \quad y_1 = 1; \quad x_2 = -1, \quad y_2 = -2.$$

нетрудно проверить, что обе пары чисел удовлетворяют исходной системе. Таким образом, система имеет два вещественных решения.

30. Преобразуем второе уравнение к виду

$$(x^2 + y^2)^2 - 2x^2y^2 = 7.$$

Полагая  $x^2 + y^2 = u$ ,  $xy = v$ , запишем это уравнение так:

$$u^2 - 2v^2 = 7.$$

озведя в квадрат первое уравнение системы, получим еще одно условие для  $u$  и  $v$ :

$$u + 2v = 1.$$

ключив  $u$  из двух последних уравнений, получим:

$$v^2 - 2v - 3 = 0,$$

ткуда

$$v_1 = 3, \quad v_2 = -1.$$

огда соответствующие значения  $u$  будут равны

$$u_1 = -5, \quad u_2 = 3.$$

Так как  $u = x^2 + y^2$  и нас интересуют лишь вещественные решения исходного уравнения, то первую пару значений  $u$  и  $v$  следует отбросить. Вторая пара приводит к системе

$$x^2 + y^2 = 3, \quad xy = -1.$$

Эта система имеет четыре вещественных решения:

$$\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}, \frac{1-\sqrt{5}}{2}\right), \quad \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}, \frac{1+\sqrt{5}}{2}\right), \\ \left(\frac{-1+\sqrt{5}}{2}, \frac{-1-\sqrt{5}}{2}\right), \quad \left(\frac{-1-\sqrt{5}}{2}, \frac{-1+\sqrt{5}}{2}\right).$$

Легко, однако, проверить, что исходной системе удовлетворяют только первые два из них. Таким образом, предложенная в задаче система имеет два вещественных решения.

31. Преобразуем уравнения системы к виду

$$(x^2 - y^2)^2 + x^2 y^2 = 13, \\ x^2 - y^2 + 2xy = 1.$$

Подставляя  $x^2 - y^2$  из второго уравнения в первое, получим:

$$5(xy)^2 - 4xy - 12 = 0.$$

Отсюда

$$(xy)_1 = 2, \quad (xy)_2 = -\frac{6}{5}. \quad (1)$$

Так как нас интересуют лишь те решения, для которых  $xy \geq 0$ , то имеется лишь одна возможность

$$xy = 2. \quad (2)$$

Подставляя отсюда  $y$  во второе уравнение, получим:

$$x^4 + 3x^2 - 4 = 0.$$

Среди всех корней этого уравнения вещественными являются лишь два:  $x_1 = 1$  и  $x_2 = -1$ . Соответствующими значениями  $y$  в силу (2) будут:  $y_1 = 2$  и  $y_2 = -2$ . Обе пары чисел  $(x, y)$  удовлетворяют и исходной системе. Таким образом, задача имеет два решения:

$$x_1 = 1, \quad y_1 = 2; \quad x_2 = -1, \quad y_2 = -2.$$

32. Раскрыв скобки в уравнениях системы и положив  $x + y = u$ ,  $xy = v$ , запишем систему в виде

$$\left. \begin{aligned} u^2 + v^2 - 2v &= 9, \\ uv - u &= 3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Если теперь обе части второго уравнения умножить на 2, а затем к левой и правой частям полученного таким образом уравнения прибавить и вычесть соответствующие части первого уравнения, то система (1) заменится следующей равносильной:

$$\left. \begin{aligned} (u + v)^2 - 2(u + v) - 15 &= 0, \\ (u - v)^2 + 2(u - v) - 3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из первого уравнения системы (2) следует:

$$(u + v)_1 = 5; \quad (u + v)_2 = -3.$$

Из второго уравнения получаем:

$$(u - v)_1 = -3; \quad (u - v)_2 = 1.$$

Таким образом, нахождение всех решений системы (2) сводится к решению следующих четырех систем:

$$\begin{aligned} 1) \left\{ \begin{aligned} u + v &= 5, \\ u - v &= -3. \end{aligned} \right. & \quad 2) \left\{ \begin{aligned} u + v &= 5, \\ u - v &= 1. \end{aligned} \right. \\ 3) \left\{ \begin{aligned} u + v &= -3, \\ u - v &= -3. \end{aligned} \right. & \quad 4) \left\{ \begin{aligned} u + v &= -3, \\ u - v &= 1. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Решение первой системы:  $u_1 = 1$ ,  $v_1 = 4$ ; решение второй системы:  $u_2 = 3$ ,  $v_2 = 2$ ; решение третьей системы:  $u_3 = -3$ ,  $v_3 = 0$  и, наконец, решение четвертой системы:  $u_4 = -1$ ,  $v_4 = -2$ .

Чтобы найти все решения исходной системы, нам предстоит теперь решить следующие четыре системы второго порядка, отличающиеся лишь правыми частями:

$$\begin{aligned} 1) \left\{ \begin{aligned} x + y &= 1, \\ xy &= 4. \end{aligned} \right. & \quad 2) \left\{ \begin{aligned} x + y &= 3, \\ xy &= 2. \end{aligned} \right. \\ 3) \left\{ \begin{aligned} x + y &= -3, \\ xy &= 0. \end{aligned} \right. & \quad 4) \left\{ \begin{aligned} x + y &= -1, \\ xy &= -2. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

ешив эти уравнения, найдем все решения исходной системы.

Их, очевидно, всего восемь:

$$\left(\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{15}}{2}, \frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{15}}{2}\right), \left(\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{15}}{2}, \frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{15}}{2}\right), \\ (2, 1), (1, 2), (-3, 0), (0, -3), (1, -2), (-2, 1).$$

33. Заметим сначала, что по смыслу задачи  $x \neq 0$  и  $y \neq 0$ . Перемножив левые и правые части данных уравнений, получим:

$$x^4 - y^4 = 6. \quad (1)$$

Умножая каждое из уравнений на  $xy$  и складывая, будем иметь:

$$x^4 - y^4 + 2x^2y^2 = 7xy. \quad (2)$$

В силу (1) и (2), теперь получаем:

$$2x^2y^2 - 7xy + 6 = 0,$$

откуда

$$(xy)_1 = 2; \quad (xy)_2 = \frac{3}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, любое решение исходной системы удовлетворяет уравнению (1) и одному из уравнений (3). Можно было бы поэтому решить каждое из двух уравнений (3) совместно с уравнением (1). Это, однако, привело бы к уравнению восьмого порядка и усложнило бы окончательное решение задачи. Заметим в связи с этим следующее. Если снова умножить каждое из уравнений исходной системы на  $xy$  и затем из первого вычесть второе, то получим уравнение

$$x^4 + y^4 = 5xy, \quad (4)$$

которому также удовлетворяет любое решение исходной системы.

Рассмотрим две возможности:

1) Пусть в соответствии с (3)

$$xy = 2. \quad (5)$$

Тогда, в силу (4),  $x^4 + y^4 = 10$ . Решая это уравнение совместно с (1), найдем:

$$x^4 = 8,$$

и, следовательно,

$$x_1 = \sqrt[4]{8}, \quad x_2 = -\sqrt[4]{8}, \quad x_3 = i\sqrt[4]{8}, \quad x_4 = -i\sqrt[4]{8}.$$

В силу (5) соответствующие значения  $y$  суть

$$y_1 = \frac{2}{\sqrt[4]{8}} = \sqrt[4]{2}, \quad y_2 = -\sqrt[4]{2}, \quad y_3 = -i\sqrt[4]{2}, \quad y_4 = i\sqrt[4]{2}$$

2) Во втором случае

$$xy = \frac{3}{2}. \quad (6)$$

Уравнение (4) приводит нас тогда к соотношению  $x^4 + y^4 = \frac{15}{12}$ , которое вместе с (1) дает  $x_4 = \frac{27}{4}$ . Отсюда

$$x_5 = \sqrt[4]{\frac{27}{4}}, \quad x_6 = -\sqrt[4]{\frac{27}{4}}, \quad x_7 = i\sqrt[4]{\frac{27}{4}}, \\ x_8 = -i\sqrt[4]{\frac{27}{4}};$$

соответствующие значения  $y$  суть

$$y_5 = \sqrt[4]{\frac{3}{4}}, \quad y_6 = -\sqrt[4]{\frac{3}{4}}, \quad y_7 = -i\sqrt[4]{\frac{3}{4}}, \\ y_8 = i\sqrt[4]{\frac{3}{4}}.$$

Таким образом, любое решение исходной системы содержится среди найденных восьми пар чисел. Легко, однако, проверить, что все найденные восемь пар чисел удовлетворяют исходной системе. Следовательно, все решения системы найдены.

34. Преобразуем второе уравнение к виду

$$(x^2 + y^2)^2 - 2x^2y^2 = bx^2y^2.$$

оставив сюда  $axy$  вместо  $x^2 + y^2$  из первого уравнения, айдем:

$$(a^2 - 2 - b)x^2y^2 = 0.$$

Возможны два случая:

1)  $a^2 - 2 - b \neq 0$ . Легко видеть, что при этом условии система имеет лишь одно решение:  $x = 0, y = 0$ .

2)  $a^2 - 2 - b = 0$ . При выполнении этого условия второе уравнение получается в результате возведения в квадрат обеих частей первого. Поэтому если  $x$  и  $y$  — любая пара чисел, удовлетворяющая первому уравнению, то она же удовлетворит и второму. Система, следовательно, имеет бесконечно много решений.

35. Преобразуем левую часть уравнения к виду

$$\frac{x+a}{x+b} \left( \frac{x+a}{x+b} - \frac{a}{b} \frac{x-a}{x-b} \right) + \frac{x-a}{x-b} \left( \frac{x-a}{x-b} - \frac{b}{a} \frac{x+a}{x+b} \right) = 0.$$

Замечая, что выражения в скобках отличаются множителем  $-\frac{a}{b}$ , получаем:

$$\left(\frac{x+a}{x+b} - \frac{a}{b} \frac{x-a}{x-b}\right) \left(\frac{x+a}{x+b} - \frac{b}{a} \frac{x-a}{x-b}\right) = 0.$$

Отсюда при условии  $a \neq b$  следует:

$$[x^2 - (a+b)x - ab][x^2 + (a+b)x - ab] = 0,$$

и мы находим четыре корня исходного уравнения:

$$x_{1,2} = \frac{(a+b) \pm \sqrt{(a+b)^2 + 4ab}}{2},$$

$$x_{3,4} = \frac{-(a+b) \pm \sqrt{(a+b)^2 + 4ab}}{2}.$$

В случае  $a = b$  уравнение удовлетворяется всеми значениями  $x$ .

36. Положим  $\frac{x}{3} - \frac{4}{x} = t$ ; тогда уравнение приводится к виду

$$3t^2 - 10t + 8 = 0.$$

Отсюда

$$t_1 = 2 \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{4}{3}.$$

Решая далее два квадратных уравнения относительно  $x$ , найдем четыре корня исходного уравнения:

$$x_1 = 3 + \sqrt{21}, \quad x_2 = 3 - \sqrt{21}, \quad x_3 = 6, \quad x_4 = -2.$$

37. Положим

$$\frac{x+y}{xy} = u \quad \text{и} \quad \frac{x-y}{xy} = v. \quad (1)$$

Тогда уравнения заданной системы можно записать в виде

$$u + \frac{1}{u} = a + \frac{1}{a}, \quad v + \frac{1}{v} = b + \frac{1}{b}.$$

Решая каждое из этих уравнений, найдем:

$$u_1 = a, \quad u_2 = \frac{1}{a}, \quad (2)$$

$$v_1 = b, \quad v_2 = \frac{1}{b}. \quad (3)$$

Нам предстоит теперь решить четыре системы вида (1) в правых частях которых стоят всевозможные комбинации

значений  $u$  и  $v$ , определяемые формулами (2) и (3). Запишем систему (1) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{y} + \frac{1}{x} &= u, \\ \frac{1}{y} - \frac{1}{x} &= v. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Отсюда получаем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{x} &= \frac{1}{2}(u - v), \\ \frac{1}{y} &= \frac{1}{2}(u + v). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из формул (5) следует, что для разрешимости системы (5), а тем самым и исходной системы числа  $a$  и  $b$  должны быть подчинены дополнительным условиям, кроме условия  $ab \neq 0$ , которое вытекает из вида уравнений исходной системы. Пусть

$$|a| \neq |b|. \quad (6)$$

Тогда, подставляя в правые части формул (5) значения  $u = a$ ,  $v = b$ , а затем  $u = \frac{1}{a}$ ,  $v = \frac{1}{b}$ , найдем два решения:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{2}{a-b}, & y_1 &= \frac{2}{a+b}, \\ x_2 &= \frac{2ab}{b-a}, & y_2 &= \frac{2ab}{a+b}. \end{aligned}$$

Пусть, далее,

$$|ab| \neq 1. \quad (7)$$

Подставляя тогда в правые части формул (5) значения  $u = a$ ,  $v = \frac{1}{b}$ , а затем  $u = \frac{1}{a}$ ,  $v = b$ , найдем еще два решения:

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{2b}{ab-1}, & y_3 &= \frac{2b}{ab+1}, \\ x_4 &= \frac{2a}{1-ab}, & y_4 &= \frac{2a}{1+ab}. \end{aligned}$$

Таким образом, если выполнены оба условия (6) и (7), то система имеет четыре решения; если одно из условий нарушено, — то только два решения; если, наконец, оба условия нарушены (это может быть лишь в случае  $|a| = |b| = 1$ ), то система вообще не имеет решений.

38. Легко видеть, что числа

$$x_1 = 4,5 \text{ и } x_2 = 5,5$$

удовлетворяют данному уравнению. Поэтому многочлен  $(x - 4,5)^4 + (x - 5,5)^4 - 1$  делится на произведение  $(x - 4,5)(x - 5,5)$  без остатка. Чтобы выполнить деление и свести вопрос к решению квадратного уравнения, удобно представить указанный многочлен в виде

$$[(x - 4,5)^4 - 1] + (x - 5,5)^4.$$

Разлагая выражение, стоящее в квадратных скобках, по формуле

$$a^4 - 1 = (a - 1)(a + 1)(a^2 + 1) = (a - 1)(a^2 + a^2 + a + 1),$$

приходим к уравнению

$$(x - 5,5) \{ (x - 4,5)^3 + (x - 4,5)^2 + (x - 4,5) + 1 \} + (x - 5,5)^4 = 0.$$

Вынося здесь общий множитель за скобку, будем иметь:

$$(x - 5,5) \{ (x - 4,5)^3 + (x - 4,5)^2 + (x - 4,5) + 1 + [(x - 4,5) - 1]^2 \} = (x - 5,5)(x - 4,5) \{ 2(x - 4,5)^2 - 2(x - 4,5) + 4 \} = 0.$$

Отсюда

$$x_1 = 5,5, \quad x_2 = 4,5, \quad x_{3,4} = \frac{10 \pm i\sqrt{7}}{2}.$$

39. Из второго уравнения системы находим, что  $y - 5 = |x - 1| \geq 0$  и, следовательно,  $y \geq 5$ . Поэтому первое уравнение может быть записано в виде

$$y - 5 = 1 - |x - 1|.$$

Сложив это уравнение со вторым, получим:

$$2(y - 5) = 1.$$

Отсюда  $y = \frac{11}{2}$ .

Из второго уравнения теперь находим  $|x - 1| = \frac{1}{2}$  следовательно,  $x - 1 = \pm \frac{1}{2}$ . Поэтому  $x_1 = \frac{1}{2}$ ,  $x_2 = \frac{3}{2}$ . Система имеет два решения:

$$x_1 = \frac{1}{2}, \quad y_1 = \frac{11}{2}; \quad x_2 = \frac{3}{2}, \quad y_2 = \frac{11}{2}.$$

40. Группировкой членов приведем левую часть к виду

$$(2x + y - 1)^2 + (x + 2y + 1)^2 = 0.$$

Следовательно,

$$2x + y - 1 = 0, \quad x + 2y + 1 = 0,$$

откуда

$$x = 1, \quad y = -1.$$

Укажем еще один способ решения. Расположив в левой части слагаемые по убывающим степеням  $x$ , получим квадратное уравнение относительно  $x$ :

$$5x^2 + (8y - 2)x + (5y^2 + 2y + 2) = 0. \quad (1)$$

Это уравнение при вещественных значениях  $y$  имеет вещественные корни тогда и только тогда, когда его дискриминант неотрицателен, т. е.

$$(8y - 2)^2 - 4 \cdot 5(5y^2 + 2y + 2) \geq 0. \quad (2)$$

Это неравенство после раскрытия скобок принимает вид

$$-36(y + 1)^2 \geq 0.$$

Последнее возможно лишь при  $y = -1$ , а тогда из уравнения (1) следует, что  $x = 1$ .

41. Преобразуем уравнение к виду

$$[x + 2 \cos(xy)]^2 + 4[1 - \cos^2(xy)] = 0.$$

Оба слагаемых неотрицательны, поэтому

$$x + 2 \cos(xy) = 0, \quad \cos^2(xy) = 1.$$

Отсюда  $\cos(xy) = \pm 1$ . В первом случае имеем систему

$$\cos(xy) = 1, \quad x + 2 \cos(xy) = 0.$$

Отсюда  $x = -2$  и  $y = k\pi$ , где  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Во втором случае

$$\cos(xy) = -1, \quad x + 2 \cos(xy) = 0.$$

Отсюда  $x = 2$  и  $y = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$ , где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Таким образом, уравнение имеет две бесконечные серии различных вещественных решений, причем значение  $x$  в каждой серии одно и то же.

42. Исключив  $z$  из данной системы, будем иметь:

$$2xy - (2 - x - y)^2 = 4$$

или

$$x^2 - 4x + 4 + y^2 - 4y + 4 = 0,$$

т. е.

$$(x - 2)^2 + (y - 2)^2 = 0.$$

Для вещественных чисел  $x$  и  $y$  это возможно только при  $x = 2$  и  $y = 2$ .

Из первого уравнения системы находим  $z = -2$ . Система имеет только одно вещественное решение:

$$x = 2, \quad y = 2, \quad z = -2.$$

43. Первое решение. Заметим, что по заданным  $x$  и  $y$  значение  $z$  определяется из первого уравнения единственным образом:

$$z = x^2 + y^2. \quad (1)$$

Подставив это значение  $z$  во второе уравнение, получим:

$$x^2 + x + y^2 + y = a.$$

Это уравнение эквивалентно уравнению

$$\left(x + \frac{1}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{1}{2}\right)^2 = a + \frac{1}{2}. \quad (2)$$

Если теперь  $a + \frac{1}{2} < 0$ , то уравнение (2) не имеет вещественных решений, так как при вещественных  $x$  и  $y$  в левой части стоит неотрицательное число. Если же  $a + \frac{1}{2} > 0$ , то уравнение (2), а с ним и вся система, имеет, очевидно, больше одного решения.

Следовательно, единственное вещественное решение возможно только тогда, когда  $a + \frac{1}{2} = 0$ . В этом случае уравнение (2) принимает вид

$$\left(x + \frac{1}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{1}{2}\right)^2 = 0$$

и имеет единственное вещественное решение:  $x = -\frac{1}{2}$ ,  $y = -\frac{1}{2}$ . Отсюда, найдя еще  $z$  из уравнения (1), заключаем, что данная система имеет единственное вещественное решение только при  $a = -\frac{1}{2}$ , а именно:

$$x = -\frac{1}{2}, \quad y = -\frac{1}{2}, \quad z = \frac{1}{2}.$$

Второе решение. Легко видеть, что если данная система имеет некоторое решение  $x = x_0, y = y_0, z = z_0$ , то она также имеет еще и такое решение:  $x = y_0, y = x_0, z = z_0$ . Поэтому для единственности необходимо, чтобы  $x = y$ . Данная система при этом условии примет вид

$$2x^2 = z, \quad 2x + z = a.$$

Исключая  $z$ , получим квадратное уравнение для  $x$ :

$$2x^2 + 2x - a = 0.$$

Для того чтобы и это уравнение имело единственный вещественный корень, необходимо и достаточно, чтобы дискриминант уравнения был равен нулю:

$$D = 2^2 - 4 \cdot 2(-a) = 4(1 + 2a) = 0.$$

Отсюда  $a = -\frac{1}{2}$  и соответствующее значение  $x = -\frac{1}{2}$ .

Мы приходим в итоге к прежнему результату.

44. Пусть  $x_0, y_0$  — некоторое решение системы. В силу первого уравнения

$$[(x_0^2 + y_0^2) - a]^2 = x_0^2 y_0^2 + \frac{1}{x_0^2 y_0^2} + 2, \quad (1)$$

а согласно второму уравнению

$$(x_0^2 + y_0^2)^2 = x_0^2 y_0^2 + \frac{1}{x_0^2 y_0^2} + 2 + b^2. \quad (2)$$

Раскрывая в левой части равенства (1) квадратные скобки и вычитая из него равенство (2), получим:

$$-2a(x_0^2 + y_0^2) + a^2 = -b.$$

Отсюда

$$x_0^2 + y_0^2 = \frac{a^2 + b^2}{2a}.$$

Так как  $a$  и  $b$  вещественны, то утверждение доказано.

45. Легко видеть, что система всегда имеет решение

$$x = 1, \quad y = 1, \quad z = 1. \quad (1)$$

Очевидно также, что в случае

$$a = b = c \quad (2)$$

все три уравнения принимают вид  $x + y + z = 3$ , и система обладает бесконечным числом решений.

Покажем, что если условие (2) не выполнено, т. е. если среди чисел  $a$ ,  $b$  и  $c$  есть неравные, то решение (1) единственно.

Сложив сначала все три уравнения данной системы, получаем:

$$(a + b + c)(x + y + z) = 3(a + b + c).$$

Сократив на  $a + b + c$ , найдем:

$$x + y + z = 3. \quad (3)$$

Отсюда  $z = 3 - x - y$ . Подставляя это выражение для  $z$  в первые два уравнения системы, будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} (a - c)x + (b - c)y &= a + b - 2c, \\ (b - a)x + (c - a)y &= -2a + b + c. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Умножая первое из этих уравнений на  $c - a$ , второе на  $c - b$  и складывая, найдем:

$$[-(a - c)^2 + (b - a)(c - b)]x = (a + b - 2c)(c - a) + (c - b)(-2a + b + c). \quad (5)$$

Так как уравнение (5) удовлетворяется при  $x = 1$ , то коэффициент при  $x$  должен тождественно по  $a$ ,  $b$  и  $c$  совпадать с правой частью уравнения. Раскрыв скобки в обоих выражениях, убеждаемся в том, что они действительно совпадают и равны

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}[2a^2 - 4ac + 2c^2 - 2bc + 2b^2 + 2ac - 2ab] &= \\ &= -\frac{1}{2}[(a - c)^2 + (b - c)^2 + (c - b)^2]. \end{aligned}$$

Таким образом, если среди чисел  $a$ ,  $b$  и  $c$  есть неравные, то уравнение (5) удовлетворяется лишь при  $x = 1$ . Из уравнений (4) после этого легко следует, что  $y = 1$ , а из соотношения (3) — что  $z = 1$ . Таким образом, при условии

$$(a - c)^2 + (b - c)^2 + (c - b)^2 \neq 0$$

система имеет единственное решение:

$$x = 1, \quad y = 1, \quad z = 1.$$

46. Легко видеть, что если среди трех чисел  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  два числа равны нулю, то система имеет бесчисленное множество решений. В самом деле, пусть, например,  $a_2 = 0$  и  $a_3 = 0$ . Положив тогда  $x = 0$  и выбрав  $y$  и  $z$  такими, чтобы

удовлетворялось уравнение  $y + z = 1$ , мы удовлетворим всем трем уравнениям системы.

Поэтому, отыскивая условие единственности, мы можем сразу предположить, что какие-нибудь два числа отличны от нуля. Пусть, например,

$$a_2 \neq 0 \text{ и } a_3 \neq 0. \quad (1)$$

Вычитая из второго уравнения первое и из третьего уравнения второе, находим  $a_1 x = a_2 y = a_3 z$ . Отсюда, в силу (1), следует:

$$y = \frac{a_1}{a_2} x, \quad z = \frac{a_1}{a_3} x. \quad (2)$$

Подставляя эти выражения в первое уравнение, получим:

$$x \left( 1 + a_1 + \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_1}{a_3} \right) = 1. \quad (3)$$

Это уравнение разрешимо лишь при условии, что выражение, стоящее в скобке, отлично от нуля.

Учитывая (1), мы приходим к условию

$$D = a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 \neq 0. \quad (4)$$

При выполнении этого условия из (3) и (2) находим:

$$x = \frac{a_2 a_3}{D}, \quad y = \frac{a_1 a_3}{D}, \quad z = \frac{a_1 a_2}{D}. \quad (5)$$

Эти три числа образуют решение системы и притом, как это следует из способа их получения, единственное.

Таким образом, условие (4) является необходимым условием того, что система имеет и притом единственное решение.

Легко проверить, что если бы вначале мы предположили отличной от нуля другую пару чисел  $a_1, a_2$  или  $a_1, a_3$ , то аналогичное рассуждение привело бы нас снова к условию (4) и к тому же решению (5). Так как, далее, из условия (4) следует, что хотя бы одна из трех пар чисел отлична от нуля, то указанное условие является не только необходимым, но и достаточным.

47. Сложив все уравнения системы, найдем:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = \frac{2(a_1 + a_2 + \dots + a_n)}{n(n+1)}. \quad (1)$$

Правую часть этого уравнения обозначим через  $A$ . Вычитая теперь из первого уравнения второе, получаем:

$$(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - n x_1 = a_1 - a_2.$$

В силу (1) имеем:

$$x_1 = \frac{A - (a_1 - a_2)}{n}.$$

Вообще для получения  $x_k$  ( $1 \leq k \leq n-1$ ) вычтем из  $k$ -го уравнения  $(k+1)$ -е уравнение. Аналогично предыдущему найдем:

$$x_k = \frac{A - (a_k - a_{k+1})}{n}.$$

Наконец, вычитая из последнего уравнения первое, получим:

$$x_n = \frac{A - (a_n - a_1)}{n}.$$

Найденные значения можно объединить в единой формуле:

$$x_i = \frac{A - (a_i - a_{i+1})}{n} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (2)$$

(здесь под  $a_{n+1}$  следует понимать  $a_1$ ). Непосредственной подстановкой убеждаемся, что набор чисел (2) действительно удовлетворяет всем уравнениям системы. Таким образом, данная система имеет единственное решение.

48. Сложив все равенства, после деления на 3 получим:

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{100} = 0. \quad (1)$$

Левая часть этого нового равенства имеет сто слагаемых, и ее можно представить в форме

$$(x_1 + x_2 + x_3) + (x_4 + x_5 + x_6) + \dots + (x_{97} + x_{98} + x_{99}) + x_{100} = 0.$$

Но каждая из сумм, стоящая в скобках, равна 0 в силу исходных равенств. Поэтому  $x_{100} = 0$ . Аналогично, переставляя  $x_{100}$  на первое место и представляя равенство (1) в форме

$$(x_{100} + x_1 + x_2) + (x_3 + x_4 + x_5) + \dots + (x_{96} + x_{97} + x_{98}) + x_{99} = 0,$$

найдем, что  $x_{99} = 0$ . Переводя затем  $x_{99}$  на первое место и снова группируя слагаемые по три, мы убедимся в том, что  $x_{98} = 0$  и т. д. Таким образом,

$$x_1 = x_2 = \dots = x_{100} = 0,$$

что и требовалось доказать.

49. Замечая, что разность двух уравнений предлагаемой системы разлагается на множители, образуем разности первого уравнения и второго, первого уравнения и третьего.

Полученные таким образом два уравнения вместе с третьим уравнением исходной системы составят следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} (u - w)(u + w - 1) &= 0, \\ (v - w)(v + w - 1) &= 0, \\ w^2 + u^2 + v &= 2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Очевидно, что всякое решение исходной системы удовлетворяет системе (1). Так как, и обратно, все уравнения исходной системы могут быть получены путем сложения и вычитания уравнений системы (1), то любое решение системы (1) является решением исходной и, следовательно, эти системы равносильны.

Система (1) распадается на следующие четыре системы:

$$\begin{aligned} \text{I.} & \begin{cases} u - w = 0, \\ v - w = 0, \\ w^2 + u^2 + v = 2. \end{cases} & \text{III.} & \begin{cases} u - w = 0, \\ v + w - 1 = 0, \\ w^2 + u^2 + v = 2. \end{cases} \\ \text{II.} & \begin{cases} u + w - 1 = 0, \\ v - w = 0, \\ w^2 + u^2 + v = 2. \end{cases} & \text{IV.} & \begin{cases} u + w - 1 = 0, \\ v + w - 1 = 0, \\ w^2 + u^2 + v = 2. \end{cases} \end{aligned}$$

В силу сказанного очевидно, что все решения этих четырех систем и только они являются решениями исходной системы. Каждая из четырех данных систем без труда сводится к квадратному уравнению и имеет два решения. Приведем соответствующие решения  $(u, v, w)$ , опуская выкладки.

Решения системы I:

$$\left( \frac{-1 + \sqrt{17}}{4}, \frac{-1 + \sqrt{17}}{4}, \frac{-1 + \sqrt{17}}{4} \right),$$

$$\left( \frac{-1 - \sqrt{17}}{4}, \frac{-1 - \sqrt{17}}{4}, \frac{-1 - \sqrt{17}}{4} \right).$$

Решения системы II:

$$(0, 1, 1), \quad \left( \frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right).$$

Решения системы III:

$$(1, 0, 1), \quad \left( -\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, -\frac{1}{2} \right).$$

Решения системы IV:

$$(1, 1, 0), \quad \left( -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \right).$$

Таким образом, исходная система имеет всего восемь решений.

50. Перемножив левые и правые части уравнений, получим:

$$(x_1 x_2 \dots x_n)^{n-2} = a_1 a_2 \dots a_n,$$

откуда

$$x_1 x_2 \dots x_n = \sqrt[n-2]{a_1 a_2 \dots a_n}; \quad (1)$$

$k$ -е уравнение системы перепишем в виде

$$a_k x_k^2 = x_1 x_2 \dots x_n.$$

Отсюда, в силу (1), имеем:

$$x_k = \sqrt{\frac{\sqrt[n-2]{a_1 a_2 \dots a_n}}{a_k}} \quad (k=1, 2, \dots, n).$$

Проверкой убеждаемся, что этот набор чисел удовлетворяет исходной системе. Таким образом, задача имеет единственное решение.

51. Заметим сначала, что при  $a=1$  система принимает вид

$$(x+y+z)^2 = k^2,$$

$$(x+y+z)^2 = l^2,$$

$$(x+y+z)^2 = m^2.$$

Эта система имеет решение лишь при дополнительном условии

$$k^2 = l^2 = m^2. \quad (1)$$

При этом условии, очевидно, получается бесконечно много решений. В дальнейшем мы можем, таким образом, предположить, что

$$a \neq 1. \quad (2)$$

Сложив все уравнения системы и положив для краткости

$$x+y+z=t,$$

получим:

$$t^2(a+2) = k^2 + l^2 + m^2.$$

Так как по условию задачи правая часть положительна, то при  $a=-2$  система вообще не имеет решений. Считая

$$a \neq -2, \quad (3)$$

находим:

$$t = \pm \sqrt{\frac{k^2 + l^2 + m^2}{a+2}}. \quad (4)$$

Преобразовав далее уравнения системы к виду

$$\begin{aligned} t^2 + t(a-1)x &= k^2, \\ t^2 + t(a-1)y &= l^2, \\ t^2 + t(a-1)z &= m^2, \end{aligned}$$

мы определим отсюда в соответствии с (4) два набора значений  $x$  и  $y$ :

$$\begin{aligned} x &= \pm \sqrt{\frac{a+2}{k^2+l^2+m^2} \frac{k^2(a+1)-l^2-m^2}{(a+2)(a-1)}}, \\ y &= \pm \sqrt{\frac{a+2}{k^2+l^2+m^2} \frac{l^2(a+1)-k^2-m^2}{(a+2)(a-1)}}, \\ z &= \pm \sqrt{\frac{a+2}{k^2+l^2+m^2} \frac{m^2(a+1)-k^2-l^2}{(a+2)(a-1)}}. \end{aligned}$$

Проверкой устанавливаем, что обе тройки чисел удовлетворяют исходной системе. Таким образом, в общем случае ( $a \neq 1$ ,  $a \neq -2$ ) система имеет два различных решения.

52. Возводя первое уравнение в квадрат и вычитая из получившегося соотношения второе уравнение, найдем:

$$xy + yz + zx = 11. \quad (1)$$

В силу третьего уравнения отсюда следует:

$$(xy)^2 + 3xy - 10 = 0.$$

Решая это уравнение, получаем:

$$(xy)_1 = +2, \quad (xy)_2 = -5. \quad (2)$$

Рассмотрим теперь две возможности.

1) Пусть

$$xy = 2. \quad (3)$$

Исключив  $x + y$  из первого и третьего уравнений исходной системы, получим следующее уравнение относительно  $z$ :

$$z^2 - 6z + 9 = 0.$$

Отсюда следует, что  $z^{(1)} = 3$ .

Первое уравнение исходной системы тогда дает

$$x + y = 3.$$

Решая это уравнение совместно с уравнением (3), получаем:

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= 1, & y_1^{(1)} &= 2, \\ x_2^{(1)} &= 2, & y_2^{(1)} &= 1. \end{aligned}$$

2) Пусть теперь в соответствии с (2)

$$xy = -5. \quad (4)$$

Из первого и третьего уравнений тогда получим:

$$z^2 - 6z + 16 = 0.$$

Это уравнение имеет не вещественные корни, и, следовательно, дальнейшие исследования, связанные с условием (4), можно не проводить.

Таким образом, возможными вещественными решениями являются лишь следующие тройки чисел  $(x, y, z)$ :

$$(1, 2, 3) \text{ и } (2, 1, 3).$$

Проверкой убеждаемся, что обе они удовлетворяют исходной системе. Таким образом, все решения системы найдены.

53. Легко заметить, что левые части уравнений могут быть разложены на множители, в результате чего система принимает вид

$$\left. \begin{aligned} (x+y)(x+z) &= a, \\ (x+y)(y+z) &= b, \\ (x+z)(y+z) &= c. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Положим для краткости

$$x+y=u, \quad x+z=v, \quad y+z=w.$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} uv &= a, \\ uw &= b, \\ vw &= c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Перемножив все уравнения, найдем:

$$(uvw)^2 = abc,$$

откуда

$$uvw = \pm \sqrt{abc}. \quad (3)$$

Теперь уже нахождение всех решений системы (2) не представляет труда. Выбирая в формуле (3) сначала знак плюс, а затем минус, устанавливаем, что система (2) имеет два решения:

$$u_1 = \frac{\sqrt{abc}}{c}, \quad v_1 = \frac{\sqrt{abc}}{b}, \quad w_1 = \frac{\sqrt{abc}}{a} \quad (4)$$

и

$$u_2 = \frac{-\sqrt{abc}}{c}, \quad v_2 = \frac{-\sqrt{abc}}{b}, \quad w_2 = \frac{-\sqrt{abc}}{a}. \quad (5)$$

Остается решить две системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} x + y &= u, \\ x + z &= v, \\ y + z &= w, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

получающиеся в результате подстановки в правые части уравнений значений (4) и (5).

Сложив все уравнения (6), получим  $x + y + z = \frac{u + v + w}{2}$ .

Отсюда, в силу (6), легко следует:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{u + v - w}{2}, & y &= \frac{u - v + w}{2}, \\ z &= \frac{-u + v + w}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, исходная система имеет всего два решения, которые определяются формулами (7) при подстановке в них значений (4) и (5).

54. Сложив все уравнения, найдем:

$$xy + xz + yz = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{2}. \quad (1)$$

В силу уравнений системы теперь легко получаем:

$$\left. \begin{aligned} xy &= \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2} = \alpha, \\ xz &= \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2} = \beta, \\ yz &= \frac{-a^2 + b^2 + c^2}{2} = \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Мы ввели здесь для удобства сокращенные обозначения для получившихся дробей. Заметим, что если исходная система имеет решение, то в наших условиях все три числа  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  отличны от нуля. В самом деле, пусть, например,  $\alpha = 0$ . Тогда  $\beta\gamma = xuz^2 = 0$ . Сложив первое уравнение системы (2) со вторым и третьим, получим:

$$a^2 = \beta, \quad b^2 = \gamma,$$

откуда  $a^2 b^2 = 0$ , что противоречит условию задачи. Таким образом,  $\alpha\beta\gamma \neq 0$ . Система (2) поэтому в точности совпадает с системой (2) предыдущей задачи. Следовательно, эта

система имеет два решения:

$$x_1 = \frac{\sqrt{a\beta\gamma}}{\gamma}, \quad y_1 = \frac{\sqrt{a\beta\gamma}}{\beta}, \quad z_1 = \frac{\sqrt{a\beta\gamma}}{a}; \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{-\sqrt{a\beta\gamma}}{\gamma}, \quad y_2 = \frac{-\sqrt{a\beta\gamma}}{\beta}, \quad z_2 = \frac{-\sqrt{a\beta\gamma}}{a}. \quad (4)$$

Легко проверить, что эти же два набора чисел удовлетворяют и исходной системе. Таким образом, все решения системы исчерпываются решениями (3) и (4).

55. Положим

$$x + y = u, \quad x + z = v, \quad y + z = w.$$

Тогда система запишется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u + v &= auv, \\ u + w &= buw, \\ v + w &= cvw. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Очевидно, система (1) имеет следующее решение:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0. \quad (2)$$

Заметим еще, что если  $u = 0$ , то из первого уравнения (1) следует  $v = 0$ , а тогда из третьего уравнения  $w = 0$ . Ограничимся поэтому рассмотрением тех случаев, когда

$$uvw \neq 0.$$

Из системы (1) находим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} + \frac{1}{u} &= a, \\ \frac{1}{w} + \frac{1}{u} &= b, \\ \frac{1}{w} + \frac{1}{v} &= c. \end{aligned}$$

Эта система имеет тот же вид, что система (6) в решении задачи 53. Применяя тот же прием, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{u} &= \frac{a+b-c}{2}, \\ \frac{1}{v} &= \frac{a-b+c}{2}, \\ \frac{1}{w} &= \frac{-a+b+c}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Отсюда следует, что система (1) может иметь решение, от-

личное от решения (2), лишь при дополнительном условии

$$\left. \begin{aligned} a + b - c = \alpha \neq 0, & \quad a - b + c = \beta \neq 0, \\ -a + b + c = \gamma \neq 0. & \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если условие (4) выполнено, то из формул (3) выводим:

$$u = \frac{2}{\alpha}, \quad v = \frac{2}{\beta}, \quad w = \frac{2}{\gamma}. \quad (5)$$

Для завершения остается решить две системы:

$$\left. \begin{aligned} x + y = 0, \\ x + z = 0, \\ y + z = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6) \quad \left. \begin{aligned} x + y = \frac{2}{\alpha}, \\ x + z = \frac{2}{\beta}, \\ y + z = \frac{2}{\gamma}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При этом система (7) возникает лишь при выполнении условия (4). Обе системы имеют по одному решению; система (6) имеет решение

$$x = 0, \quad y = 0, \quad z = 0,$$

а система (7) имеет решение

$$\left. \begin{aligned} x = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\gamma}, \quad y = \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma}, \\ z = -\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, исходная система имеет лишь нулевое решение:  $x = y = z = 0$ , а при выполнении дополнительного условия (4) еще одно, определяемое формулами (8) и (4).

56. По виду второго уравнения системы заключаем, что  $x \neq 0$ ,  $y \neq 0$  и  $z \neq 0$ . Приведем левую часть второго уравнения к общему знаменателю, получаем в силу третьего уравнения

$$xyz = 27. \quad (1)$$

Умножив далее третье уравнение на  $z$ , будем иметь, учитывая (1):

$$27 + (x + y)z^2 = 27z.$$

Подставив сюда  $x + y = 9 - z$  из первого уравнения системы, получим:

$$z^3 - 9z^2 + 27z - 27 = 0,$$

или  $(z - 3)^3 = 0$ . Поэтому  $z = 3$ . Подставив это значение в первое уравнение и в (1), найдем, что  $x = 3$  и  $y = 3$ .

Последнее, впрочем, можно было предвидеть, так как все неизвестные входят в уравнения системы симметрично. Итак, если система имеет решение, то им может оказаться лишь тройка чисел  $x=3$ ,  $y=3$ ,  $z=3$ . Проверкой убеждаемся, что эти числа действительно образуют решение. Таким образом, система имеет и притом единственное решение:

$$x=3, \quad y=3, \quad z=3.$$

57. Подставив  $x+y$  из первого уравнения во второе, получим:

$$xy + z(a-z) = a^2.$$

Внеся отсюда  $xy$  в третье уравнение, будем иметь:

$$z^3 - az^2 + a^2z - a^3 = 0.$$

Левая часть легко разлагается на множители:

$$(z-a)(z-ai)(z+ai) = 0.$$

Отсюда

$$z_1 = a, \quad z_2 = ai, \quad z_3 = -ai.$$

Подставив  $z=a$  в первое и второе уравнения, придем к системе

$$x+y=0, \quad xy=a^2.$$

Отсюда  $x = \pm ia$ ,  $y = \mp ia$ , причем легко проверить, что обе тройки чисел  $(x, y, z)$ :

$$(ia, -ia, a) \quad \text{и} \quad (-ia, ia, a)$$

удовлетворяют исходной системе. Аналогично находим еще две пары решений, соответствующих значениям  $z_2$  и  $z_3$ :

$$(a, -ia, ia), \quad (-ia, a, ia), \quad (ia, a, -ia), \quad (a, ia, -ia).$$

Таким образом, системе удовлетворяют шесть указанных нами решений и ими исчерпываются все решения системы.

К этому же результату можно прийти и более коротким путем, если обратить внимание на связь решений рассматриваемой системы с корнями кубического уравнения

$$t^3 - at^2 + a^2t - a^3 = 0. \quad (1)$$

В самом деле, согласно формулам Виета (см. (2), стр. 10), три корня уравнения (1)  $t_1 = a$ ,  $t_2 = ia$ ,  $t_3 = -ia$ , занумерованные в любом порядке, образуют решение рассматриваемой системы. Таким образом, мы уже имеем шесть (3!) решений. Покажем, что этими шестью решениями исчерпы-

ваются все решения системы. Действительно, пусть  $(x_1, y_1, z_1)$  — некоторое решение системы. Рассмотрим уравнение третьей степени

$$(t - x_1)(t - y_1)(t - z_1) = 0, \quad (2)$$

корнями которого являются числа  $x_1, y_1$  и  $z_1$ . Раскрыв скобки в уравнении (2) и воспользовавшись равенствами

$$\begin{aligned} x_1 + y_1 + z_1 &= a, \\ x_1 y_1 + y_1 z_1 + x_1 z_1 &= a^2, \\ x_1 y_1 z_1 &= a^3, \end{aligned}$$

мы обнаружим, что уравнения (2) и (1) совпадают. Следовательно,  $x_1, y_1$  и  $z_1$  являются корнями уравнения (1), что и требовалось доказать. Этим же замечанием можно было бы воспользоваться и при решении предыдущей задачи.

58. Подставив  $x$  из первого уравнения во второе, получим:

$$3y^2 + z^2 = 0. \quad (1)$$

В силу третьего уравнения отсюда следует:

$$3y^2 - xy = 0. \quad (2)$$

Поэтому либо  $y = 0$ , либо  $x = 3y$ .

В первом случае ( $y = 0$ ), согласно (1), имеем  $z = 0$ , а в силу первого уравнения системы и  $x = 0$ .

Во втором случае, подставив  $x$  из равенства  $x = 3y$  во второе уравнение системы, получим:

$$2y^2 + 4yz = 0. \quad (3)$$

Если теперь  $y = 0$ , то мы приходим к уже рассмотренному первому случаю. Если же  $y = -2z$ , то из условия (1) заключаем, что  $z = 0$ , а, следовательно,  $y = 0$  и  $x = 0$ . Утверждение доказано.

59. Из тождества

$$(x + y + z)^2 = x^2 + y^2 + z^2 + 2(xy + xz + yz), \quad (1)$$

в силу первого и второго уравнений системы, получаем:

$$xy + xz + yz = 0. \quad (2)$$

Рассмотрим далее тождество, получаемое возведением трехчлена в куб:

$$\begin{aligned} (x + y + z)^3 &= x^3 + y^3 + z^3 + 3x^2y + 3x^2z + 3xy^2 + \\ &+ 6xyz + 3xz^2 + 3y^2z + 3yz^2. \quad (3) \end{aligned}$$

Правую часть его можно представить в виде

$$x^2 + y^2 + z^2 + 3x(xy + xz + yz) + 3y(yx + yz + xz) + 3z^2(x + y).$$

Следовательно, из тождества (3), в силу уравнений системы и равенства (2), вытекает, что

$$3z^2(x + y) = 0. \quad (4)$$

Рассмотрим в связи с этим два случая:

1) Если  $z = 0$ , то согласно (2)  $xy = 0$ . Учитывая далее первое уравнение системы, мы приходим к двум наборам значений:

$$x_1 = a, \quad y_1 = 0, \quad z_1 = 0; \quad (5)$$

$$x_2 = 0, \quad y_2 = a, \quad z_2 = 0. \quad (6)$$

Легко видеть при этом, что формулы (5) и (6) определяют два решения исходной системы.

2) Если  $x + y = 0$ , то из условия (2) снова получаем  $xy = 0$  и, следовательно,  $x = 0$ ,  $y = 0$ . Из первого уравнения системы тогда следует, что  $z = a$ , и мы приходим к еще одному решению исходной системы:

$$x_3 = 0, \quad y_3 = 0, \quad z_3 = a. \quad (7)$$

Таким образом, при условии  $a \neq 0$  система имеет три различных решения, в случае же  $a = 0$  — лишь одно нулевое решение.

60. Раскрыв скобки, запишем второе уравнение в виде

$$x^2 + y^2 + z^2 + 3xy + 3xz + 3yz = 1,$$

или

$$(x + y + z)^2 + xy + xz + yz = 1.$$

Отсюда, используя первое уравнение системы, получаем:

$$xy + xz + yz = -3. \quad (1)$$

Третье уравнение системы представим в виде

$$x(xy + xz) + y(yz + xy) + z(xz + yz) = -6.$$

Тогда, принимая во внимание (1), будем иметь:

$$x(3 + yz) + y(3 + xz) + z(3 + xy) = 6,$$

или

$$x + y + z + xyz = 2,$$

т. е.

$$xyz = 0.$$

Мы приходим к следующей системе:

$$\left. \begin{aligned} x + y + z &= 2, \\ xy + xz + yz &= -3, \\ xyz &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из последнего уравнения этой системы следует, что, по крайней мере, одно неизвестное равно нулю. Пусть  $x=0$ ; тогда

$$y + z = 2, \quad yz = -3,$$

откуда либо  $y=3, z=-1$ , либо  $y=-1, z=3$ . Аналогично рассматриваются случаи  $y=0$  и  $z=0$ . Таким образом, получаем шесть решений  $(x, y, z)$  системы (2):

$$(0, 3, -1), \quad (-1, 0, 3),$$

$$(0, -1, 3), \quad (3, -1, 0),$$

$$(3, 0, -1), \quad (-1, 3, 0).$$

Легко проверить, что все эти наборы чисел удовлетворяют и исходной системе. Таким образом, задача имеет шесть решений.

**61.** Раскрыв скобки во всех трех уравнениях, заметим, что если из суммы первых двух уравнений вычесть третье, то получится уравнение

$$(x - y + z)^2 = a - b + c. \quad (1)$$

Поступая аналогично, найдем:

$$(x + y - z)^2 = a + b - c, \quad (2)$$

$$(y + z - x)^2 = b + c - a. \quad (3)$$

Легко убедиться в том, что и, наоборот, исходная система является следствием системы уравнений (1), (2) и (3). В самом деле, сложив, например, уравнения (2) и (3), мы получим второе уравнение исходной системы и т. д. Таким образом, исходная и полученная системы равносильны. Поэтому достаточно найти все решения системы уравнений (1), (2), (3). Положим для сокращения

$$\sqrt{a - b + c} = b_1, \quad \sqrt{a + b - c} = c_1, \quad \sqrt{b + c - a} = a_1.$$

Тогда система уравнений (1), (2), (3) равносильна следующим восьми системам первой степени:

$$\left. \begin{aligned} x - y + z &= \pm b_1, \\ x + y - z &= \pm c_1, \\ -x + y + z &= \pm a_1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Выбирая в правых частях всюду знак плюс, легко найдем следующее единственное решение соответствующей системы:

$$x = \frac{b_1 + c_1}{2}, \quad y = \frac{a_1 + c_1}{2}, \quad z = \frac{b_1 + a_1}{2}.$$

Комбинируя всеми способами знаки в правых частях, мы найдем еще семь решений:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{-b_1 + c_1}{2}, \frac{a_1 + c_1}{2}, \frac{-b_1 + a_1}{2} \right), \quad \left( \frac{b_1 - c_1}{2}, \frac{a_1 - c_1}{2}, \frac{b_1 + a_1}{2} \right), \\ & \left( \frac{b_1 + c_1}{2}, \frac{-a_1 + c_1}{2}, \frac{b_1 - a_1}{2} \right), \quad \left( \frac{-b_1 - c_1}{2}, \frac{a_1 - c_1}{2}, \frac{-b_1 + a_1}{2} \right), \\ & \left( \frac{-b_1 + c_1}{2}, \frac{-a_1 + c_1}{2}, \frac{-b_1 - a_1}{2} \right), \\ & \left( \frac{b_1 - c_1}{2}, \frac{-a_1 - c_1}{2}, \frac{b_1 - a_1}{2} \right), \\ & \left( \frac{-b_1 - c_1}{2}, \frac{-a_1 - c_1}{2}, \frac{-b_1 - a_1}{2} \right). \end{aligned}$$

Указанными восемью решениями, очевидно, исчерпываются все решения системы.

62. Перепишем третье уравнение системы в виде

$$z^2 + xy - z(x + y) = 2. \quad (1)$$

Подставляя сюда  $z^2$  из второго уравнения, а  $z(x + y)$  из первого, получаем:

$$x^2 + y^2 + xy - 47 - xy = 2, \text{ или } (x + y)^2 = 49.$$

Отсюда

$$x + y = \pm 7. \quad (2)$$

Сложим далее второе уравнение с первым, обе части которого предварительно умножим на 2. В результате получим:

$$(x + y)^2 + 2z(x + y) = 94 + z^2. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь два случая.

1) Пусть сначала в формуле (2) выбран знак плюс. Подставляя тогда  $x + y$  из уравнения  $x + y = 7$  в (3), получаем  $z^2 - 14z + 45 = 0$ . Обозначая корни этого уравнения  $z_1^{(1)}$  и  $z_2^{(1)}$ , найдем:  $z_1^{(1)} = 9$ ,  $z_2^{(1)} = 5$ . При  $z = 9$  из уравнения (1) следует, что  $xy = -16$ . Решая это уравнение совместно с  $x + y = 7$ , находим:

$$x_1^{(1)} = \frac{7 + \sqrt{113}}{2}, \quad y_1^{(1)} = \frac{7 - \sqrt{113}}{2}$$

и

$$x_2^{(1)} = \frac{7 - \sqrt{113}}{2}, \quad y_2^{(1)} = \frac{7 + \sqrt{113}}{2}.$$

Если же  $z = 5$ , то из уравнения (1) следует  $xu = 12$ . Решив систему

$$xu = 12, \quad x + y = 7,$$

получим  $x_3^{(1)} = 4, y_3^{(1)} = 3$  и  $x_4^{(1)} = 3, y_4^{(1)} = 4$ .

2) В случае  $x + y = -7$ , поступая аналогично, получим уравнение  $z^2 + 14z + 45 = 0$ . Его корни  $z_1^{(2)} = -9, z_2^{(2)} = -5$ . Решив далее последовательно две системы уравнений

$$xu = -16, \quad x + y = -7$$

и

$$xu = 12, \quad x + y = -7,$$

из первой системы найдем:

$$x_1^{(2)} = \frac{-7 - \sqrt{113}}{2}, \quad y_1^{(2)} = \frac{-7 + \sqrt{113}}{2}$$

и

$$x_2^{(2)} = \frac{-7 + \sqrt{113}}{2}, \quad y_2^{(2)} = \frac{-7 - \sqrt{113}}{2},$$

а из второй системы

$$x_3^{(2)} = -4, \quad y_3^{(2)} = -3$$

и

$$x_4^{(2)} = -3, \quad y_4^{(2)} = -4.$$

Из наших рассуждений следует, что решениями исходной системы могут быть лишь следующие восемь троек чисел  $(x, y, z)$ :

$$\left(\frac{7 + \sqrt{113}}{2}, \frac{7 - \sqrt{113}}{2}, 9\right), \left(\frac{7 - \sqrt{113}}{2}, \frac{7 + \sqrt{113}}{2}, 9\right),$$

$$(4, 3, 5), (3, 4, 5), \left(\frac{-7 - \sqrt{113}}{2}, \frac{-7 + \sqrt{113}}{2}, -9\right),$$

$$\left(\frac{-7 + \sqrt{113}}{2}, \frac{-7 - \sqrt{113}}{2}, -9\right), (-4, -3, -5),$$

$$(-3, -4, -5).$$

Проверкой убеждаемся в том, что все они являются решениями.

63. Пусть  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — вещественное решение системы. Числа  $x_k$  ( $k=1, \dots, n$ ), очевидно, должны быть одного знака. Предположим для определенности, что все  $x_k > 0$ . В противном случае мы бы могли поменять знак во всех уравнениях системы. Покажем, что

$$x_k \geq \sqrt{2} \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

Имеем:

$$\left(x_k - \frac{2}{x_k}\right)^2 \geq 0.$$

Раскрывая скобки и прибавляя к обеим частям 8, получаем:

$$x_k^2 + 4 + \frac{4}{x_k^2} \geq 8.$$

Отсюда

$$\left(x_k + \frac{2}{x_k}\right)^2 \geq 8$$

и, следовательно,

$$\left(x_k + \frac{2}{x_k}\right) \geq 2\sqrt{2}.$$

В силу уравнений системы отсюда следует неравенство (1). Сложив теперь все уравнения системы, получим:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = \frac{2}{x_1} + \frac{2}{x_2} + \dots + \frac{2}{x_n}. \quad (2)$$

При условии (1) равенство здесь, очевидно, возможно лишь в том случае, когда все неизвестные равны  $\sqrt{2}$ . Так как легко проверить, что набор чисел  $x_1 = x_2 = \dots = x_n = \sqrt{2}$  удовлетворяет исходной системе, то система имеет и притом лишь одно положительное решение. Поменяв знак у значений неизвестных, мы получим еще одно вещественное решение

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n = -\sqrt{2}.$$

Этими двумя решениями, таким образом, исчерпываются все вещественные решения.

64. Пусть  $x, y, z$  — решение системы. Выражая  $x$  из первого равенства и подставляя во второе и третье, найдем:

$$\begin{aligned} (a-b)x + (c-b)y + (d-b)z &= 0, \\ (a^2-b^2)x + (c^2-b^2)y + (d^2-b^2)z &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда путем несложных выкладок находим:

$$y = -\frac{(a-d)(a-b)}{(c-b)(c-d)}, \quad z = -\frac{(a-b)(a-c)}{(d-b)(d-c)}.$$

Подставляя найденные значения  $y$  и  $z$  в первое равенство, получаем:

$$x = -\frac{(a-c)(a-d)}{(b-c)(b-d)}.$$

Следовательно,

$$xyz = \frac{(a-b)^2(a-c)^2(a-d)^2}{(b-c)^2(c-d)^2(d-b)^2} > 0.$$

65. Если  $a \neq 0$ , то  $x = a$  не является корнем уравнения. Деля обе части уравнения на  $\sqrt[3]{(a-x)^2}$ , заменим его следующим равносильным уравнением:

$$\sqrt[3]{\left(\frac{a+x}{a-x}\right)^2} + 4 = 5\sqrt[3]{\frac{a+x}{a-x}}.$$

Полагая  $t = \sqrt[3]{\frac{a+x}{a-x}}$ , найдем  $t_1 = 4$ ,  $t_2 = 1$ . Отсюда

$x_1 = \frac{63}{65}a$ ,  $x_2 = 0$ . Если  $a = 0$ , то исходное уравнение имеет лишь один корень  $x = 0$ .

66. Подстановкой убеждаемся, что  $x = 1$  не есть корень. Поэтому после деления обеих частей уравнения на  $\sqrt[m]{(1-x)^2}$  оно перейдет в равносильное:

$$\sqrt[m]{\left(\frac{1+x}{1-x}\right)^2} - 1 = \sqrt[m]{\frac{1+x}{1-x}}.$$

Обозначая  $\sqrt[m]{\frac{1+x}{1-x}}$  через  $t$ , получим уравнение  $t^2 - 1 = t$ ,

или  $t^2 - t - 1 = 0$ . Отсюда  $t_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$  и  $t_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}$ .

как как второе значение отрицательно, то, в силу принятого соглашения о корнях, мы в случае четного показателя  $m$  олжны  $t_2$  отбросить. Таким образом, в случае четного  $m$  имеем:

$$\sqrt[m]{\frac{1+x}{1-x}} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}, \quad \frac{1+x}{1-x} = \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2}\right)^m$$

и, следовательно,

$$x = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^m - 1}{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^m + 1}.$$

В случае нечетного  $m$  уравнение имеет два корня:

$$x_{1,2} = \frac{\left(\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}\right)^m - 1}{\left(\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}\right)^m + 1}.$$

67. Сделаем подстановку,  $\sqrt{2y-5} = t \geq 0$ . В результате получим:

$$\sqrt{t^2 + 2t + 1} + \sqrt{t^2 + 6t + 9} = 14.$$

Отсюда  $t + 1 + t + 3 = 14$  и  $t = 5$ . Решив уравнение

$$\sqrt{2y-5} = 5,$$

находим  $y = 15$ .

68. Умножив обе части уравнения на  $\sqrt{x + \sqrt{x}}$ , получим:

$$x - \sqrt{x^2 - x} = \frac{1}{2}\sqrt{x}. \quad (1)$$

Так как  $x > 0$  (при  $x = 0$  правая часть исходного уравнения теряет смысл), то уравнение (1) равносильно уравнению

$$2\sqrt{x-1} = 2\sqrt{x-1}.$$

Возведя обе его части в квадрат, убеждаемся в том, что это уравнение имеет единственный корень  $x = \frac{25}{169}$ ; последний удовлетворяет и исходному уравнению.

69. Умножив обе части уравнения на  $\sqrt{x+1}$ , положим  $x^2 + 8x = t$ . Тогда получим уравнение

$$\sqrt{t} + \sqrt{t+7} = 7.$$

Это уравнение имеет единственный корень  $t = 9$ . Решив затем уравнение  $x^2 + 8x - 9 = 0$ , найдем  $x_1 = -9$ ,  $x_2 = 1$ . Исходное уравнение, в силу принятого условия относительно значения корней, удовлетворяется лишь при  $x = 1$ .

70. Возведя обе части уравнения в куб, получаем:

$$x - 1 + 3 \sqrt[3]{(x-1)^2} \sqrt[3]{x+1} + 3 \sqrt[3]{x-1} \sqrt[3]{(x+1)^2} + x + 1 = 2x^3.$$

Отсюда

$$2x + 3 \sqrt[3]{x^2 - 1} (\sqrt[3]{x-1} + \sqrt[3]{x+1}) = 2x^3 \quad (1)$$

и на основании исходного уравнения

$$2x + 3 \sqrt[3]{x^2 - 1} x \sqrt[3]{2} = 2x^3. \quad (2)$$

После простых преобразований получаем:

$$x \sqrt[3]{x^2 - 1} [3 \sqrt[3]{2} - 2 \sqrt[3]{(x^2 - 1)^2}] = 0.$$

Отсюда находим все числа, которые могут служить корнями исходного уравнения. Имеем сразу:

$$x_1 = 0, \quad x_2 = 1, \quad x_3 = -1.$$

Решая далее уравнение

$$3 \sqrt[3]{2} = 2 \sqrt[3]{(x^2 - 1)^2},$$

найдем:

$$27 = 4(x^2 - 1)^2, \quad (x^2 - 1)^2 = \frac{27}{4}, \quad x^2 = 1 \pm \frac{3\sqrt[3]{3}}{2}.$$

Так как ищутся только вещественные корни, то, следовательно,

$$x^2 = 1 + \frac{3\sqrt[3]{3}}{2}.$$

$$\text{Отсюда } x_4 = \sqrt{1 + \frac{3\sqrt[3]{3}}{2}}, \quad x_5 = -\sqrt{1 + \frac{3\sqrt[3]{3}}{2}}.$$

Легко проверить подстановкой, что  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  являются корнями исходного уравнения. Непосредственная проверка значений  $x_4$  и  $x_5$  вызывает известные трудности. Поступим поэтому так. Положим

$$a = \sqrt[3]{x_4 - 1}, \quad b = \sqrt[3]{x_4 + 1}$$

и

$$c = \sqrt[3]{2} x_4$$

и покажем, что

$$a + b = c. \quad (3)$$

Так как  $x_4$  удовлетворяет уравнению (2), то мы имеем

$$a^3 + 3abc + b^3 = c^3, \quad (4)$$

и нам надлежит показать, что из (4) следует (3). Заметим, что если в (4) вместо  $c$  подставить  $a + b$ , то получится тождество. Следовательно, по теореме Безу, рассматриваемый относительно  $c$  многочлен  $c^3 - 3abc - a^3 - b^3$  делится на двучлен  $c - (a + b)$ . Проведя деление, получим

$$\begin{aligned} c^3 - 3abc - a^3 - b^3 &= \\ &= [c - (a + b)] \{c^2 + c(a + b) + a^2 - ab + b^2\}. \end{aligned} \quad (5)$$

В силу (4) левая часть (5) есть нуль; легко видеть, однако, что  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$ , и значит, выражение в фигурных скобках положительно. Таким образом, равенство (3) доказано. Аналогично устанавливается, что  $x_5$  — также корень исходного уравнения.

71. Возведем обе части первого уравнения в квадрат и в полученное уравнение подставим  $x^2 + y^2$  из второго уравнения. В результате будем иметь:

$$36xy - 1 = \sqrt{-\frac{11}{5} + 64xy + 256(xy)^2}.$$

Возведя еще раз в квадрат обе части уравнения, получим квадратное уравнение относительно  $t = xy$ :

$$650t^2 - 85t + 2 = 0.$$

Решив это уравнение, найдем  $t_1 = \frac{1}{10}$ ,  $t_2 = \frac{2}{65}$ . Рассмотрим теперь две системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 + 4xy &= \frac{1}{5}, \\ xy &= \frac{1}{10}. \end{aligned} \right\} (1) \quad \left. \begin{aligned} x^2 + y^2 + 4xy &= \frac{1}{5}, \\ xy &= \frac{2}{65}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Очевидно, все решения исходной системы содержатся среди решений данных систем.

Решая первую систему, находим:

$$(x + y)^2 = \frac{1}{5} - 2xy = \frac{1}{5} - \frac{1}{5} = 0.$$

Следовательно,  $x + y = 0$ , и мы получаем два решения системы (1):

$$x_1 = \frac{i}{\sqrt{10}}, y_1 = -\frac{i}{\sqrt{10}}; \quad x_2 = -\frac{i}{\sqrt{10}}, y_2 = \frac{i}{\sqrt{10}}.$$

Вторая система преобразованием первого уравнения к виду  $(x + y)^2 = \frac{3}{65}$  сводится к двум следующим системам:

$$\left. \begin{aligned} x + y &= \frac{3}{\sqrt{65}}, \\ xy &= \frac{2}{65}. \end{aligned} \right\} (2') \quad \left. \begin{aligned} x + y &= -\frac{3}{\sqrt{65}}, \\ xy &= \frac{2}{65}. \end{aligned} \right\} (2'')$$

Система (2') имеет два решения:

$$x_3 = \frac{2}{\sqrt{65}}, y_3 = \frac{1}{\sqrt{65}}; \quad x_4 = \frac{1}{\sqrt{65}}, y_4 = \frac{2}{\sqrt{65}}.$$

Система (2'') также имеет два решения:

$$x_5 = -\frac{2}{\sqrt{65}}, y_5 = -\frac{1}{\sqrt{65}}; \quad x_6 = -\frac{1}{\sqrt{65}}, y_6 = -\frac{2}{\sqrt{65}}.$$

Исходной системе, как легко проверить, удовлетворяют лишь первый, второй, третий и шестой наборы чисел. Таким образом, исходная система имеет всего четыре решения.

72. Положим

$$\sqrt[3]{x} = u, \quad \sqrt[3]{y} = v.$$

Тогда данная система запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} u^3 - v^3 &= \frac{7}{2}(u^2v - uv^2), \\ u - v &= 3. \end{aligned}$$

Первое уравнение преобразуем к виду

$$(u - v)[(u - v)^2 + 3uv] = \frac{7}{2}uv.$$

Отсюда

$$uv = 18.$$

Решая данное уравнение совместно со вторым уравнением системы, найдем  $u_1 = 6, v_1 = 3; u_2 = -3, v_2 = -6$ . Возвращаясь к исходной системе, получим два ее решения:

$$x_1 = 216, y_1 = 27; \quad x_2 = -27, y_2 = -216.$$

73. Первое уравнение подстановкой  $\sqrt{\frac{x}{y}} = t \geq 0$  преобразуем к виду

$$2t^2 - 3t - 2 = 0.$$

Отсюда следует, что  $t = 2$  (второй корень,  $-\frac{1}{2}$ , отбрасываем). Решив систему

$$\sqrt{\frac{x}{y}} = 2, \quad x + xy + y = 9,$$

найдем два ее решения:

$$x_1 = 4, \quad y_1 = 1; \quad x_2 = -9, \quad y_2 = -\frac{9}{4},$$

которые являются решениями и исходной системы. Таким образом, исходная система имеет два решения.

74. Положим

$$\sqrt{\frac{y+1}{x-y}} = t > 0.$$

Тогда первое уравнение принимает вид

$$t^2 - 3t + 2 = 0,$$

откуда  $t_1 = 1$ ,  $t_2 = 2$ .

Рассмотрим теперь две системы уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \sqrt{\frac{y+1}{x-y}} = 1, \\ x + xy + y = 7. \end{array} \right\} (1) \quad \left. \begin{array}{l} \sqrt{\frac{y+1}{x-y}} = 2, \\ x + xy + y = 7. \end{array} \right\} (2)$$

Первая система имеет два решения:

$$(-5, -3), \quad (3, 1).$$

Вторая система также имеет два решения:

$$\left(\sqrt{10} - 1, \frac{\sqrt{160} - 5}{5}\right), \quad \left(-\sqrt{10} - 1, \frac{-\sqrt{160} - 5}{5}\right).$$

Следовательно, исходная система имеет четыре решения.

75. Принимая во внимание, что

$$\sqrt{\frac{x+y}{x-y}} = \frac{1}{|x-y|} \sqrt{x^2 - y^2},$$

получим, умножив первое уравнение на  $x - y$ :

$$x^2 - y^2 - \sqrt{x^2 - y^2} - 12 = 0 \quad \text{при } x - y > 0$$

и

$$x^2 - y^2 + \sqrt{x^2 - y^2} - 12 = 0 \text{ при } x - y < 0.$$

Отсюда

$$(\pm \sqrt{x^2 - y^2})_1 = 4, \quad (\pm \sqrt{x^2 - y^2})_2 = -3.$$

Рассмотрим в связи с этим две системы уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} x^2 - y^2 = 16, \\ xy = 15. \end{array} \right\} (1) \quad \left. \begin{array}{l} x^2 - y^2 = 9, \\ xy = 15. \end{array} \right\} (2)$$

Система (1) имеет два вещественных решения:

$$x_1 = 5, \quad y_1 = 3; \quad x_2 = -5, \quad y_2 = -3.$$

Система (2) также имеет два вещественных решения:

$$x_3 = \sqrt{\frac{9 + \sqrt{981}}{2}}, \quad y_3 = \sqrt{\frac{\sqrt{981} - 9}{2}};$$

$$x_4 = -\sqrt{\frac{9 + \sqrt{981}}{2}}, \quad y_4 = -\sqrt{\frac{\sqrt{981} - 9}{2}}.$$

Нетрудно, однако, проверить, что исходной системе удовлетворяют только две из найденных пар чисел, а именно:

$$(5, 3), \quad \left( -\sqrt{\frac{\sqrt{981} + 9}{2}}, -\sqrt{\frac{\sqrt{981} - 9}{2}} \right).$$

Таким образом, исходная система имеет два вещественных решения.

**76.** Положим

$$\sqrt{x^2 - 12y + 1} = t.$$

Тогда первое уравнение можно записать в виде

$$t^2 - 8t + 16 = 0.$$

Отсюда  $t_{1,2} = 4$ , и мы получаем

$$x^2 - 12y = 15. \quad (1)$$

Заметив далее, что  $y \neq 0$ , умножим второе уравнение на  $\frac{2x}{y}$ ; в результате оно примет вид

$$\left(\frac{x}{2y}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{2y}\right)\sqrt{1 + \frac{4x}{3y}} + \left(1 + \frac{4x}{3y}\right) = 0.$$

Отсюда

$$\frac{x}{2y} - \sqrt{1 + \frac{4x}{3y}} = 0. \quad (2)$$

После возведения в квадрат получаем уравнение

$$3 \left( \frac{x}{y} \right)^2 - 16 \left( \frac{x}{y} \right) - 12 = 0,$$

из которого находим:

$$\left( \frac{x}{y} \right)_1 = 6, \quad \left( \frac{x}{y} \right)_2 = -\frac{2}{3}.$$

Второе значение, очевидно, не удовлетворяет уравнению (2), поэтому можно ограничиться рассмотрением системы

$$x^2 - 12y = 15, \quad \frac{x}{y} = 6.$$

Эта система имеет два решения  $\left( 5, \frac{5}{6} \right)$ ,  $\left( -3, -\frac{1}{2} \right)$ , которые, как легко проверить, удовлетворяют и исходной системе.

77. Освободив первое уравнение от иррациональности в знаменателях, получим:

$$\frac{4x^2 - 2y^2}{y^2} = \frac{17}{4}.$$

Отсюда

$$\left( \frac{x}{y} \right)_1 = \frac{5}{4} \quad \text{и} \quad \left( \frac{x}{y} \right)_2 = -\frac{5}{4}.$$

Во втором уравнении положим

$$\sqrt{x^2 + xy + 4} = t, \quad (1)$$

после чего его можно будет записать так:

$$t^2 + t - 56 = 0.$$

Отсюда  $t_1 = 7$ ,  $t_2 = -8$ . Так как в (1)  $t \geq 0$ , то второй корень придется отбросить. В результате мы приходим к следующим двум системам уравнений: первая система

$$x = \frac{5}{4}y, \quad x^2 + xy - 45 = 0;$$

вторая система

$$x = -\frac{5}{4}y, \quad x^2 + xy - 45 = 0.$$

Решения первой системы:  $(5, 4)$ ,  $(-5, -4)$ . Решения второй системы:  $(15, -12)$ ,  $(-15, 12)$ . Все четыре решения удовлетворяют и исходной системе.

78. Выразив  $x$  из второго уравнения и подставив в первое получим

$$y^2 + \sqrt{3y^2 - \frac{4}{3}y - \frac{1}{3}} = \frac{2}{3} \frac{2y+5}{3} + 5.$$

Полагая здесь  $\sqrt{\frac{9y^2 - 4y - 1}{3}} = t \geq 0$ , придем к уравнению

$$t^2 - 3t - 18 = 0.$$

Отсюда

$$t_1 = 6, \quad t_2 = -3.$$

Так как  $t$  по условию неотрицательно, то имеем лишь одно уравнение

$$9y^2 - 4y - 109 = 0.$$

Решая это уравнение вместе со вторым уравнением исходной системы, находим два ее решения:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{49 + 2\sqrt{985}}{27}, & y_1 &= \frac{2 + \sqrt{985}}{9}; \\ x_2 &= \frac{49 - 2\sqrt{985}}{27}, & y_2 &= \frac{2 - \sqrt{985}}{9}. \end{aligned}$$

79. Положим

$$\sqrt{x^2 - 6y + 1} = t \geq 0.$$

Тогда первое уравнение запишется в виде

$$t^2 - 8t + 16 = 0.$$

Отсюда  $t = 4$ , и мы имеем:

$$x^2 - 6y - 15 = 0. \tag{1}$$

Если теперь во втором уравнении положить  $x^2 y = u$  и учесть (1), то получится уравнение

$$9u^2 - 241u - 13230 = 0,$$

откуда  $u_1 = 54, u_2 = \frac{245}{9}$ .

Мы приходим к двум системам уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x^2 - 6y - 15 &= 0, \\ x^2 y &= 54. \end{aligned} \right\} \tag{2} \quad \left. \begin{aligned} x^2 - 6y - 15 &= 0, \\ x^2 y &= \frac{245}{9}. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Исключая  $x^2$  из системы (2), получим уравнение

$$2y^2 + 5y - 18 = 0,$$

откуда  $y_1 = 2, y_2 = -4\frac{1}{2}$ . Второй корень приходится

отбросить, ибо он, в силу уравнения  $x^2y=54$ , приводит к не-  
вещественным значениям  $x$ . Система (2), следовательно,  
имеет два вещественных решения:

$$x_1 = \sqrt{27}, \quad y_1 = 2; \quad x_2 = -\sqrt{27}, \quad y_2 = 2.$$

Система (3) имеет также два вещественных решения:

$$x_1 = \sqrt{\frac{V7905 + 45}{6}}, \quad y_1 = \frac{V7905 - 45}{36};$$

$$x_2 = -\sqrt{\frac{V7905 + 45}{6}}, \quad y_2 = \frac{V7905 - 45}{36}.$$

Таким образом, исходная система имеет четыре вещественных  
решения.

80. Положим

$$\sqrt{x} = u \geq 0; \quad \sqrt{y} = v \geq 0. \quad (1)$$

Тогда система запишется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (u^2 - v^2)v &= \frac{u}{2}, \\ (u^2 + v^2)u &= 3v. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Система (2) имеет очевидное решение

$$u = 0; \quad v = 0. \quad (3)$$

Считая в дальнейшем  $u \neq 0$ , а следовательно (в силу урав-  
нений), и  $v \neq 0$ , получим, перемножив правые и левые части  
уравнений (2):

$$u^4 - v^4 = \frac{3}{2}. \quad (4)$$

Умножим далее первое уравнение системы (2) на  $v$ , второе —  
на  $u$  и сложим, в результате получим:

$$u^4 - v^4 + 2u^2v^2 = \frac{7}{2}uv.$$

В силу (4) теперь имеем:

$$4(uv)^2 - 7uv + 3 = 0. \quad (5)$$

Отсюда

$$(uv)_1 = 1, \quad (uv)_2 = \frac{3}{4}.$$

Рассмотрим теперь две системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} uv &= 1, \\ (u^2 + v^2)u &= 3v. \end{aligned} \right\} \quad (6) \quad \left. \begin{aligned} uv &= \frac{3}{4}, \\ (u^2 + v^2)u &= 3v. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Очевидно, что всякое решение системы (2), отличное от (3), содержится среди решений данных систем.

Умножив второе уравнение системы (6) на  $u$ , найдем в силу первого уравнения, что  $u^4 = 2$ ; отсюда, учитывая (1), получаем:

$$u = \sqrt[4]{2}, \quad v = \frac{\sqrt[4]{8}}{2}.$$

Аналогично находим и решение системы (7), удовлетворяющее условию (1):

$$u = \frac{\sqrt[4]{27}}{2}, \quad v = \frac{\sqrt[4]{3}}{2}.$$

Легко проверить, что оба решения удовлетворяют и системе (2). Таким образом, исходная система имеет три решения:

$$(0, 0), \left( \sqrt[4]{2}, \frac{\sqrt[4]{2}}{2} \right); \left( \frac{3\sqrt[4]{3}}{4}, \frac{\sqrt[4]{3}}{4} \right).$$

81. Возведя обе части первого уравнения в квадрат, получим:

$$\sqrt{x^2 - y^2} = x - \frac{a^2}{2}. \quad (1)$$

В силу второго уравнения имеем:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \frac{3a^2}{2} - x. \quad (2)$$

Возведя теперь в квадрат обе части второго уравнения исходной системы, получим:

$$\sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{x^2 - y^2} = \frac{a^4}{2} - x^2.$$

Отсюда в силу (1) и (2)

$$\frac{a^4}{2} - x^2 = \left( x - \frac{a^2}{2} \right) \left( \frac{3a^2}{2} - x \right).$$

Раскрыв скобки, найдем  $x = \frac{5}{8} a^2$ . После этого из уравнения (1) легко получим два значения  $y$ :

$$y_1 = a^2 \sqrt{\frac{3}{8}}; \quad y_2 = -a^2 \sqrt{\frac{3}{8}}.$$

Проверкой обнаруживаем, что исходная система имеет лишь одно решение  $\left( \frac{5}{8} a^2, a^2 \sqrt{\frac{3}{8}} \right)$ .

82. Положим

$$\sqrt{x} = u \geq 0 \quad \text{и} \quad \sqrt{y} = v \geq 0; \quad (1)$$

тогда система примет вид

$$\left. \begin{aligned} u^3 - v^3 &= a(u - v), \\ u^4 + u^2v^2 + v^4 &= b^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Эта система распадается очевидно на две системы:

$$\left. \begin{aligned} u - v &= 0, \\ u^4 + u^2v^2 + v^4 &= b^2 \end{aligned} \right\} (2') \quad \text{и} \quad \left. \begin{aligned} u^2 + uv + v^2 &= a, \\ u^4 + u^2v^2 + v^4 &= b^2 \end{aligned} \right\} (2'')$$

Решая систему (2'), находим  $3u^4 = b^2$ , откуда, учитывая (1), получаем:

$$u = \frac{\sqrt[4]{b^4/27}}{3}, \quad v = \frac{\sqrt[4]{b^4/27}}{3}. \quad (3)$$

Переходя к системе (2''), преобразуем оба уравнения следующим образом:

$$u^2 + v^2 = a - uv, \quad (u^2 + v^2)^2 = b^2 + u^2v^2.$$

Отсюда находим  $uv$  и  $u^2 + v^2$ :

$$\left. \begin{aligned} uv &= \frac{a^2 - b^2}{2a}, \\ u^2 + v^2 &= \frac{a^2 + b^2}{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Нетрудно показать, что система уравнений (4) равносильна системе (2''). Из уравнений (4) получаем:

$$\left. \begin{aligned} (u + v)^2 &= \frac{3a^2 - b^2}{2a}, \\ (u - v)^2 &= \frac{3b^2 - a^2}{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Заметим, что правая часть первого из уравнений системы (4), в силу (1), должна быть неотрицательна; неотрицательной должна быть и правая часть второго уравнения системы (5). Таким образом, мы должны предполагать выполненным условие

$$3b^2 \geq a^2 \geq b^2, \quad (6)$$

в противном случае система (5), а вместе с ней и система (2''), не имеет решений, удовлетворяющих условию (1).

Решая систему (5), получаем:

$$u + v = \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}}, \quad u - v = \pm \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}}.$$

В результате имеем:

$$u = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}} \pm \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}} \right),$$

$$v = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}} \mp \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}} \right).$$

Легко видеть, что в силу условия (6) обе пары значений  $(u, v)$  неотрицательны; действительно, так как  $a^2 \geq b^2$ , то  $3a^2 - b^2 \geq 3b^2 - a^2$ .

Таким образом, в случае, если выполнено дополнительное условие (6), исходная система имеет три решения:

$$x_1 = b\sqrt{3}, \quad y_1 = b\sqrt{3};$$

$$x_2 = \frac{1}{4} \left( \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}} + \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}} \right)^2,$$

$$y_2 = \frac{1}{4} \left( \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}} - \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}} \right)^2;$$

$$x_3 = \frac{1}{4} \left( \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}} - \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}} \right)^2,$$

$$y_3 = \frac{1}{4} \left( \sqrt{\frac{3a^2 - b^2}{2a}} + \sqrt{\frac{3b^2 - a^2}{2a}} \right)^2;$$

если же условие (6) нарушено, — то только первое из них.

### 3. Алгебраические неравенства

83. Если положить

$$\frac{x}{y} + \frac{y}{x} = u$$

и заметить, что  $\frac{x^2}{y^2} + \frac{y^2}{x^2} = u^2 - 2$ , то данное выражение легко преобразуется к виду

$$3u^2 - 8u + 4. \quad (1)$$

Если  $x$  и  $y$  разных знаков, то  $u < 0$  и трехчлен (1) положителен. Если же  $x$  и  $y$  одного знака, то легко видеть, что  $u \geq 2$  (см. формулу (2) на стр. 20).

Так как корни квадратного трехчлена (1) равны  $\frac{2}{3}$  и 2, то при  $u \geq 2$  трехчлен неотрицателен. Таким образом, трехчлен неотрицателен при  $u < 0$  и при  $u \geq 2$ , а следовательно, исходное выражение неотрицательно при всех вещественных  $x$  и  $y$ , не равных нулю.

84. Заметим, что  $x^2 - x + 1 > 0$  при всех значениях  $x$ , так как дискриминант квадратного трехчлена равен  $-3 < 0$  и коэффициент при  $x^2$  положителен; мы вправе поэтому умножить оба неравенства на знаменатель. В результате получим:

$$\begin{aligned} -3x^2 + 3x - 3 &< x^2 + ax - 2, \\ x^2 + ax - 2 &< 2x^2 - 2x + 2, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} 4x^2 + (a-3)x + 1 &> 0, \\ x^2 - (a+2)x + 4 &> 0. \end{aligned}$$

Первое неравенство справедливо при всех  $x$  тогда и только тогда, когда дискриминант квадратного трехчлена меньше нуля, т. е. когда  $(a-3)^2 - 16 < 0$ . По аналогичной причине второе неравенство выполняется при условии

$$(a+2)^2 - 16 < 0.$$

Решая теперь совместно два неравенства  $(a-3)^2 - 16 < 0$  и  $(a+2)^2 - 16 < 0$  относительно  $a$ , получаем:

$$-4 < a-3 < 4, \quad -1 < a < 7$$

и

$$-4 < a+2 < 4, \quad -6 < a < 2.$$

Отсюда окончательно имеем  $-1 < a < 2$ .

85. Данная система равносильна следующей:

$$x^2 + (x+a)^2 + 2x \leq 1, \quad y = x + a.$$

Неравенство

$$2x^2 + 2(a+1)x + a^2 - 1 \leq 0$$

имеет единственное решение относительно  $x$  тогда и только тогда, когда дискриминант трехчлена равен нулю:

$$(a+1)^2 - 2(a^2 - 1) = 0,$$

т. е.

$$a^2 - 2a - 3 = 0;$$

отсюда

$$a_1 = 3, \quad a_2 = -1.$$

1) Если  $a = 3$ , то  $x^2 + 4x + 4 = 0$  и  $x = -2$ ,  $y = 1$ .

2) Если  $a = -1$ , то  $x^2 = 0$  и  $x = 0$ ,  $y = -1$ .

86. Запишем данную систему неравенств следующим образом:

$$y + \frac{1}{2} > |x^2 - 2x|,$$

$$y < 2 - |x - 1|.$$

Так как всегда  $|x^2 - 2x| \geq 0$  и  $|x - 1| \geq 0$ , то

$$-\frac{1}{2} < y < 2.$$

Единственными целыми числами  $y$ , удовлетворяющими этому неравенству, являются 0 и 1. Следовательно, данная система неравенств, рассматриваемая для целых  $x$  и  $y$ , может быть совместна лишь при значениях  $y=0$  и  $y=1$ . Рассмотрим оба случая.

Случай 1. Если  $y=0$ , то система неравенств принимает вид

$$|x^2 - 2x| < \frac{1}{2}, \quad |x - 1| < 2.$$

Второму из этих неравенств удовлетворяют лишь целые числа: 0, 1 и 2. Подстановкой нетрудно убедиться, что 0 и 2 удовлетворяют и первому неравенству, а 1 ему не удовлетворяет. Итак, для случая  $y=0$  найдены два решения:

$$x_1 = 0, y_1 = 0; \quad x_2 = 2, y_2 = 0.$$

Случай 2. Если  $y=1$ , то исходная система неравенств приводит к следующей:

$$|x^2 - 2x| < \frac{3}{2}, \quad |x - 1| < 1.$$

Второму из этих неравенств удовлетворяет единственное целое число  $x=1$ , которое удовлетворяет и первому из неравенств. Итак, в этом случае имеем еще одно решение задачи:  $x_3 = 1, y_3 = 1$ . Таким образом, система неравенств удовлетворяется тремя парами целых чисел.

87. В левой части всего  $n$  слагаемых, причем первые  $n-1$  слагаемых строго больше последнего. Поэтому

$$\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \dots + \frac{1}{2n} > n \frac{1}{2n} = \frac{1}{2}.$$

88. Обозначим через  $S_m$  левую часть доказываемого неравенства для случая, когда число слагаемых равно  $2m+1$ . Легко видеть, что при этом

$$S_{m+1} - S_m = \frac{1}{3m+4} + \frac{1}{3m+3} + \frac{1}{3m+2} - \frac{1}{m+1}.$$

Приведя дроби к общему знаменателю, найдем:

$$S_{m+1} - S_m = \frac{2}{(3m+2)(3m+3)(3m+4)} > 0.$$

Таким образом,  $S_{m+1} > S_m$ . Так как

$$S_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} > 1,$$

то по доказанному

$$S_m > S_{m-1} > \dots > S_2 > S_1 > 1,$$

т. е.  $S_m > 1$ , что и требовалось доказать.

89. Напишем ряд очевидных неравенств

$$\frac{1}{2^2} < \frac{1}{1 \cdot 2} = \frac{1}{1} - \frac{1}{2},$$

$$\frac{1}{3^2} < \frac{1}{2 \cdot 3} = \frac{1}{2} - \frac{1}{3},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\frac{1}{n^2} < \frac{1}{(n-1)n} = \frac{1}{n-1} - \frac{1}{n}.$$

Сложив эти неравенства почленно, получим:

$$\frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots + \frac{1}{n^2} < 1 - \frac{1}{n} = \frac{n-1}{n},$$

что и требовалось доказать.

90. Перепишем обе части доказываемого неравенства следующим образом:

$$(n!)^2 = \underbrace{(1 \cdot n)[2 \cdot (n-1)] \dots [k(n-k+1)] \dots (n \cdot 1)}_{\substack{n \text{ множителей} \\ n^n = n \cdot n \dots n. \\ n \text{ множителей}}},$$

Докажем, что

$$(n-k+1)k \geq n \quad (1)$$

при  $n \geq k \geq 1$ . Действительно,

$$\begin{aligned} nk - k^2 + k - n &= k(n-k) - (n-k) = \\ &= (n-k)(k-1) \geq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, мы уже доказали, что

$$(n!)^2 \geq n^n. \quad (3)$$

Заметим, что если число  $k$  больше единицы и меньше, чем  $n$ , то в формуле (1), как это следует из (2), имеет мест

строгое неравенство. Оно, очевидно, повлечет за собой строгое неравенство и в формуле (3). При  $n > 2$  такое число  $k$  найдется. Следовательно, в этом случае справедливо строгое неравенство  $(n!)^2 > n^n$ .

91. Легко проверить, что для построения треугольника со сторонами  $a, b, c$  необходимо и достаточно, чтобы эти числа  $a, b, c$  удовлетворяли трем неравенствам:

$$\left. \begin{aligned} a + b - c &> 0, \\ a + c - b &> 0, \\ b + c - a &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Докажем, что одновременное выполнение этих неравенств эквивалентно выполнению поставленного в задаче условия. Положим

$$K = pa^2 + qb^2 - pqc^2.$$

Так как  $q = 1 - p$ , то предыдущее выражение можно переписать в виде

$$K = pa^2 + (1 - p)b^2 - p(1 - p)c^2 = c^2 p^2 + \frac{1}{2}(a^2 - b^2 - c^2)p + b^2,$$

где  $a, b, c$  — постоянные, а  $p$  может принимать любые значения.

Таким образом,  $K$  представляет собой квадратный трехчлен относительно  $p$ . В общем случае в зависимости от величины  $p$  трехчлен  $K$  может принимать значения разных знаков. Указанное в задаче неравенство равносильно тому, что  $K > 0$  при всех  $p$ . Для этого, как известно, необходимо и достаточно, чтобы дискриминант трехчлена

$$D = (a^2 - b^2 - c^2)^2 - 4b^2c^2$$

был отрицателен (мы учли при этом, что коэффициент при  $p^2$  равен  $c^2 > 0$ ).

Дискриминант можно представить в следующей форме:

$$\begin{aligned} D &= (a^2 - b^2 - c^2)^2 - 4b^2c^2 = \\ &= (a^2 - b^2 - c^2 - 2bc)(a^2 - b^2 - c^2 + 2bc) = \\ &= [a^2 - (b + c)^2][a^2 - (b - c)^2] = \\ &= (a + b + c)(a - b - c)(a + b - c)(a - b + c) = \\ &= -(a + b + c)(a + b - c)(b + c - a)(c + a - b). \end{aligned}$$

Если треугольник можно построить, то неравенства (1) выполнены и, следовательно,  $D < 0$ . Тем самым в одну сторону утверждение доказано.

Обратно, если  $D < 0$ , то

$$(a + b - c)(b + c - a)(c + a - b) > 0. \quad (2)$$

Покажем, что отсюда следуют все три неравенства (1). Действительно, предположим, что только одна из скобок в левой части (2) положительна, а две другие отрицательны, например  $a + b - c < 0$  и  $b + c - a < 0$ . Сложив эти неравенства, получим  $2b < 0$ , что невозможно. Таким образом, утверждение доказано и в другую сторону.

92. Преобразуем левую часть неравенства следующим образом:

$$\begin{aligned} & 4(x + y)(x + z)x(x + y + z) + y^2z^2 = \\ & = 4(x^2 + xy + xz + yz)(x^2 + xy + xz) + y^2z^2 = \\ & = 4(x^2 + xy + xz)^2 + 4yz(x^2 + xy + xz) + y^2z^2 = \\ & = [2(x^2 + xy + xz) + yz]^2. \end{aligned}$$

Полученное выражение неотрицательно при любых вещественных  $x, y, z$ , что и требовалось доказать.

93. Обозначив левую часть неравенства через  $z$ , преобразуем  $z$  следующим образом:

$$z = x^2 + 2xy + 3y^2 + 2x + 6y + 4 = (x + y + 1)^2 + 2(y + 1)^2 + 1.$$

При вещественных  $x$  и  $y$  первые два слагаемых неотрицательны, а значит,  $z \geq 1$ .

94. Так как  $x = \frac{1-4y}{2}$ , то подлежащее доказательству неравенство равносильно неравенству

$$\left(\frac{1-4y}{2}\right)^2 + y^2 \geq \frac{1}{20},$$

которое легко преобразуется к следующему очевидному:

$$100y^2 - 40y + 4 = (10y - 2)^2 \geq 0.$$

95. Так как  $d > 0$  и  $R \geq r > 0$ , то

$$d^2 + R^2 - r^2 > 0 \text{ и } 2dR > 0.$$

Следовательно, данное неравенство равносильно неравенству

$$d^2 + R^2 - r^2 \leq 2dR.$$

Приведем его к виду  $(d-R)^2 \leq r^2$ , получим  $|d-R| \leq r$  или  $-r \leq d-R \leq r$ . Следовательно,

$$R-r \leq d \leq R+r.$$

96. Умножив обе части доказываемого неравенства на  $a+b+c$ , получим равносильное неравенство, левая часть которого равна

$$\begin{aligned} (a+b+c) \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) &= 3 + \left( \frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) + \left( \frac{b}{c} + \frac{c}{b} \right) + \\ &+ \left( \frac{c}{a} + \frac{a}{c} \right) = 9 + \left( \sqrt{\frac{a}{b}} - \sqrt{\frac{b}{a}} \right)^2 + \\ &+ \left( \sqrt{\frac{b}{c}} - \sqrt{\frac{c}{b}} \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{c}{a}} - \sqrt{\frac{a}{c}} \right)^2 \geq 9. \end{aligned}$$

97. Имеем:

$$1 - 2\sqrt{a_k} + a_k = (1 - \sqrt{a_k})^2 \geq 0,$$

откуда

$$1 + a_k \geq 2\sqrt{a_k}.$$

Написав эти неравенства для  $k=1, 2, \dots$  и перемножив их почленно, получим:

$$(1 + a_1)(1 + a_2) \dots (1 + a_n) \geq 2^n \sqrt{a_1 a_2 \dots a_n} = 2^n.$$

98. Достаточно рассмотреть случай, когда  $a$  и  $b$  одного знака (т. е. положительны), так как в противном случае одно из чисел больше 1 и неравенство очевидно. Имеем:

$$\begin{aligned} a^4 + b^4 &= (a+b)^4 - 4ab^3 - 4a^3b - 6a^2b^2 = \\ &= 1 - 4ab[1 - 2ab] - 6a^2b^2 = 2a^2b^2 - 4ab + 1 = \\ &= 2(ab - 1)^2 - 1. \end{aligned}$$

Но если  $a+b=1$ , то  $0 \leq ab \leq \frac{1}{4}$ , так как

$$ab \leq \left( \frac{a+b}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

(см. формулу (3) на стр. 20).

Следовательно,

$$a^4 + b^4 \geq 2 \left( \frac{1}{4} - 1 \right)^2 - 1 = \frac{1}{8}.$$

99. Рассмотрим три случая:

1)  $x \leq 0$ ; тогда  $x^3 - x^5 + x^2 - x + 1 > 0$ , ибо первые четыре слагаемых неотрицательны;

2)  $0 < x < 1$ ; преобразуем многочлен к виду

$$x^3 + (x^2 - x^5) + (1 - x) = x^3 + x^2(1 - x^3) + (1 - x).$$

Здесь все слагаемые, очевидно, положительны, следовательно и многочлен больше нуля;

3)  $x \geq 1$ ; запишем многочлен в виде

$$x^3(x^2 - 1) + x(x - 1) + 1.$$

Первые два слагаемых неотрицательны; следовательно, и этом случае

$$x^3 - x^5 + x^2 - x + 1 > 0.$$

100. Имеем:

$$(1 + x)^n + (1 - x)^n = 2(1 + C_n^2 x^2 + C_n^4 x^4 + \dots), \quad (1)$$

причем последнее слагаемое суммы, стоящей в скобках, равно  $x^n$ , если  $n$  четно, и  $nx^{n-1}$ , если  $n$  нечетно. По условию  $-1 < x < 1$ , откуда следует, что  $C_n^{2k} x^{2k} < C_n^{2k}$  для всех целых  $k$ . Поэтому

$$(1 + x)^n + (1 - x)^n < A_n,$$

где  $A_n$  — значение многочлена (1) при  $x = \pm 1$ , т. е.  $A_n = 2^n$ .

101. Доказываемое неравенство равносильно неравенству  $\varepsilon^2(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2) + 4(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) \pm \pm 4\varepsilon(x_1 a_1 + x_2 a_2 + \dots + x_n a_n) \geq 0$ ,

которое справедливо, так как левая часть равна

$$(\varepsilon a_1 \pm 2x_1)^2 + (\varepsilon a_2 \pm 2x_2)^2 + \dots + (\varepsilon a_n \pm 2x_n)^2.$$

102. Обозначим выражение, содержащее  $k$  знаков радикала, через  $x_k$ :

$$\sqrt{2 + \sqrt{2 + \dots + \sqrt{2 + \sqrt{2}}}} = x_k.$$

Заметим, что  $x_k < 2$ . В самом деле, заменим под знаком последнего внутреннего радикала 2 на 4. В результате все корни последовательно извлекаются и левая часть окажется

равной 2. Следовательно,  $x_k < 2$ . Отсюда, в частности, следует, что числитель и знаменатель в левой части исходного неравенства отличны от нуля.

Пользуясь далее тем, что

$$x_n = \sqrt{2 + x_{n-1}},$$

преобразуем левую часть исходного неравенства следующим образом:

$$\frac{2 - \sqrt{x_{n-1} + 2}}{2 - x_{n-1}} = \frac{\sqrt{x_{n-1} + 2} - 2}{(x_{n-1} + 2) - 4} = \frac{1}{\sqrt{x_{n-1} + 2} + 2} = \frac{1}{x_n + 2}.$$

Так как  $x_n < 2$ , то  $\frac{1}{x_n + 2} > \frac{1}{4}$ , что и требовалось доказать.

103. Как известно, для любых вещественных чисел  $a$  и  $b$  имеет место неравенство

$$|a \cdot b| \leq \frac{a^2 + b^2}{2} \quad (\text{см. формулу (1) на стр. 19}).$$

Пользуясь далее тем, что абсолютная величина суммы не превосходит суммы абсолютных величин соответствующих слагаемых, получаем:

$$\begin{aligned} |a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n| &\leq |a_1 b_1| + |a_2 b_2| + \dots + |a_n b_n| \leq \\ &\leq \frac{a_1^2 + b_1^2}{2} + \frac{a_2^2 + b_2^2}{2} + \dots + \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} = \\ &= \frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2 + b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2}{2} \leq \frac{1 + 1}{2} = 1, \end{aligned}$$

что и требовалось доказать.

104. Если  $n=1$ , то  $x_1=1$  и, следовательно,  $x_1 \geq 1$ , так что утверждение верно. Пусть оно верно для всех  $m$ , где  $1 \leq m \leq n-1$ ; докажем справедливость для  $m=n$ . Если все числа  $x_1, x_2, \dots, x_n$  равны единице, то утверждение справедливо. Если хотя бы одно из этих чисел больше единицы, то в силу равенства  $x_1 x_2 \dots x_n = 1$  найдется другое меньшее единицы. Пусть нумерация такова, что  $x_n > 1$ ,  $x_{n-1} < 1$ . Из предположения индукции и условия

$$x_1 x_2 \dots x_{n-2} (x_{n-1} x_n) = 1$$

следует:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{n-2} + x_{n-1} x_n \geq n - 1,$$

т. е.

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{n-2} + x_{n-1}x_n + 1 \geq n.$$

Так как  $(x_n - 1)(1 - x_{n-1}) > 0$ , то

$$x_n + x_{n-1} - x_n x_{n-1} - 1 > 0$$

и, следовательно,

$$x_{n-1} + x_n > x_{n-1}x_n + 1.$$

Таким образом,

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1} + x_n > x_1 + x_2 + \dots + x_{n-2} + x_{n-1}x_n + 1 \geq n,$$

и утверждение доказано.

#### 4. Логарифмические и показательные уравнения, тождества и неравенства

105. Разделив обе части уравнения на  $4^x$ , найдем:

$$1 - \left(\frac{3}{4}\right)^x \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{3}} = \left(\frac{3}{4}\right)^x \sqrt{3} - \frac{1}{2}.$$

Отсюда

$$\left(\frac{3}{4}\right)^x = \frac{3\sqrt[3]{3}}{8} = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{3}{2}}$$

и, следовательно,  $x = \frac{3}{2}$ .

106. Как видно из уравнения, оно имеет смысл только при  $a > 0$ ,  $a \neq 1$  и  $b > 0$ ,  $b \neq 1$ . Для решения уравнения воспользуемся формулой перехода к логарифмам с другим основанием:

$$\lg_b a = \frac{\lg_c a}{\lg_c b}$$

(см. формулу (2) на стр. 24). Здесь  $c$  — произвольное основание ( $c > 0$ ,  $c \neq 1$ ). Выбор основания  $c$  в данной задаче безразличен, нужно только все логарифмы привести к одному основанию. Можно, например, за общее основание принять  $a$ , поскольку  $a > 0$  и  $a \neq 1$ . Тогда уравнение преобразуется к виду

$$\frac{\lg_a x}{\lg_a 2} \lg_a^2 2 - 2 \lg_a x \lg_a \frac{1}{b} = \frac{\lg_a x}{\lg_a \sqrt[3]{a}} \lg_a x,$$

или после упрощения

$$(\lg_a 2 + 2 \lg_a b) \lg_a x = 3 \lg_a^2 x.$$

Отсюда первое решение:

$$\lg_a x = 0, \quad \text{т. е.} \quad x = 1.$$

Второе решение:

$$\lg_a x = \frac{1}{3}(\lg_a 2 + 2 \lg_a b) = \frac{1}{3} \lg_a 2b^2 = \lg_a \sqrt[3]{2b^2},$$

$$\text{т. е.} \quad x = \sqrt[3]{2b^2}.$$

107. Перейдем к логарифмам по основанию 2; используя формулу (2), стр. 24, получаем:

$$\frac{1}{\lg_2 x} \cdot \frac{1}{\lg_2 x - 4} = \frac{1}{\lg_2 x - 6}.$$

Это уравнение равносильно следующему:

$$\lg_2^2 x - 5 \lg_2 x + 6 = 0.$$

Отсюда

$$(\lg_2 x)_1 = 2, \quad x_1 = 4,$$

$$(\lg_2 x)_2 = 3, \quad x_2 = 8.$$

108. Потенцируя по основанию 2, получаем:

$$9^{x-1} + 7 = 4(3^{x-1} + 1).$$

Отсюда

$$(3^{x-1})^2 - 4(3^{x-1}) + 3 = 0.$$

Следовательно,

$$(3^{x-1})_1 = 3, \quad x_1 = 2; \quad (3^{x-1})_2 = 1, \quad x_2 = 1.$$

109. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию 3.

На основании формулы (2), стр. 24, будем иметь:

$$\frac{1 - \lg_3 x}{1 + \lg_3 x} + \lg_3^2 x = 1.$$

Отсюда

$$(1 - \lg_3 x)[1 - (1 + \lg_3 x)^2] = 0$$

и, следовательно,

$$(\lg_3 x)_1 = 1, \quad x_1 = 3;$$

$$(\lg_3 x)_2 = 0, \quad x_2 = 1;$$

$$(\lg_3 x)_3 = -2, \quad x_3 = \frac{1}{9}.$$

110. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию 2.

На основании формулы (2), стр. 24, будем иметь:

$$\frac{1 - \lg_2 x}{1 + \lg_2 x} \lg_2^2 x + \lg_2^4 x = 1.$$

Умножив обе части уравнения на знаменатель, перенесем в члены в левую часть и разложим ее на множители.

В результате получим:

$$(\lg_2 x - 1)(\lg_2^4 x + 2\lg_2^3 x + \lg_2^2 x + 2\lg_2 x + 1) = 0.$$

Второй из множителей при  $x > 1$ , очевидно, положителен в нуль не обращается. Приравнявая первый множитель нулю устанавливаем, что исходное уравнение при  $x > 1$  имеет и притом единственный корень  $x = 2$ .

111. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию  $a$ . Пользуясь формулой (2), стр. 24, получаем:

$$\frac{1}{3\lg_a x - 1} + \frac{\lg_a x}{2} = 1.$$

Это уравнение эквивалентно следующему квадратному уравнению относительно  $\lg_a x$ :

$$3\lg_a^2 x - 7\lg_a x + 4 = 0.$$

Решая это уравнение, находим:

$$(\lg_a x)_1 = \frac{4}{3}, \quad x_1 = a^{\frac{4}{3}}; \quad (\lg_a x)_2 = 1, \quad x_2 = a.$$

112. Имеем:

$$\lg_x a + \lg_{\frac{1}{x a^4}} (x a^{\frac{1}{4}})^2 = 4.$$

Отсюда  $\lg_x a + 2 = 4$  и, следовательно,  $x = \sqrt{a}$ .

113. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию  $a$ . Пользуясь формулой (2), стр. 24, будем иметь:

$$2 \left( \frac{\lg_a x}{\lg_a b} \cdot \frac{\lg_a 3}{2} + \lg_a x \cdot \frac{1}{\lg_a b} \right) = \lg_a x \cdot \frac{\lg_a x}{\lg_a b}.$$

Это уравнение эквивалентно следующему:

$$\lg_a x (\lg_a 3 + 2 - \lg_a x) = 0.$$

Приравнявая оба множителя поочередно нулю, находим:

$$x_1 = 1, \quad x_2 = 3a^2.$$

114. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию  $a$  ( $a > 0$  и  $a \neq 1$ , в противном случае выражение  $\lg_{\frac{1}{a}} 2x$  не имел

бы смысла). В силу формулы (2), стр. 24, получаем:

$$\frac{\lg_a 2x}{\lg_a a^2 \sqrt{x}} + \frac{\lg_a 2x}{\lg_a \frac{1}{a} \lg_a ax} = 0.$$

Отсюда либо  $\lg_a 2x = 0$  и тогда  $x_1 = \frac{1}{2}$ , либо

$$\lg_a ax = \lg_a (a^2 \sqrt{x}).$$

Решая последнее уравнение, находим  $x_2 = a^2$ .

115. Переходя к логарифмам по основанию  $a$ , после сложных преобразований получаем эквивалентное уравнение в виде

$$\lg_a x \cdot [\lg_a x - (\lg_a c + 1)] = 0.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} (\lg_a x)_1 &= 0, & x_1 &= 1; \\ (\lg_a x)_2 &= \lg_a c + 1 = \lg_a ac, & x_2 &= ac. \end{aligned}$$

116. Используя равенство  $\lg_x b = \frac{1}{\lg_b x}$ , преобразуем исходное уравнение в эквивалентное:

$$\lg_b [x(2 \lg a - x)] = 2.$$

Отсюда после потенцирования получаем:

$$x^2 - 2 \lg ax + b^2 = 0.$$

Решив это уравнение, найдем:

$$x_{1,2} = \lg a \pm \sqrt{\lg^2 a - b^2}.$$

При  $a \geq 10^b$  оба корня оказываются вещественными и положительными и, как нетрудно проверить, удовлетворяют исходному уравнению. При  $a < 10^b$  уравнение не имеет корней.

117. Перейдя в уравнении к логарифмам по основанию 2, получим:

$$\frac{1}{\lg_2 x} \cdot \frac{1}{1 + \lg_2 x} = \frac{1}{2 + \lg_2 x}.$$

После упрощений приходим к уравнению

$$\lg_2^2 x = 2.$$

Отсюда  $(\lg_2 x)_{1,2} = \pm \sqrt{2}$  и, следовательно,

$$x_1 = 2^{\sqrt{2}}, \quad x_2 = 2^{-\sqrt{2}}.$$

118. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию  $a$ :

$$\frac{3 \lg_a x}{2 + \lg_a x} + \frac{\frac{1}{2} \lg_a x}{\lg_a x - \frac{1}{2}} = 2.$$

После упрощений получаем эквивалентное уравнение

$$3(\lg_a x)^2 - 7 \lg_a x + 4 = 0.$$

Решая это уравнение, находим:

$$(\lg_a x)_1 = \frac{4}{3}, \quad x_1 = a^{\frac{4}{3}}; \quad (\lg_a x)_2 = 1, \quad x_2 = a.$$

119. Переходя к логарифмам по основанию  $a$ , получаем:

$$\frac{2}{\lg_a x} + \frac{3}{2 + \lg_a x} + \frac{1}{\lg_a x + 1} = 0.$$

После упрощений приходим к эквивалентному уравнению

$$6(\lg_a x)^2 + 11 \lg_a x + 4 = 0.$$

Отсюда

$$(\lg_a x)_1 = -\frac{1}{2}, \quad x_1 = \frac{1}{\sqrt{a}}; \quad (\lg_a x)_2 = -\frac{4}{3}, \quad x_2 = \frac{1}{\sqrt[3]{a^4}}.$$

120. Перейдя в уравнении к логарифмам по основанию  $a$ , мы приведем его к виду

$$\sqrt{\lg_a \sqrt[4]{ax} \left(1 + \frac{1}{\lg_a x}\right)} + \sqrt{\lg_a \sqrt{\frac{x}{a}} \left(1 - \frac{1}{\lg_a x}\right)} = a.$$

После дальнейших преобразований получаем:

$$\sqrt{\frac{(\lg_a x + 1)^2}{4 \lg_a x}} + \sqrt{\frac{(\lg_a x - 1)^2}{4 \lg_a x}} = a.$$

Учитывая, что квадратные корни понимаются здесь в арифметическом смысле, можно данное уравнение записать так:

$$|\lg_a x + 1| + |\lg_a x - 1| = 2a \sqrt{\lg_a x}. \quad (1)$$

Рассмотрим теперь два случая:

1) Предположим, что

$$\lg_a x > 1. \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) принимает вид

$$\lg_a x = a \sqrt{\lg_a x}.$$

Отсюда

$$x_1 = a^{a^2}.$$

Легко видеть, что условие (2) удовлетворяется при этом лишь в случае  $a > 1$ .

2) Предположим, что

$$0 < \lg_a x \leq 1. \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) принимает вид

$$2 = 2a \sqrt{\lg_a x}.$$

Отсюда

$$x_2 = a^{\frac{1}{a^2}}.$$

Заметим, что условие (3) выполняется лишь тогда, когда  $a \geq 1$ . Так как заведомо  $a \neq 1$  (иначе бы исходное уравнение потеряло смысл), то и второй корень  $x_2$  существует лишь при условии  $a > 1$ .

Мы исчерпали все возможности, так как значения  $x$ , при которых  $\lg_a x \leq 0$ , очевидно, не могут удовлетворить уравнению (1). Таким образом, при  $a > 1$  рассматриваемое уравнение имеет два корня:  $x_1 = a^{a^2}$  и  $x_2 = a^{\frac{1}{a^2}}$ . При  $0 < a < 1$  уравнение корней не имеет.

121. Имеем:

$$\lg(\sqrt{x+1} + 1) = \lg(x-40).$$

Полагая  $\sqrt{x+1} = t$ , получаем после потенцирования уравнение

$$t^2 - t - 42 = 0.$$

Его корни:  $t_1 = 7$  и  $t_2 = -6$ . Так как  $t = \sqrt{x+1} \geq 0$ , то  $t_2$  отбрасываем. Корню  $t_1$  соответствует значение  $x = 48$ . Проверкой убеждаемся, что оно удовлетворяет исходному уравнению. Таким образом, уравнение имеет единственный корень  $x = 48$ .

122. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию 3. результате после возведения обеих частей в квадрат и упрощений получим уравнение

$$(\lg_3 x)^2 + (\lg_3 x) - 2 = 0.$$

Отсюда

$$(\lg_3 x)_1 = -2, \quad x_1 = \frac{1}{9}; \quad (\lg_3 x)_2 = 1, \quad x_2 = 3.$$

Проверкой убеждаемся, что  $x_2$  не удовлетворяет исходному уравнению. Таким образом, единственный корень будет  $x_1 = \frac{1}{9}$ .

**123.** Переходя в уравнении к логарифмам по основанию  $a$ , получаем:

$$1 + \frac{\lg_a(p-x)}{\lg_a(x+q)} = \frac{2\lg_a(p-q) - \lg_a 4}{\lg_a(x+q)}.$$

Отсюда после упрощений и потенцирования приходим к квадратному уравнению

$$(x+q)(p-x) = \frac{1}{4}(p-q)^2.$$

Корни этого уравнения имеют вид

$$x_1 = \frac{1}{2}(p-q) + \sqrt{pq}, \quad x_2 = \frac{1}{2}(p-q) - \sqrt{pq}.$$

Легко проверить, что оба корня удовлетворяют неравенству

$$p > x_{1,2} > -q,$$

а следовательно, и исходному уравнению.

**124.** После несложных преобразований, использующих формулу перехода от одной системы логарифмов к другой, приводим данное уравнение к виду

$$\sqrt{\frac{3}{\lg_{\sqrt{5}} x}} + 3 \cdot \lg_{\sqrt{5}} x = -\sqrt{6}.$$

Положив  $\lg_{\sqrt{5}} x = t$ , получим после упрощений и возведения в квадрат уравнение

$$t^2 + t - 2 = 0.$$

Его корни:  $t_1 = -2$ ,  $t_2 = 1$ . Первому корню отвечает значение  $x = \frac{1}{5}$ , которое, как легко проверить, удовлетворяет и исходному уравнению. Второму корню отвечает значение  $x = \sqrt{5}$ , которое исходному уравнению не удовлетворяет

**125.** Пользуясь тем, что  $0,4 = \frac{2}{5}$ , а  $6,25 = \left(\frac{5}{2}\right)^2$ , приведем исходное уравнение к виду

$$\left(\frac{2}{5}\right)^{\lg^2 x + 1} = \left(\frac{2}{5}\right)^{2(\lg x^2 - 2)}.$$

Приравнивая показатели, получаем уравнение

$$\lg^2 x - 6 \lg x + 5 = 0,$$

решив которое, найдем:

$$(\lg x)_1 = 1, \quad x_1 = 10; \quad (\lg x)_2 = 5, \quad x_2 = 10^5.$$

126. Перейдя в уравнении к логарифмам по основанию 10, получим:

$$1 + \frac{\lg\left(\frac{4-x}{10}\right)}{\lg x} = (\lg \lg n - 1) \frac{1}{\lg x}.$$

Отсюда после простых преобразований приходим к уравнению

$$\lg\left(x \cdot \frac{4-x}{10}\right) = \lg \frac{\lg n}{10}.$$

После потенцирования будем иметь:

$$x^2 - 4x + \lg n = 0,$$

откуда

$$x_{1,2} = 2 \pm \sqrt{4 - \lg n}.$$

Несложное исследование приводит теперь к следующим результатам.

а) Если  $0 < n < 10^4$  и  $n \neq 10^3$ , то уравнение имеет два различных корня:

$$x_1 = 2 + \sqrt{4 - \lg n} \quad \text{и} \quad x_2 = 2 - \sqrt{4 - \lg n}.$$

б) Если  $n = 10^3$ , то имеется лишь один корень  $x = 3$  ( $x = 1$  приходится отбросить); при  $n = 10^4$  получаем также один корень  $x = 2$ .

в) Если, наконец,  $x > 10^4$ , то корней нет.

127. Перейдем в уравнении к логарифмам по основанию 2. В результате получим уравнение

$$\frac{1}{\lg_2 \sin x} \frac{\lg_2 a}{2 \lg_2 \sin x} + 1 = 0.$$

Отсюда

$$\lg_2^2 \sin x = -\frac{\lg_2 a}{2}.$$

ак как величина, стоящая слева, строго положительна ( $\sin x \neq 1$ , иначе бы символ  $\lg_{\sin x} 2$  потерял смысл), то  $\lg_2 a < 0$  и, следовательно, при  $a > 1$  уравнение вообще не имеет

решений. Считая  $0 < a < 1$ , получаем:

$$\lg_2 \sin x = \pm \sqrt{-\frac{\lg_2 a}{2}}.$$

Знак плюс перед радикалом отбрасываем, так как  $\lg_2 \sin x < 0$ . Тогда

$$\sin x = 2^{-\sqrt{-\frac{\lg_2 a}{2}}}$$

и

$$x = (-1)^k \arcsin 2^{-\sqrt{-\frac{\lg_2 a}{2}}} + \pi k \quad (k=0, \pm 1, \dots).$$

Легко видеть, что вся эта бесконечная серия значений удовлетворяет исходному уравнению.

128. Потенцируя второе уравнение, будем иметь:

$$y - x = 4. \quad (1)$$

Подставив отсюда  $y = 4 - x$  в первое уравнение, получим:

$$3^x \cdot 2^x = 36.$$

Следовательно,  $6^x = 36$  и  $x = 2$ . Из уравнения (1) находим, что  $y = 6$ .

129. Из второго уравнения находим:

$$x + y = \frac{2}{x - y}. \quad (1)$$

Подставив это выражение для  $x + y$  в первое уравнение получим:

$$1 - \lg_2(x - y) - \lg_2(x - y) = 1$$

или

$$\lg_2(x - y) + \lg_2(x - y) = 0.$$

Переходя к логарифмам по основанию 3, преобразуем последнее уравнение к виду

$$(\lg_2 3 + 1) \lg_2(x - y) = 0.$$

Так как  $\lg_2 3 + 1 \neq 0$ , то отсюда  $\lg_2(x - y) = 0$  и  $x - y = 1$ . Вместе с уравнением (1) это дает систему

$$x + y = 2, \quad x - y = 1.$$

Решив ее, получим:

$$x = \frac{3}{2}, \quad y = \frac{1}{2}.$$

Проверкой убеждаемся в том, что найденная пара чисел является решением исходной системы.

130. Логарифмируя первое уравнение по основанию  $c$ , удем иметь:

$$a \lg_c x = b \lg_c y. \quad (1)$$

Из второго уравнения находим:

$$\lg_c x - \lg_c y = \frac{\lg_c x}{\lg_c y}.$$

одставляя сюда  $\lg_c y$  из уравнения (1), получаем:

$$\lg_c x - \frac{a}{b} \lg_c x = \frac{b}{a}, \text{ или } \lg_c x^{1 - \frac{a}{b}} = \frac{b}{a}.$$

отенцируя, получаем:

$$x^{\frac{b-a}{b}} = c^{\frac{b}{a}}, \text{ или } x = c^{\frac{b^2}{a(b-a)}}.$$

Из первого уравнения системы теперь находим:

$$y = x^{\frac{a}{b}} = c^{\frac{b}{b-a}}.$$

131. Пользуясь логарифмическим тождеством  $a^{\lg_a b} = b$ , апишем систему в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \lg_5 x + y &= 7, \\ x^y &= 5^{12}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

отенцируя первое уравнение, получим  $x \cdot 5^y = 5^7$ , откуда

$$x = 5^{7-y}. \quad (2)$$

одставляя  $x$  из уравнения (2) во второе уравнение системы), получаем уравнение  $5^{12+y^2-7y} = 1$ , имеющее корни

$$y_1 = 4, \quad y_2 = 3.$$

В результате мы приходим к двум решениям:

$$x_1 = 125, \quad y_1 = 4; \quad x_2 = 625, \quad y_2 = 3.$$

132. Логарифмируя первое уравнение по основанию  $y$ , почим относительно  $\lg_y x$  квадратное уравнение

$$2 \lg_y^2 x - 5 \lg_y x + 2 = 0,$$

еющее корни

$$\lg_y x = 2, \quad \lg_y x = \frac{1}{2}.$$

Если  $\lg_y x = 2$ , то

$$x = y^2. \quad (1)$$

Из второго уравнения, в силу тождества  $\lg_a b = \frac{1}{\lg_b a}$ , лучим  $\lg_y (y - 3x) = \lg_y 4$ , откуда

$$y - 3x = 4. \quad (2)$$

Полученное уравнение вместе с (1) дает квадратное уравнение для определения  $y$ :

$$3y^2 - y + 4 = 0.$$

Так как по условию  $y > 0$ , то, решив уравнение, получим  $y_1 = \frac{4}{3}$ , после чего из формулы (1) находим  $x_1 = \frac{16}{y}$ . Если же  $\lg_y x = \frac{1}{2}$ , то  $x = \sqrt{y}$  и  $y = x^2$ . В этом случае в силу (1) получим уравнение

$$x^2 - 3x - 4 = 0.$$

В результате найдем еще одно решение:

$$x_2 = 4, \quad y_2 = 16.$$

**133.** Логарифмируя первое уравнение по основанию найдем:

$$x + y \lg_a b = 1 + \lg_a b. \quad (1)$$

Во втором уравнении перейдем к логарифмам по основанию  $T$ . Тогда

$$2 \lg_a x = -\frac{\lg_a y}{\lg_a b} \frac{\lg_a b}{\lg_a \sqrt{a}} = -2 \lg_a y.$$

Отсюда  $x = \frac{1}{y}$ . Подставив  $y = \frac{1}{x}$  в (1), получим уравнение

$$x^2 - x(1 + \lg_a b) + \lg_a b = 0,$$

имеющее корни

$$x_1 = \lg_a b \quad \text{и} \quad x_2 = 1.$$

Окончательный ответ:

$$x_1 = \lg_a b, \quad y_1 = \lg_b a; \quad x_2 = 1, \quad y_2 = 1.$$

**134.** В первом уравнении перейдем к основанию  $x$ ; тогда уравнение примет вид

$$3 \left( \lg_x y + \frac{1}{\lg_x y} \right) = 10.$$

Положив здесь  $\lg_x y = t$ , получим уравнение

$$3t^2 - 10t + 3 = 0,$$

имеющее корни  $t_1 = 3$  и  $t_2 = \frac{1}{3}$ . В первом случае  $\lg_x y = 3$  и  $y = x^3$  и, в силу второго уравнения исходной системы

$4 = 81$ . Так как  $x > 0$  и  $y > 0$ , то мы получаем при этом лишь одно решение:

$$x_1 = 3, \quad y_1 = 27.$$

олагая затем  $\lg_x y = \frac{1}{3}$ , находим еще одно решение:

$$x_2 = 27, \quad y_2 = 3.$$

135. Перейдем в каждом уравнении системы к логарифмам по основанию 2. В результате получим систему

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lg_2 x}{\lg_2 12} (\lg_2 x + \lg_2 y) &= \lg_2 x, \\ \lg_2 x \cdot \frac{\lg_2 (x+y)}{\lg_2 3} &= 3 \frac{\lg_2 x}{\lg_2 3}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

так как  $x \neq 1$  (в противном случае левая часть первого уравнения исходной системы не имела бы смысла), то  $\lg_2 x \neq 0$  систему (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \lg_2 x + \lg_2 y &= \lg_2 12, \\ \lg_2 (x + y) &= 3. \end{aligned}$$

отенцируя, получаем:

$$xy = 12, \quad x + y = 8,$$

откуда

$$x_1 = 6, \quad y_1 = 2; \quad x_2 = 2, \quad y_2 = 6.$$

136. Логарифмируя обе части первого уравнения по основанию 10, получим:

$$2 + x \lg 2 = y \lg 5. \quad (1)$$

Во втором уравнении перейдем к логарифмам по основанию 10; тогда

$$\lg (2x + 1) = \lg y$$

, следовательно,

$$y = 2x + 1. \quad (2)$$

Подставляя  $y$  из (2) в (1) и пользуясь тем, что  $\lg 5 = 1 - \lg 2$ , получаем:

$$x = \frac{1 + \lg 2}{2 + 3 \lg 2}.$$

Теперь из (2) легко находим:

$$y = \frac{4 + 5 \lg 2}{2 + 3 \lg 2}.$$

137. Переходя в каждом из уравнений системы к логарифмам по основанию 2, получим:

$$\left. \begin{aligned} x \lg_2 y &= y \sqrt{y} (1 - \lg_2 x), \\ 2 \lg_2 x &= 3 \lg_2 y. \end{aligned} \right\}$$

Из второго уравнения системы (1) находим  $x^2 = y^3$ , откуда

$$x = y^{\frac{3}{2}}.$$

Используя (2), из первого уравнения найдем  $y = \sqrt[5]{4}$ . Следовательно,

$$x = 2^{\frac{3}{5}}, \quad y = 2^{\frac{2}{5}}.$$

138. Потенцируя второе уравнение, получим:

$$xy = 16.$$

Полагая  $\lg_y x = t$ , запишем первое уравнение в виде

$$t^2 - 2t - 3 = 0.$$

Отсюда  $t_1 = -1$ ,  $t_2 = 3$ . В первом случае имеем  $x = \frac{1}{y}$ , что противоречит уравнению (1). Во втором случае  $x = y^3$ . Решая это уравнение совместно с уравнением (1), найдем  $x_1 = y_1 = 2$ .

139. Пользуясь тождеством

$$\lg_y 2 = \frac{\lg_x 2}{\lg_x y},$$

запишем первое уравнение системы в виде

$$2 \lg_x 2 + 3 \frac{\lg_x 2}{\lg_x y} = 0.$$

Так как  $\lg_x 2 \neq 0$ , то отсюда  $\lg_x y = -\frac{3}{2}$  и, следовательно

$$y = x^{-\frac{3}{2}}.$$

Подставляя это значение во второе уравнение, получим  $x^2 - 4x^{-3} = 0$ , или  $x^5 = 4$ ; отсюда

$$x = \sqrt[5]{4}, \quad y = \frac{\sqrt[5]{2}}{2}.$$

140. Преобразуем систему, переходя в первом уравнении к основанию 2, во втором — к основанию 3 и в третьем

к основанию 4. Получим:

$$\lg_2 x + \frac{1}{2} \lg_2 y + \frac{1}{2} \lg_2 z = \lg_2 4,$$

$$\lg_2 y + \frac{1}{2} \lg_2 z + \frac{1}{2} \lg_2 x = \lg_2 9,$$

$$\lg_2 z + \frac{1}{2} \lg_2 x + \frac{1}{2} \lg_2 y = \lg_2 16.$$

Потенцируя, приходим к системе

$$\left. \begin{aligned} x\sqrt{yz} &= 4, \\ y\sqrt{xz} &= 9, \\ z\sqrt{xy} &= 16. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Перемножая уравнения системы (1) почленно, найдем:

$$(xyz)^2 = 24^2.$$

Так как  $x > 0$ ,  $y > 0$ ,  $z > 0$ , то

$$xyz = 24. \quad (2)$$

Возводя первое уравнение системы (1) в квадрат и используя (2), получим:

$$x = \frac{16}{24} = \frac{2}{3}.$$

Аналогично находим  $y = \frac{27}{8}$  и  $z = \frac{32}{3}$ . Проверкой убеждаемся, что найденные три числа образуют решение.

141. Переходя к основанию 2 в первом уравнении, а затем потенцируя, получаем:

$$y^2 - xy = 4. \quad (1)$$

Уравнение (1) вместе со вторым уравнением исходной системы дает систему

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 &= 25, \\ y^2 - xy &= 4. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Эта система имеет два решения, удовлетворяющие условиям  $y > x$ ,  $y > 0$ , а именно:

$$x_1 = -\frac{7}{\sqrt{2}}, \quad y_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}; \quad x_2 = 3, \quad y_2 = 4.$$

142. Логарифмируя первое уравнение системы, получим:

$$\lg x + \lg y = \lg a. \quad (1)$$

Выражая из уравнения (1)  $\lg x$  через  $\lg y$  и подставляя

во второе уравнение, получаем относительно  $\lg y$  квадратное уравнение

$$2 \lg^2 y - 2 \lg a \cdot \lg y - \frac{3}{2} \lg^2 a = 0,$$

имеющее корни  $(\lg y)_1 = \frac{3}{2} \lg a$  и  $(\lg y)_2 = -\frac{1}{2} \lg a$ .

В первом случае  $y_1 = a^{\frac{3}{2}}$ , а соответствующее значение  $x$  находим из первого уравнения исходной системы  $x_1 = a^{-\frac{1}{2}}$ .

Во втором случае  $y_2 = a^{-\frac{1}{2}}$  и  $x_2 = a^{\frac{3}{2}}$ .

143. Подставив  $y$  из второго уравнения в первое, получим:

$$x^{x + \frac{1}{x^2}} = x^{-2x + \frac{2}{x^2}}.$$

Отсюда либо  $x = 1$ , либо

$$x + \frac{1}{x^2} = -2x + \frac{2}{x^2}$$

и, следовательно,

$$x = \frac{1}{\sqrt[3]{3}}.$$

Ответ:

$$x_1 = y_1 = 1, \quad x_2 = \frac{1}{\sqrt[3]{3}}, \quad y_2 = \sqrt[3]{9}.$$

144. Положив  $a^x = u$ ,  $a^y = v$ , запишем систему в следующем виде:

$$\begin{aligned} u^2 + v^2 &= 2b, \\ uv &= c. \end{aligned}$$

Из этих двух уравнений следует:

$$(u + v)^2 = 2(b + c), \quad (u - v)^2 = 2(b - c).$$

Так как искомые значения  $u$  и  $v$  должны быть положительны, то первое уравнение сводится к уравнению

$$u + v = \sqrt{2(b + c)}. \quad (1)$$

Второе уравнение показывает, что для разрешимости системы необходимо потребовать, кроме положительности чисел  $b$  и  $c$ , выполнения неравенства.

$$b \geq c. \quad (2)$$

При этом

$$u - v = \pm \sqrt{2(b-c)}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1) и (3), в случае знака плюс найдем:

$$u_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sqrt{b+c} + \sqrt{b-c}),$$

$$v_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sqrt{b+c} - \sqrt{b-c}).$$

Во втором случае получаем:

$$u_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sqrt{b+c} - \sqrt{b-c}),$$

$$v_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sqrt{b+c} + \sqrt{b-c}).$$

Мы нашли два решения системы (1), причем при выполнении условия (2) все значения неизвестных, очевидно, положительны. Два соответствующих решения исходной системы имеют вид

$$x_1 = \lg_a u_1, \quad y_1 = \lg_a v_1; \quad x_2 = \lg_a u_2, \quad y_2 = \lg_a v_2.$$

Мы можем теперь утверждать, что для разрешимости системы необходимо и достаточно, чтобы  $b > 0$ ,  $c > 0$  и  $b \geq c$ . При выполнении этих условий система имеет два решения.

145. Перемножив оба уравнения, получим:

$$(xy)^{x+y} = (xy)^{2n}.$$

Отсюда ввиду положительности  $x$  и  $y$  следует:

$$x + y = 2n. \quad (1)$$

В силу этого первое уравнение принимает вид

$$x^{2n} = y^n,$$

откуда

$$y = x^2. \quad (2)$$

Подставляя отсюда  $y$  в левую часть (1), получаем:

$$x^2 + x - 2n = 0.$$

то уравнение имеет единственный положительный корень

$$x = \frac{\sqrt{8n+1} - 1}{2}.$$

Соответствующее значение  $y$  находим, используя (2):

$$y = \frac{1}{4} (\sqrt{8n+1} - 1)^2.$$

146. Преобразуем систему к виду

$$\begin{aligned} (3x+y)^{x-y} &= 9, \\ \sqrt[x-y]{324} &= 2(3x+y)^2. \end{aligned}$$

Из второго уравнения находим:

$$324 = 2^{x-y} (3x+y)^{2(x-y)}$$

и, следовательно, в силу первого уравнения

$$324 = 2^{x-y} \cdot 81.$$

Отсюда  $2^2 = 2^{x-y}$ , т. е.

$$x - y = 2. \quad (1)$$

Решая уравнение (1) вместе с первым уравнением исходной системы, приходим к двум системам:

$$1) \begin{cases} x - y = 2, \\ 3x + y = 3; \end{cases} \quad 2) \begin{cases} x - y = 2, \\ 3x + y = -3. \end{cases}$$

Решение первой системы:  $x_1 = \frac{5}{4}, y_1 = -\frac{3}{4}.$

Решение второй системы:  $x_2 = -\frac{1}{4}, y_2 = -\frac{3}{4}.$

Проверкой убеждаемся, что обе пары чисел удовлетворяют исходной системе.

147. Положим  $\frac{q}{p} = \alpha$ . Если  $\alpha = 1$ , т. е.  $p = q$ , то система удовлетворяется любой парой равных положительных чисел. Будем поэтому считать  $\alpha \neq 1$ . Из второго уравнения получаем  $x = y^2$ . Логарифмируя первое уравнение и используя это равенство, будем иметь:

$$y \lg y (\alpha - y^{2-1}) = 0.$$

Так как  $y > 0$ , то либо  $\lg y = 0$ , либо  $\alpha = y^{\alpha-1}$ . В первом случае получаем  $x_1 = 1, y_1 = 1$ . Во втором случае  $x_2 = \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}, y_2 = \alpha^{\frac{1}{\alpha-1}}$ . Обе пары чисел удовлетворяют и исходной системе.

148. Логарифмируя оба уравнения, получим систему

$$\begin{cases} y \lg x = x \lg y, \\ x \lg p = y \lg q. \end{cases} \quad (1)$$

из которой определяем отношение  $\frac{x}{y} = \frac{\lg q}{\lg p} = a$ ; следовательно,

$$x = ay. \quad (2)$$

Если  $p = q$ , то система имеет бесконечное число решений вида  $x = y = a$ , где  $a > 0$  любое. Если  $p \neq q$ , то, подставив  $x$  из формулы (2) в первое уравнение системы (1), найдем:

$$x = a^{\frac{a}{a^2-1}}, \quad y = a^{\frac{1}{a^2-1}}.$$

Следовательно, при условии  $p \neq q$  система имеет единственное решение.

149. Логарифмируя обе части равенства  $a^2 = c^2 - b^2$ , получаем:

$$2 = \lg_a(c-b) + \lg_a(c+b).$$

Отсюда  $2 = \frac{1}{\lg_{c-b} a} + \frac{1}{\lg_{c+b} a}$  и, следовательно,

$$\lg_{c+b} a + \lg_{c-b} a = 2 \lg_{c+b} a \cdot \lg_{c-b} a.$$

150. Используя формулу  $\lg_n m = \frac{1}{\lg_m n}$ , легко получим:

$$\lg_{b^{2^k}} \frac{1}{a} = 2^k \lg_b a \quad \text{и} \quad \lg_{a^{2^k}} b = \frac{1}{2^k} \lg_a b,$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n (\lg_{b^{2^k}} \frac{1}{a} - \lg_{a^{2^k}} b)^2 &= \sum_{k=0}^n \left( 2^k \lg_b a - \frac{1}{2^k} \lg_a b \right)^2 = \\ &= \lg_b^2 a \sum_{k=0}^n 4^k + \lg_a^2 b \sum_{k=0}^n \frac{1}{4^k} - \sum_{k=0}^n 2 = \\ &= \frac{4^{n+1} - 1}{4 - 1} \lg_b^2 a + \frac{\left(\frac{1}{4}\right)^{n+1} - 1}{\frac{1}{4} - 1} \lg_a^2 b - 2(n+1) = \\ &= \frac{1}{3} (4^{n+1} - 1) \lg_b^2 a + \frac{1}{3} (4^{n+1} - 1) \frac{1}{4^n} \lg_a^2 b - 2(n+1) = \\ &= \frac{1}{3} (4^{n+1} - 1) \left( \lg_b^2 a + \frac{1}{4^n \lg_b^2 a} \right) - 2(n+1). \end{aligned}$$

\*) Символ  $\sum_{k=0}^n a_k$  обозначает сумму  $a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_n$ .

$$151. a^{\frac{\lg_b \lg_b a}{\lg_b a}} = (a^{\lg_a b})^{\lg_b \lg_b a} = b^{\lg_b \lg_b a} = \lg_b a.$$

152. Имеем:

$$c = a_1 a_2 \dots a_n = a \cdot a q \dots (a q^{n-1}) = a^n q^{\frac{n(n-1)}{2}}.$$

Используя формулу перехода от одной системы логарифмов к другой, получаем:

$$\lg_c b = \frac{\lg_a b}{\lg_a c} = \frac{A}{n + \frac{n(n-1)}{2} \lg_a q}.$$

Но

$$\lg_a q = \frac{\lg_b q}{\lg_b a} = \frac{\lg_a b}{\lg_a b} = \frac{A}{B}.$$

Поэтому

$$\lg_c b = \frac{2AB}{2nB + n(n-1)A}.$$

153. Используя равенство  $\lg_a b = \frac{1}{\lg_b a}$ , преобразуем данную формулу следующим образом:

$$\frac{\lg_N c}{\lg_N a} = \frac{\frac{1}{\lg_a a} - \frac{1}{\lg_a b}}{\frac{1}{\lg_a b} - \frac{1}{\lg_a c}} = \frac{\lg_N \frac{b}{a}}{\lg_N \frac{c}{b}} \cdot \frac{\lg_N c}{\lg_N a}.$$

Отсюда следует:

$$\lg_N \frac{b}{a} = \lg_N \frac{c}{b}, \quad (1)$$

ибо множитель  $\frac{\lg_N c}{\lg_N a} \neq 0$ . Потенцируя равенство (1), получаем:

$$\frac{b}{a} = \frac{c}{b}. \quad (2)$$

Таким образом,  $b$  есть средняя пропорциональная между  $a$  и  $c$ . Логарифмируя далее равенство (2) по любому основанию  $N$  и проводя выкладки в обратном порядке, мы завершим доказательство предлагаемого утверждения.

154. Следует считать, что  $N \neq 1$ , иначе дробь в правой части становится неопределенной. Разделив подлежащее  $d$

казательству тождество на  $\lg_a N \lg_b N \lg_c N$ , мы заменим его следующим эквивалентным:

$$\frac{1}{\lg_a N} + \frac{1}{\lg_b N} + \frac{1}{\lg_c N} = \frac{1}{\lg_{abc} N}.$$

Перейдя здесь к логарифмам по основанию  $N$ , получим:

$$\lg_N a + \lg_N b + \lg_N c = \lg_N abc.$$

Так как последнее тождество, очевидно, имеет место, то задача решена.

155. Логарифмируя тождество  $a^{\lg_a x} = x$  ( $x \neq 1$ ) по основанию  $ab$ , получим:

$$\lg_a x \cdot \lg_{ab} a = \lg_{ab} x.$$

Но  $\lg_{ab} a = \frac{\lg_a a}{\lg_a ab} = \frac{1}{1 + \lg_a b}$ . Поэтому

$$\frac{\lg_a x}{\lg_{ab} x} = 1 + \lg_a b,$$

что и требовалось доказать.

156. Пользуясь логарифмическим тождеством  $\lg_b a = \frac{\lg_c a}{\lg_c b}$ , преобразуем левую часть данного неравенства следующим образом:

$$\begin{aligned} \lg_{\frac{1}{2}} x + \lg_3 x &= \frac{\lg_3 x}{\lg_3 \frac{1}{2}} + \lg_3 x = \lg_3 x (\lg_{\frac{1}{2}} 3 + 1) = \\ &= \lg_3 x \cdot \lg_{\frac{1}{2}} \frac{3}{2} = \frac{\lg_3 x}{\lg_3 \frac{1}{2}} = -\frac{\lg_3 x}{\lg_3 2}. \end{aligned}$$

огда данное неравенство примет вид

$$-\frac{\lg_3 x}{\lg_3 2} > 1.$$

ак как  $2 > 1$  и  $\frac{3}{2} > 1$  и по свойству логарифмов  $\lg_{\frac{3}{2}} 2 > 0$ , о, следовательно, предыдущее неравенство эквивалентно

неравенству

$$\lg_a x < -\lg_{\frac{3}{2}} 2.$$

Отсюда, заметив еще, что по смыслу задачи  $x > 0$ , окончательно получаем:

$$0 < x < 3^{\frac{-\lg_3 2}{2}}.$$

157. Так как  $x > 0$ , то данное неравенство равносильно неравенству

$$x^{\lg_a x} > a^2.$$

Но  $a > 1$ , поэтому, логарифмируя последнее неравенство по основанию  $a$  (эта операция также приводит к равносильному неравенству), получим:

$$\lg_a^2 x > 2.$$

Отсюда окончательно находим:

либо  $\lg_a x > \sqrt{2}$  и, следовательно,  $x > a^{\sqrt{2}}$ ;

либо  $\lg_a x < -\sqrt{2}$  и тогда  $0 < x < a^{-\sqrt{2}}$ .

158. По смыслу задачи  $x > 0$ , поэтому данное неравенство равносильно неравенству

$$\lg_a x(x+1) < \lg_a(2x+6).$$

Так как  $a > 1$ , то отсюда  $x(x+1) < 2x+6$ , или

$$x^2 - x - 6 < 0.$$

Решая это квадратное неравенство при условии  $x > 0$  получаем:

$$0 < x < 3.$$

159. По смыслу задачи  $x > 0$  и, значит, данное неравенство равносильно неравенству

$$x^{3-\lg_2^2 x - 2\lg_2 x} > 1.$$

Логарифмируем это неравенство по основанию 2 и положи  $y = \lg_2 x$ ; получим равносильное неравенство

$$y(3 - y^2 - 2y) > 0,$$

которое после разложения квадратного трехчлена на множители можно записать в виде

$$y(1 - y)(3 + y) > 0.$$

Это неравенство выполнено тогда и только тогда, когда либо все три сомножителя положительны, либо один из них положителен, а два других отрицательны. В первом случае, т. е. когда

$$y > 0, 1 - y > 0, 3 + y > 0,$$

находим  $0 < y < 1$  и, следовательно,

$$1 < x < 2. \quad (1)$$

Второй случай подразделяется на три подслучая, причем непротиворечивая система неравенств получается только в одном подслучае, а именно когда

$$y < 0, 1 - y > 0, 3 + y < 0.$$

Отсюда  $y < -3$  и, значит,

$$0 < x < \frac{1}{8}. \quad (2)$$

Таким образом, исходное неравенство имеет место тогда и только тогда, когда либо

$$0 < x < \frac{1}{8},$$

либо

$$1 < x < 2.$$

160. Положив  $\lg_2 x = y$  и заметив, что  $\lg_x 2 = \frac{1}{\lg_2 x} = \frac{1}{y}$ , перепишем данное неравенство в виде

$$y + \frac{1}{y} + 2 \cos \alpha \leq 0. \quad (1)$$

Число  $z = y + \frac{1}{y}$  имеет тот же знак, что и число  $y$ , и  $|z| \geq 2$  при всех  $y$  (см. (2), стр. 20). Поэтому если  $z > 0$ , то неравенство  $z \leq -2 \cos \alpha$  может быть выполнено только в том случае, если  $z = 2$  ( $y = 1$ ) и  $\cos \alpha = -1$ , т. е. если в исходном неравенстве  $x = 2$  и  $\alpha = (2k + 1)\pi$ , ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). При этих значениях имеет место знак равенства.

Если же  $z < 0$ , т. е.  $y < 0$ , то  $z \leq -2$  и неравенство (1) выполнено при всех  $\alpha$ , откуда следует, что исходное неравенство выполняется, кроме уже найденных значений, при  $0 < x < 1$  и всех вещественных значениях  $\alpha$ .

161. Используя известное свойство логарифмической функции с основанием, меньшим единицы, получаем:

$$0 < \lg_4 (\sin x + 2\sqrt{2} \cos x) < 1$$

и, следовательно,

$$1 < \sin x + 2\sqrt{2} \cos x < 4.$$

Заметив, что  $\sqrt{1 + (2\sqrt{2})^2} = 3$ , преобразуем сумму тригонометрических функций, введя вспомогательный угол  $\varphi = \arctg 2\sqrt{2}$ :

$$\begin{aligned} \sin x + 2\sqrt{2} \cos x &= 3 \left[ \sin x \cdot \frac{1}{3} + \cos x \cdot \frac{2\sqrt{2}}{3} \right] = \\ &= 3 \sin(x + \varphi). \end{aligned}$$

Следовательно, данное неравенство равносильно неравенству  $\frac{1}{3} < \sin(x + \varphi) < \frac{4}{3}$ . Неравенство  $\sin(x + \varphi) < \frac{4}{3}$  выполняется при всех значениях  $x$ . Неравенство  $\sin(x + \varphi) > \frac{1}{3}$  имеет общее решение

$$\begin{aligned} 2k\pi + \arcsin \frac{1}{3} - \varphi < x < \pi - \arcsin \frac{1}{3} + 2k\pi - \varphi \\ (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \end{aligned}$$

### 5. Комбинаторика и бином Ньютона

162. Записав отдельно отношения первого члена пропорции ко второму и второго к третьему, после сокращения получим:

$$\begin{aligned} \frac{(n+1)!}{(m+1)!(n-m)!} : \frac{(n+1)!}{m!(n-m+1)!} &= \frac{n-m+1}{m+1}, \\ \frac{(n+1)!}{m!(n-m+1)!} : \frac{(n+1)!}{(m-1)!(n-m+2)!} &= \frac{n-m+2}{m}. \end{aligned}$$

В силу условия задачи мы приходим к двум уравнениям:

$$\frac{n-m+1}{m+1} = 1, \quad \frac{n-m+2}{m} = \frac{5}{3}.$$

Решив их совместно, найдем  $m = 3$ ,  $n = 6$ .

163. Имеем:

$$\begin{aligned} (1 + x^2 - x^3)^6 &= 1 + C_6^1(x^2 - x^3) + C_6^2(x^2 - x^3)^2 + \\ &+ C_6^3(x^2 - x^3)^3 + C_6^4(x^2 - x^3)^4 + C_6^5(x^2 - x^3)^5 + \dots \\ &\dots + (x^2 - x^3)^6. \end{aligned}$$

Рассматривая слагаемые правой части, легко заметить, что  $x^3$  содержится лишь в четвертом и пятом членах. Используя это, без труда находим коэффициент при  $x^3$ . Он равен  $3C_3^3 + C_4^3$ .

164. Слагаемые данной суммы образуют прогрессию со знаменателем  $1+x$ . Поэтому

$$(1+x)^k + (1+x)^{k+1} + \dots + (1+x)^n = \frac{(1+x)^{n+1} - (1+x)^k}{x}. \quad (1)$$

Записав эту же сумму в виде многочлена

$$a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m + \dots + a_nx^n,$$

и раскрыв скобки в правой части равенства (1), получим: если  $m < k$ , то

$$a_m = C_{n+1}^{m+1} - C_k^{m+1};$$

если же  $m \geq k$ , то

$$a_m = C_{n+1}^m.$$

165. Из условия задачи следует:

$$C_n^2 = C_n^1 + 44, \quad \text{или} \quad \frac{n(n-1)}{2} = n + 44.$$

Решив это уравнение относительно  $n$ , найдем  $n=11$ .

Общий член разложения

$$\left(x\sqrt{x} + \frac{1}{x^2}\right)^{11}$$

можно записать в виде

$$C_{11}^m x^{\frac{3}{2}(11-m) - 4m}.$$

По условию задачи  $\frac{3}{2}(11-m) - 4m = 0$ , откуда  $m=3$ . Следовательно, искомый член равен  $C_{11}^3$ .

166. Неравенства  $T_{k+1} > T_k$  и  $T_{k+1} > T_{k+2}$  после упрощений принимают вид

$$\frac{\sqrt{3}}{k} > \frac{1}{101-k}, \quad \frac{1}{100-k} > \frac{\sqrt{3}}{k+1}.$$

Решив каждое из них относительно  $k$ , получим:

$$\frac{101\sqrt{3}}{\sqrt{3}+1} > k > \frac{100\sqrt{3}-1}{\sqrt{3}+1}. \quad (1)$$

Левая и правая части неравенства (1) — числа нецелые, а разность между ними равна единице. Поэтому существует лишь одно целое число  $k$ , удовлетворяющее неравенству (1). Заметив, что  $1,72 < \sqrt{3} < 1,73$ , прямым вычислением установим, что

$$64,64 > k > 63,135.$$

Следовательно,  $k = 64$ .

167. В разложение войдут:  $n$  членов вида  $x_i^2$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $n(n-1)$  членов вида  $x_i^2 x_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$ ) и, наконец,  $C_n^2$  членов вида  $x_i x_j x_k$ , где  $i, j, k$  — различные числа. Таким образом, число различных не подобных членов равно

$$n + n(n-1) + \frac{n(n-1)(n-2)}{6} = \frac{n(n+1)(n+2)}{6}.$$

168. Делителями числа  $q$  являются, очевидно, числа  $p_1, p_2, \dots, p_k$  и всевозможные их произведения по два, по три и т. д. Число таких делителей равно

$$C_k^0 + C_k^1 + \dots + C_k^k = 2^k.$$

Тот факт, что все полученные делители не равны между собой и что других делителей нет, следует из единственности представления числа в виде произведения простых чисел.

169. Подлежащее доказательству равенство имеет вид

$$1 + \frac{C_n^1}{2} + \frac{C_n^2}{3} + \dots + \frac{C_n^k}{k+1} + \dots + \frac{C_n^{n-1}}{n} + \frac{1}{n+1} = \frac{2^{n+1}-1}{n+1}$$

и равносильно равенству

$$1 + (n+1) + \frac{n+1}{2} C_n^1 + \frac{n+1}{3} C_n^2 + \dots + \frac{n+1}{k+1} C_n^k + \dots \\ \dots + \frac{n+1}{n} C_n^{n-1} + 1 = 2^{n+1}.$$

Так как

$$\frac{n+1}{k+1} C_n^k = \frac{n+1}{k+1} \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{(n+1)!}{(k+1)!(n-k)!} = C_{n+1}^k,$$

то левая часть последнего равенства равна

$$1 + C_{n+1}^1 + C_{n+1}^2 + \dots + C_{n+1}^{n+1} + \dots + C_{n+1}^n + 1 = \\ = (1 + 1)^{n+1} = 2^{n+1},$$

что и требовалось доказать.

170. Всякое деление колоды, указанное в условии, равносильно извлечению 16 нетузов из числа 32 нетузов и двух тузов из числа четырех тузов. Первое извлечение можно осуществить  $C_{32}^{16}$  способами, а второе —  $C_4^2$  способами. Так как каждое извлечение 16 нетузов можно скомбинировать с любым извлечением двух тузов, то общее число способов указанного деления колоды равно  $C_{32}^{16} C_4^2$ .

171. Искомое число померов равно числу размещений, которые можно образовать из 10 цифр по 5, т. е. равно  $10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6 = 30\,240$ .

172. Занумеруем некоторые  $n$  мест и будем образовывать разбиения, последовательно заполняя каждое из указанных мест парой элементов.

На первое место можно выбрать пару  $C_{2n}^2$  способами; после того как первая пара выбрана; вторую можно выбрать  $C_{2n-2}^2$  способами, третью  $C_{2n-4}^2$  способами и т. д. В результате мы придем к  $C_{2n}^2 C_{2n-2}^2 C_{2n-4}^2 \dots C_2^2$  разбиениям, в число которых войдут, однако, и все разбиения, отличающиеся порядком расположения пар. Следовательно, число интересующих нас разбиений равно

$$\frac{C_{2n}^2 C_{2n-2}^2 \dots C_2^2}{n!} = \frac{2n(2n-1)(2n-2)(2n-3)\dots 2 \cdot 1}{2^n n!} = \\ = (2n-1)(2n-3)\dots 3 \cdot 1.$$

Это произведение сокращенно иногда обозначают символом  $2n-1)!$

К тому же результату можно придти, рассуждая несколько иначе. Обозначим через  $k_n$  число разбиений для того случая, когда число элементов равно  $2n$ . Рассмотрим  $2n$  элементов. Поскольку порядок расположения пар несуществен, можно считать первой парой ту, которая содержит первый элемент. Пары, содержащие первый элемент, можно образовать  $2n-1$  способами. Остальные  $2(n-1)$  элементов при

выбранной первой паре можно разбить на пары  $k_{n-1}$  способами. Поэтому  $k_n = (2n-1)k_{n-1}$ . С помощью этого соотношения легко находим:

$$k_n = (2n-1)(2n-3)\dots 5 \cdot 3 \cdot 1.$$

173. Из общего числа  $n!$  перестановок нам надлежит вычесть те, в которых элементы  $a$  и  $b$  стоят рядом. Чтобы образовать такую перестановку, нужно взять некоторую перестановку из оставшихся  $n-2$  элементов (их всего  $(n-2)!$ ) и присоединить к выбранной перестановке два элемента  $a$  и  $b$  так, чтобы они оказались рядом. Это, очевидно, можно сделать  $2(n-1)$  способами (множитель 2 здесь связан с тем, что  $a$  и  $b$  можно переставить местами). Таким образом, число перестановок, в которых  $a$  и  $b$  стоят рядом, равно  $2(n-2)!(n-1)$ , а интересующее нас число равно

$$n! - 2(n-1)! = (n-1)!(n-2).$$

174. Если среди вынутых 5 билетов оказалось ровно два выигрышных, то остальные три — невыигрышные. Из 8 выигрышных билетов можно выбрать два  $C_8^2$  способами, из  $50-8=42$  невыигрышных билетов три можно выбрать  $C_{42}^3$  способами. Каждый способ выбора двух выигрышных билетов может сочетаться с любым из способов выбора трех невыигрышных. Поэтому общее число способов равно

$$C_8^2 \cdot C_{42}^3 = \frac{8 \cdot 7}{1 \cdot 2} \cdot \frac{42 \cdot 41 \cdot 40}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 326\,240.$$

Число способов выбора 5 билетов, при которых, по крайней мере (по меньшей мере), два будут выигрышными, равно сумме числа способов, при которых вынимается ровно два выигрышных, ровно три выигрышных, ровно четыре выигрышных и ровно пять выигрышных билетов. Следовательно, это число равно  $C_8^2 C_{42}^3 + C_8^3 C_{42}^2 + C_8^4 C_{42}^1 + C_8^5 \cdot 1 =$

$$= \frac{8 \cdot 7}{1 \cdot 2} \cdot \frac{42 \cdot 41 \cdot 40}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{8 \cdot 7 \cdot 6}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \frac{42 \cdot 41}{1 \cdot 2} + \frac{8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \cdot \frac{42}{1} + \frac{8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} =$$

$$= 326\,240 + 48\,216 + 2\,940 + 56 = 377\,452.$$

175. Рассмотрим параллелограмм  $ABCD$  (рис. 1). Проведено  $m$  прямых, параллельных  $AB$ . Если учесть еще стороны параллелограмма  $AB$  и  $CD$ , то получим  $m+2$  параллельны

линий  $l_1, l_2, \dots, l_{m+2}$  (линии занумерованы по порядку слева направо). Допустим пока, что прямые, параллельные  $BC$ , еще не проведены. Тогда  $l_1$  образует с каждой следующей линией, т. е.  $l_2, l_3, \dots, l_{m+2}$  по одному параллелограмму и всего, следовательно,  $m+1$  параллелограммов. Вторая линия  $l_2$  образует с  $l_3, l_4, \dots, l_{m+2}$  всего  $m$  параллелограммов (параллелограмм, образованный  $l_2$  с  $l_1$ , уже учтен);  $l_3$  образует  $m-1$  параллелограммов и т. д. Наконец,  $l_{m+1}$  образует единственный параллелограмм с  $l_{m+2}$ . Итак, рассмотренные отдельно прямые, параллельные  $AB$ , образуют  $s_1$  параллелограммов, причем

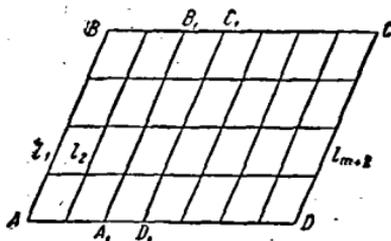


Рис. 1.

$$s_1 = 1 + 2 + \dots + (m+1) = \frac{(m+1)(m+2)}{2}.$$

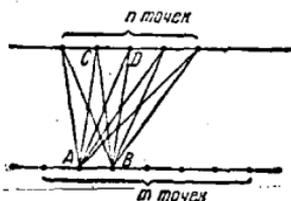
Проведем теперь  $m$  линий, параллельных  $BC$ , и рассмотрим произвольный из уже полученных  $s_1$  параллелограммов  $A_1B_1C_1D_1$ . Он пересечен  $m$  прямыми, параллельными  $BC$ . Повторяя проведенное выше рассуждение, мы найдем, что посредством этих  $m+2$  линий, параллельных  $BC$ , образуются  $\frac{(m+1)(m+2)}{2}$  параллелограммов. Всего, таким образом, имеем

$$\left[ \frac{(m+1)(m+2)}{2} \right]^2 \text{ параллелограммов.}$$

Возможно и другое решение. Каждый из рассматриваемых параллелограммов вполне определяется заданием двух противоположных вершин. Число способов выбора первой вершины равно числу всех точек пересечения проведенных параллельных линий, включая стороны, т. е. равно  $(m+2)^2$ . Ясно, что если первая вершина фиксирована, то для второй останется  $(m+1)^2$  возможностей. Таким образом получаем  $(m+1)^2(m+2)^2$  параллелограммов. Так как любая из четырех вершин каждого параллелограмма при этом способе подсчета могла быть взята в качестве первой, то каждый параллелограмм оказался сосчитанным ровно 4 раза. Следовательно, число различных параллелограммов равно

$$\frac{(m+1)^2(m+2)^2}{4}.$$

176. Пусть на верхней прямой расположено  $n$  точек, на нижней  $m$  точек (рис. 2). Подразделим все соединяющие отрезки на пучки отрезков, причем в один пучок объединим все отрезки, соединяющие фиксированную точку нижней прямой (например,  $A$ ) со всеми точками на верхней прямой. Ясно, что число таких пучков равно  $m$  и что число точек пересечения отрезков, принадлежащих каким-нибудь двум пучкам, одно и то же для любой пары пучков. Если это число обозначим через  $k_n$ , то общее число точек пересечения всех отрезков будет равно произведению  $k_n$  и число сочетаний пучков по два, т. е.



$$k_n C_m^2 = k_n \frac{m(m-1)}{2}.$$

Рис. 2.

Для подсчета числа  $k_n$  подразделим все отрезки, соединяющие  $n$  точек верхней прямой с двумя точками  $A$  и  $B$  нижней прямой, на пучки отрезков, объединив в один пучок два отрезка, соединяющих фиксированную точку верхней прямой (например,  $C$ ) с точками  $A$  и  $B$ . Число таких пучков равно  $n$ , а число точек пересечения отрезков, принадлежащих двум пучкам, равно единице (точка пересечения диагоналей трапеции  $ABCD$ ). Поэтому

$$k_n = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Следовательно, общее число точек пересечения всех отрезков, соединяющих  $n$  точек верхней прямой с  $m$  точками нижней прямой, равно

$$\frac{n(n-1)}{2} \frac{m(m-1)}{2}.$$

177. Ввиду того что в данном алфавите любому отдельному знаку (точке или тире) и любой паре знаков соответствует какая-то буква, число способов, которыми можно прочитать сплошную цепочку из  $n$  знаков, не зависит от конкретного строения этой цепочки и равно числу всевозможных разбиений образующих цепочку знаков на группы из одного или из двух рядом стоящих знаков. Обозначим это число через  $p_n$ .

Распределим всевозможные способы прочтения данной цепочки из  $n$  знаков по двум категориям.

К первой категории отнесем те способы, в которых один первый знак цепочки прочитывается как отдельная буква. Число способов первой категории равно числу способов прочтения цепочки из  $n - 1$  знаков (остающихся после отбрасывания первого), т. е. равно  $p_{n-1}$ .

Ко второй категории отнесем те способы, в которых два первых знака цепочки прочитываются как одна буква. Число способов второй категории равно числу способов прочтения цепочки из  $n - 2$  знаков (остающихся после отбрасывания первых двух), т. е. равно  $p_{n-2}$ .

Так как всякий способ прочтения данной цепочки принадлежит одной и только одной из двух указанных категорий, то общее число способов равно сумме числа способов первой категории и второй категории, т. е.

$$p_n = p_{n-1} + p_{n-2}. \quad (1)$$

Это равенство представляет собой рекуррентную формулу, по которой можно последовательно вычислить  $p_n$  для любого  $n$ , если только знать  $p_1$  и  $p_2$ . Но в данной задаче  $p_1 = 1$  (для цепочки из одного знака есть только один способ первой категории) и  $p_2 = 2$  (для цепочки из двух знаков есть два способа: один первой категории и один второй категории).

Пользуясь формулой (1), последовательно находим:

$$p_3 = p_2 + p_1 = 2 + 1 = 3,$$

$$p_4 = p_3 + p_2 = 3 + 2 = 5,$$

$$p_5 = p_4 + p_3 = 5 + 3 = 8$$

и т. д. Окончательно получаем:

$$p_{12} = 233.$$

## 6. Составление уравнений

178. Пусть  $x$  — меньший из сомножителей. Тогда из условий задачи непосредственно вытекает, что

$$x(x + 10) - 40 = 39x + 22$$

или

$$x^2 - 29x - 62 = 0,$$

откуда  $x_1 = 31$ ,  $x_2 = -2$ . Отрицательный корень отбрасываем, следовательно, множители равны 31 и 41.

179. До первой встречи первый велосипедист прошел  $s + a$  км, второй  $s - a$  км, где  $s$  — расстояние от  $A$  до  $B$ . До второй встречи они прошли соответственно  $2s + \frac{1}{k}s$  и  $2s - \frac{1}{k}s$  км.

Но если два тела движутся с постоянными скоростями, то отношение скоростей тел при равенстве затраченных времен равно отношению пройденных телами путей. Поэтому для нахождения  $s$  имеем уравнение

$$\frac{s + a}{s - a} = \frac{2 + \frac{1}{k}}{2 - \frac{1}{k}}.$$

Отсюда  $s = 2ak$  км.

180. Если два тела движутся с постоянными скоростями, то на одном и том же участке пути отношение их скоростей обратно отношению затраченных телами времен. Пусть  $v$  — скорость третьей машины,  $t$  — время движения второй машины до того момента, когда ее обогнала третья. Тогда

$$\frac{40}{v} = \frac{t - 0,5}{t}, \quad \frac{50}{v} = \frac{t + 1}{t + 1,5}.$$

Разделив первое уравнение почленно на второе, найдем  $t = \frac{3}{2}$  часа; затем определим  $v = 60$  км/час.

181. Пусть до встречи прошло  $x$  часов. Один и тот же путь от места встречи до пункта  $B$  велосипедист проехал за  $x$  часов, а пешеход прошел за  $x + t$  часов. Так как при равном пути времена обратно пропорциональны скоростям, то

$$\frac{x + t}{x} = k,$$

откуда

$$x = \frac{t}{k - 1}.$$

182. Обозначим расстояние от  $A$  до  $B$  через  $x$ , а расстояние от  $B$  до  $C$  через  $y$ . Тогда, учитывая, что время движения во всех случаях, о которых говорится в условиях задачи, одинаково, получим систему уравнений

$$\frac{x}{3,5} + \frac{y}{4} = \frac{x+y}{3,75},$$

$$\frac{x+y}{3,75} = \frac{14}{60} + \frac{y}{3,75} + \frac{x}{4}.$$

Решая эту систему, находим  $x = 14$  км,  $y = 16$  км.

183. Пусть  $x$  — длина дороги по ровному месту,  $y$  — длина дороги в гору. Имеем систему уравнений

$$\frac{y}{3} + \frac{x}{4} + \frac{11,5 - (x+y)}{5} = 2 \frac{9}{10},$$

$$\frac{11,5 - (x+y)}{3} + \frac{x}{4} + \frac{y}{5} = 3 \frac{1}{10}.$$

Сложив уравнения системы, найдем, что  $x = 4$ .

184. Обозначим через  $l$  расстояние между пунктами  $A$  и  $B$  и через  $v_1, v_2$  — скорости мотоциклов. За время  $t$  первый мотоцикл проехал путь, равный  $p + l - q$ , а второй — путь  $q + l - p$ . Поэтому

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{l+p-q}{t}, \\ v_2 &= \frac{l+q-p}{t}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

С другой стороны, отношение скоростей равно отношению путей, пройденных до первой встречи, т. е.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{l-p}{p}.$$

Подставив сюда  $v_1$  и  $v_2$  из (1), получим уравнение для определения  $l$ . Решив его, найдем  $l = 3p - q$ . Подставив это значение  $l$  в формулы (1), получим:

$$v_1 = \frac{4p - 2q}{t}, \quad v_2 = \frac{2p}{t}.$$

185. Разность между временами опоздания самолета в первом и втором рейсах, равная  $\frac{t_1 - t_2}{60}$  часов, связана с тем, что путь в  $d$  км был пройден с разными скоростями: в первом рейсе скорость была  $v$  км/час, во втором  $w$  км/час (на остальных участках пути скорости были соответственно равны). Отсюда получаем уравнение

$$\frac{t_1 - t_2}{60} = \frac{d}{v} - \frac{d}{w},$$

из которого находим, что начальная скорость самолета равна

$$w = \frac{60vd}{60d + v(t_2 - t_1)} \frac{\text{км}}{\text{час}}.$$

186. Обозначим вес отрезанного куска через  $x$ . Пусть первый кусок содержал  $100 a\%$  меди, а второй —  $100 b\%$  меди. Тогда весовое количество меди в первом куске после сплавления остатка от него с отрезком от второго будет равно  $a(m - x) + bx$ , а вес меди во втором куске после сплавления остатка от него с отрезком от первого куска будет равен  $b(n - x) + ax$ . По условию задачи

$$\frac{a(m - x) + bx}{m} = \frac{b(n - x) + ax}{n}.$$

Решив это уравнение, получим (учитывая, что  $a \neq b$ ):

$$x = \frac{mn}{m + n}.$$

187. Пусть отношение весов сплавливаемых кусков равно  $\alpha : \beta$ . Тогда

$$\frac{\frac{\alpha p}{100} + \frac{\beta q}{100}}{\alpha + \beta} = \frac{r}{100}.$$

Отсюда получаем:

$$\alpha : \beta = (r - q) : (p - r).$$

Решение возможно, если  $p > r > q$  или  $p < r < q$ .

Чтобы найти максимальный вес нового сплава, рассмотрим отношения  $\frac{P}{|r - q|}$  и  $\frac{Q}{|p - r|}$ .

Если  $\frac{P}{|r-q|} = \frac{Q}{|p-r|}$ , то максимальный вес равен

$$P + Q = \frac{p-q}{r-q} P = \frac{p-q}{p-r} Q.$$

Если  $\frac{P}{|r-q|} < \frac{Q}{|p-r|}$ , то максимальный вес равен

$$P + \frac{p-r}{r-q} P = \frac{p-q}{r-q} P.$$

Если, наконец,  $\frac{P}{|r-q|} > \frac{Q}{|p-r|}$ , то максимальный вес равен

$$Q + \frac{r-q}{p-r} Q = \frac{p-q}{p-r} Q.$$

188. Пусть каждый рабочий работал по  $t$  дней и пусть заработал  $x$  рублей, а  $B$  заработал  $y$  рублей. Из условий задачи получаем систему уравнений.

$$\left. \begin{aligned} (t-1) \frac{x}{t} &= 720, \\ (t-7) \frac{y}{t} &= 648, \\ (t-1) \frac{y}{t} - (t-7) \frac{x}{t} &= 324. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из первых двух уравнений находим:

$$\frac{t-1}{t} = \frac{720}{x}, \quad \frac{t-7}{t} = \frac{648}{y}.$$

тогда из последнего уравнения получаем:

$$720 \frac{y}{x} - 648 \frac{x}{y} = 324,$$

ли

$$20 \left( \frac{y}{x} \right)^2 - 9 \left( \frac{y}{x} \right) - 18 = 0.$$

тсюда  $y = \frac{6}{5} x$  (отрицательный корень отбрасываем).  
 Если теперь второе уравнение системы (1) на первое и

заменяя  $\frac{y}{x}$  его значением, находим:

$$\frac{6}{5} \cdot \frac{t-7}{t-1} = \frac{648}{720}, \quad \frac{t-7}{t-1} = \frac{3}{4}.$$

Отсюда  $t=25$  и, следовательно,

$$x=750 \text{ руб.}, \quad y=900 \text{ руб.}$$

189. Обозначим через  $t_1$  время, прошедшее до первой встречи, через  $t_2$  — время, прошедшее до второй встречи и через  $R$  — радиус окружности. За время  $t_1$  первое тело прошло путь  $vt_1$ , а второе — путь  $\frac{at_1^2}{2}$ . Сумма этих путей равна длине окружности, так что

$$vt_1 + \frac{at_1^2}{2} = 2\pi R. \quad (1)$$

За время  $t_2$  каждое тело прошло один и тот же путь, равный длине окружности, так что

$$vt_2 = 2\pi R, \quad \frac{at_2^2}{2} = 2\pi R.$$

Исключая отсюда  $t_2$ , найдем  $R = \frac{v^2}{\pi a}$ . Подставив это значение  $R$  в (1), получим квадратное уравнение относительно  $t$

$$\frac{at_1^2}{2} + vt_1 - \frac{2v^2}{a} = 0.$$

Решив это уравнение и отбросив отрицательный корень (так как по смыслу задачи должно быть  $t_1 > 0$ ), окончательно получим:

$$t_1 = (\sqrt{5} - 1) \frac{v}{a}.$$

190. Обозначим через  $q_1$  и  $q_2$  производительности кранов (в л/мин) и через  $v$  — объем бассейна. Время наполнения бассейна каждым из кранов будет равно

$$t_1 = \frac{v}{q_1}, \quad t_2 = \frac{v}{q_2}. \quad ($$

ервое условие задачи приводит к уравнению

$$q_1 \cdot \frac{1}{3} t_2 + q_2 \cdot \frac{1}{3} t_1 = \frac{13}{18} v.$$

Используя равенства (1), получим квадратное уравнение

$$\left(\frac{q_1}{q_2}\right)^2 - \frac{13}{6} \frac{q_1}{q_2} + 1 = 0,$$

решениями которого будут  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{2}{3}$ ,  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{3}{2}$ . Из второго условия задачи следует:

$$v = (3 \cdot 60 + 36)(q_1 + q_2) = 216(q_1 + q_2).$$

з (1) находим искомые величины:

$$t_1 = \frac{216(q_1 + q_2)}{q_1} = 540 \text{ мин. (9 час.)},$$

$$t_2 = \frac{216(q_1 + q_2)}{q_2} = 360 \text{ мин. (6 час.)}.$$

сть и второе решение:

$$t_1 = 360 \text{ мин.}, \quad t_2 = 540 \text{ мин.}$$

191. Обозначим через  $\gamma$  удельный вес воды, а через

площадь поперечного сечения трубки. Атмосферное давление  $p_a$  найдется по формуле

$$p_a = \gamma c.$$

и  $p_1$  — давление под поршнем поднятом положении, то, по закону Бойля—Мариотта, для воздуха, заключенного между поршнем и уровнем воды, имеем  $p_1(b-x)s = p_a h s$  (рис. 3). Уравнение равновесия столба жидкости имеет вид

$-p_1 = \gamma x$ . Это приводит к

уравнению  $c - \frac{hc}{b-x} = x$  ( $\gamma$  сокращается), т. е. к квадратному уравнению

$$x^2 - (b+c)x + (b-h)c = 0.$$

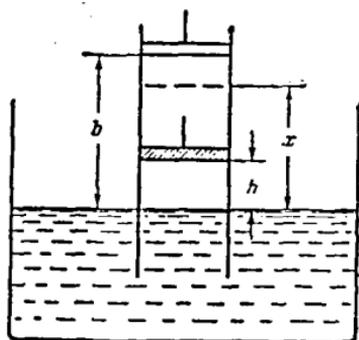


Рис. 3.

Отсюда находим:

$$x = \frac{1}{2} [(b+c) - \sqrt{(b-c)^2 + 4hc}].$$

192. Пусть  $p_1$  и  $p_2$  — давления воздуха, находящегося под поршнем, в положениях I и II соответственно (рис. 4) и  $\gamma$  — удельный вес ртути. Уравнения равновесия столбов ртути высотой 12 см и  $x$  см будут соответственно

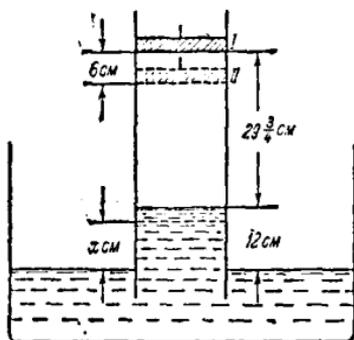


Рис. 4.

$$\left. \begin{aligned} 76\gamma - p_1 &= 12\gamma, \\ 76\gamma - p_2 &= x\gamma. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Закон Бойля — Мариотта для воздуха, находящегося под поршнем дает уравнение

$$p_1 \cdot 29 \frac{3}{4} = p_2 (36 - x).$$

Подставив сюда выражения для  $p_1$  и  $p_2$  из (1), получим квадратное уравнение для  $x$ :

$$29 \frac{3}{4} \cdot 64 = (76 - x)(36 - x),$$

или

$$x^2 - 112x + 832 = 0.$$

Отсюда  $x = 56 \pm \sqrt{3136 - 832} = 56 \pm \sqrt{2304} = 56 \pm 48$   
т. е.  $x = 8$  см.

193. Пусть часы спешат на  $x$  минут в сутки. Тогда они покажут верное время через  $\frac{2}{x}$  суток. Если бы они показывали на 3 минуты меньше, а спешили бы на  $x + \frac{1}{2}$  мин в сутки, то верное время они показали бы через  $\frac{3}{x + \frac{1}{2}}$  суток.

суток. Следовательно,

$$\frac{3}{x + \frac{1}{2}} + 1 = \frac{2}{x},$$

откуда

$$x^2 + \frac{3}{2}x - 1 = 0.$$

Решая это уравнение, найдем  $x = 0,5$ .

194. Если  $x$  — исходные суммы вкладчиков, а  $y$  — процент, выплачиваемый сберкассой, то

$$x + x \frac{y}{100} \frac{m}{12} = p, \quad x + x \frac{y}{100} \frac{n}{12} = q.$$

Умножая первое уравнение на  $n$ , второе на  $m$  и вычитая из первого второе, найдем:

$$x = \frac{pn - qm}{n - m}.$$

Возвращаясь снова к первоначальной системе и вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$\frac{xy}{1200}(m - n) = p - q.$$

Отсюда

$$y = \frac{1200(p - q)}{qm - pn} \%.$$

195. Обозначим через  $v_1$  и  $v_2$  скорости точек, и пусть  $v_1 > v_2$ . Первое условие задачи запишется уравнением

$$\frac{2\pi R}{v_2} - \frac{2\pi R}{v_1} = t.$$

второе условие означает, что за время  $T$  точка, движущаяся с большей скоростью, пройдет по окружности путь а  $2\pi R$  больший, чем другая точка. Это дает второе уравнение

$$Tv_1 - Tv_2 = 2\pi R.$$

Из второго уравнения находим:

$$v_2 = v_1 - \frac{2\pi R}{T}.$$

Подставив это выражение для  $v_2$  в первое уравнение, получим квадратное уравнение для  $v_1$ :

$$v_1^2 - \frac{2\pi R}{T} v_1 - \frac{2\pi R}{T} \cdot \frac{2\pi R}{t} = 0.$$

Решив его, найдем:

$$v_1 = \frac{\pi R}{T} \left( \sqrt{1 + \frac{4T}{t}} + 1 \right)$$

и затем

$$v_2 = \frac{\pi R}{T} \left( \sqrt{1 + \frac{4T}{t}} - 1 \right).$$

**196.** Пусть  $v$  — объем раствора в колбе,  $x$  — количество соли, содержащейся в растворе, в процентах.

В пробирку отливают  $\frac{v}{n}$  раствора и выпаривают до тех пор, пока процентное содержание соли не повысится вдвое. Так как количество соли при этом не изменяется, то, следовательно, объем раствора в пробирке уменьшится вдвое и вес выпаренной воды будет равен  $\frac{v}{2n}$ .

После переливания выпаренного раствора обратно в колбу в колбе снова будет то же количество соли, что и раньше т. е.  $v \frac{x}{100}$ , а объем раствора уменьшится на  $\frac{v}{2n}$ . Отсюда получаем уравнение

$$\frac{v \frac{x}{100}}{v - \frac{v}{2n}} = \frac{x+p}{100},$$

из которого находим:

$$x = (2n - 1)p.$$

**197.** Пусть в первом сосуде было  $x$  литров спирта; тогда во втором будет  $30 - x$  литров. После доливания первого сосуда водой в 1 л полученной смеси содержалось  $\frac{x}{30}$  спирт и  $1 - \frac{x}{30}$  воды. После переливания из первого сосуда во втором стало  $30 - x + \frac{x}{30}x$  литров спирта и  $\left(1 - \frac{x}{30}\right)$

литров воды. Эта новая смесь такова, что в одном литре смеси содержится

$$1 - \frac{x}{30} + \left(\frac{x}{30}\right)^2 \text{ литров спирта.}$$

После того как 12 л новой смеси было отлито в первый сосуд, в нем оказалось

$$12 \left[ 1 - \frac{x}{30} + \left(\frac{x}{30}\right)^2 \right] + \frac{x}{30} (30 - x) \text{ литров спирта,}$$

а во втором сосуде

$$18 \left[ 1 - \frac{x}{30} + \left(\frac{x}{30}\right)^2 \right] \text{ литров спирта.}$$

По условию

$$\begin{aligned} 18 \left[ 1 - \frac{x}{30} + \left(\frac{x}{30}\right)^2 \right] + 2 &= \\ &= 12 \left[ 1 - \frac{x}{30} + \left(\frac{x}{30}\right)^2 \right] + x - \frac{x^2}{30}, \end{aligned}$$

откуда получаем уравнение

$$x^2 - 30x + 200 = 0.$$

Это уравнение имеет корни

$$x_1 = 20, \quad x_2 = 10.$$

Итак, в первом сосуде было либо 20 л (и тогда во втором 10 л), либо 10 л (и тогда во втором 20 л).

198. Пусть  $x$  — расстояние от первого берега до того места, где  $C$  покинул лодку. Заметим сначала, что на таком же расстоянии от второго берега  $A$  сел в лодку. Действительно, способ, которым преодолели переправу  $A$  и  $C$ , отличается лишь тем, что  $C$  сначала ехал в лодке, а затем плыл,  $A$  — наоборот. Так как они плывут с одинаковой скоростью  $v$ , причем  $v \neq v_1$ , и затрачивают одинаковое время на переправу, то, очевидно, указанные расстояния должны быть равны.

После этого замечания легко составить уравнение

$$\frac{x + s - 2(s - x)}{v_1} = \frac{s - x}{v}.$$

Здесь левая часть выражает время, затраченное лодкой на преодоление пути до встречи с  $A$ , а правая часть — время которое затратил  $A$  до встречи с лодкой.

Из полученного уравнения находим:

$$x = \frac{s(v + v_1)}{3v + v_1}.$$

Отсюда время переправы

$$T = \frac{s - x}{v} + \frac{x}{v_1} = \frac{s v + 3v_1}{v_1 3v + v_1}.$$

Примечание. Можно было бы решить задачу и без предварительного замечания о равенстве указанных выше расстояний. При этом, однако, пришлось бы ввести несколько неизвестных и решение оказалось бы более громоздким.

199. Обозначим искомое расстояние через  $s$  км, скорость поезда через  $v$  км/час. За 6 часов до остановки, вызванной снежным заносом, поезд прошел  $6v$  км, а оставшуюся часть пути длиной  $(s - 6v)$  км он прошел за  $\frac{5(s - 6v)}{6v}$  часов, так как скорость поезда на этом участке пути была равна  $\frac{6}{5}$

Поезд был в пути всего (с учетом двухчасовой вынужденной стоянки)  $8 + \frac{5(s - 6v)}{6v}$  часов. Это число часов на один час больше положенных по расписанию  $\frac{s}{v}$  часов. Таким образом, получаем уравнение

$$8 + \frac{5(s - 6v)}{6v} = 1 + \frac{s}{v}.$$

Проведя аналогичное рассуждение относительно второго поезда, составим еще одно уравнение:

$$\frac{s}{v} + \frac{3}{2} = 8 + \frac{150}{v} + \frac{5(s - 6v - 150)}{6v}.$$

Из этой системы находим  $s = 600$  км.

200. Обозначая через  $v$  скорость лодки в стоячей воде, через  $w$  скорость течения, получим систему двух уравнений

$$\frac{a}{v+w} + \frac{a}{v-w} = T,$$

$$\frac{a}{v-w} = T_0 + \frac{a-b}{v+w} + \frac{2b}{v+w} = T_0 + \frac{a+b}{v+w}.$$

ешая эту систему относительно неизвестных  $\frac{1}{v-w}$  и  $\frac{1}{v+w}$  беря обратные величины, находим:

$$v+w = \frac{2a+b}{T-T_0} \quad \text{и} \quad v-w = \frac{a(2a+b)}{T(a+b)+T_0a}.$$

тсюда следует, что

$$v = \frac{1}{2} \left[ \frac{2a+b}{T-T_0} + \frac{a(2a+b)}{T(a+b)+T_0a} \right],$$

$$w = \frac{1}{2} \left[ \frac{2a+b}{T-T_0} - \frac{a(2a+b)}{T(a+b)+T_0a} \right].$$

201. Пусть  $x$  — время, в течение которого был открыт орой кран,  $v$  — скорость поступления воды из первого ана,  $w$  — скорость поступления воды из второго крана и  $w$  измеряются в  $л^3/час$ . Имеем:

$$v(x+5) + wx = 425,$$

$$2vx = w(x+5),$$

$$(v+w)17 = 425.$$

з второго и третьего уравнений получаем:

$$v = 25 \frac{x+5}{3x+5}; \quad w = \frac{50x}{3x+5}.$$

дставляя эти выражения в первое уравнение, находим:

$$3x^2 - 41x - 60 = 0,$$

куда  $x = 15$  час. (Второй корень, отрицательный, не готся.)

202. Обозначим искомую скорость поезда через  $v$  км/час, скорость поезда по графику — через  $v_1$  км/час. Первую ловину пути поезд проходил за  $\frac{10}{v_1}$  часов, на преодоление

второй половины и на стоянку поезд затратил в первый раз  $\frac{10}{v_1 + 10} + \frac{1}{20}$  часов и во второй раз  $\frac{10}{v} + \frac{1}{12}$  часов. Но оба раза поезд пришел в  $B$  вовремя, и поэтому

$$\frac{10}{v_1} = \frac{10}{v_1 + 10} + \frac{1}{20}, \quad \frac{10}{v} = \frac{10}{v} + \frac{1}{12}.$$

Из первого уравнения найдем  $v_1$ :

$$10 \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_1 + 10} \right) = \frac{1}{20}, \quad \frac{100}{v_1(v_1 + 10)} = \frac{1}{20},$$

$$v_1^2 + 10v_1 - 2000 = 0.$$

Это уравнение имеет только один положительный корень  $v_1 = 40$ .

Из второго уравнения найдем  $v$ :

$$\frac{10}{v} = \frac{1}{4} - \frac{1}{12} = \frac{1}{6}, \quad \text{т. е. } v = 60 \text{ км/час.}$$

203. Пусть расстояние  $AB$  равно  $s$  км, а скорости первого и второго самолетов равны  $v_1$  и  $v_2$ . Тогда, в сил условий задачи, имеем систему трех уравнений:

$$\frac{s}{2v_1} + \frac{a}{v_1} = \frac{s}{2v_2} - \frac{a}{v_2}, \quad (1)$$

$$\frac{s}{2v_2} - \frac{s}{2v_1} = b, \quad (2)$$

$$\frac{3s}{4v_1} - b = \frac{s}{4v_2}. \quad (3)$$

Положим

$$\frac{s}{2v_1} = x, \quad \frac{s}{2v_2} = y.$$

Из уравнений (2) и (3) найдем  $x = \frac{3}{2}b$ ,  $y = \frac{5}{2}b$ , а из первого  $a \left( \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right) = b$ . Но  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{x}{y} = \frac{3}{5}$ . Теперь уже не трудно найти, что  $v_1 = \frac{8a}{3b}$ ,  $v_2 = \frac{8a}{5b}$  и  $s = 8a$ .

204. Пусть  $u$  — скорость катера в стоячей воде, а  $v$  — скорость течения. Тогда имеем систему

$$\frac{96}{u+v} + \frac{96}{u-v} = 14,$$

$$\frac{24}{v} = \frac{96}{u+v} + \frac{72}{u-v}.$$

Для ее решения положим  $\frac{u}{v} = z$ . Умножив обе части второго уравнения на  $v$ , найдем:

$$24 = \frac{96}{z+1} + \frac{72}{z-1}.$$

Свобождаясь от знаменателей, получаем:

$$24z^2 - 168z = 0.$$

ак как  $z \neq 0$ , то  $z = 7$ . Следовательно,  $u = 7v$ . Подставляя  $u = 7v$  в первое уравнение системы, находим:

$$\frac{96}{8v} + \frac{96}{6v} = 14,$$

откуда

$$v = 2 \text{ км/час}, \quad u = 14 \text{ км/час}.$$

205. Путь, пройденный каждым телом за  $t$  сек, определяется формулой

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Чтобы найти  $v_0$  и  $a$  для каждого тела, подставляем в эту формулу приведенные в условиях задачи числовые данные:

1) для первого тела:

$$\text{при } t=1 \text{ имеем } 25 = v_0 + \frac{a}{2},$$

$$\text{при } t=2 \text{ имеем } 50 \frac{1}{3} = 2v_0 + 2a;$$

сюда  $a = \frac{1}{3}$ ,  $v_0 = 25 - \frac{1}{6}$  и

$$s_1 = 24 \frac{5}{6} t + \frac{t^2}{6};$$

2) для второго тела:

$$\text{при } t=1 \text{ имеем } 30 = v_0 + \frac{a}{2},$$

$$\text{при } t=2 \text{ имеем } 59 \frac{1}{2} = 2v_0 + 2a;$$

отсюда  $a = -\frac{1}{2}$ ,  $v_0 = 30 + \frac{1}{4}$  и

$$s_2 = 30 \frac{1}{4} t - \frac{t^2}{4}.$$

В тот момент, когда первое тело нагонит второе, будет  $s_1 = s_2 + 20$ ; отсюда получаем квадратное уравнение для определения  $t$ :

$$t^2 - 13t - 48 = 0.$$

Решая его, находим  $t = 16$ . Второй, отрицательный, корень отбрасываем.

206. Пусть  $v$  — собственная скорость лодки. Тогда время движения лодки равно

$$t = \frac{10}{v+1} + \frac{6}{v-1}.$$

По условию имеем:

$$3 \leq \frac{10}{v+1} + \frac{6}{v-1} \leq 4.$$

Необходимо, чтобы было  $v > 1$ , так как в противном случае лодка не сможет двигаться против течения. От невенства (1) перейдем к равносильному неравенству

$$3(v^2 - 1) \leq 16v - 4 \leq 4(v^2 - 1).$$

Итак, нужно, чтобы сразу выполнялись два неравенства:

$$3v^2 - 16v + 1 \leq 0$$

и

$$4v^2 - 16v \geq 0.$$

Первое неравенство удовлетворяется, если

$$\frac{8 - \sqrt{61}}{3} \leq v \leq \frac{8 + \sqrt{61}}{3}.$$

Второе неравенство удовлетворяется, если  $v < 0$  или  $v > 4$ . Но, так как  $v > 1$ , то окончательно имеем:

$$4 \leq v \leq \frac{8 + \sqrt{61}}{3}.$$

207. Обозначим через  $x$  объем воды в сосуде  $A$  до переливания. Тогда первоначальный объем воды в сосудах  $B$  и  $C$  удет равен соответственно  $2x$  и  $3x$ , а общий объем  $+ 2x + 3x = 6x$ .

После первого переливания из  $A$  в  $B$  и из  $B$  в  $C$  глина во всех сосудах стала одинаковой, и поэтому объемы воды относятся как площади основания, т. е. как 1:4:9. Поэтому после первого переливания объемы воды в сосудах  $A$ ,  $B$ ,  $C$  будут соответственно иметь значения

$$1 \cdot \frac{6x}{1+4+9} = \frac{3}{7}x, \quad 4 \cdot \frac{6x}{1+4+9} = \frac{12}{7}x, \\ 9 \cdot \frac{6x}{1+4+9} = \frac{27}{7}x.$$

После второго переливания из  $C$  в  $B$  эти объемы станут соответственно равными

$$\frac{3}{7}x, \quad \frac{12}{7}x + 128 \frac{4}{7}, \quad \frac{27}{7}x - 128 \frac{4}{7}.$$

После третьего переливания из  $B$  в  $A$  объем воды в  $A$  стал равным  $x - 100$ , а в  $B$  — равным

$$\frac{1}{2}(x - 100) \cdot 4 = 2(x - 100).$$

Сложив объемы воды во всех сосудах, получаем уравнение первой степени относительно  $x$ :

$$(x - 100) + 2(x - 100) + \frac{27}{7}x - 128 \frac{4}{7} = 6x.$$

Решая это уравнение, находим:

$$x = 500.$$

Таким образом, первоначальное количество воды во всех сосудах

таковы:

в  $A$  — 500 л,

в  $B$  — 1000 л,

в  $C$  — 1500 л.

208. Пусть искомое число имеет вид  $xyzt$ . (Здесь буквы  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  обозначают цифры соответствующих разрядов.) По условиям задачи получаем следующую систему:

$$\begin{cases} x^2 + t^2 = 13, & (1) \\ y^2 + z^2 = 85, & (2) \\ xyzt - 1089 = tzyx. & (3) \end{cases}$$

Так как  $t \neq 9$  (в противном случае  $x=0$  и число  $xyzt$  не является четырехзначным), то

$$(10 + t) - 9 = x \quad \text{или} \quad x = t + 1. \quad (4)$$

Но тогда из (1) находим уравнение для определения  $t$ :

$$(t + 1)^2 + t^2 = 13,$$

откуда  $t=2$ . Из (4) следует тогда, что  $x=3$ . Из уравнения (3) имеем:

$$3yz2 - 1089 = 2zy3. \quad (5)$$

Заметим, что  $z < 9$  (если  $z=9$ , то из (5)  $y=0$ , но тогда не удовлетворяется (1)). Из (3) имеем:

$$(z - 1 + 10) - 8 = y,$$

т. е.  $z=y-1$ . Из (2) находим  $z=6$  и, следовательно  $y=7$ . Итак, искомое число есть 3762.

209. Сначала найдем расстояние  $x$  от начала до мест первой встречи. Уравнение времен движения обеих точек имеет вид

$$\frac{a+x}{v} - t = \frac{x}{w},$$

откуда

$$x = \frac{(a-vt)w}{v-w}.$$

От начала движения до первой встречи прошло время, равное

$$t_1 = \frac{a+x}{v}.$$

Подставив сюда найденное значение  $x$ , получим:

$$t_1 = \frac{a-wt}{v-w}.$$

Пусть  $\tau$  — интервал времени между двумя последовательными встречами. Тогда

$$v\tau - w\tau = l,$$

откуда

$$\tau = \frac{l}{v-w}.$$

Последовательные встречи будут происходить в моменты времени  $t_1, t_1 + \tau, t_1 + 2\tau, \dots$ . Момент  $n$ -й встречи будет

$$t_n = \frac{a-wt + l(n-1)}{v-w}.$$

210. Удельный вес первого из составляющих сплав металлов обозначим через  $\gamma_1$ , второго — через  $\gamma_2$ , и воды — через  $\gamma$ . Пусть  $x$  — вес первого металла в сплаве. По закону Архимеда потеря веса сплава в воде равна

$$\left( \frac{x}{\gamma_1} + \frac{P-x}{\gamma_2} \right) \gamma.$$

Аналогично для чистых металлов эта потеря будет равна

$$\frac{P}{\gamma_1} \gamma \quad \text{и} \quad \frac{P}{\gamma_2} \gamma.$$

Эти потери даны и равны соответственно  $B$  и  $C$ . Отсюда находим:

$$\frac{\gamma}{\gamma_1} = \frac{B}{P}; \quad \frac{\gamma}{\gamma_2} = \frac{C}{P}.$$

Следовательно, потеря веса сплава равна

$$A = \frac{B}{P} x + \frac{C}{P} (P-x).$$

Отсюда

$$x = \frac{A-C}{B-C}P.$$

Для разрешимости задачи необходимо, чтобы  $B \neq C$ . Далее из того, что  $\frac{x}{P}$  есть число, заключенное между 0 и 1, вытекает неравенство

$$0 < \frac{A-C}{B-C} < 1.$$

Отсюда следует, что либо  $B > A > C$ , либо  $C > A > B$ . Итак, для того чтобы задача имела решение, необходимо достаточно, чтобы число  $A$  было заключено между числами  $B$  и  $C$ .

211. Обозначим расстояние от пункта  $A$  до устья реки через  $s$ , расстояние от устья реки по озеру до пункта  $B$  через  $s_1$ , скорость парохода (без буксировки) — через  $v$ , скорость течения реки через  $v_1$ . Нужно определить  $\frac{2s_1}{v} = x$ .

Из условий задачи составляем три уравнения:

$$\frac{s}{v+v_1} + \frac{x}{2} = 61, \quad (1)$$

$$\frac{s}{v-v_1} + \frac{x}{2} = 79, \quad (2)$$

$$\frac{s}{v_1} + x = 411. \quad (3)$$

Из уравнения (1) имеем:

$$\frac{v+v_1}{s} = \frac{2}{122-x}; \quad (4)$$

из уравнения (2) найдем:

$$\frac{v-v_1}{s} = \frac{2}{158-x}, \quad (5)$$

из уравнения (3) получим:

$$\frac{v_1}{s} = \frac{1}{411-x}. \quad (6)$$

Вычитая из равенства (4) равенство (5) и используя равенство (6), получим уравнение относительно  $x$ :

$$\frac{1}{122-x} - \frac{1}{158-x} = \frac{1}{411-x},$$

или

$$x^2 - 244x + 4480 = 0.$$

Решая это уравнение, находим:

$$x_1 = 20, \quad x_2 = 224.$$

Очевидно, значение  $x_2 = 224$  не подходит, так как в уравнении (4) левая часть не может быть отрицательна.

212. Обозначим расстояние  $AB$  через  $s$ , расстояние  $BC$  — через  $s_1$ ; пусть, далее,  $v$  — скорость лодки,  $v_1$  — скорость течения (предполагается, что  $s$  и  $s_1$  выражены в одних и тех же единицах длины;  $v$  и  $v_1$  — скорости, рассчитанные на час).

Для движения лодки вниз по течению от  $A$  до  $C$  имеем:

$$\frac{s}{v} + \frac{s_1}{v+v_1} = 6. \quad (1)$$

Для движения лодки вверх по течению от  $C$  до  $A$  имеем:

$$\frac{s_1}{v-v_1} + \frac{s}{v} = 7. \quad (2)$$

При условии, что на  $AB$  течение такое же, как на  $BC$ , путь  $AC$  займет

$$\frac{s+s_1}{v+v_1} = 5,5 \text{ часа.} \quad (3)$$

ужно определить отношение  $\frac{s+s_1}{v-v_1}$ .

Приведем уравнения (1), (2) и (3) к общему знаменателю, умножив обе части уравнения (3) на  $v \neq 0$ , получим истему

$$\begin{cases} (s+s_1)v = 6v(v+v_1) - sv_1, & (4) \\ (s+s_1)v = 7v(v-v_1) + sv_1, & (5) \\ (s+s_1)v = 5,5(v+v_1)v. & (6) \end{cases}$$

ожив (4) и (5) и используя (6), получим:

$$2(s+s_1)v = v(13v - v_1) = 11v(v+v_1).$$

Отсюда  $v = 6v_1$ . Но из (6) имеем  $\frac{s+s_1}{v} = 7.5,5$ . Следовательно,

$$\frac{s+s_1}{v-v_1} = \frac{s+s_1}{5v_1} = 7,7 \text{ часа.}$$

**213.** Обозначим через  $v$  объем сосуда, и пусть  $\alpha_1$  — процентное содержание кислоты в нем после первого перемешивания,  $\alpha_2$  — процентное содержание кислоты после второго перемешивания и т. д. Имеем:

$$\frac{(v-a)p + aq}{v} = \alpha_1,$$

$$\frac{(v-a)\alpha_1 + aq}{v} = \alpha_2,$$

.....

$$\frac{(v-a)\alpha_{k-2} + aq}{v} = \alpha_{k-1},$$

$$\frac{(v-a)\alpha_{k-1} + aq}{v} = r.$$

Умножая  $s$ -е равенство на  $\left(\frac{v-a}{v}\right)^{k-s}$  и складывая, получаем:

$$\left(\frac{v-a}{v}\right)^k p + \frac{a}{v} q \left[ 1 + \frac{v-a}{v} + \left(\frac{v-a}{v}\right)^2 + \dots + \left(\frac{v-a}{v}\right)^{k-1} \right] = r.$$

Отсюда

$$\left(\frac{v-a}{v}\right)^k p + \frac{a}{v} q \frac{\left(\frac{v-a}{v}\right)^k - 1}{\frac{v-a}{v} - 1} = r$$

и, значит,

$$\left(1 - \frac{a}{v}\right)^k (p - q) = r - q.$$

Ответ:

$$v = \frac{a}{1 - \sqrt[k]{\frac{r-q}{p-q}}}.$$

214. В конце первого года вклад возрос на  $\frac{Ap}{100}$  рублей, а вкладчик взял  $B$  рублей. Поэтому к началу второго года вклад составлял в рублях сумму  $P_1 = A\left(1 + \frac{p}{100}\right) - B$ . В конце второго года вклад составил сумму

$$P_2 = P_1\left(1 + \frac{p}{100}\right) - B = A\left(1 + \frac{p}{100}\right)^2 - B\left[1 + \left(\frac{p}{100} + 1\right)\right],$$

а в конце третьего года  $P_3 = Ak^3 - B(1 + k + k^2)$ , где

$$k = 1 + \frac{p}{100}.$$

Очевидно, в конце  $n$ -го года сумма вклада будет равна

$$P_n = Ak^n - B(1 + k + k^2 + \dots + k^{n-1}),$$

т. е.

$$P_n = \frac{Ap - 100B}{p} \left(1 + \frac{p}{100}\right)^n + \frac{100B}{p}.$$

По условию задачи нужно найти такое  $n$ , чтобы  $P_n \geq 3A$ . Тогда

$$n \geq \frac{\lg(3Ap - 100B) - \lg(Ap - 100B)}{\lg\left(1 + \frac{p}{100}\right)}. \quad (1)$$

задача имеет смысл, если сумма вклада возрастает, т. е. если

$$Ap > 100B.$$

ак как, кроме того,  $p > 0$ ,  $A > 0$ ,  $B > 0$ , то выражение, стоящее в правой части неравенства (1), имеет смысл.

215. В конце первого года на лесной делянке было

$$a\left(1 + \frac{p}{100}\right) - x = a_1$$

ревесины, к концу второго года

$$a_1\left(1 + \frac{p}{100}\right) - x = a_2$$

ревесины, к концу третьего года

$$a_2\left(1 + \frac{p}{100}\right) - x = a_3$$

древесины и т. д. Наконец, к концу  $n$ -го года было

$$a_{n-1} \left( 1 + \frac{p}{100} \right) - x = a_n = aq$$

древесины. Нужно определить  $x$ .

Положив для сокращения записи  $1 + \frac{p}{100} = k$ , из последнего уравнения получим  $x = ka_{n-1} - aq$ . Из предыдущего уравнения выразим  $a_{n-1}$ . Получим:

$$x = k(ka_{n-2} - x) - aq = k^2 a_{n-2} - kx - aq.$$

Но

$$a_{n-2} = ka_{n-3} - x.$$

Следовательно,

$$x = k^2 a_{n-3} - k^2 x - kx - aq.$$

Продолжая далее таким же образом, мы выразим, наконец,  $a_2$  через  $a_1$  и получим следующее уравнение относительно  $x$ :

$$x = k^n a - x(k^{n-1} + k^{n-2} + \dots + k) - aq.$$

Отсюда

$$x = a \frac{k^n - q}{k^n - 1} (k - 1) = a \frac{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n - q}{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n - 1} \frac{p}{100}.$$

**216.** До переливания концентрация  $q_i$  спирта была равна

$$\text{в первом сосуде } q_1 = 1,$$

$$\text{во втором сосуде } q_2 = \frac{1}{k},$$

.....

$$\text{в } n\text{-м сосуде } q_n = \frac{1}{k^{n-1}}.$$

Пусть после всех переливаний концентрации стали равны соответственно:  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Тогда  $p_1 = 1$ , а  $p_i$  при  $i >$  определяется из уравнения

$$p_i = \frac{q_i \frac{v}{2} + p_{i-1} \frac{v}{2}}{v} = \frac{q_i + p_{i-1}}{2} \quad (i = 2, \dots, n).$$

Это уравнение мы получаем, деля количество спирта

$$q_i \frac{v}{2} + p_{i-1} \frac{v}{2},$$

которое оказывается в  $i$ -м сосуде при переливании из  $(i-1)$ -го сосуда, на объем всего сосуда  $v$ .

Таким образом,

$$p_2 = \frac{q_2 + p_1}{2}, \quad p_3 = \frac{q_3 + p_2}{2}, \quad \dots, \quad p_n = \frac{q_n + p_{n-1}}{2}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} p_n &= \frac{q_n + p_{n-1}}{2} = \frac{q_n + \frac{q_{n-1} + p_{n-2}}{2}}{2} = \frac{q_n}{2} + \frac{q_{n-1}}{2^2} + \frac{1}{2^2} p_{n-2} = \\ &= \frac{q_n}{2} + \frac{q_{n-1}}{2^2} + \frac{1}{2^2} \frac{q_{n-2} + p_{n-3}}{2} = \\ &= \frac{q_n}{2} + \frac{q_{n-1}}{2^2} + \frac{q_{n-2}}{2^3} + \frac{p_{n-3}}{2^3} = \dots \\ &= \frac{q_n}{2} + \frac{q_{n-1}}{2^2} + \dots + \frac{q_2}{2^{n-1}} + \frac{p_1}{2^{n-1}} = \\ &= \frac{1}{2k^{n-1}} + \frac{1}{2^2 k^{n-2}} + \dots + \frac{1}{2^{n-1} k} + \frac{1}{2^{n-1}}. \end{aligned}$$

последняя сумма при  $k \neq 2$  равна

$$p_n = \frac{1}{2k} \frac{\frac{1}{k^{n-1}} - \frac{1}{2^{n-1}}}{\frac{1}{k} - \frac{1}{2}} + \frac{1}{2^{n-1}} = \frac{2^{n-1} - k^{n-1}}{(2k)^{n-1} (2-k)} + \frac{1}{2^{n-1}}.$$

при  $k=2$  равна

$$p_n = \frac{n-1}{2^n} + \frac{1}{2^{n-1}} = \frac{n-1}{2^n} + \frac{2}{2^n} = \frac{n+1}{2^n}.$$

217. Дробь имеет вид  $\frac{p}{p^2-1}$ , где  $p$  — целое, большее ля. Условия задачи записываются в виде неравенств

$$\frac{p+2}{p^2+1} > \frac{1}{3}, \quad 0 < \frac{p-3}{p^2-4} < \frac{1}{10}.$$

реобразуем первое неравенство к виду

$$3(p+2) > p^2+1 \quad \text{или} \quad 0 > p^2-3p-5.$$

Решая соответствующее квадратное уравнение, получим:

$$p_{1,2} = \frac{3 \pm \sqrt{29}}{2}.$$

Из неравенства  $0 > p^2 - 3p - 5$  получаем  $p_2 < p < p_1$ . Н  $p_2 < 0$ , а  $p > 0$ , поэтому

$$0 < p < p_1 = \frac{3 + \sqrt{29}}{2}.$$

Легко видеть, что  $p_1$  лежит между 4 и 4,5. Следовательно, из этого неравенства вытекает, что  $p$  как число цело может принять только одно из четырех значений:  $p = 1, 2, 3, 4$ . Подставляя эти значения во второе неравенство

$$0 < \frac{p-3}{p^2-4} < \frac{1}{10},$$

находим, что  $p \neq 1$ ,  $p \neq 2$  и  $p \neq 3$ . Таким образом,  $p = 4$   
 $\frac{p}{p^2-1} = \frac{4}{15}$ .

## 7. Разные задачи

218. Имеем:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n(n+1)} + \frac{1}{(n+1)(n+2)} + \dots + \frac{1}{(n+k-1)(n+k)} = \\ & = \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) + \left( \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right) + \dots \\ & \dots + \left( \frac{1}{n+k-1} - \frac{1}{n+k} \right) = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+k} = \frac{k}{n(n+k)} \end{aligned}$$

219. Пусть сначала  $x \neq a$ . Умножая и деля исследуем произведение на  $x - a$  и применяя последовательно формулу для разности квадратов двух чисел, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{(x-a)(x+a)(x^2+a^2)(x^4+a^4)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}})}{x-a} = \\ & = \frac{(x^2-a^2)(x^2+a^2)(x^4+a^4)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}})}{x-a} = \\ & = \frac{(x^4-a^4)(x^4+a^4)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}})}{x-a} = \\ & = \frac{(x^8-a^8)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}})}{x-a} = \frac{x^{2^n}-a^{2^n}}{x-a}. \end{aligned}$$

Пусть теперь  $x = a$ . Тогда исследуемое произведение равно

$$2a \cdot 2a^2 \cdot 2a^4 \dots 2a^{2^{n-1}} = 2^n a^{1+2+2^2+\dots+2^{n-1}} = \\ = 2^n a^{\frac{2^n-1}{2-1}} = 2^n a^{2^n-1}.$$

220. Умножим и разделим данное выражение на произведение

$$(x+a)(x^2+a^2)(x^4+a^4)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}}),$$

которое при всех вещественных  $x \neq -a$  отлично от нуля. Легко видеть, что результат можно записать следующим образом:

$$\frac{(x^2+a^2)(x^4+a^4)(x^{12}+a^{12})\dots(x^{3 \cdot 2^{n-1}}+a^{3 \cdot 2^{n-1}})}{(x+a)(x^2+a^2)(x^4+a^4)\dots(x^{2^{n-1}}+a^{2^{n-1}})}.$$

числителе и знаменателе этой дроби стоят произведения, нологичные уже рассмотренному в предыдущей задаче. Поэтому, умножая числитель и знаменатель на произведение  $x-a$  ( $x^2-a^2$ ), мы приведем наше выражение к виду

$$\frac{x^{3 \cdot 2^n} - a^{3 \cdot 2^n}}{x^2 - a^2} \cdot \frac{x-a}{x^{2^n} - a^{2^n}} = \frac{x^{2^n+1} + a^{2^n} x^{2^n} + a^{2^n+1}}{x^2 + ax + a^2}.$$

Наш метод теряет силу при  $x = \pm a$ . В этих случаях, однако, простой подсчет показывает, что при  $x = -a$  произведение равно  $3^n a^{2(2^n-1)}$ , а при  $x = a$  оно оказывается равным  $a^{2(2^n-1)}$ .

221. Очевидно,

$$S_k - S_{k-1} = b_k \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

$$S_1 = b_1. \quad (2)$$

оставляя в сумму

$$a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n$$

место  $b_1, b_2, \dots, b_n$  их значения, из (1) и (2) получим:

$$b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n = a_1 S_1 + a_2 (S_2 - S_1) + \\ + a_3 (S_3 - S_2) + \dots + a_n (S_n - S_{n-1}) = \\ S_1 (a_1 - a_2) + S_2 (a_2 - a_3) + \dots + S_{n-1} (a_{n-1} - a_n) + a_n S_n.$$

222. Умножив обе части равенства на 2, перенесем его правую часть влево. После простых преобразований получаем:

$$\begin{aligned} 2(a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc) &= a^2 - 2ab + b^2 + \\ &+ a^2 - 2ac + c^2 + b^2 - 2bc + c^2 = \\ &= (a - b)^2 + (a - c)^2 + (b - c)^2 = 0. \end{aligned}$$

Так как  $a, b, c$  вещественны, то это возможно только тогда, когда  $a = b = c$ .

223. Умножим  $a^2 + b^2 + c^2 - bc - ca - ab$  на  $a + b + c$ . После несложных подсчетов находим, что произведение равно  $a^3 + b^3 + c^3 - 3abc$ , т. е., согласно условию задачи, равно нулю. Отсюда вытекает справедливость утверждения задачи.

224. Так как  $p \neq 0, q \neq 0$ , то можно написать:

$$\begin{aligned} \left(\frac{a_1}{p}\right)^2 + \left(\frac{a_2}{p}\right)^2 + \dots + \left(\frac{a_n}{p}\right)^2 &= 1, \\ \left(\frac{b_1}{q}\right)^2 + \left(\frac{b_2}{q}\right)^2 + \dots + \left(\frac{b_n}{q}\right)^2 &= 1, \\ \frac{a_1 b_1}{p q} + \frac{a_2 b_2}{p q} + \dots + \frac{a_n b_n}{p q} &= 1. \end{aligned}$$

Складывая первые два из этих равенств и вычитая удвоенно третье, находим:

$$\left(\frac{a_1}{p} - \frac{b_1}{q}\right)^2 + \left(\frac{a_2}{p} - \frac{b_2}{q}\right)^2 + \dots + \left(\frac{a_n}{p} - \frac{b_n}{q}\right)^2 = 0.$$

Принимая во внимание вещественность всех величин, заключаем, что

$$\frac{a_1}{p} - \frac{b_1}{q} = 0, \quad \frac{a_2}{p} - \frac{b_2}{q} = 0, \quad \dots, \quad \frac{a_n}{p} - \frac{b_n}{q} = 0,$$

откуда непосредственно вытекает утверждение задачи.

225. Положим  $p_n = a_n - a_{n-1}$ . Тогда из условия задачи следует формула  $p_n = p_{n-1} + 1$ , показывающая, что числа образуют арифметическую прогрессию с разностью 1. Поэтому

$p_n = p_2 + n - 2$ . Теперь находим:

$$\begin{aligned} a_n &= (a_n - a_{n-1}) + (a_{n-1} - a_{n-2}) + \dots + (a_2 - a_1) + a_1 = \\ &= p_n + p_{n-1} + \dots + p_2 + a_1 = \\ &= (n-1)p_2 + (n-2) + (n-3) + \dots + 1 + a_1 = \\ &= (n-1)(a_2 - a_1) + a_1 + \frac{(n-2)(n-1)}{2}, \end{aligned}$$

или окончательно

$$a_n = (n-1)a_2 - (n-2)a_1 + \frac{(n-2)(n-1)}{2}.$$

226. Имеем  $x_1 + x_2 = 3a$ ,  $x_1 x_2 = a^2$ . Поэтому

$$x_1^2 + x_2^2 = (x_1 + x_2)^2 - 2x_1 x_2 = 7a^2 = \frac{7}{4},$$

откуда  $a^2 = \frac{1}{4}$ . Следовательно, возможны два значения  $a$ , именно:  $a_1 = \frac{1}{2}$ ,  $a_2 = -\frac{1}{2}$ .

227. Находим:

$$y_1 = (x_1 + x_2)^2 - 2x_1 x_2 = p^2 - 2q,$$

$$y_2 = (x_1 + x_2)^2 - 3(x_1 + x_2)x_1 x_2 = -p^2 + 3pq.$$

коэффициенты квадратного уравнения  $y^2 + ry + s = 0$ , корнями которого являются  $y_1$  и  $y_2$ , равны

$$r = -(y_1 + y_2) = p^2 - p^2 - 3pq + 2q,$$

$$s = y_1 y_2 = (p^2 - 2q)(-p^2 + 3pq).$$

228. Имеем  $x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}$ ,  $x_1 x_2 = \frac{c}{a}$ . С помощью этих формул находим:

$$\frac{1}{x_1^2} + \frac{1}{x_2^2} = \frac{(x_1 + x_2)^2 - 2x_1 x_2}{x_1^2 x_2^2} = \frac{b^2 - 2ac}{c^2};$$

$$\begin{aligned} x_1^4 + x_1^2 x_2^2 + x_2^4 &= (x_1^2 + x_2^2)^2 - x_1^2 x_2^2 = \\ &= \left(\frac{b^2}{a^2} - 2\frac{c}{a}\right)^2 - \left(\frac{c}{a}\right)^2. \end{aligned}$$

229. Пусть при всех  $x$

$$(a_1 + b_1 x)^2 + (a_2 + b_2 x)^2 + (a_3 + b_3 x)^2 = (A + Bx)^2, \quad (1)$$

где  $B \neq 0$ . Полагая  $x = -\frac{A}{B}$ , получаем:

$$\left(a_1 - b_1 \frac{A}{B}\right)^2 + \left(a_2 - b_2 \frac{A}{B}\right)^2 + \left(a_3 - b_3 \frac{A}{B}\right)^2 = 0.$$

Так как все величины вещественны, то отсюда следуют три равенства:

$$a_1 = \lambda b_1, \quad a_2 = \lambda b_2, \quad a_3 = \lambda b_3, \quad (2)$$

где  $\lambda = -\frac{A}{B}$ . Кроме того, при этом должно выполняться следующее условие:

$$b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 \neq 0, \quad (3)$$

иначе все три числа были бы нулями и левая часть (1) не зависела бы от  $x$ .

Пусть теперь, наоборот, выполнены условия (2) и (3); тогда

$$\begin{aligned} (a_1 + b_1 x)^2 + (a_2 + b_2 x)^2 + (a_3 + b_3 x)^2 &= \\ &= b_1^2 (\lambda + x)^2 + b_2^2 (\lambda + x)^2 + b_3^2 (\lambda + x)^2 = \\ &= (\lambda \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2} + \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2} x)^2, \end{aligned}$$

и, следовательно, указанная в задаче сумма представляет собой квадрат многочлена первой степени. Таким образом, условия (2) и (3) являются необходимыми и достаточными.

230. Доказываем утверждение от противного. Предположим, что  $a \neq 0$ . Тогда для корней  $x_1$  и  $x_2$  имеем:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c + \lambda)}}{2a}.$$

Рассмотрим теперь два случая:

1) Пусть  $a > 0$ . Выберем тогда  $\lambda$  так, чтобы выполнялось неравенство

$$\lambda > \frac{b^2}{4a} - c.$$

При этом, очевидно,  $b^2 - 4a(c + \lambda) < 0$  и, следовательно, заданное уравнение имеет не вещественные корни.

2) Пусть  $a < 0$ . Тогда при условии  $\lambda > -c$  имеем:  $-b + \sqrt{b^2 - 4a(c + \lambda)} > 0$ , и, значит, корень

$$\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c + \lambda)}}{2a} < 0.$$

Итак, оба допущения приводят к противоречию. Утверждение доказано.

231. Подставив  $y$  из второго уравнения в первое, получим уравнение

$$2ax^2 + 2(a\lambda + 1)x + a\lambda^2 = 0, \quad (1)$$

которое по условию имеет вещественные корни при всех значениях  $\lambda$ . Покажем, что тогда  $a = 0$ . Предположим противное. Тогда для дискриминанта  $D$  квадратного уравнения (1) справедливо неравенство

$$D = 4(a\lambda + 1)^2 - 8a^2\lambda^2 \geq 0 \quad (2)$$

при всех  $\lambda$ . Левая часть неравенства (2), однако, имеет вид

$$-4a^2\lambda^2 + 8\lambda + 1$$

при достаточно больших по абсолютной величине значениях  $\lambda$  отрицательна. Например, при  $\lambda = \frac{10}{a}$  левая часть уравнения (1) равна  $-321$ . Это приводит к противоречию.

232. В приведенной форме данное уравнение имеет вид

$$x^2 - (p + q + 2a^2)x + pq + (p + q)a^2 = 0.$$

ычисляя дискриминант  $D$  данного квадратного уравнения, получаем:

$$D = (p + q + 2a^2)^2 - 4[pq + (p + q)a^2] = (p - q)^2 + 4a^4.$$

ак как  $D \geq 0$  при всех вещественных  $a, p, q$ , то квадратное уравнение, а вместе с ним и исходное, имеет вещественные корни.

233. Рассмотрим дискриминант данного квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} D &= (b^2 + a^2 - c^2)^2 - 4a^2b^2 = \\ &= (b^2 + a^2 - c^2 - 2ab)(b^2 + a^2 - c^2 + 2ab) = \\ &= [(a - b)^2 - c^2][(a + b)^2 - c^2]. \end{aligned}$$

Так как  $a + b > c$  и  $|a - b| < c$ , то  $(a + b)^2 > c^2$  и  $(a - b)^2 < c^2$ . Следовательно,  $D < 0$ .

234. По формулам Виета (см. стр. 10) имеем:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2, \quad x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_1 = 1, \quad x_1x_2x_3 = -1.$$

Пользуясь этими равенствами, получаем:

$$\begin{aligned} y_1 + y_2 + y_3 &= x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_1 = 1, \\ y_1y_2 + y_2y_3 + y_3y_1 &= x_1x_2x_3(x_1 + x_2 + x_3) = -2, \\ y_1y_2y_3 &= (x_1x_2x_3)^2 = 1. \end{aligned}$$

Следовательно, новое уравнение имеет вид

$$y^3 - y^2 - 2y - 1 = 0.$$

235. На основании формул Виета имеем:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= 1, \\ x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_1 &= 0, \\ x_1x_2x_3 &= 1. \end{aligned}$$

В силу этих равенств

$$y_1 + y_2 + y_3 = 2(x_1 + x_2 + x_3) = 2.$$

Так как  $y_1 = 1 - x_1$ ,  $y_2 = 1 - x_2$ ,  $y_3 = 1 - x_3$ , то

$$\begin{aligned} y_1y_2 + y_2y_3 + y_3y_1 &= (1 - x_1)(1 - x_2) + (1 - x_2)(1 - x_3) + \\ &+ (1 - x_3)(1 - x_1) = 3 - 2(x_1 + x_2 + x_3) + \\ &+ x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_1 = \end{aligned}$$

и, наконец,

$$y_1y_2y_3 = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3) = -1.$$

Новое уравнение поэтому имеет вид

$$y^3 - 2y^2 + y + 1 = 0.$$

236. Пусть

$$x_1 = p - d, \quad x_2 = p, \quad x_3 = p + d.$$

Тогда  $x_1 + x_2 + x_3 = 3p$ ; с другой стороны, по формуле Виета  $x_1 + x_2 + x_3 = -a$ . Отсюда  $3p = -a$  и, следовательно,

$$x_2 = p = -\frac{a}{3}.$$

Подставляя этот корень в уравнение, получаем:

$$\left(-\frac{a}{3}\right)^2 + a\left(-\frac{a}{3}\right) + b\left(-\frac{a}{3}\right) + c = 0,$$

откуда

$$c = -\frac{2}{27}a^3 + \frac{1}{3}ab.$$

237. Пусть  $x_1 > 0$ ,  $x_2 > 0$ ,  $x_3 > 0$  — корни заданного уравнения. Следуя указанию, рассмотрим выражение

$$(x_1 + x_2 - x_3)(x_2 + x_3 - x_1)(x_3 + x_1 - x_2). \quad (1)$$

Для того чтобы из отрезков с длинами  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  можно было составить треугольник, необходимо и достаточно, чтобы

$$(x_1 + x_2 - x_3)(x_2 + x_3 - x_1)(x_3 + x_1 - x_2) > 0. \quad (2)$$

Этот факт был доказан в решении задачи 91.

Чтобы получить требуемое в задаче условие, выразим левую часть (2) через  $p$ ,  $q$  и  $r$ . Для этой цели используем зависимость между корнями и коэффициентами уравнения

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= -p, & x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 &= q, \\ x_1x_2x_3 &= -r. \end{aligned}$$

Условие (2) запишем теперь следующим образом:

$$(-p - 2x_3)(-p - 2x_1)(-p - 2x_2) > 0;$$

тсюда

$$\begin{aligned} -p^3 - 2p^2(x_1 + x_2 + x_3) - 4p(x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3) - \\ - 8x_1x_2x_3 > 0 \end{aligned}$$

, следовательно,

$$p^3 - 4pq + 8r > 0.$$

238. Пусть  $x_0$  — общий корень уравнений. Подставляя  $x$  в оба уравнения и вычитая одно уравнение из другого, на ходим:

$$x_0 = \frac{q_2 - q_1}{p_1 - p_2} \neq 0.$$

Пусть  $x^2 + ax + b$  — частное от деления трехчлена  $x^2 + p_1x + q_1$  на  $x - x_0$ . Тогда

$$x^2 + p_1x + q_1 = (x - x_0)(x^2 + ax + b).$$

Приравняв в этом тождестве коэффициенты при  $x^2$  и свободные члены, найдем:  $a = x_0$  и  $b = -q_1/x_0$ . Отсюда следует, что остальные два корня первого уравнения определяются формулой

$$x_{2,3}^{(1)} = \frac{-x_0 \pm \sqrt{x_0^2 + \frac{4q_1}{x_0}}}{2},$$

а второго уравнения — формулой

$$x_{2,3}^{(2)} = \frac{-x_0 \pm \sqrt{x_0^2 + \frac{4q_2}{x_0}}}{2}.$$

239. Легко проверить, что при  $\lambda = 0$  уравнения не имеют общего корня. Пусть  $x_0$  — общий корень уравнений при некотором  $\lambda \neq 0$ . Тогда

$$\lambda x_0^2 - x_0^2 - x_0 - (\lambda + 1) = 0, \quad (1)$$

$$\lambda x_0^2 - x_0 - (\lambda + 1) = 0. \quad (2)$$

Умножая равенство (2) на  $x_0$  и вычитая его из равенства (1), найдём:

$$x_0 = \frac{\lambda + 1}{\lambda}. \quad (3)$$

Таким образом, если общий корень существует, то он связан с  $\lambda$  формулой (3). Легко теперь проверить, что дробь  $\frac{\lambda + 1}{\lambda}$  действительно удовлетворяет обоим уравнениям (очевидно, достаточно этот факт установить лишь для второго уравнения). Итак, уравнения (1) и (2) имеют общий корень при всех  $\lambda \neq 0$ . Этот корень определяется формулой (3).

240. Первое решение. Пусть  $x_1, x_2, x_3$  — корни многочлена  $P(x)$ . По формулам Виета имеем:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0, \quad x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 = p,$$

откуда легко следует:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + 2p = 0.$$

Так как  $x_1, x_2, x_3$  действительны и отличны от нуля ( $q \neq 0$ ), то  $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 > 0$  и, следовательно,  $p < 0$ .

Второе решение. Легко видеть, что среди трех корней многочлена  $P(x)$  найдутся два неравных. В противном случае  $P(x)$  представлял бы собой точный куб:  $P(x) \equiv (x - x_0)^3$ , что, очевидно, места не имеет.

Пусть теперь  $x_1$  и  $x_2$  — два неравных корня многочлена и пусть  $x_1 < x_2$ . Предположим, напротив, что  $p \geq 0$ ; тогда  $x_1^2 < x_2^2$  и  $px_1 \leq px_2$ . Отсюда следует:

$$P(x_1) = x_1^3 + px_1 + q < x_2^3 + px_2 + q = 0,$$

так как  $P(x_2) = 0$ . Мы приходим к заключению, что  $P(x_1) < 0$ . Это противоречит тому, что  $x_1$  — корень  $P(x)$ . Следовательно,  $p < 0$ .

241. Пусть  $x_1, x_2, x_3$  — корни данного уравнения. В силу формул Виета имеем:

$$x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 = 0, \quad (1)$$

$$x_1x_2x_3 = b > 0. \quad (2)$$

редположим сначала, что все три корня вещественны. Тогда из условия (2) следует, что, по крайней мере, один из них положителен. Если бы при этом положительными оказались два корня, то из той же формулы (2) мы заключили бы, что и третий корень положителен, а это противоречит словию (1). Таким образом, в случае вещественности всех трех корней задача решена.

Пусть теперь  $x_1$  — невещественный корень уравнения, тогда, как известно, уравнение имеет и комплексно-сопряженный корень  $x_2 = \bar{x}_1$ . Так как в этом случае  $x_1x_2 = x_1\bar{x}_1 > 0$ , то из равенства (2) получаем:

$$x_3 = \frac{b}{x_1x_2} > 0.$$

тверждение тем самым доказано полностью.

242. Пусть  $\alpha, \beta, \gamma_1$  — корни первого уравнения и  $\alpha, \beta, \gamma_2$  — корни второго. В силу формул Виета имеем:

$$\alpha + \beta + \gamma_1 = -a, \quad (1)$$

$$\alpha\beta\gamma_1 = -18, \quad (2)$$

$$\alpha + \beta + \gamma_2 = 0, \quad (3)$$

$$\alpha\beta\gamma_2 = -12. \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (3) получаем:

$$\gamma_1 - \gamma_2 = -a, \quad (5)$$

а из уравнений (2) и (4)

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{3}{2}. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6), находим:

$$\gamma_1 = -3a, \quad \gamma_2 = -2a. \quad (7)$$

Таким образом, если при некоторых  $a$  и  $b$  уравнения имеют общие корни, то третьи корни этих уравнений определяются формулами (7). Подставив  $\gamma_1 = -3a$  в первое уравнение, а  $\gamma_2 = -2a$  во второе, получим:

$$-18a^2 + 18 = 0$$

и

$$-8a^2 - 2ab + 12 = 0.$$

Отсюда определяется единственная пара вещественных значений

$$a = 1, \quad b = 2. \quad (8)$$

Подставляя эти значения в уравнения, легко найдем:

$$x^2 + x^2 + 18 = (x + 3)(x^2 - 2x + 6)$$

и

$$x^2 + 2x + 12 = (x + 2)(x^2 - 2x + 6).$$

Следовательно, уравнения при указанных значениях  $a$  и действительно имеют два общих корня. Эти корни определяются формулой

$$x_{1,2} = -1 \pm \sqrt{-5}.$$

243. Обозначим левую часть равенства через  $A$ . Имеем:

$$\begin{aligned} A^3 &= 20 + 14\sqrt{2} + 3\sqrt[3]{(20 + 14\sqrt{2})^2} \sqrt[3]{20 - 14\sqrt{2}} + \\ &+ 3\sqrt[3]{20 + 14\sqrt{2}} \sqrt[3]{(20 - 14\sqrt{2})^2} + 20 - 14\sqrt{2} = \\ &= 40 + 3\sqrt[3]{400 - 2 \cdot 14^2} A = 40 + 6A. \end{aligned}$$

Таким образом, левая часть доказываемого равенства удовлетворяет кубическому уравнению

$$x^3 - 6x - 40 = 0. \quad (1)$$

Легко проверить, что при  $x=4$  уравнение (1) удовлетворяется. Разделив левую часть уравнения (1) на  $x-4$ , получим для нахождения двух других корней уравнение

$$x^2 + 4x + 10 = 0.$$

Это уравнение имеет невещественные корни, так как его дискриминант  $D = -24 < 0$ . Таким образом, уравнение (1) имеет лишь один вещественный корень  $x=4$ , и так как  $A$  — заведомо вещественное число, то  $A=4$ , что и требовалось доказать.

244. Легко видеть, что рассматриваемое выражение обращается в нуль, если два какие-нибудь из чисел  $a, b, c$  равны между собой. Отсюда по теореме Безу следует, что оно должно делиться без остатка на каждую из разностей

$$(b-c), (c-a), (a-b).$$

Это наводит на мысль, что данное выражение является произведением указанных множителей. Действительно, имеем:

$$\begin{aligned} &^2(c-b) + b^2(a-c) + c^2(b-a) = a^2c - a^2b + b^2a - \\ &- b^2c + c^2b - c^2a = a^2(c-b) - a(c^2 - b^2) + \\ &+ bc(c-b) = (c-b)[a^2 - ac - ab + bc] = \\ &= (c-b)[a(a-c) - b(a-c)] = (c-b)(b-a)(c-a). \quad (1) \end{aligned}$$

ак как  $a, b, c$  попарно различны, то утверждение доказано.

245. Заметим, что при  $x=-y$  данное выражение обращается в нуль. Следовательно, по теореме Безу оно делится на  $x+y$  без остатка. Чтобы провести деление, пред-

ставим  $x + y + z$  в виде суммы двух слагаемых:  $(x + y)$  и  $z$ . Возводя сумму в куб, получаем:

$$\begin{aligned} [(x + y) + z]^3 - x^3 - y^3 - z^3 &= \\ &= (x + y)^3 + 3(x + y)^2z + 3(x + y)z^2 - x^3 - y^3 = \\ &= 3(x + y)[z^2 + z(x + y) + xy]. \end{aligned}$$

Квадратный трехчлен относительно  $z$ , стоящий справа в квадратных скобках, легко разложить на множители, так как очевидно, что его корнями являются  $-x$  и  $-y$ . В результате получаем:

$$(x + y + z)^3 - x^3 - y^3 - z^3 = 3(x + y)(z + x)(z + y).$$

246. Умножив обе части заданного равенства на  $abc(a + b + c)$ , приведем его к виду

$$(ab + bc + ac)(a + b + c) - abc = 0.$$

Раскрыв скобки, получаем:

$$a^2b + 2abc + a^2c + ab^2 + b^2c + bc^2 + ac^2 = 0.$$

Левая часть этого равенства легко разлагается на множители

$$\begin{aligned} a^2(b + c) + ab(c + b) + ac(b + c) + bc(b + c) &= \\ &= (b + c)(a^2 + ab + ac + bc) = (b + c)(a + b)(a + c). \end{aligned}$$

Так как последнее произведение равно нулю, то, по крайней мере, один из множителей равен нулю, откуда и следует утверждение задачи.

247. Пусть  $\alpha$  и  $\beta$  — корни квадратного трехчлена  $x^2 + px + q$ . Если двучлен  $x^4 - 1$  делится на указанный трехчлен без остатка, то и  $\alpha$  и  $\beta$  являются корнями двучлена. Легко видеть, что справедливо и обратное: если  $\alpha$  и  $\beta$  являются корнями двучлена  $x^4 - 1$ , то он разделится на  $x^2 + px + q$  без остатка\*).

Корнями двучлена  $x^4 - 1$  являются числа  $1, -1, i, -i$ . Поэтому имеет место разложение

$$(x^4 - 1) = (x - 1)(x + 1)(x - i)(x + i). \quad (1)$$

\*) При этом, если  $\alpha = \beta$ , то число  $\alpha$  должно быть кратным ко нем и делимого.

В силу сказанного выше интересующими нас трехчленами могут быть лишь те, которые представляют собой произведение двух множителей, стоящих в правой части (1).

Составив всевозможные сочетания, найдем  $C_4^2 = 6$  трехчленов:

$$\begin{aligned}(x-1)(x+1) &= x^2 - 1, \\(x-1)(x-i) &= x^2 - (1+i)x + i, \\(x-1)(x+i) &= x^2 - (1-i)x - i, \\(x+1)(x-i) &= x^2 + (1-i)x - i, \\(x+1)(x+i) &= x^2 + (1+i)x + i, \\(x-i)(x+i) &= x^2 + 1.\end{aligned}$$

Ими, очевидно, исчерпываются все искомые трехчлены.

248. Представив данный многочлен в виде  $x^n - 1 - ax(x^{n-2} - 1)$ , разделим его на разность  $x - 1$ , воспользовавшись формулой

$$\frac{x^{k+1} - 1}{x - 1} = 1 + x + \dots + x^k. \quad (1)^*$$

В результате в частном получим многочлен

$$x^{n-1} + x^{n-2} + \dots + x + 1 - ax(x^{n-3} + x^{n-2} + \dots + x + 1).$$

Для того чтобы этот многочлен делился на  $x - 1$  без остатка, в силу теоремы Безу должно выполняться равенство

$$n - a(n - 2) = 0.$$

Поэтому делимость имеет место при любом натуральном  $n > 2$  и  $a = \frac{n}{n-2}$ .

249. Из условия задачи следует, что

$$\left. \begin{aligned}p(a) &= A, \\p(b) &= B, \\p(c) &= C.\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Разделив теперь многочлен  $p(x)$  на  $(x-a)(x-b)(x-c)$ , представим его в виде

$$p(x) = (x-a)(x-b)(x-c)q(x) + r(x). \quad (2)$$

\* Формула (1) легко проверяется непосредственно; впрочем, она совпадает с формулой для суммы  $k$  членов геометрической прогрессии.

Очевидно, что  $r(x)$  — многочлен не выше второй степени. Записав его в виде

$$r(x) = lx^2 + mx + n, \quad (3)$$

подставим в тождество (2) последовательно  $x=a$ ,  $x=b$ ,  $x=c$ . В силу равенств (1) мы придем к следующей системе уравнений для определения коэффициентов  $l$ ,  $m$  и  $n$  многочлена (3):

$$\left. \begin{aligned} la^2 + ma + n &= A, \\ lb^2 + mb + n &= B, \\ lc^2 + mc + n &= C. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решив эту систему, найдем:

$$\begin{aligned} l &= \frac{(A-B)(b-c) - (B-C)(a-b)}{(a-b)(b-c)(a-c)}, \\ m &= \frac{(A-B)(b^2 - c^2) - (B-C)(a^2 - b^2)}{(a-b)(b-c)(c-a)}, \\ n &= \frac{a^2(Bc - Cb) + a(Cb^2 - Bc^2) + A(Bc^2 - Cb^2)}{(a-b)(b-c)(c-a)}. \end{aligned}$$

**З а м е ч а н и е.** Искомый многочлен  $r(x)$  при  $x=a$ ,  $x=b$ ,  $x=c$  принимает соответственно значения  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Легко проверить, что таким многочленом не выше второй степени является следующий:

$$A \frac{(x-b)(x-c)}{(a-b)(a-c)} + B \frac{(x-a)(x-c)}{(b-a)(b-c)} + C \frac{(x-a)(x-b)}{(c-a)(c-b)}. \quad (5)$$

Так как система (4) имеет единственное решение, то существует лишь один многочлен с указанным свойством и, следовательно,  $r(x)$  совпадает с многочленом (5).

**250.** Очевидно, формула верна при  $n=1$ . Пусть формула верна для некоторого  $n$ ; докажем, что тогда она будет верна и для  $n+1$ . Обозначив через  $S_n$  сумму, стоящую в левой части доказываемой формулы, будем иметь:

$$\begin{aligned} S_{n+1} &= S_n + \frac{(n+1)(n+2)}{2} = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{6} = \\ &= \frac{(n+1)[(n+1)+1][(n+1)+2]}{6} \end{aligned}$$

Отсюда, согласно методу индукции, и следует справедливость формулы при любом натуральном  $n$ .

251. Пусть  $S_n$  — сумма, стоящая в левой части формулы. При  $n=1$  обе части формулы совпадают. Покажем, что если формула верна для некоторого  $n$ , то она верна также для  $n+1$ . Имеем:

$$\begin{aligned} S_{n+1} &= S_n + (n+1)^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + (n+1)^2 = \\ &= \frac{(n+1)(2n^2+7n+6)}{6} = \frac{(n+1)[2n(n+2)+3(n+2)]}{6} = \\ &= \frac{(n+1)[(n+1)+1][2(n+1)+1]}{6}. \end{aligned}$$

Следовательно, формула верна при любом натуральном  $n$ .

252. Легко убедиться в справедливости утверждения при  $n=1$ . Пусть формула верна при некотором  $n \geq 1$ . Обозначим через  $S_n$  сумму, стоящую в левой части формулы. Имеем:

$$\begin{aligned} S_{n+1} &= S_n + \frac{1}{(n+1)(n+2)(n+3)} = \\ &= \frac{n(n+3)}{4(n+1)(n+2)} + \frac{1}{(n+1)(n+2)(n+3)}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} S_{n+1} &= \frac{n^2+6n^2+9n+4}{4(n+1)(n+2)(n+3)} = \frac{(n+1)(n^2+5n+4)}{4(n+1)(n+2)(n+3)} = \\ &= \frac{(n+1)[(n+1)+3]}{4[(n+1)+1][(n+1)+2]}. \end{aligned}$$

Следовательно, формула справедлива при любом натуральном  $n$ .

253. Доказательство будем вести методом индукции, прежде всего убеждаемся в том, что формула верна при  $n=1$ . Действительно, при  $n=1$  формула имеет вид

$$(a+b)_1 = C_1^0(a)_0(b)_1 + C_1^1(a)_1(b)_0. \quad (1)$$

Если теперь воспользоваться определением обобщенной степени, то станет очевидным, что обе части формулы (1) равны  $a+b$  и, следовательно, равенство действительно имеет место.

Предположим теперь, что формула верна для некоторого  $n$  и докажем, что она будет верна и для  $n+1$ . Из определения обобщенной степени имеем:

$$\begin{aligned}(a+b)_{n+1} &= (a+b)_n (a+b-n) = \\ &= [C_n^0(a)_0(b)_n + C_n^1(a)_1(b)_{n-1} + \dots \\ &\dots + C_n^k(a)_k(b)_{n-k} + \dots + C_n^n(a)_n(b)_0] (a+b-n)\end{aligned}$$

Раскрыв здесь квадратные скобки, преобразуем каждое из  $n+1$  слагаемых по формуле

$$\begin{aligned}C_n^k(a)_k(b)_{n-k}(a+b-n) &= \\ &= C_n^k(a)_k(b)_{n-k}[(a-k) + (b-n+k)] = \\ &= C_n^k(a)_k(a-k)(b)_{n-k} + C_n^k(a)_k(b)_{n-k}(b-n+k) = \\ &= C_n^k(a)_{k+1}(b)_{n-k} + C_n^k(a)_k(b)_{n-k+1} \quad (k=0, 1, \dots, n)\end{aligned}$$

В результате получим:

$$\begin{aligned}(a+b)_{n+1} &= C_n^0(a)_1(b)_n + C_n^0(a)_0(b)_{n+1} + C_n^1(a)_2(b)_{n-1} + \\ &\quad + C_n^1(a)_1(b)_n + \dots + C_n^k(a)_{k+1}(b)_{n-k} + \\ &\quad + C_n^k(a)_k(b)_{n-k+1} + \dots + C_n^n(a)_{n+1}(b)_0 + C_n^n(a)_n(b)_1\end{aligned}$$

После приведения подобных членов будем иметь:

$$\begin{aligned}(a+b)_{n+1} &= C_n^0(a)_0(b)_{n+1} + (C_n^0 + C_n^1)(a)_1(b)_n + \\ &\quad + (C_n^1 + C_n^2)(a)_2(b)_{n-1} + \dots + (C_n^k + C_n^{k+1})(a)_{k+1}(b)_{n-k} + \dots \\ &\quad \dots + (C_n^{n-1} + C_n^n)(a)_n(b)_1 + C_n^n(a)_{n+1}(b)\end{aligned}$$

Используя, далее, тот факт, что

$$C_n^0 = C_{n+1}^0 = 1, \quad C_n^n = C_{n+1}^{n+1} = 1,$$

и легко проверяемое тождество

$$C_n^k + C_n^{k+1} = C_{n+1}^{k+1},$$

получаем:

$$\begin{aligned}(a+b)_{n+1} &= C_{n+1}^0(a)_0(b)_{n+1} + C_{n+1}^1(a)_1(b)_n + \\ &\quad + C_{n+1}^2(a)_2(b)_{n-1} + \dots + C_{n+1}^{k+1}(a)_{k+1}(b)_{n-k} + \dots \\ &\quad \dots + C_{n+1}^n(a)_n(b)_1 + C_{n+1}^{n+1}(a)_{n+1}(b)\end{aligned}$$

следовательно, доказано, что если формула, приведенная в условии задачи, верна для некоторого  $n$ , то она верна и для  $n+1$ . Но она справедлива при  $n=1$ , следовательно, согласно принципу полной индукции, она верна при всех натуральных  $n$ .

254. Пусть  $r(t)$  — расстояние между поездами в момент времени  $t$ . Тогда

$$\begin{aligned} r^2(t) &= (a - v_1 t)^2 + (b - v_2 t)^2 = \\ &= (v_1^2 + v_2^2) t^2 - 2(av_1 + bv_2)t + a^2 + b^2. \end{aligned}$$

Заметим, что если  $r^2(t)$  имеет наименьшее значение при  $t = t_0$ , то и  $r(t)$  также принимает наименьшее значение при  $t = t_0$ . Верно и обратное. Задача сводится к нахождению наименьшего значения квадратного трехчлена  $r^2(t)$ .

Согласно формуле (4) на стр. 46 наименьшее значение  $r^2(t)$ , а следовательно и  $r(t)$ , достигается в момент времени

$$t_0 = \frac{av_1 + bv_2}{v_1^2 + v_2^2}.$$

Используя далее формулу (3), находим наименьшее расстояние между поездами:

$$\begin{aligned} r(t_0) &= \sqrt{\frac{4(a^2 + b^2)(v_1^2 + v_2^2) - 4(av_1 + bv_2)^2}{4(v_1^2 + v_2^2)}} = \\ &= \frac{|av_2 - bv_1|}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}. \end{aligned}$$

255. В момент времени  $t$  автомашина находится на расстоянии  $40t$  км от пункта  $A$ , а мотоцикл — на расстоянии  $t^2 + 9$  км от того же пункта. Следовательно, расстояние между ними равно абсолютной величине разности  $16t^2 + 9 - 40t$ . означая эту разность через  $y(t)$ , начертим график квадратного трехчлена  $y(t)$  (рис. 5). Он представляет собой параболу, которая пересекает ось  $t$  при  $t_1 = \frac{1}{4}$  и  $t_2 = 2\frac{1}{4}$ .

Из графика ясно, что наибольшая по абсолютной величине отрицательная  $y$  при условии  $0 \leq t \leq 2$  соответствует вершине

параболы. Вершина параболы лежит на оси симметрии, которая пересекает ось  $t$  в точке

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{5}{4}.$$

Таким образом, наибольшее расстояние достигается через 1 час 15 минут после начала движения и равно 16 км.

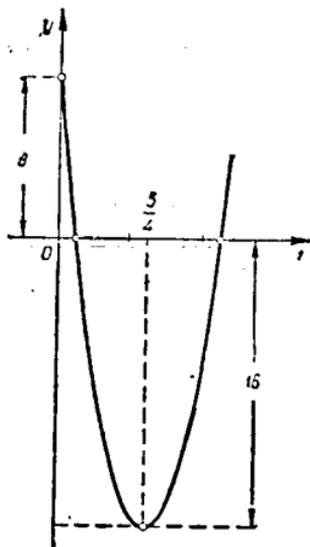


Рис. 5.

256. Обозначим исследуемое выражение через  $y$  и преобразуем его следующим образом:

$$\begin{aligned} y &= \lg_2^4 x + 12 \lg_2^3 x (\lg_2 8 - \lg_2 x) \\ &= \lg_2^3 x (\lg_2^2 x - 12 \lg_2 x + 36) = \\ &= \lg_2^3 x (6 - \lg_2 x)^2 \end{aligned}$$

Положим, далее,  $\lg_2 x = z$ , так что  $0 \leq z \leq 6$ . Тогда задача сводится к нахождению наибольшего значения переменной

$$y = z^3 (6 - z)^2.$$

Достаточно найти наибольшее значение для  $z(6 - z)$  при условии  $0 \leq z \leq 6$ , так как чем больше положительное число, тем больше и его квадрат. Квадрат трехчлен  $z(6 - z) = -(z - 3)^2 + 9$  достигает наибольшего значения при  $z = 3$  ( $x = 8$ ) и равно 81.

257. Первое решение. Очевидно, достаточно рассматривать лишь положительные значения  $x$ . Согласно известному неравенству (3), стр. 20, имеем:

$$\frac{ax^2 + b}{2} \geq \sqrt{ax^2 b} = x\sqrt{ab}. \quad ($$

Следовательно, для всех  $x > 0$

$$y = \frac{x^4}{ax^2 + b} \leq \frac{x}{2x\sqrt{ab}} = \frac{1}{2\sqrt{ab}}.$$

Так как (1) превращается в равенство при условии  $ax^2 = b$ , то при  $x_0 = \sqrt{\frac{b}{a}}$  имеем:

$$y_0 = \frac{1}{2\sqrt{ab}}. \quad (3)$$

В силу (2) это и есть наибольшее значение функции.

Второе решение. Разрешив соотношение

$$y = \frac{x}{ax^2 + b} \quad (4)$$

относительно  $x$ , получим:

$$x = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4aby^2}}{2ay}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что при всех вещественных  $x$  должно выполняться неравенство  $1 - 4aby^2 \geq 0$ . Отсюда

$$y \leq \frac{1}{2\sqrt{ab}}. \quad (6)$$

Так как значение  $y_0 = \frac{1}{2\sqrt{ab}}$  функция (4) принимает при некотором вещественном значении  $x_0$  (из формулы (5) находим, что  $x_0 = \sqrt{\frac{b}{a}}$ ), то в силу (6) оно является наибольшим.

258. Возьмем числовую ось и отметим на ней точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , соответствующие числам  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ . Точку

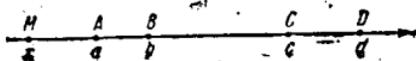


Рис. 6.

переменной абсциссой  $x$  будем обозначать через  $M$  (рис. 6). Рассмотрим следующие пять случаев.

1)  $x \leq a$ ; тогда

$$\varphi(x) = MA + MB + MC + MD = AB + 2MB + 2BC + CD.$$

Отсюда ясно, что  $\varphi(x)$  будет принимать наименьшее значение в том случае, когда точка  $M$  совпадает с точкой  $A$ , и то это значение равно

$$3AB + 2BC + CD.$$

2)  $a < x \leq b$ ; тогда

$$\varphi(x) = AM + MB + MC + MD = AB + 2MB + 2BC + CD.$$

Наименьшее значение функция  $\varphi(x)$  принимает тогда, когда точка  $M$  совпадает с точкой  $B$ ; это значение равно

$$AB + 2BC + CD.$$

3)  $b \leq x \leq c$ ;  $\varphi(x)$  при этих значениях  $x$  постоянна равна

$$AB + 2BC + CD.$$

4)  $c \leq x < d$ ; наименьшее значение функция  $\varphi(x)$  принимает при  $x = c$ ; оно равно также

$$AB + 2BC + CD.$$

5)  $x \geq d$ ; наименьшее значение функции  $\varphi(x)$  равно

$$AB + 2BC + 3CD.$$

Сравнивая полученные результаты, видим, что наименьшее значение функции  $\varphi(x)$  равно  $AB + 2BC + CD$ , или

$$b - a + 2(c - b) + d - c = d + c - b - a.$$

Это значение функция  $\varphi(x)$  принимает при условии, что

$$b \leq x \leq c.$$

259. Пусть  $r$  — модуль и  $\varphi$  — аргумент комплексного числа  $z$  ( $r \geq 0$ ,  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ). Тогда  $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$  данное уравнение принимает вид

$$r^2(\cos 2\varphi + i \sin 2\varphi) + r = 0.$$

Отсюда либо  $r = 0$  и  $z = z_1 = 0$ , либо

$$r \cos 2\varphi + 1 + ir \sin 2\varphi = 0$$

и, значит,

$$\left. \begin{aligned} \sin 2\varphi &= 0, \\ r \cos 2\varphi + 1 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Первому уравнению удовлетворяют значения  $\varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  а так как в силу второго уравнения  $\cos 2\varphi < 0$ , то остаются только значения  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  и  $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ . При этом в обоих случаях из второго уравнения находим  $r = 1$ , так что получаем два решения:

$$z_1 = 1\left(\cos \frac{\pi}{2} + i \sin \frac{\pi}{2}\right) = i, \quad z_2 = 1\left(\cos \frac{3\pi}{2} + i \sin \frac{3\pi}{2}\right) = -$$

260. Представим  $z$  в виде  $z = x + iy$ . Тогда уравнение

$$\left| \frac{z-4}{z-8} \right| = 1 \text{ примет вид}$$

$$(x-4)^2 + y^2 = (x-8)^2 + y^2.$$

отсюда  $x = 6$  и, стало быть,  $z = 6 + iy$ . Подставляем это значение в уравнение  $\left| \frac{z-12}{z-8i} \right| = \frac{5}{3}$ . Тогда после упрощения уравнение примет вид

$$y^2 - 25y + 136 = 0.$$

отсюда

$$y_{1,2} = \frac{25 \pm \sqrt{625 - 4 \cdot 136}}{2} = \frac{25 \pm \sqrt{625 - 544}}{2} = \frac{25 \pm 9}{2},$$

е.  $y_1 = 17$ ;  $y_2 = 8$ .

Ответ:  $z_1 = 6 + 17i$ ;  $z_2 = 6 + 8i$ .

261. Для сокращения записи положим  $\frac{1+i}{2} = z$ . Рассматриваемое произведение

$$(1+z)(1+z^2)(1+z^4) \dots (1+z^{2^n})$$

имеет тот же вид, что и произведение в задаче 223. Обозначим это произведение для краткости через  $P$ .

Поступая так же, как и в задаче 219, найдем:

$$P = \frac{1 - z^{2^{n+1}}}{1 - z}.$$

стается в данную формулу подставить вместо  $z$  его значение. Будем иметь:

$$\frac{1}{1-z} = \frac{1}{1 - \frac{1+i}{2}} = \frac{2}{1-i} = \frac{2(1+i)}{(1-i)(1+i)} = 1+i$$

, далее,

$$\begin{aligned} 1 - z^{2^{n+1}} &= 1 - \left( \frac{1+i}{2} \right)^{2^{n+1}} = 1 - \left[ \left( \frac{1+i}{2} \right)^2 \right]^{2^n} = \\ &= 1 - \left( \frac{i}{2} \right)^{2^n}. \end{aligned} \quad (1)$$

Заметим, что при  $n \geq 2$  имеем  $i^{2^n} = (i^4)^{2^{n-2}} = 1$ . Следовательно, в силу (1), при  $n \geq 2$  будет  $1 - z^{2^{n+1}} = 1 - \frac{1}{2^{2^n}}$

$$P = (1+i) \left( 1 - \frac{1}{2^{2^n}} \right).$$

При  $n=1$  имеем:

$$1 - z^{2^{n+1}} = 1 - \left(\frac{i}{2}\right)^2 = \frac{5}{4}.$$

Ответ:

$$P = (1 + i) \frac{5}{4}.$$

**262.** Так как вычитание комплексных чисел геометрически проводится по правилу параллелограмма, то модуль разности двух комплексных чисел  $|z' - z''|$  равен расстоянию между соответствующими точками комплексной плоскости. Следовательно, условию  $|z - 25i| \leq 15$  удовлетворяют точки комплексной плоскости, лежащие внутри и на границе круг с центром в точке  $z_0 = 25i$  и радиусом 15 (рис. 7). Из чертежа видно, что числу с наименьшим аргументом соответствует точка  $z_1$ , в которой прямая, проведенная из точки  $O$ , касается окружности. Из прямоугольного треугольника  $Oz_1z_0$  находим  $x_1 = 12$  и  $y_1 = 16$ . Искомое число будет  $z_1 = 12 + 16i$ .

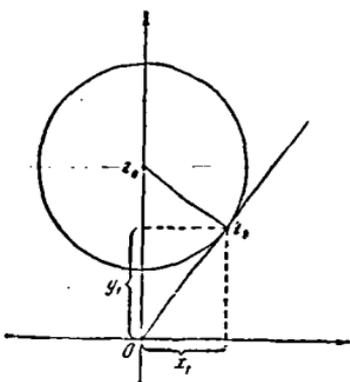


Рис. 7.

**263.** Докажем, что для представления комплексного числа  $a + bi$  в виде

$$a + bi = \frac{1 - ix}{1 + ix} \quad (1)$$

необходимо и достаточно, чтобы  $|a + bi| = 1$  и  $a + ib \neq -1$

Докажем необходимость. Пусть выполняется равенство (1)  
Тогда

$$|a + bi| = \left| \frac{1 - ix}{1 + ix} \right| = 1,$$

так как

$$|1 - ix| = |1 + ix| = \sqrt{1 + x^2}.$$

Далее,

$$\frac{1 - ix}{1 + ix} \neq -1,$$

так как в противном случае мы бы имели  $1 - ix = -1 - i$   
т. е.  $2 = 0$ .

Докажем достаточность. Пусть

$$|a + bi| = 1 \text{ и } a + ib \neq -1.$$

Положим  $\arg(a + bi) = \alpha$ , где  $-\pi < \alpha < \pi$ . Заметим, что  $\alpha \neq \pi$  в силу условия  $a + ib \neq -1$ . Имеем теперь:

$$a + bi = |a + bi|(\cos \alpha + i \sin \alpha) = \cos \alpha + i \sin \alpha. \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

оставляя эти выражения в правую часть формулы (2), получаем:

$$a + bi = \frac{\left(1 + i \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)^2}{\left(1 + i \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)\left(1 - i \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{1 + i \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - i \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{1 - ix}{1 + ix},$$

где  $x = -\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ .

264. Пусть  $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ ; тогда

$$|z^2 + 1| = \sqrt{(r^2 \cos 2\varphi + 1)^2 + (r^2 \sin 2\varphi)^2} = \sqrt{r^4 + 2r^2 \cos 2\varphi + 1};$$

$$\left|z + \frac{1}{z}\right| = \frac{|z^2 + 1|}{r} = 1;$$

$$r^4 + r^2(2 \cos 2\varphi - 1) + 1 = 0.$$

Положим  $r^2 = t$ ;  $|z|$  примет наибольшее значение тогда, когда наибольшее значение примет  $t$ . Имеем:

$$t = \frac{1 - 2 \cos 2\varphi \pm \sqrt{(1 - 2 \cos 2\varphi)^2 - 4}}{2}.$$

ак как нас интересует наибольшее значение  $t$ , то перед прием нужно взять знак плюс. Легко видеть, что наибольшее значение  $t$  достигается тогда, когда  $\cos 2\varphi = -1$ , т. е.

и  $\varphi = \frac{\pi}{2} + k\pi$ . Это значение равно  $\frac{3 + \sqrt{5}}{2}$ . Следова-

тельно, наибольшее значение  $|z|$  равно  $\sqrt{\frac{3 + \sqrt{5}}{2}} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$ .

265. Угол между двумя соседними лучами равен  $\frac{2\pi}{n}$ . Обозначим через  $d_1, d_2, \dots$  расстояния оснований перпендикулов, последовательно опускаемых на лучи, исходящие из точки  $A$  (рис. 8). Очевидно, имеем:

$$d_k = d \left( \cos \frac{2\pi}{n} \right)^k \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Длина  $k$ -го перпендикуляра равна

$$L_k = d_{k-1} \sin \frac{2\pi}{n} = d \sin \frac{2\pi}{n} \left( \cos \frac{2\pi}{n} \right)^{k-1}.$$

Полная длина ломаной из  $m$  звеньев будет

$$d \sin \frac{2\pi}{n} \left[ 1 + \cos \frac{2\pi}{n} + \left( \cos \frac{2\pi}{n} \right)^2 + \dots + \left( \cos \frac{2\pi}{n} \right)^{m-1} \right].$$

Длина  $L$  бесконечно загибающейся ломаной получится при неограниченном увеличении  $m$  и выразится суммой членов бесконечной убывающей геометрической прогрессии со знаменателем

$$q = \cos \frac{2\pi}{n} \text{ и первым членом}$$

$$d \sin \frac{2\pi}{n} :$$

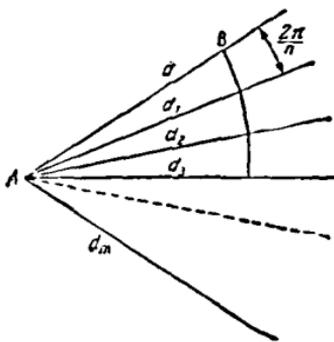


Рис. 8.

$$L = d \frac{\sin \frac{2\pi}{n}}{1 - \cos \frac{2\pi}{n}} = d \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}.$$

При увеличении  $n$  длина  $L$  растет и при неограниченном увеличении  $n$  растет неограниченно.

266. Пусть  $1abcde$  — искомое число. (Здесь буквы  $a, c, d, e$  обозначают цифры соответствующих разрядов.) Очевидно,  $e = 7$ , так как  $1abcde \times 3 = abcde1$ . После умножения 7 на 3 двойка переходит в следующий разряд, поэтому произведение  $d \times 3$  должно оканчиваться цифрой 5. Значит  $d = 5$ . Имеем  $1abc57 \cdot 3 = abc571$ . Рассуждая аналогично находим, что  $c = 8, b = 2$  и, наконец,  $a = 4$ . Искомое число есть 142857.

267. В основании пирамиды шары уложены в виде р-стороннего треугольника. Пусть сторона этого треуго-

ника содержит  $n$  шаров. Тогда в основании пирамиды лежит  $n + (n-1) + (n-2) + \dots + 3 + 2 + 1 = \frac{n(n+1)}{2}$  шаров.

Следующий, второй слой пирамиды содержит

$$(n-1) + (n-2) + \dots + 3 + 2 + 1 = \frac{(n-1)n}{2} \text{ шаров.}$$

Третий слой пирамиды содержит  $\frac{(n-2)(n-1)}{2}$  шаров и т. д.

оследний, самый верхний, слой состоит из одного шара. Всего в пирамиде 120 шаров. Следовательно,

$$20 = \frac{n(n+1)}{2} + \frac{(n-1)n}{2} + \frac{(n-2)(n-1)}{2} + \dots \\ \dots + \frac{3 \cdot 4}{2} + \frac{2 \cdot 3}{2} + \frac{1 \cdot 2}{2}.$$

равая часть равенства равна  $\frac{n(n+1)(n+2)}{6}$  (см. задачу 250,

тр. 46), следовательно, для определения  $n$  получаем уравнение

$$n(n+1)(n+2) = 720. \quad (1)$$

то уравнение имеет очевидное решение  $n=8$ . Для отыскания других решений этого уравнения переносим 720 в левую часть и получающийся там многочлен делим на  $n-8$ . Частное от деления будет равно  $n^2 + 11n + 90$ . Так как корни того последнего многочлена не вещественны, то уравнение 1) не имеет других целых решений, кроме  $n=8$ . Итак, в основании пирамидальной фигуры лежит  $\frac{n(n+1)}{2} = 36$  шаров.

268. Так как число наполненных ящиков равно  $m$ , то число вложенных ящиков будет равно  $mk$ . Отсюда вытекает, то количество всех ящиков (вместе с первым) равно  $k+1$ . Следовательно, число пустых ящиков равно

$$mk + 1 - m = m(k-1) + 1.$$


---

# ГЕОМЕТРИЯ

## А. ПЛАНИМЕТРИЯ

### 1. Задачи на вычисление

269. По теореме синусов

$$\frac{a}{\sin 2B} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin(\pi - 3B)}$$

Отсюда  $a = 2b \cos B$  и  $\sin 3B = \frac{c}{b} \sin B$ . Заметив, что

$$\begin{aligned} \sin 3B &= \sin B \cos 2B + \cos B \sin 2B = \\ &= \sin B (\cos 2B + 2 \cos^2 B) = \sin B (4 \cos^2 B - 1) \end{aligned}$$

получим  $4 \cos^2 B - 1 = \frac{c}{b}$ , откуда  $\cos^2 B = \frac{b+c}{4b}$ . Следов

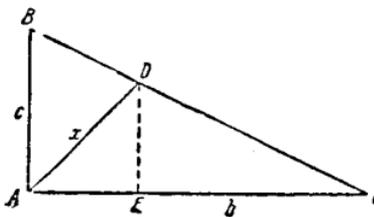


Рис. 9.

тельно,

$$a = 2b \sqrt{\frac{b+c}{4b}} = \sqrt{b^2 + bc}.$$

270. Пусть  $AD$  — биссектри прямого угла  $A$  в  $\triangle ABC$ .  $DE \perp AC$  (рис. 9). Так как

$$\angle DAE = \frac{\pi}{4}, \text{ то } AE = DE = \frac{x}{\sqrt{2}}$$

где  $x = AD$  — искомая длина. Очевидно

$$\frac{ED}{AB} = \frac{CE}{CA}, \text{ или } \frac{\frac{x}{\sqrt{2}}}{c} = \frac{b - \frac{x}{\sqrt{2}}}{b}.$$

Отсюда

$$x = \frac{bc\sqrt{2}}{b+c}.$$

271. В треугольнике  $ABC$  (рис. 10)  $O$  есть точка пересечения медиан  $AD$  и  $BE$ ,  $AC=b$ ,  $BC=a$ . Найдём  $AB=c$ .

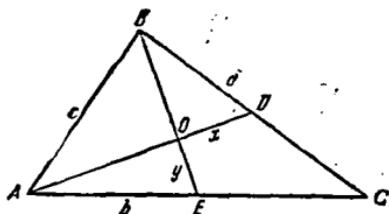


Рис. 10.

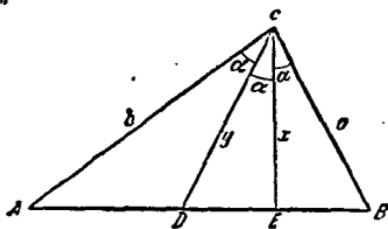


Рис. 11.

Пусть  $OD=x$ ,  $OE=y$ . Используя свойство медиан, из треугольников  $AOB$ ,  $BOD$  и  $AOE$  найдем:

$$4x^2 + y^2 = \frac{b^2}{4}, \quad 4x^2 + 4y^2 = c^2, \quad 4x^2 + 16y^2 = a^2.$$

Исключив  $x$  и  $y$ , получим:

$$c^2 = \frac{a^2 + b^2}{5}.$$

Условия существования треугольника со сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  принимают вид

$$5(a+b)^2 > a^2 + b^2, \quad 5(a-b)^2 < a^2 + b^2.$$

Первое неравенство, очевидно, выполнено при любых  $a$  и  $b$ , а второе преобразуется в следующее:

$$a^2 - \frac{5}{2}ab + b^2 < 0.$$

ешив это неравенство относительно  $\frac{a}{b}$ , окончательно получим:

$$\frac{1}{2} < \frac{a}{b} < 2.$$

272. Пусть  $\angle ACD = \angle DCE = \angle ECB = \alpha$  и  $CE=x$ ,  $CD=y$  (рис. 11). Для площади треугольника  $ABC$  можно написать следующие три выражения:

$$S_{ACD} + S_{DCB} = \frac{1}{2} by \sin \alpha + \frac{1}{2} ay \sin 2\alpha,$$

$$S_{ACB} + S_{ECB} = \frac{1}{2} bx \sin 2\alpha + \frac{1}{2} ax \sin \alpha,$$

$$S_{ACD} + S_{DCE} + S_{ECB} = \frac{1}{2} by \sin \alpha + \frac{1}{2} xy \sin \alpha + \frac{1}{2} ax \sin \alpha.$$

Приравнивая друг другу левые части этих равенств и учитывая условие задачи, придем к системе трех уравнений:

$$2a \cos \alpha = x + a \frac{x}{y},$$

$$2b \cos \alpha = y + b \frac{y}{x},$$

$$\frac{x}{y} = \frac{m}{n}.$$

Решив ее, получим:

$$x = \frac{(n^2 - m^2)ab}{n(bm - an)}, \quad y = \frac{(n^2 - m^2)ab}{m(bm - an)}.$$

273. Обозначим через  $S$  площадь данного треугольника  $ABC$  (рис. 12) и положим  $\frac{AD}{AB} = x$ . Тогда площадь  $\triangle ADE$

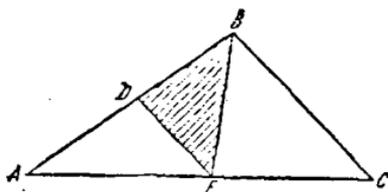


Рис. 12.

будет равна  $x^2S$ , а площадь  $\triangle ABE$  равна  $xS$ . Условие задачи приводит к уравнению,

$$xS - x^2S = k^2,$$

решив которое, получим:

$$x = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4k^2}{S}}}{2}.$$

Задача разрешима, если  $S \geq 4k^2$ , и имеет два или одно решение в зависимости от того, будет ли  $S > 4k^2$  или  $S = 4k^2$  соответственно.

274. Обозначим через  $S$  площадь данного треугольника  $ABC$ . Полученные указанным в условии задачи построением треугольнички с площадями  $S_1, S_2, S_3$  подобны  $\triangle ABC$  (рис. 13). Поэтому их площади

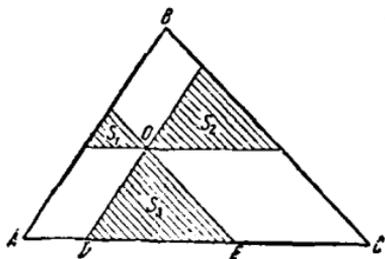


Рис. 13.

относятся как квадраты сходственных сторон, откуда

$$\sqrt{\frac{S_1}{S}} = \frac{AD}{AC}, \quad \sqrt{\frac{S_2}{S}} = \frac{EC}{AC}, \quad \sqrt{\frac{S_3}{S}} = \frac{DE}{AC}.$$

Сложив эти равенства почленно, найдем:

$$S = (\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2} + \sqrt{S_3})^2.$$

275. Третью сторону треугольника, равную опущенной на нее высоте, обозначим через  $x$ . Используя два выражения для площади данного треугольника, получим уравнение

$$\frac{1}{2}x^2 = \sqrt{\frac{b+c+x}{2} \cdot \frac{c+x-b}{2} \cdot \frac{x+b-c}{2} \cdot \frac{b+c-x}{2}}.$$

ешив его, найдем:

$$x^2 = \frac{1}{5}(b^2 + c^2 \pm 2\sqrt{3b^2c^2 - b^4 - c^4}). \quad (1)$$

еобходимым условием разрешимости задачи является условие

$$3b^2c^2 \geq b^4 + c^4. \quad (2)$$

сли оно выполнено, то оба значения  $x^2$  в (1) положительны. Легко проверить, что при выполнении (2) будут также выполнены неравенства

$$b+c > x \geq |b-c|,$$

ричем знак равенства имеет место только в том случае, когда  $x=0$ . Последнее имеет место, если в (1) при  $b=c$  зять перед корнем знак минус. Следовательно, в случае  $b=c$  задача имеет единственное решение

$$x = \frac{2}{\sqrt{5}}b.$$

сли  $b \neq c$ , то треугольник существует лишь в том случае, когда выполнено неравенство (2). Решив его относительно  $b$ , найдем, что оно эквивалентно следующим неравенствам:

$$\frac{2}{1+\sqrt{5}} \leq \frac{b}{c} \leq \frac{1+\sqrt{5}}{2}. \quad (3)$$

ледовательно, при  $b \neq c$  существуют два треугольника, и оба неравенства (3) выполнены со знаком  $<$ , и один угольник, если хотя бы одно из неравенств (3) выполнено знаком  $=$ .

276. Сначала предположим, что  $\triangle ABC$  остроугольный (рис. 14). Тогда

$$S_{ABC} - S_{A_1B_1C_1} = S_{B_1AC_1} + S_{C_1BA_1} + S_{A_1CB_1}. \quad (1)$$

Имеем:

$$\begin{aligned} S_{B_1AC_1} &= \frac{1}{2} AB_1 \cdot AC_1 \sin A = \frac{1}{2} AB \cos A \cdot AC \cos A \sin A = \\ &= \frac{1}{2} AB \cdot AC \sin A \cos^2 A = S_{ABC} \cos^2 A \end{aligned}$$

и аналогично

$$S_{C_1BA_1} = S_{ABC} \cos^2 B, \quad S_{A_1CB_1} = S_{ABC} \cos^2 C.$$

Подставив эти выражения в (1), после очевидных преобразований получим:

$$\frac{S_{A_1B_1C_1}}{S_{ABC}} = 1 - \cos^2 A - \cos^2 B - \cos^2 C. \quad (2)$$

Если  $\triangle ABC$  тупоугольный (рис. 15), то вместо (1) будем иметь:

$$S_{ABC} + S_{A_1B_1C_1} = S_{B_1AC_1} + S_{C_1BA_1} + S_{A_1CB_1}$$

и, соответственно, вместо (2)

$$\frac{S_{A_1B_1C_1}}{S_{ABC}} = \cos^2 A + \cos^2 B + \cos^2 C - 1. \quad (3)$$

Наконец, если  $\triangle ABC$  прямоугольный, то  $S_{A_1B_1C_1} = 0$ , что как легко проверить, получается также из формул (2) или (3)

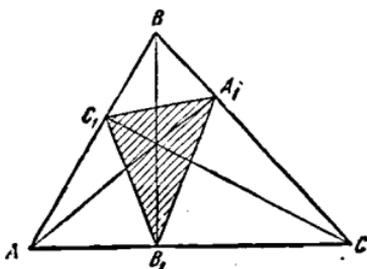


Рис. 14.

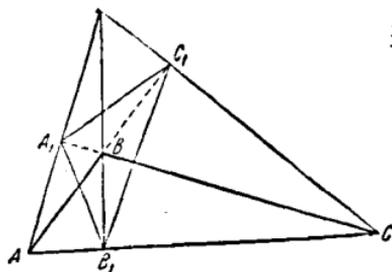


Рис. 15.

277. 1) Пусть  $BO$  и  $CO$  — биссектрисы внутренних углов  $\triangle ABC$  (рис. 16). Легко видеть, что треугольнички  $BOM$  и  $CON$  равнобедренные. Следовательно,  $MN = BM + CN$ .

2) Зависимость  $MN = BM + CN$  имеет место и в случае внешних биссектрис.

3) Если одна из биссектрис внутренняя, а другая — внешняя (рис. 17), то из внутренних треугольников  $BMO$  и  $CNO$

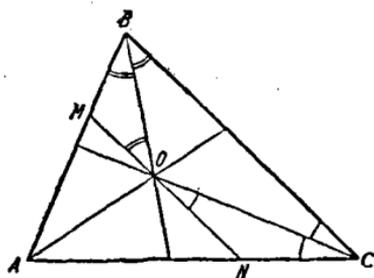


Рис. 16.

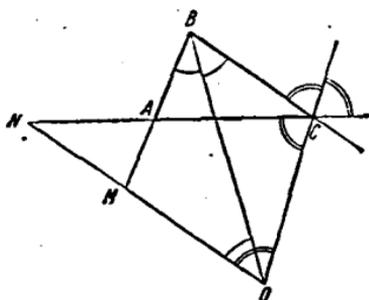


Рис. 17.

находим  $MN = CN - BM$ , когда  $CN > BM$ , и  $MN = BM - CN$ , когда  $CN < BM$ . Итак, в этом случае

$$MN = |CN - BM|.$$

Точки  $M$  и  $N$  совпадают только в случае (3), если  $ABC$  равнобедренный ( $AB = AC$ ).

278. Проведем через точку  $P$  три прямые, параллельные сторонам треугольника (рис. 18).

три образовавшихся треугольника (заштрихованные на рисунке) также правильные, и сумма их сторон равна стороне  $AB = a$  треугольника  $ABC$ . Значит, и сумма высот равна высоте  $\triangle ABC$ , к что

$$PD + PE + PF = \frac{a\sqrt{3}}{2}.$$

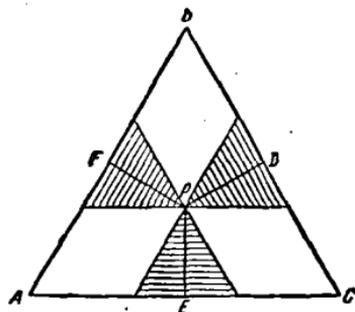


Рис. 18.

сумма  $BD + CE + AF$  равна сумме сторон заштрихованных треугольников, сложенной с суммой половин этих же сторон, так что

$$BD + CE + AF = \frac{3}{2}a.$$

Следовательно,

$$\frac{PD + PE + PF}{BD + CE + AF} = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

279. Пусть  $O$  — точка пересечения медиан в  $\triangle ABC$  (рис. 19). На продолжении медианы  $BE$  отложим  $ED = OE$ .

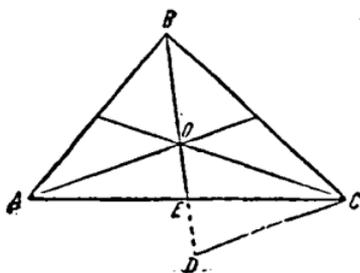


Рис. 19.

По свойству медиан стороны  $\triangle CDO$  равны  $\frac{2}{3}$  сторон треугольника, составленного из медиан. Обозначив площадь последнего через  $S_1$ , будем иметь:

$$S_1 = \frac{9}{4} S_{CDO}.$$

С другой стороны,  $\triangle CDO$  составлен из двух, а  $\triangle ABC$  — из шести треугольников, равновеликих  $\triangle CEO$ . Поэтому

$$S_{CDO} = \frac{1}{3} S_{ABC}. \text{ Следовательно, } \frac{S_1}{S_{ABC}} = \frac{3}{4}.$$

280. Пусть  $ABC$  — данный треугольник (рис. 20). Площадь  $\triangle COB$  равна  $\frac{1}{2} ar$ , а площадь

$\triangle COA$  равна  $\frac{1}{2} br$ . Складывая эти величины и выражая площадь  $\triangle ABC$  по формуле Герона, получим:

$$r = \frac{2}{a+b} \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)},$$

где  $p = \frac{1}{2}(a+b+c)$ .

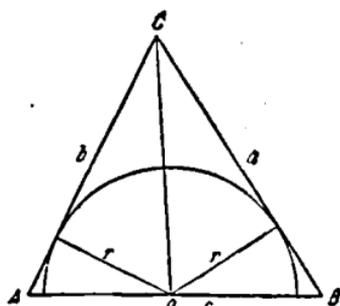


Рис. 20.

281. Пусть  $R$  — радиус описанного круга и  $r$  — радиусу вписанного. Тогда (рис. 21)  $AB = 2R$ , а также

$$AB = r \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + r \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}.$$

Отсюда

$$\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} = \frac{2R}{r} = 5.$$

Кроме того,  $\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} = \frac{\pi}{4}$  и  $\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2}\right) = 1$ , т. е.

$$\frac{\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg}\frac{\beta}{2} - 1}{\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg}\frac{\beta}{2}} = 1,$$

откуда

$$\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg}\frac{\beta}{2} = 6.$$

Следовательно,  $\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}$  и  $\operatorname{ctg}\frac{\beta}{2}$  равны корням квадратного уравнения  $x^2 - 5x + 6 = 0$ .

Окончательно получаем:

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg}\frac{1}{2}, \quad \beta = 2 \operatorname{arctg}\frac{1}{3}.$$

282. Обозначим через  $a$  и  $b$  стороны данного прямоугольника и через  $\varphi$  — угол между стороной описанного и данного

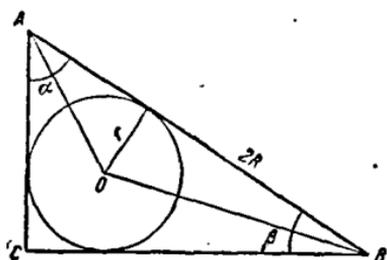


Рис. 21.

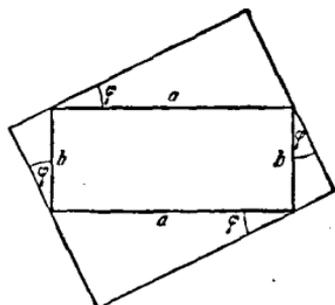


Рис. 22.

прямоугольников (рис. 22). Тогда стороны описанного прямоугольника будут равны

$$a \cos \varphi + b \sin \varphi \quad \text{и} \quad a \sin \varphi + b \cos \varphi.$$

о условию задачи

$$(a \cos \varphi + b \sin \varphi)(a \sin \varphi + b \cos \varphi) = m^2,$$

откуда найдем:

$$\sin 2\varphi = \frac{2(m^2 - ab)}{a^2 + b^2}.$$

Условием разрешимости задачи будет  $0 \leq \sin 2\varphi \leq 1$ , что равносильно следующим неравенствам:

$$\sqrt{ab} \leq m \leq \frac{a+b}{\sqrt{2}}.$$

283. Если  $\angle AED = \angle DEC$  (рис. 23), то также  $\angle CDE = \angle DEC$ , откуда  $CE = CD$ . Следовательно,  $E$  есть точка пересечения стороны  $AB$  с окружностью, описанной из

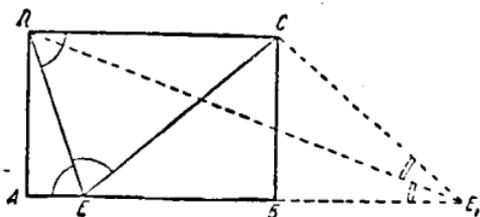


Рис. 23.

центра  $C$  радиусом  $CD$ . Задача разрешима, если  $AB \geq BC$ , причем имеет два решения, когда  $AB > BC$ , и одно решение когда  $AB = BC$ . (Точка  $E_1$  на рис. 23 соответствует второму решению.)

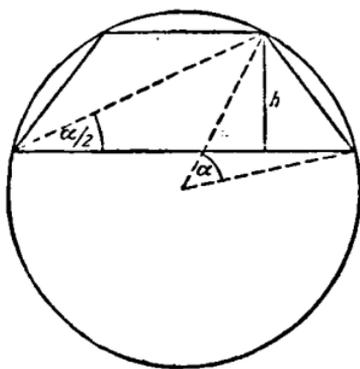


Рис. 24.

284. Боковая сторона видна из вершины нижнего основания под углом  $\frac{\alpha}{2}$  (рис. 24), а средняя линия равна отрезку от этой вершины до основания высоты, опущенной из противоположной вер-

шины, т. е.  $h \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$ . Следовательно, площадь трапеции

$$S = h^2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}.$$

285. Середины диагоналей  $E$  и  $F$  трапеции лежат на ее средней линии  $MN$  (рис. 25). Но  $ME = FN = \frac{a}{2}$

Следовательно,

$$EF = \frac{b+a}{2} - a = \frac{b-a}{2}.$$

286. Параллелограмм составлен из 8 треугольников, равновеликих треугольнику  $AOB$ . Фигура (восьмиугольник), по-

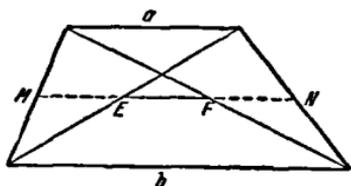


Рис. 25.

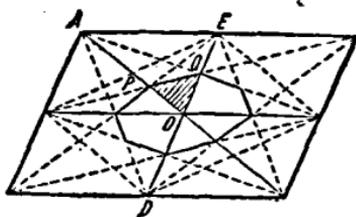


Рис. 26.

ученная путем указанного построения, также составлена из треугольников, равновеликих  $\triangle POQ$  (рис. 26). Так как  $P = \frac{1}{3} OA$  (по свойству медиан в  $\triangle DAE$ ) и  $OQ = \frac{1}{2} OE$ , то

$$S_{POQ} = \frac{1}{6} S_{AOB}.$$

Следовательно, искомое отношение равно  $\frac{1}{6}$ .

287. Очевидно, что  $KLMN$  — параллелограмм (рис. 27), причем  $KL = \frac{2}{5} AQ$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} S_{KLMN} &= \frac{2}{5} S_{AQCS} = \\ &= \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{2} a^2 = \frac{1}{5} a^2. \end{aligned}$$

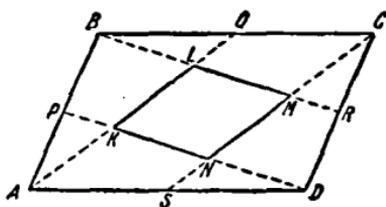


Рис. 27.

288. Двум данным хордам длинами  $2a$  и  $2b$  соответствуют центральные углы  $2\alpha$  и  $2\beta$ , где

$$\sin \alpha = \frac{a}{R}, \quad \sin \beta = \frac{b}{R}.$$

Дугу, равную  $2(\alpha \pm \beta)$ , стягивает хорда  $2c$ , где

$$c = R |\sin(\alpha \pm \beta)| = \left| \frac{a}{R} \sqrt{R^2 - b^2} \pm \frac{b}{R} \sqrt{R^2 - a^2} \right|.$$

289. Искомая площадь равна сумме площадей двух секторов с углами  $2\alpha$  и  $2\beta$  (рис. 28) без удвоенной площади треугольника со сторонами  $R$ ,  $r$ ,  $d$ :

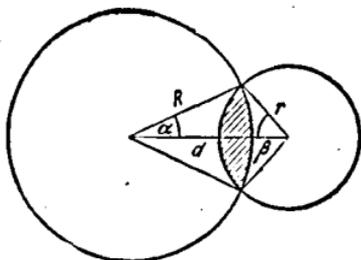


Рис. 28.

$$S = R^2\alpha + r^2\beta - Rd \sin \alpha.$$

Для определения углов  $\alpha$  и  $\beta$  имеем два уравнения:

$$R \sin \alpha = r \sin \beta,$$

$$R \cos \alpha + r \sin \beta = d,$$

решая которые, находим:

$$\cos \alpha = \frac{d^2 + R^2 - r^2}{2Rd},$$

$$\cos \beta = \frac{d^2 + r^2 - R^2}{2rd}.$$

Следовательно,

$$S = R^2 \arccos \frac{d^2 + R^2 - r^2}{2Rd} + r^2 \arccos \frac{d^2 + r^2 - R^2}{2rd} - Rd \sqrt{1 - \left( \frac{d^2 + R^2 - r^2}{2Rd} \right)^2}.$$

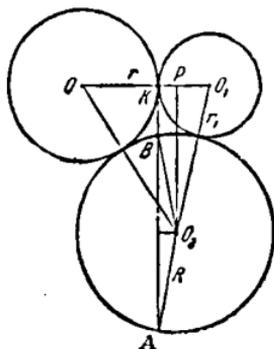


Рис. 29.

290. Пусть  $K$  — точка касания двух окружностей, имеющих радиусы  $r$  и  $r_1$ , и  $P$  — основание перпендикуляра, опущенного из центра  $O_2$  третьей окружности на  $OO_1$  (рис. 29). Положив  $KP = x$ , будем иметь:

$$AB = 2\sqrt{R^2 - x^2}. \quad (1)$$

Величина  $x$  определяется из уравнения

$$(R + r)^2 - (r + x)^2 = (R + r_1)^2 - (r_1 - x)^2$$

и равна  $x = \frac{r-r_1}{r+r_1}R$ . Подставив это значение в (1), получим:

$$AB = \frac{4\sqrt{rr_1}}{r+r_1}R.$$

291. Пусть  $O_1, O_2, O_3$  — центры трех равных окружностей и  $O$  — центр круга радиуса  $r$  (рис. 30). Обозначим через  $S_{O_1O_2O_3}$  площадь  $\triangle O_1O_2O_3$ ,  $S_{AO_2B}$  — площадь сектора  $AO_2B$ ; тогда искомая площадь будет

$$S = \frac{1}{3}(S_{O_1O_2O_3} - 3S_{AO_2B} - \pi r^2). \quad (1)$$

Если  $R$  — общий радиус трех кругов, то

$$R = \frac{\sqrt{3}}{2}(R+r),$$

откуда

$$R = \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}}r = (3 + 2\sqrt{3})r.$$

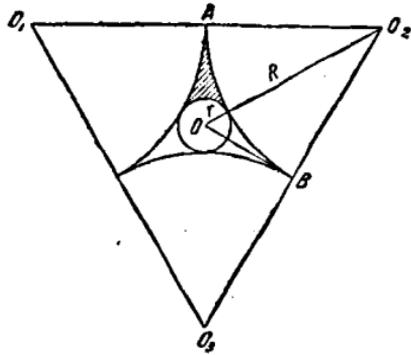


Рис. 30.

Далее, находим:

$$S_{O_1O_2O_3} = \frac{1}{2} 2RR\sqrt{3} = \sqrt{3}R^2 = 3(12 + 7\sqrt{3})r^2,$$

$$S_{AO_2B} = \frac{1}{6} \pi R^2 = \frac{\pi}{2}(7 + 4\sqrt{3})r^2$$

по формуле (1) окончательно получаем:

$$S = \left[ 12 + 7\sqrt{3} - \left( \frac{23}{6} + 2\sqrt{3} \right) \pi \right] r^2.$$

292. Обозначим через  $a$  и  $b$  расстояния данной точки  $A$  от данных прямых  $l_1$  и  $l_2$ , а через  $x$  и  $y$  — длины катетов искомого треугольника (рис. 31). Заметив, что  $\frac{a}{x} = \sin \varphi$ ,  $\frac{b}{y} = \cos \varphi$ , будем иметь два уравнения:

$$\frac{a^2}{x^2} + \frac{b^2}{y^2} = 1, \quad \frac{1}{2}xy = k^2.$$

Преобразовав эти уравнения, придем к системе

$$xy = 2k^2,$$

$$b^2x^2 + a^2y^2 = 4k^4.$$

Решив ее, получим

$$x = \frac{k}{b} \left| \sqrt{k^2 + ab} \pm \sqrt{k^2 - ab} \right|,$$

$$y = \frac{k}{a} \left| \sqrt{k^2 + ab} \mp \sqrt{k^2 - ab} \right|.$$

Задача разрешима при  $k^2 \geq ab$  и имеет два решения при  $k^2 > ab$  и одно решение при  $k^2 = ab$ .

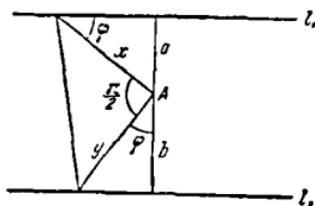


Рис. 31.

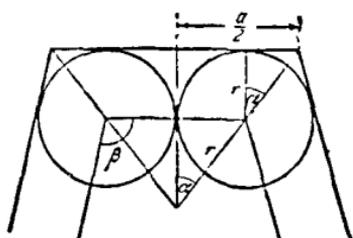


Рис. 32.

293. Соединив центры кругов, получим многоугольник, подобный данному. Центр полученного многоугольника совпадает с центром данного и стороны его соответственно параллельны сторонам данного (рис. 32).

Пусть  $r$  — общий радиус рассматриваемых кругов. Тогда сторона построенного нами многоугольника равна  $2r$ , а его площадь

$$\sigma = nr^2 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}.$$

Пусть, далее,  $\beta = \frac{\pi(n-2)}{n}$  — внутренний угол многоугольника. Для искомой площади  $S$  «звездочки» мы получаем выражение

$$S = \sigma - n \frac{r^2}{2} \beta = nr^2 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} - n \frac{r^2}{2} \beta.$$

Легко далее видеть (см. рис. 32), что

$$\frac{a}{2} - r = r \operatorname{tg} \frac{\pi}{n},$$

откуда  $r = \frac{a}{2 \left(1 + \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}\right)}$  и, следовательно,

$$S = \frac{a^2}{4} \frac{n \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} - (n-2) \frac{\pi}{2}}{\left(1 + \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}\right)^2}.$$

294. В обозначениях рис. 33 имеем

$$\angle CGF = \frac{1}{2} (\widehat{FA} + \widehat{AC}), \quad \angle CDB = \frac{1}{2} (\widehat{FA} + \widehat{BC}).$$

четырёхугольник  $DEGF$  будет вписанным тогда и только тогда, когда  $\angle CGF = \angle CDB$ , т. е. когда  $\widehat{AC} = \widehat{BC}$ .

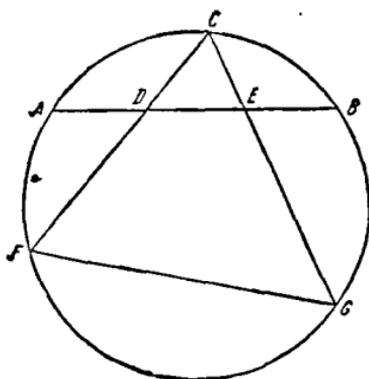


Рис. 33.

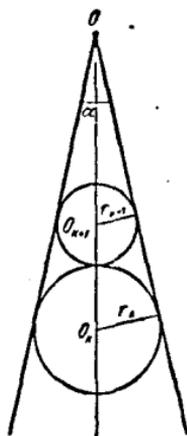


Рис. 34.

295. Пусть  $O$  — вершина острого угла  $\alpha$  и  $O_k$  — центр  $k$ -го круга (рис. 34). Тогда

$$r_k = OO_k \sin \frac{\alpha}{2}, \quad r_{k+1} = (OO_k - r_k - r_{k+1}) \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$r_{k+1} = r_k - r_k \sin \frac{\alpha}{2} - r_{k+1} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Следовательно,

$$\frac{r_{k+1}}{r_k} = \frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}{1 + \sin \frac{\alpha}{2}},$$

т. е. радиусы кругов образуют геометрическую прогрессию со знаменателем

$$\frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

296. Пусть наименьший угол между отраженными лучами и плоскостью  $P$  равен  $\alpha$  (рис. 35). Такой угол образует луч, проходящий через край зеркала  $C$  после однократного

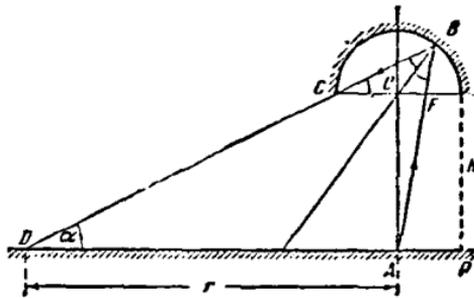


Рис. 35.

отражения в точке  $B$ . По условию задачи  $CF \parallel DA$ ; следовательно,  $\angle OCB = \angle OBC = \alpha$ . Из условия отражения в точке  $r$  следует  $\angle OBF = \alpha$ . Поэтому в треугольнике  $OBF$  имеем:

$$\angle BOF = 2\alpha, \quad \angle OFB = 180^\circ - 2\alpha - \alpha = 180^\circ - 3\alpha.$$

Обозначим расстояние от зеркала до плоскости через  $h$ , а радиус освещенного круга  $AD$  через  $r$ . Так как радиус зеркала равен 1, то

$$\frac{h}{r-1} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Из треугольника  $OBF$  по теореме синусов находим:

$$OF = \frac{\sin \alpha}{\sin 3\alpha}.$$

В силу подобия треугольников  $CBF$  и  $DBA$  высоты в них пропорциональны сторонам, так что

$$\frac{AD}{FC} = \frac{h + \sin 2\alpha}{\sin 2\alpha},$$

или

$$\frac{r}{1 + \frac{\sin \alpha}{\sin 3\alpha}} = \frac{h + \sin 2\alpha}{\sin 2\alpha}. \quad (2)$$

Решая уравнения (1) и (2) совместно, находим:

$$r = \frac{2 \cos 2\alpha}{2 \cos 2\alpha - 1}.$$

Подставив сюда данную в задаче величину  $\alpha = 15^\circ$ , получим:

$$r = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3} - 1} = \frac{3 + \sqrt{3}}{2}.$$

Далее,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin 2\alpha}{1 + \cos 2\alpha} = \frac{\frac{1}{2}}{1 + \frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{1}{2 + \sqrt{3}} = 2 - \sqrt{3},$$

отсюда из (1) получим:

$$h = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{3}) (2 - \sqrt{3}) = \frac{\sqrt{3} - 1}{2}.$$

**297.** Следует рассмотреть различные случаи в зависимости от величины отношения  $\frac{r}{a}$ .

1)  $\frac{r}{a} \geq \sqrt{2}$ . Окружности не пересекают квадрат,  $S = a^2$ .

2)  $\frac{\sqrt{5}}{2} \leq \frac{r}{a} < \sqrt{2}$ . Очевидно, в этом случае  $S = a^2 - 8\sigma$ ,

где  $\sigma$  — площадь заштрихованного криволинейного треугольника (рис. 36). Имеем:

$$\sigma = \frac{1}{2} a \sqrt{2} x - \frac{1}{2} r^2 \varphi,$$

где  $\varphi = \arcsin \frac{x}{r}$ . Для отыскания  $x$  заметим, что

$$x \sqrt{2} + \sqrt{r^2 - a^2} = a,$$

откуда

$$x = \frac{a - \sqrt{r^2 - a^2}}{\sqrt{2}}.$$

Следовательно,

$$\sigma = \frac{1}{2} a (a - \sqrt{r^2 - a^2}) - \frac{1}{2} r^2 \arcsin \frac{a - \sqrt{r^2 - a^2}}{r\sqrt{2}}.$$

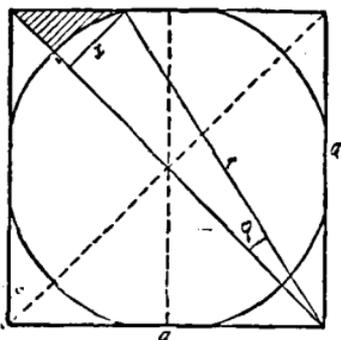


Рис. 36.

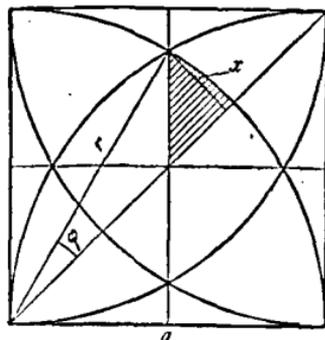


Рис. 37.

3)  $\frac{1}{\sqrt{2}} < \frac{r}{a} < \frac{\sqrt{5}}{2}$ . Здесь  $S = 8\sigma$ , где  $\sigma$  — площадь заштрихованного криволинейного треугольника (рис. 37). Имеем:

$$\sigma = \frac{1}{2} r^2 \varphi - \frac{1}{2} \frac{a}{\sqrt{2}} x,$$

где

$$\varphi = \arcsin \frac{x}{r}.$$

Замечая, что

$$\sqrt{r^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} = \frac{a}{2} + x\sqrt{2},$$

находим:

$$x = \frac{\sqrt{4r^2 - a^2} - a}{2\sqrt{2}}.$$

Следовательно,

$$\sigma = \frac{1}{2} r^2 \arcsin \frac{\sqrt{4r^2 - a^2} - a}{2\sqrt{2}r} - \frac{a(\sqrt{4r^2 - a^2} - a)}{8}.$$

4)  $\frac{r}{a} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Искомая площадь равна нулю.

298. Обозначив через  $a, b, c, d$  длины сторон и через  $m, n$  — длины диагоналей четырехугольника (рис. 38), по теореме косинусов имеем:

$$\begin{aligned} n^2 &= a^2 + d^2 - 2ad \cos \varphi, \\ n^2 &= b^2 + c^2 + 2bc \cos \varphi. \end{aligned}$$

Отсюда

$$(bc + ad)n^2 = (a^2 + d^2)bc + (b^2 + c^2)ad = (ab + cd)(ac + bd).$$

Следовательно,

$$n^2 = \frac{ab + cd}{bc + ad}(ac + bd).$$

Аналогично найдем:

$$m^2 = \frac{ad + bc}{ab + cd}(ac + bd).$$

Перемножив эти равенства, получим теорему Птолемея:

$$mn = ac + bd.$$

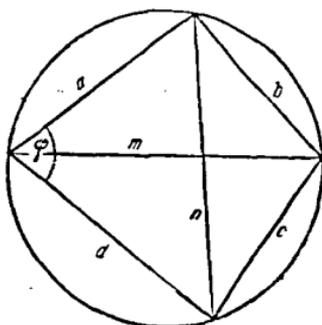


Рис. 38.

## 2. Задачи на построение

299. Пусть  $O_1$  и  $O_2$  — центры данных окружностей. Проводим прямую  $O_1A$  и через центр  $O_2$  второй окружности прямую, параллельную  $O_1A$ , которая пересекает вторую окружность в точках  $M$  и  $N$  (рис. 39). Прямая  $MA$  пересечет вторую окружность в точке  $P_1$ . Прямая  $O_2P_1$  пересечет  $O_1A$  в точке  $C_1$ . Из подобия треугольников  $MO_2P_1$  и  $AC_1P_1$  следует:

$$C_1A = C_1P_1.$$

Следовательно, окружность с центром  $C_1$  и радиусом  $C_1A$  является искомой. Второе решение получается с помощью точки  $N$  так же, как первое с помощью точки  $M$ . Если одна из прямых  $MA$  или  $NA$  будет касательной ко второй окружности, то останется одно решение, а второе даст эту каса-

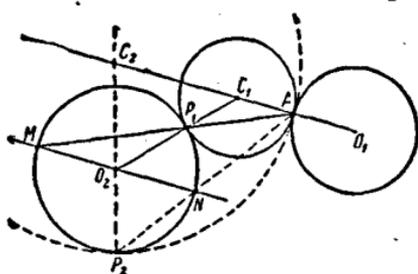


Рис. 39.

тельную (центр окружности в бесконечности). Это будет тогда и только тогда, когда  $A$  совпадет с точкой касания одной из четырех общих касательных к данным окружностям.

300. Пусть  $O$  — центр данной окружности,  $AB$  — данная прямая (рис. 40). Задача решается аналогично предыдущей.

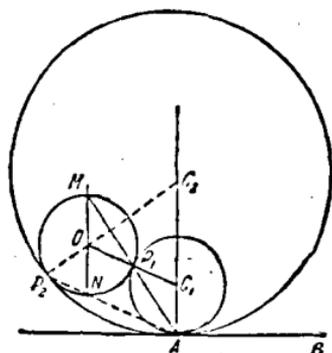


Рис. 40.

В общем случае она имеет два решения. Особыми случаями будут следующие: 1) данная прямая пересекает окружность, и данная точка  $A$  совпадает с одной из точек пересечения (нет ни одного решения); 2) данная прямая касается окружности, а точка  $A$  не совпадает с точкой касания (одно решение); 3) данная прямая касается окружности, и точка  $A$  совпадает с точкой касания (бесконечно много решений).

301. Через центр  $O$  данной окружности проводим прямую, перпендикулярную к данной прямой  $l$ , пересекающую окружность в точках  $M$  и  $N$  (рис. 41). Прямая  $MA$  пересечет  $l$  в точке  $P_1$ . Точка  $C_1$  есть точка пересечения перпендикуляра к  $l$  в точке  $P_1$  и прямой  $OA$ . Из подобия треугольников  $AOM$  и  $AC_1P_1$  следует, что  $C_1A = C_1P_1$ . Следовательно, окружность с центром  $C_1$  и радиусом  $C_1A$  является искомой. Второе решение получается с помощью точки  $N$  так же, как первое с помощью точки  $M$ . Если прямая  $l$  не проходит через одну из точек  $A$ ,  $M$ ,  $N$  и точка  $A$  не совпадает с  $M$  или  $N$ , то задача всегда имеет два решения.

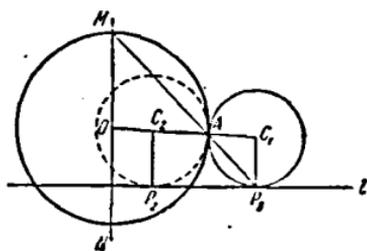


Рис. 41.

Пусть  $A$  не совпадает с  $M$  или  $N$ ; если  $l$  проходит через  $M$  или через  $N$ , то задача имеет одно решение (вторая окружность совпадает с данной окружностью); если же  $l$  проходит через  $A$ , то задача не имеет ни одного решения

Пусть  $A$  совпадает с  $M$ ; если  $l$  не проходит через  $M$  или  $N$ , то задача имеет одно решение (второе переходит в прямую  $l$ ); если  $l$  проходит через  $N$ , то решением будет данная окружность, а если  $l$  проходит через  $M$ , то задача имеет бесконечно много решений.

**302.** На данной гипотенузе  $AB=c$ , как на диаметре, построим окружность с центром в точке  $O$  (рис. 42). Проведем

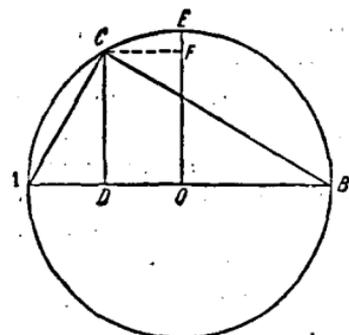


Рис. 42.

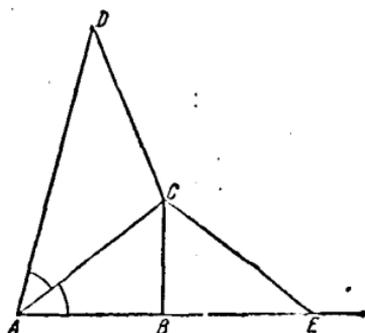


Рис. 43.

$E \perp AB$  и на  $OE$  отложим  $OF=h$ . Прямая, параллельная  $BE$  и проходящая через  $F$ , пересечет окружность в искомой точке  $C$ . Задача разрешима, если  $h \leq \frac{c}{2}$ . Длины катетов  $a, b$  найдутся из системы уравнений

$$a^2 + b^2 = c^2, \quad ab = hc.$$

ешив эту систему, получим:

$$a = \frac{1}{2} (\sqrt{c^2 + 2hc} + \sqrt{c^2 - 2hc}),$$

$$b = \frac{1}{2} (\sqrt{c^2 + 2hc} - \sqrt{c^2 - 2hc}).$$

**303.** Берем отрезок  $AB$  и на прямой  $AB$  от точки  $A$  сторону  $B$  откладываем отрезок  $AE=AD$  (рис. 43). Строим  $BCE$  на основании  $BE$  со сторонами  $BC$  и  $EC=CD$ . а отрезке  $AC$ , как на основании, строим  $\triangle ACD$  со сторонами  $AD$  и  $CD$ . Четырехугольник  $ABCD$  искомый, так как он имеет данные стороны и  $\angle DAC = \angle CAE$  (треугольники  $ACD$   $ACE$  по построению равны).

304. Пусть  $H, S, M$  — точки пересечения высоты, биссектрисы и медианы соответственно с описанной окружностью  $K$ , имеющей центр  $O$  (рис. 44). Проведем прямую  $SO$  и через  $H$  — прямую, параллельную  $SO$ , которая второй раз пересечет  $K$  в точке  $A$ . Проведем прямую  $AM$ , которая пересечет  $SO$  в точке  $P$ . Через  $P$  проведем прямую, перпендикулярную к  $SO$ , которая пересечет окружность в точках  $B$  и  $C$ . Треугольник  $ABC$

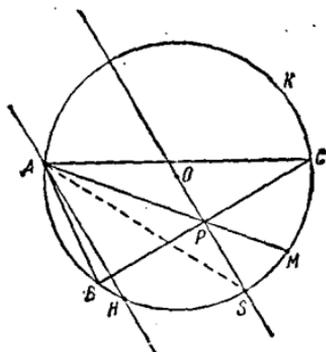


Рис. 44.

искомый, так как  $AH \perp BC$ ,  $\overset{\frown}{BS} = \overset{\frown}{SC}$  и  $BP = PC$ . Задача разрешима тогда и только тогда, когда  $H, S, M$  не лежат на одной прямой, касательная к  $K$  в точке  $H$  не параллельна

$SO$ , точки  $H$  и  $M$  лежат по разные стороны от прямой  $SO$ , но не на одном диаметре круга  $K$ .

305. А. Случай внешнего касания. Из точки  $O$  пересечения биссектрис внутренних углов треугольника  $AB$

опустим перпендикуляры  $OM, ON, OP$  на сторон

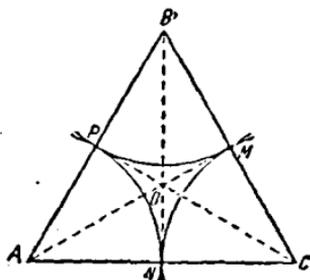


Рис. 45.

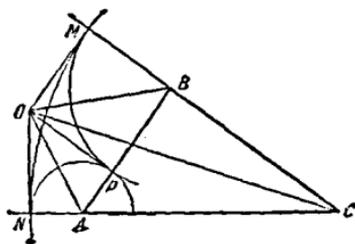


Рис. 46.

треугольника (рис. 45). Тогда  $AP = AN$ ,  $BP = BM$ ,  $CM = CN$ . Следовательно, окружности радиусов  $AP, BM, CN$  с центрами в  $A, B, C$  будут касаться друг друга в точках  $P, M, N$ .

Б. Случай внутреннего касания. Из точки пересечения биссектрисы угла  $C$  и биссектрис внешних углов  $A$  и  $B$  опустим перпендикуляры  $OM, ON$  и  $OP$  на стороны (или на продолжения сторон) треугольника  $ABC$  (рис. 4

Тогда

$$AP = AN, \quad BP = BM, \quad CM = CN.$$

Следовательно, окружности радиусов  $AP$ ,  $BM$ ,  $CN$  с центрами  $A$ ,  $B$ ,  $C$  будут касаться друг друга в точках  $P$ ,  $M$ ,  $N$ .

Еще два решения получим, беря биссектрисы внутреннего угла  $A$  и внешних  $B$  и  $C$  или внутреннего угла  $B$  и внешних  $A$  и  $C$ .

306. Решение основано на следующем свойстве: если высоты  $h_A$  и  $h_B$  вписанного треугольника  $ABC$  пересекают окружность в точках  $A_1$  и  $B_1$ , то вершина  $C$  делит дугу  $A_1B_1$  пополам (рис. 47). Это следует из равенства углов  $\angle A_1AC$  и  $\angle B_1BC$ , каждый из которых равен  $\frac{\pi}{2} - \angle ACB$ .

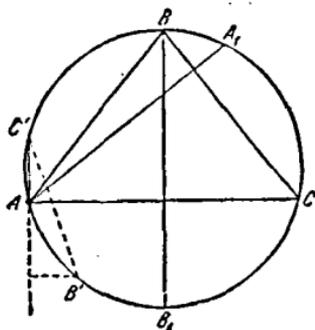


Рис. 47.

Построение. Через  $A$  проводим прямую в данном направлении до пересечения с окружностью в точке  $A_1$ ; пусть  $B_1$  — точка пересечения высоты  $h_B$  с окружностью; находим середину  $S$  дуги  $A_1B_1$  и проводим  $AC$ ; проводим  $B_1B \perp AC$ ; треугольник  $ABC$  искомый.

Второе решение  $AB'C'$  получится, если взять середину  $S'$  второй из дуг  $A_1B_1$ .

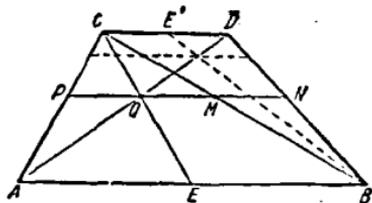


Рис. 48.

307. Середину  $E$  основания  $AB$  соединим с вершиной  $C$  и найдем точку  $Q$  пересечения прямых  $EC$  и  $AD$  (рис. 48). Прямая  $PQMN$ , параллельная  $AB$ , — искомая. Действительно,

$$\frac{PQ}{QM} = \frac{AE}{EB} = 1,$$

ткуда  $PQ = QM$ ; далее,

$$\frac{MN}{CD} = \frac{PQ}{CD},$$

откуда  $MN = PQ$ . Второе решение получается с помощью середины  $E'$  основания  $CD$  так же, как первое — с помощью  $E$ .

308. Пусть квадрат  $ABCD$  построен, причем  $B$  — заданная вершина,  $E$  и  $F$  — данные точки (рис. 49). Вершина  $D$  должна

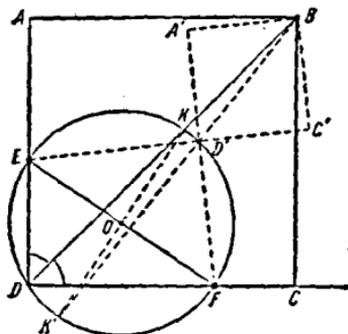


Рис. 49.

лежать на окружности, построенной на  $EF$ , как на диаметре. Пусть  $BD$  пересекает окружность в точке  $K$ . Тогда  $\overset{\frown}{EK} = \overset{\frown}{KF}$ , так как  $\angle ADB = \angle BDC$ .

Построение. На  $EF$ , как на диаметре, построим окружность и из ее центра восставим перпендикуляр к  $EF$  до пересечения с окружностью в точках  $K$  и  $K'$ ; соединим  $B$  с  $K$  и продолжим  $BK$  до пересечения с окружностью в точке  $D$ ; проведем прямые  $DE$  и  $DF$  и через

точку  $B$  — перпендикулярные к ним  $BA$  и  $BC$ .  $ABCD$  — искомый квадрат. Второе решение получим, используя точку  $K'$ . Задача всегда имеет два решения, кроме того случая, когда точка  $B$  лежит на окружности с диаметром  $EF$ . В этом последнем случае задача решений не имеет, если точка  $B$  не совпадает с одной из точек  $K, K'$ .

309. Проводим  $AD \parallel MB$  до пересечения с продолжением  $BC$  в точке  $D$  (рис. 50). На отрезке  $CD$  находим точку  $N$  такую, чтобы

$$\frac{CD}{CN} = k.$$

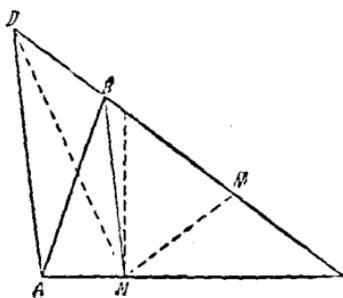


Рис. 50.

Прямая  $MN$  искомая, так как площадь  $S_{ABM} = S_{DBM}$  следовательно,  $S_{ABC} = S_{DMC}$  и по построению  $S_{DMC} = kS_{NM}$ . Второе решение получим, используя точку  $N_1$  такую, что

$$\frac{CD}{N_1D} = k.$$

Тогда

$$\frac{S_{ABC}}{S_{ABN,M}} = k.$$

Учитывая возможность аналогичного построения, исходящего из вершины  $C$  (вместо  $A$ ), легко убедиться в том, что при  $k \neq 2$  задача всегда имеет два решения, а при  $k = 2$  — только одно.

**310.** Для построения достаточно знать высоту  $h = KL$  прямоугольника.

Пусть прямоугольник  $KLMN$  искомый,  $KN$  лежит на  $AC$  (рис. 51). Если перемещать вершину  $B$  параллельно основанию  $AC$  и сохранять при этом величину  $h$  неизменной, то будут сохраняться также величины основания и диагонали прямоугольника (ибо  $LM$  составляет ту же часть  $AC$ , какую оставляет  $BH - h$  от  $BH$ ). значит, для нахождения  $h$  можно данный треугольник  $ABC$  заменить любым другим с тем же

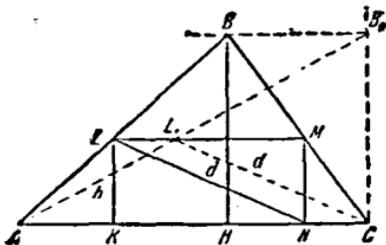


Рис. 51.

основанием  $AC$  и той же высотой  $BH$ . Удобнее всего взять прямоугольник с прямым углом при основании. Отсюда получаем следующее построение. Проводим через  $B$  прямую, параллельную  $AC$ , а через  $C$  — прямую, перпендикулярную  $AC$ ; из вершины прямого угла  $C$  раствором циркуля, равным половине  $d$  данной диагонали, делаем засечку  $L_1$  на гипотенузе  $B_1C_1$ ; через  $L_1$  проводим прямую параллельно  $AC$ ; точки ее пересечения  $L$  и  $M$  со сторонами  $AB$  и  $BC$  являются вершинами искомого прямоугольника. Смотря по тому, будет ли высота треугольника  $AB_1C_1$ , опущенная из  $C_1$ , меньше, равна ли больше данной величины  $d$ , задача будет иметь два решения, одно или ни одного.

**311.** В данный угол впишем данную окружность. От точек касания  $A$  и  $B$  на сторонах угла отложим по направлению вершины отрезки  $AC$  и  $BD$ , равные данной стороне треугольника (рис. 52).

Впишем в данный угол вторую окружность так, чтобы она касалась сторон угла в точках  $C$  и  $D$ . Проведем общую касательную  $EF$  к построенным окружностям. Докажем, что полученный таким образом  $\triangle SEF$  есть искомый. Для этого достаточно доказать, что  $AC = EF$ . Нетрудно убедиться в том, что периметр  $\triangle SEF$  равен  $2SC$ ; с другой стороны, он, очевидно, равен  $2(SA + EL + LF)$ . Итак,  $SC = SA + EL + LF$ ,  $SA + AC = SA + EF$ , т. е.

$$AC = EF,$$

что и требовалось доказать.

Ясно, что задача имеет два решения, если окружности не пересекаются, и одно, — если они касаются. Задача неразрешима, если окружности пересекаются. Пусть  $\alpha$  — данный угол,  $r$  и  $R$  — радиусы окружностей,  $a$  — данная сторона треугольника. Расстояние между центрами окружностей равно  $\frac{a}{\cos \frac{\alpha}{2}}$ ; для разрешимости задачи требуется, чтобы

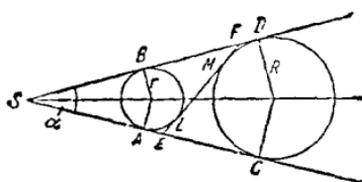


Рис. 52.

$$R + r \geq \frac{a}{\cos \frac{\alpha}{2}}.$$

$$R = r + a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

и, следовательно, должно быть

$$2r + a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \geq \frac{a}{\cos \frac{\alpha}{2}},$$

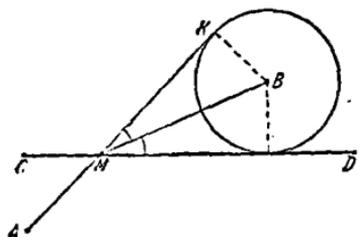


Рис. 53.

или

$$\frac{2r}{a} \geq \frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}}.$$

**312.** Проводим окружность с центром в точке  $B$ , касающуюся прямой  $CD$  (рис. 53). Из точки  $A$  (если  $A$  и  $B$  лежат по разные стороны от  $CD$ , или из точки  $A'$ , симметричной с  $A$  относительно  $CD$ , если  $A$  и  $B$  лежат по одну сторону

от  $CD$ ) проводим касательную  $AK$  к построенной окружности. Точка  $M$ , в которой  $AK$  (или  $A'K$ ) пересечет  $CD$ , и есть искомая. Действительно,

$$\angle AMC = \angle KMD = 2 \angle BMD.$$

### 3. Задачи на доказательство

313. Пусть  $BO$  — медиана в треугольнике  $ABC$ ; построим треугольник  $ABC$  до параллелограмма  $ABCD$  (рис. 54). Из треугольника  $BCD$  имеем  $2BO < BC + CD$ , и так как  $CD = AB$ , то

$$BO < \frac{AB + BC}{2}.$$

в  $\triangle AOB$  и  $\triangle BOC$  имеем:

$$BO + \frac{AC}{2} > AB,$$

$$BO + \frac{AC}{2} > BC.$$

ожив эти неравенства, получим:

$$BO > \frac{AB + BC}{2} - \frac{AC}{2}.$$

314. Пусть  $D$  — точка пересечения высот,  $O$  — центр описанной окружности,  $E$  и  $F$  — середины сторон  $BC$  и  $AC$  (рис. 55). Треугольники  $ADB$  и  $EOF$  подобны, так как  $\angle ABD = \angle OFE$  и  $\angle BAD = \angle OEF$  (как углы с параллельными сторонами). Следовательно,

$$\frac{OE}{AD} = \frac{EF}{AB} = \frac{1}{2}.$$

315. См. решение задачи 278.

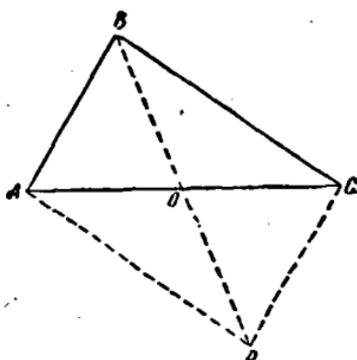


Рис. 54.

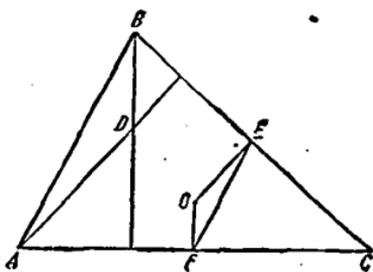


Рис. 55.

316. Пусть  $a, b, c$  — длины сторон треугольника, лежащих соответственно против углов  $A, B, C$ . Докажем, что длина  $l_A$  биссектрисы угла  $A$  выражается формулой

$$l_A = \frac{2bc \cos \frac{A}{2}}{b+c} = \frac{2 \cos \frac{A}{2}}{\frac{1}{b} + \frac{1}{c}}. \quad (1)$$

Действительно, площадь треугольника  $ABC$  равна

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} bc \sin A = \frac{1}{2} cl_A \sin \frac{A}{2} + \frac{1}{2} bl_A \sin \frac{A}{2}.$$

Отсюда следует формула (1). Аналогично для биссектрисы  $l_B$  угла  $B$  получим формулу

$$l_B = \frac{2 \cos \frac{B}{2}}{\frac{1}{a} + \frac{1}{c}}. \quad (2)$$

Пусть  $a > b$ ; тогда  $\angle A > \angle B$ , и так как, кроме того  $0 < \frac{A}{2} < \frac{\pi}{2}$  и  $0 < \frac{B}{2} < \frac{\pi}{2}$ , то  $\cos \frac{A}{2} < \cos \frac{B}{2}$ . Итак, числитель дроби (1) меньше числителя дроби (2). Далее, знаменатель  $\frac{1}{b} + \frac{1}{c}$  дроби (1) больше знаменателя  $\frac{1}{a} + \frac{1}{c}$

дроби (2), так как  $\frac{1}{b} > \frac{1}{a}$ . Следовательно,  $l_A < l_B$ .

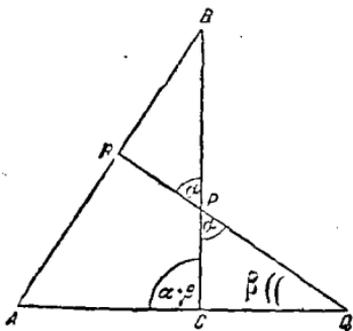


Рис. 56.

317. Пусть  $\angle CPQ = \angle PQC = \beta$  (рис. 56). По теореме синусов имеем:

$$\frac{RB}{\sin \alpha} = \frac{BP}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad \frac{PC}{\sin \beta} = \frac{CQ}{\sin \alpha},$$

$$\frac{AQ}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{AR}{\sin \beta}.$$

Перемножив эти равенства почленно, получим:

$$RB \cdot PC \cdot QA = PB \cdot QC \cdot RA.$$

318. Пусть  $\angle AKB = \alpha$ ,  $\angle AFB = \beta$ ,  $\angle ACB = \gamma$  (рис. 57).

Имеем  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ , и так как

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{2}, \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{3},$$

то

$$\operatorname{tg}(\beta + \gamma) = \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3}} = 1.$$

Отсюда  $\beta + \gamma = \frac{\pi}{4}$  и  $\alpha + \beta + \gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$ .

319. Воспользуемся теоремой, обратной теореме Пифагора: если сумма квадратов двух сторон треугольника равна

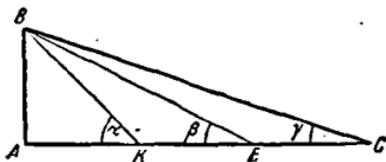


Рис. 57.

квадрату третьей стороны, то этот треугольник прямоугольный. В данном случае соотношение

$$(a + b)^2 + h^2 = (c + h)^2$$

выполнено, так как оно эквивалентно очевидному равенству  $b = ch$ .

320. Первое решение. Проведем  $AE$  так, чтобы  $\angle EAC = 20^\circ$  и  $BD \perp AE$  (рис. 58). Так как  $\triangle CAE \sim \triangle ABC$ ,

$$\frac{CE}{a} = \frac{a}{b},$$

откуда  $CE = \frac{a^2}{b}$  и  $BE = b - \frac{a^2}{b}$ .

С другой стороны,  $\angle BAD = 60^\circ$ , в силу чего

$$BD = \frac{\sqrt{3}}{2}b, \quad AD = \frac{b}{2},$$

и так как  $AE = a$ , то  $ED = \frac{b}{2} - a$ . Поэтому

$$BE = \sqrt{\left(\frac{b}{2} - a\right)^2 + \frac{3}{4}b^2}.$$

Следовательно,

$$b - \frac{a^2}{b} = \sqrt{\left(\frac{b}{2} - a\right)^2 + \frac{3}{4}b^2}.$$

Возведя обе части в квадрат и сделав упрощения, найдем, что это соотношение равносильно доказываемому.

Второе решение. Так как  $a = 2b \sin 10^\circ$ , то доказываемое соотношение равносильно следующему:

$$1 + 8 \sin^3 10^\circ = 6 \sin 10^\circ,$$

или

$$\sin 30^\circ = 3 \sin 10^\circ - 4 \sin^3 10^\circ.$$

Последнее равенство выполнено в силу общей формулы

$$\sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha.$$

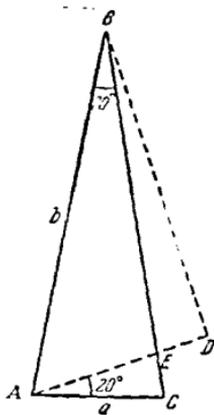


Рис. 58.

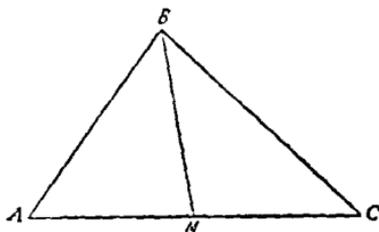


Рис. 59.

**321.** В треугольнике против большей стороны лежит больший угол. Поэтому, если в  $\triangle ABC$  (рис. 59)

$$AC < 2BM,$$

что равносильно двум неравенствам:

$$AM < BM,$$

$$MC < BM,$$

то

$$\angle ABM < \angle BAM,$$

$$\angle MBC < \angle BCM.$$

Сложив эти неравенства, получим:

$$\angle ABC < \angle BAM + \angle BCM = \pi - \angle ABC,$$

откуда  $2 \angle ABC < \pi$  или  $\angle ABC < \frac{\pi}{2}$ .

Аналогично рассматриваются случаи  $AC \geq 2 BM$ .

322. Легко видеть, что угол  $P = 80^\circ$  в том и только в том случае, если  $\triangle ABP \sim \triangle PCQ$  (сплошными дугами на рис. 60 отмечены углы, величины которых прямо следуют из условий задачи). Докажем, что эти треугольники действительно подобны. Для этого ввиду равенства углов  $ABP$  и  $PCQ$  достаточно проверить, что

$$\frac{AB}{CQ} = \frac{PB}{CP}. \quad (1)$$

Положим  $AB = l$ ; тогда из равнобедренного треугольника  $CQB$  имеем:

$$CQ = \frac{l}{2 \cos 20^\circ}.$$

С другой стороны, так как  $PC = AC$ , то

$$PC = 2l \sin 10^\circ, \text{ а } BP = l - 2l \sin 10^\circ.$$

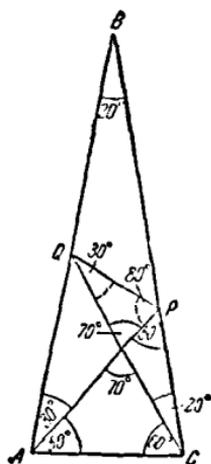


Рис. 60.

Подставив эти выражения в (1), приходим к равносильному равенству:

$$4 \sin 10^\circ \cos 20^\circ = 1 - 2 \sin 10^\circ. \quad (2)$$

Справедливость последнего легко обнаружить, заметив, что

$$\begin{aligned} \sin 10^\circ \cos 20^\circ &= \\ &= \frac{\sin(10^\circ + 20^\circ) + \sin(10^\circ - 20^\circ)}{2} = \\ &= \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \sin 10^\circ. \end{aligned}$$

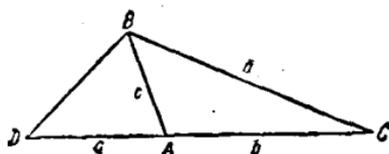


Рис. 61.

323. Пусть дан  $\triangle ABC$  (рис. 61). На продолжении стороны  $AC$  отложим  $AD = c$ . Из равенства  $a^2 = b^2 + bc$  следует:

$$\frac{a}{b} = \frac{b+c}{a}.$$

Это означает, что треугольники  $CAB$  и  $CBD$  подобны и  $\angle A = \angle CBD$ . Кроме того,  $\angle B = \angle BDA = \angle DBA$ . Следовательно,

$$\angle A = \angle B + \angle DBA = 2 \angle B.$$

324. Пусть  $ABC$  — остроугольный треугольник и  $AD$ ,  $BE$ ,  $CF$  — его высоты, пересекающиеся в точке  $O$  (рис. 62). Каж-

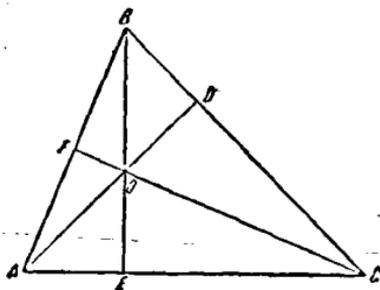


Рис. 62.

дый из четырехугольников  $BDOF$ ,  $CEOD$ ,  $AFOE$  является вписанным в некоторую окружность. По теореме о произведении секущей на ее внешнюю часть имеем:

$$AD \cdot AO = AB \cdot AF = AC \cdot AE,$$

$$BE \cdot BO = BC \cdot BD = BA \cdot BF,$$

$$CF \cdot CO = CA \cdot CE = CB \cdot CD.$$

Сложив эти равенства, получим:

$$2(AD \cdot AO + BE \cdot BO + CF \cdot CO) =$$

$$= AB \cdot AF + BC \cdot BD + CA \cdot CE + AC \cdot AE + BA \cdot BF + CB \cdot CD$$

$$= AB(AF + BF) + BC(BD + CD) + CA(CE + AE) =$$

$$= (AB)^2 + (BC)^2 + (CA)^2$$

что и требовалось доказать. В случае тупоугольного треугольника, произведение, соответствующее тупому углу надо взять со знаком минус.

325. По условию  $b - a = c - b$ , или  $a + c = 2b$ . Для вычисления произведения  $Rr$  воспользуемся выражениями для площади  $S$  треугольника через радиус описанного или вписанного круга и стороны. Известно, что  $S = \frac{1}{2}bc \sin A$ , по теореме синусов  $\sin A = \frac{a}{2R}$ , откуда

$$S = \frac{abc}{4R}.$$

С другой стороны,  $S = rp$ , где  $p$  — полупериметр. Приравняв оба выражения, будем иметь:

$$rR = \frac{abc}{4p}.$$

В условиях данной задачи

$$p = \frac{a+b+c}{2} = \frac{3}{2}b.$$

Подставив это значение  $p$  в (1), получим:

$$6rR = ac.$$

326. Пусть  $z$  — длина биссектрисы,  $m$ ,  $n$  — длины отрезков, на которые она делит основание треугольника (рис. 63). По теореме косинусов

$$\begin{aligned} a^2 &= z^2 + m^2 - 2mz \cos \alpha, \\ b^2 &= z^2 + n^2 + 2nz \cos \alpha. \end{aligned}$$

Умножив первое из этих равенств на  $n$ , второе на  $m$  и сложив, получим:

$$na^2 + mb^2 = (m+n)(z^2 + mn). \quad (1)$$

В силу соотношения  $\frac{a}{m} = \frac{b}{n}$  имеем:

$$na^2 + mb^2 = na \frac{mb}{n} + mb \frac{na}{m} = ab(m+n).$$

Подставив это выражение в (1), получим требуемое равенство

$$ab = z^2 + mn.$$

В случае  $a = b$ ,  $m = n$  доказанное равенство выражает теорему Пифагора:  $a^2 = z^2 + m^2$ .

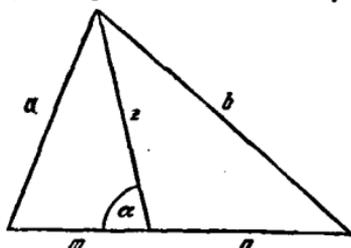


Рис. 63.

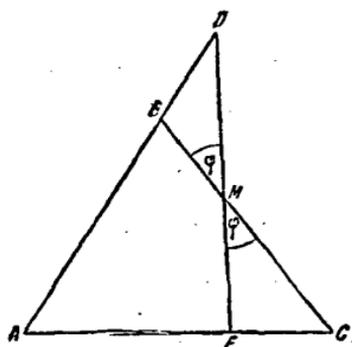


Рис. 64.

327. По условию  $BD = EC$  (рис. 64). Если  $M$  — точка пересечения  $BC$  и  $DE$ , то из  $\triangle BDM$  и  $\triangle ECM$  имеем:

$$\frac{BD}{\sin \varphi} = \frac{DM}{\sin B}, \quad \frac{EC}{\sin \varphi} = \frac{ME}{\sin C},$$

откуда

$$\frac{DM}{ME} = \frac{\sin B}{\sin C}.$$

Но в  $\triangle ABC$

$$\frac{\sin B}{\sin C} = \frac{AC}{AB}.$$

Следовательно,

$$\frac{DM}{ME} = \frac{AC}{AB}.$$

328. Пусть  $BD$ ,  $BE$  и  $BF$  суть соответственно высота, биссектриса и медиана в  $\triangle ABC$ . Предположим, что  $AB < BC$ . Тогда

$$\angle A > \angle C, \quad \angle CBD > \angle ABD,$$

откуда

$$\angle CBD > \frac{1}{2}(\angle ABD + \angle CBD) = \frac{1}{2} \angle B,$$

т. е.  $\angle CBD > \angle CBE$ . Значит, биссектриса  $BE$  проходит внутри  $\angle CBD$  и точка  $E$  лежит между  $D$  и  $C$ .

Далее,  $\frac{AE}{EC} = \frac{AB}{BC} < 1$ ,  $AE < EC$ , откуда

$$AE < \frac{1}{2}(AE + EC) = \frac{1}{2} AC,$$

т. е.  $AE < AF$ . Значит, точка  $F$  лежит между  $E$  и  $C$ . Таким образом, точка  $E$  лежит между  $D$  и  $F$ , что и требовалось доказать.

329. В треугольнике  $ABC$  пусть  $BD$  — биссектриса,  $BM$  — медиана и  $BN$  — прямая, симметричная с  $BM$  относительно  $BD$  (рис. 65). Если  $S_{ABN}$  и  $S_{MBC}$  — площади соответствующих треугольников, то

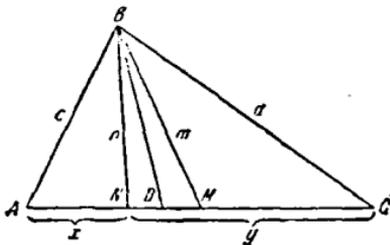


Рис. 65.

$$2S_{ABN} = xh_B = nc \sin \angle ABN,$$

$$\begin{aligned} 2S_{MBC} &= \frac{x+y}{2} h_B = \\ &= ma \sin \angle MBC, \end{aligned}$$

где  $h_B$  — высота, опущенная из вершины  $B$  на  $AC$ . Так как  $\angle ABN = \angle MBC$ , то отсюда

$$x = \frac{x+y}{2} \cdot \frac{nc}{ma}. \quad (1)$$

Аналогично

$$2S_{NBC} = yh_B = na \sin \angle NBC,$$

$$2S_{ABM} = \frac{x+y}{2} h_B = mc \sin \angle ABM.$$

Так как  $\angle NBC = \angle ABM$ , то отсюда

$$y = \frac{x+y}{2} \cdot \frac{na}{mc}. \quad (2)$$

Поделив почленно (1) на (2), получим:

$$\frac{x}{y} = \frac{c^2}{a^2},$$

что и требовалось доказать.

330. Прямые  $AP$ ,  $BQ$  и  $CR$  разбивают треугольник  $ABC$  на шесть треугольников:  $\triangle AOR$ ,  $\triangle ROB$ ,  $\triangle BOP$ ,  $\triangle POC$ ,  $\triangle COQ$  и  $\triangle QOA$  (рис. 66). Применяя теорему синусов к каждому из них, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{AR}{\sin \varphi} &= \frac{AO}{\sin \gamma}, \\ \frac{BO}{\sin \gamma} &= \frac{BR}{\sin(\varphi + \psi)}, \\ \frac{CQ}{\sin(\varphi + \psi)} &= \frac{CO}{\sin \beta}, \end{aligned} \right| \left. \begin{aligned} \frac{AO}{\sin \beta} &= \frac{AQ}{\sin \psi}, \\ \frac{BP}{\sin \psi} &= \frac{BO}{\sin \alpha}, \\ \frac{CO}{\sin \alpha} &= \frac{CP}{\sin \varphi}. \end{aligned} \right.$$

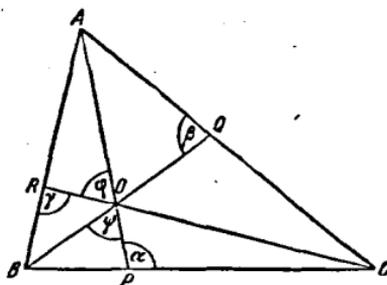


Рис. 66.

умножив почленно все эти равенства, находим:

$$AR \cdot BP \cdot CQ = BR \cdot AQ \cdot CP.$$

331. Первое решение. Пусть  $ABC$  — данный треугольник,  $K_1$  — вписанная окружность радиуса  $r$  и  $K_2$  — описанная окружность радиуса  $R$ . Построим вспомогательный треугольник  $A_1B_1C_1$ , так, чтобы его стороны были параллельны сторонам  $\triangle ABC$  и проходили через вершины  $\triangle ABC$  (рис. 67). проведем касательные к окружности  $K_2$ , параллельные сторонам  $\triangle A_1B_1C_1$ , руководствуясь следующим правилом: касательная  $A_2B_2$ , параллельная стороне  $A_1B_1$ , касается  $K_2$  в точке, лежащей на той же дуге  $\widehat{AB}$ , на которой лежит вершина  $C$  и т. д. Отрезки проведенных касательных образуют  $\triangle A_2B_2C_2$ .

Тогда  $\triangle A_1B_1C_1$  лежит внутри  $\triangle A_2B_2C_2$  и эти два треугольника подобны. Поэтому радиус  $R'$  окружности, вписанной в  $\triangle A_1B_1C_1$ , не больше радиуса  $R$  окружности  $K_2$ , вписанной в  $\triangle A_2B_2C_2$ , т. е.  $R' \leq R$ ; с другой стороны, отношение радиусов окружностей, вписанных в подобные треугольники  $A_1B_1C_1$  и  $ABC$ , равно отношению сходственных сторон этих треугольников, т. е.  $\frac{A_1B_1}{AB} = 2$ . Таким образом,

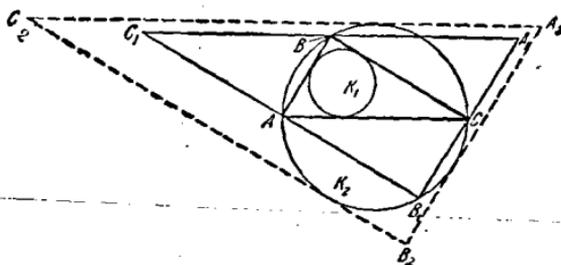


Рис. 67.

$R' = 2r$ . Сопоставляя это равенство с неравенством  $R' \leq R$  окончательно получаем:

$$2r \leq R.$$

Второе решение. Пусть  $r$ ,  $R$  — радиусы вписанной и описанной окружностей,  $S$  — площадь данного треугольника  $p$  — полупериметр,  $a$ ,  $b$  — стороны. Тогда

$$\frac{r}{R} = \frac{S}{pR} = \frac{1}{2} \frac{ab \sin C}{pR} = \frac{2R \sin A \sin B \sin C}{R(\sin A + \sin B + \sin C)}.$$

Но

$$\begin{aligned} \sin A + \sin B + \sin C &= 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2} + \\ &+ 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A+B}{2} = 4 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A}{2} \cos \frac{B}{2} = \\ &= 4 \cos \frac{A}{2} \cos \frac{B}{2} \cos \frac{C}{2} \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\frac{r}{R} = 4 \sin \frac{A}{2} \sin \frac{B}{2} \sin \frac{C}{2}.$$

Задача сводится к доказательству неравенства

$$\sin \frac{A}{2} \sin \frac{B}{2} \sin \frac{C}{2} \leq \frac{1}{8}$$

(см. задачу 586).

332. Пусть  $a, b$  — длины катетов и  $c$  — длина гипотенузы. Сравним два выражения для площади треугольника, получаем:

$$S = \frac{1}{2} (a + b + c)r = \frac{1}{2} hc,$$

откуда

$$\frac{r}{h} = \frac{c}{a + b + c}. \quad (1)$$

Так как  $a + b > c$ , то

$$\frac{r}{h} < \frac{c}{c + c} = 0,5.$$

Далее, неравенство  $a^2 + b^2 \geq 2ab$  в силу соотношения  $c^2 = a^2 + b^2$  равносильно неравенству  $2c^2 \geq (a + b)^2$ , или  $a + b \leq c\sqrt{2}$ . Поэтому

$$\frac{r}{h} \geq \frac{c}{c\sqrt{2} + c} = \frac{1}{\sqrt{2} + 1} = \sqrt{2} - 1 > 0,4.$$

333. Пусть  $A, B, C$  — углы треугольника,  $a, b, c$  — противолежащие им стороны и  $P = a + b + c$ . Используя выражение для площади треугольника, находим:

$$2S = rP = ak_a + bk_b + ck_c. \quad (1)$$

отношение

$$k_a + k_b + k_c = r + R$$

можно доказать путем следующих преобразований. Умножив обе части равенства на  $P$ , в силу (1) будем иметь:

$$P(k_a + k_b + k_c) = ak_a + bk_b + ck_c + PR,$$

и

$$(b + c)k_a + (c + a)k_b + (a + b)k_c = PR.$$

аметив, что

$$k_a = R \cos A, \quad k_b = R \cos B, \quad k_c = R \cos C,$$

получим:

$$(b + c) \cos A + (c + a) \cos B + (a + b) \cos C = a + b + c.$$

одставив сюда взятые из теоремы косинусов выражения

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

т. д., получим тождество

$$(b + c)(b^2 + c^2 - a^2) + b(c + a)(c^2 + a^2 - b^2) + c(a + b)(a^2 + b^2 - c^2) = 2abc(a + b + c).$$

334. Пусть  $A_2B_2$ ,  $B_2C_2$ ,  $C_2A_2$  — средние линии в  $\triangle ABC$ ,  $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_3$  — середины отрезков  $AA_1$ ,  $BB_1$ ,  $CC_1$  (рис. 68). Точки  $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_3$  лежат на средних линиях  $\triangle ABC$  и притом не на концах этих линий, так как в противном случае по крайней мере одна из точек  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  совпала бы с вершиной  $\triangle ABC$ . Так как всякая прямая, не проходящая через вершины треугольника  $A_2B_2C_2$ , не пересекает одновременно все три его стороны, то точки  $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_3$  не лежат на одной прямой.

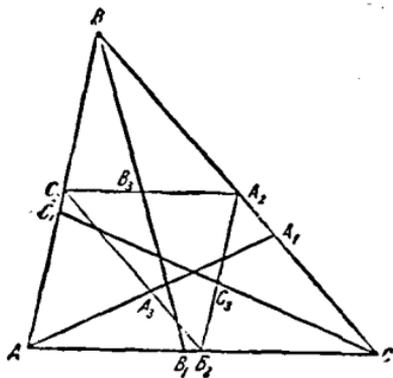


Рис. 68.

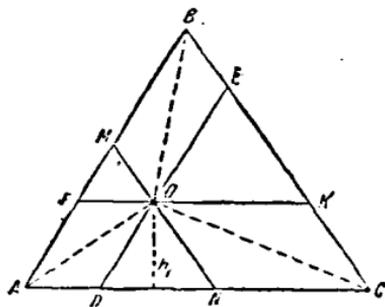


Рис. 69.

335. Если  $h_1$  — высота  $\triangle DON$ ,  $h_B$  — высота  $\triangle ABC$ , а  $S_{AOC}$  и  $S_{ABC}$  — площади соответствующих треугольников, то (рис. 69)

$$\frac{S_{AOC}}{S_{ABC}} = \frac{h_1}{h_B} = \frac{OD}{AB} = \frac{AF}{AB}$$

и аналогично

$$\frac{S_{AOB}}{S_{ABC}} = \frac{BE}{BC}, \quad \frac{S_{COB}}{S_{ABC}} = \frac{CN}{CA}.$$

Сложив эти равенства, получим:

$$\frac{AF}{AB} + \frac{BE}{BC} + \frac{CN}{CA} = \frac{S_{AOC} + S_{BOC} + S_{AOB}}{S_{ABC}} = \frac{S_{ABC}}{S_{ABC}} = 1.$$

336. 1) Рассмотрим окружность  $K'$  радиуса  $r'$ , вписанную в квадрат, и проведем к ней касательные  $A'B' \parallel AB$ ,  $B'C' \parallel BC$  (рис. 70). Ясно, что  $\triangle A'B'C'$  лежит внутри  $\triangle ABC$ , и по этому  $A'C' < AC$ . Так как

$$\triangle A'B'C' \sim \triangle ABC,$$

то  $\frac{r'}{r} = \frac{A'C'}{AC} < 1$ , откуда  $x = 2r' < 2r$ .

2) Рассмотрим окружность  $K''$  радиуса  $r''$ , описанную около квадрата, и проведем к ней касательные  $A''B'' \parallel AB$ ,  $B''C'' \parallel BC$

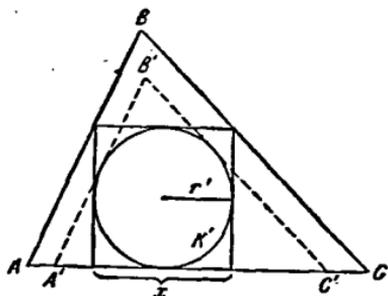


Рис. 70.

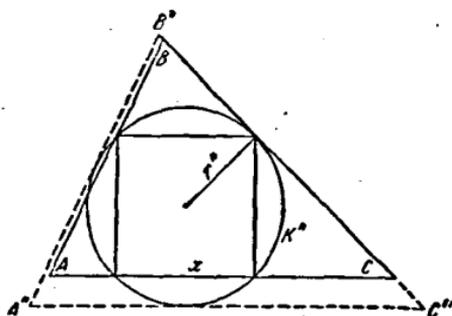


Рис. 71.

и  $A''C'' \parallel AC$  (рис. 71). Ясно, что  $\triangle ABC$  лежит внутри  $\triangle A''B''C''$  и поэтому  $A''C'' > AC$ . Так как

$$\triangle A''B''C'' \sim \triangle ABC,$$

то  $\frac{r''}{r} = \frac{A''C''}{AC} > 1$ , откуда

$$x = \sqrt{2} r'' > \sqrt{2} r.$$

337. Пусть в  $\triangle ABC$  точка  $M$  есть точка пересечения высот  $AA_1, BB_1, CC_1$ ;  $P$  — центр описанного круга радиуса  $R$ ;  $C_2, B_2$  — середины сторон  $AB, AC$ ;  $OM = OP$ ;  $ON \perp AC$ ;  $A_2, B_2, C_2$  — середины  $AM, BM, CM$  (рис. 72). Докажем, что точка  $O$  находится на равном расстоянии от  $A_i, B_i, C_i$ , где  $i = 1, 2, 3$ . Так как  $ON$  — средняя линия в трапеции  $MB_1B_2P$ , то  $B_1 = OB_2$ . Из подобия треугольников  $AMB$  и  $PA_2B_2$  находим  $BM = 2PB_2$ , поэтому  $B_2M = PB_2$ . Из параллелограмма  $MB_1PB_2$  имеем  $OB_1 = OB_2$ . Но

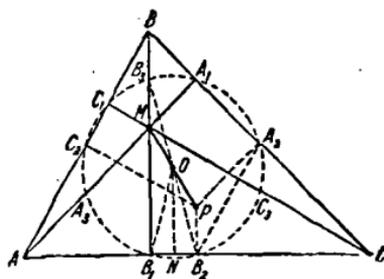


Рис. 72.

$$OB_1 = \frac{1}{2} BP = \frac{R}{2}$$

(как средняя линия в треугольнике  $PMB$ ). Следовательно,

$$OB_2 = OB_1 = OB_3 = \frac{R}{2}.$$

Точно так же доказывается, что

$$OA_1 = OA_2 = OA_3 = OC_1 = OC_2 = OC_3 = \frac{R}{2}.$$

338. В  $\triangle ABC$  пусть  $AA_1, BB_1, CC_1$  — высоты, пересекающиеся в точке  $O$ ,  $C_1M \parallel B_1N \perp BC$ ,  $A_1P \parallel C_1Q \perp AC$ ,  $B_1R \parallel A_1S \perp AB$  (рис. 73).

1) Докажем, что  $SM \parallel AC$ . Имеем  $\triangle BA_1A \sim \triangle BC_1C$  как прямоугольные треугольники с общим острым углом  $ABC$ . Поэтому

$$\frac{BA_1}{BC_1} = \frac{BA}{BC}.$$

Следовательно,  $\triangle A_1BC_1 \sim \triangle ABC$  и  $\angle BA_1C_1 = \angle BAC$ . В  $\triangle A_1BC_1$  отрезки  $A_1S$  и  $C_1M$  — высоты. Поэтому, повторив

предыдущее рассуждение, покажем, что  $\angle BSM = \angle BA_1C_1$ . Следовательно,  $\angle BSM = \angle BAC$  и  $SM \parallel AC$ . Аналогично доказывается, что  $PN \parallel AB$  и  $RQ \parallel BC$ .

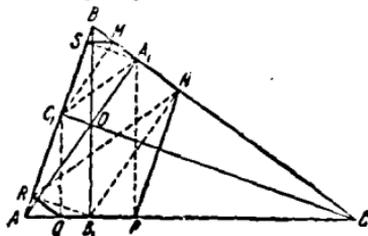


Рис. 73.

2) Для доказательства того, что вершины шестиугольника  $MNPQRS$  лежат на одной окружности, достаточно доказать,

что любые четыре его последовательные вершины лежат на одной окружности. Это следует из того, что через три точки, не лежащие на одной прямой, можно провести только одну окружность. Имеются четверки последовательных вершин рассматриваемого шестиугольника двух типов: такие, в которых средние точки лежат на разных сторонах  $\triangle ABC$  ( $RSMN$ ,  $MNPQ$ ,  $PQRS$ ), и такие, в которых средние точки лежат на одной стороне  $\triangle ABC$  ( $NPQR$ ,  $QRSM$ ,  $SMNP$ ).

Рассмотрим четверки  $RSMN$  и  $NPQR$  (разных типов) Из очевидной пропорциональности

$$\frac{BC_1}{BR} = \frac{CQ}{BB_1} = \frac{BA_1}{BN}$$

следует, что  $NR \parallel A_1C_1$ . Поэтому

$$\angle MNR = \angle BA_1C_1 = \angle BAC = \angle BSM.$$

Значит,  $\angle MNR + \angle MSR = \pi$  и точки  $R, S, M, N$  лежат на одной окружности. Далее,

$$\begin{aligned} \angle PNR + \angle PQR &= \pi - (\angle PNC + \angle BNR) + \\ &+ \pi - \angle AQR = 2\pi - (\angle ABC + \angle BAC + \angle ACB) = \pi, \end{aligned}$$

откуда следует, что точки  $N, P, Q, R$  также лежат на одной окружности. Аналогично проводится доказательство для остальных четверок.

**339.** Пусть  $A_1, B_1, C_1$  — точки касания вписанного круга со сторонами  $\triangle ABC$ ,  $D$  — центр вписанного круга (рис. 74). Так как отрезки касательных, проведенных из одной точки к окружности, равны, то

$$CA_1 = CB_1, \quad BA_1 = BC_1, \quad AB_1 = AC_1.$$

Кроме того,

$$DB_1 = CA_1, \quad B_1C = A_1D.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} AC + BC &= CA_1 + A_1B + CB_1 + B_1A = \\ &= B_1D + A_1D + BC_1 + AC_1 = 2r + 2R, \end{aligned}$$

где  $r$  — радиус вписанного, а  $R$  — радиус описанного круга.

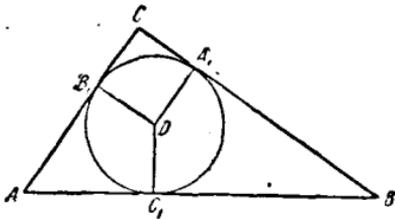


Рис. 74.

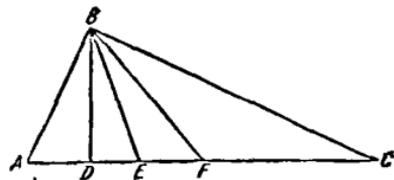


Рис. 75.

**340.** Пусть в  $\triangle ABC$  угол  $ABC$  прямой,  $BD$  — высота,  $BE$  — биссектриса и  $BF$  — медиана (рис. 75). Так как  $BF = FC$ , то  $\angle CBF = \angle ACB$ . Но

$$\angle ABD = \frac{\pi}{2} - \angle BAD = \angle ACB.$$

Следовательно,  $\angle ABD = \angle CBF$  и

$$\angle DBE = \angle ABE - \angle ABD = \angle CBE - \angle CBF = \angle FBE,$$

что и требовалось доказать.

341. Симметрия в расположении  $ABC$  и  $A_1B_1C_1$  относительно центра вписанного круга  $O$  означает, что соответствующие точки  $\triangle ABC$  и  $\triangle A_1B_1C_1$  лежат на одной прямой с  $O$  и находятся на равном расстоянии от  $O$  (рис. 76). В частности,  $OC = OC_1$ ,  $OB = OB_1$  и  $BCB_1C_1$  — параллелограмм; значит,  $BC = B_1C_1$ . Аналогично  $AC = A_1C_1$ ,  $AB = A_1B_1$  и  $\triangle ABC = \triangle A_1B_1C_1$ . Рассматривая параллелограммы  $ABA_1B_1$ ,  $BDB_1D_1$  и  $ACA_1C_1$ ,  $ECE_1C_1$ , находим, что  $AD = A_1D_1$ ,  $AE = A_1E_1$ , а так как

$\angle A = \angle A_1$ , то  $\triangle ADE = \triangle A_1D_1E_1$ . Аналогично  $\triangle B_1EK_1 = \triangle BE_1K$  и  $\triangle DC_1K = \triangle D_1CK_1$ .

Введем обозначения:

- $S$  — площадь  $\triangle ABC$ ,
- $S_1$  — площадь  $\triangle ADE$ ,
- $S_2$  — площадь  $\triangle DC_1K$ ,
- $S_3$  — площадь  $\triangle KBE_1$ ,

$$AB = c, \quad BC = a, \quad AC = b,$$

$h_A, h_B, h_C$  — высоты, опущенные из вершин  $A, B, C$ . Тогда

$$S = pr = \frac{ah_A}{2} = \frac{bh_B}{2} = \frac{ch_C}{2}.$$

Пусть  $AM$  — высота в  $\triangle ADE$ ,  $AN$  — высота в  $\triangle ABC$ ; тогда

$$S_1 = \frac{DE \cdot AM}{2}.$$

Из подобия треугольников  $ABC$  и  $ADE$  находим:

$$DE = \frac{a(h_A - 2r)}{h_A}.$$

Следовательно,

$$S_1 = \frac{a(h_A - 2r)^2}{2h_A} = \frac{a \left( \frac{2pr}{a} - 2r \right)^2}{2h_A} = \frac{r^2(p - a)^2}{S}.$$

Аналогично

$$S_2 = \frac{r^2(p-c)^2}{S}, \quad S_3 = \frac{r^2(p-b)^2}{S}.$$

Используя формулу Герона, получаем:

$$S^2 S_1^2 S_2^2 S_3^2 = \frac{r^{12}(p-a)^4(p-b)^4(p-c)^4 S^2}{S^6} = r^{12} \frac{S^4}{p^4} = r^{10}.$$

342. В обозначениях рис. 77 имеем:

$$MA^2 = MO^2 + AO^2 - 2MO \cdot AO \cos \alpha,$$

$$MC^2 = MO^2 + CO^2 + 2MO \cdot CO \cos \alpha.$$

Так как  $AO = CO$ , то, сложив эти равенства, получим:

$$MA^2 + MC^2 = 2MO^2 + 2AO^2.$$

Аналогично

$$MB^2 + MD^2 = 2MO^2 + 2BO^2.$$

Следовательно, разность

$$(MA^2 + MC^2) - (MB^2 + MD^2) = 2(AO^2 - BO^2)$$

не зависит от положения точки  $M$ .

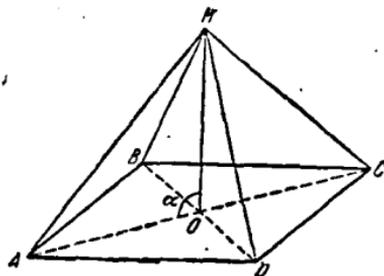


Рис. 77.

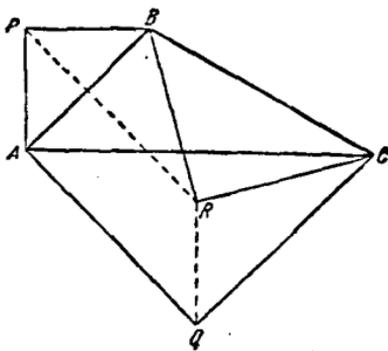


Рис. 78.

343. В обозначениях рис. 78 имеем:

$$\angle PBR = \angle ABC$$

$$\frac{PB}{AB} = \frac{BR}{BC}.$$

Поэтому  $\triangle PBR \sim \triangle ABC$  и аналогично  $\triangle QRC \sim \triangle ABC$ . Пользуясь этим, получим:

$$\angle APR = \angle APB - \angle BPR = \angle APB - \angle BAC,$$

поэтому

$$\angle APR + \angle PAQ = \angle APB + 2 \angle PAB = \pi,$$

так что  $PR \parallel AQ$ . Аналогично докажем, что  $QR \parallel AP$ .

344. Обозначим через  $h_B$ ,  $h_C$  и  $h_D$  расстояния от вершин  $B$ ,  $C$  и  $D$  параллелограмма до прямой  $AO$  (рис. 79). Тогда имеет место следующее свойство: наибольшее из этих трех расстояний равно сумме двух других. Например, если  $AO$  пересекает сторону  $BC$  (как на рис. 79), то, проведя  $BE \parallel AO$  и  $CE \perp AO$ , из равенства треугольников  $BEC$  и  $AD'D$  найдем:

$$h_D = h_B + h_C.$$

Аналогично, если  $AO$  пересекает сторону  $CD$ , то  $h_B = h_C + h_D$ ; если  $AO$  не пересекает сторон  $BC$  и  $CD$ , то  $h_C = h_B + h_D$ . Из этого свойства для случая, показанного на рис. 79, сразу следует равенство для площадей треугольников:

$$S_{AOC} = S_{AOD} - S_{AOB}.$$

Вообще, очевидно, можно написать формулу

$$S_{AOC} = |S_{AOD} \pm S_{AOB}|,$$

где берется знак плюс, если точки  $B$  и  $D$  лежат по одну сторону от  $AO$ , и знак минус, если точки  $B$  и  $D$  лежат по разные стороны от  $AO$ .

Повторение этого рассуждения для прямой  $CO$  вместо  $AO$  приводит к аналогичной формуле

$$S_{AOC} = |S_{COD} \pm S_{COB}|$$

с тем же правилом выбора знаков, но относительно прямой  $CO$ .

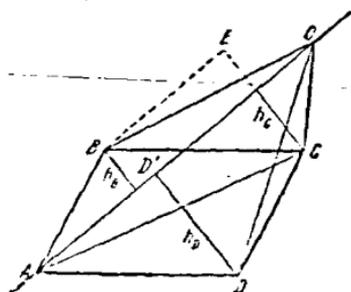


Рис. 79.

345. Построим трапецию  $ABCD$  до треугольника  $AMD$  и соединим  $M$  с серединой  $F$  основания  $AD$  (рис. 80). Тогда

$$ME = \frac{BC}{2}, \quad MF = \frac{AD}{2}.$$

Следовательно,

$$EF = \frac{AD - BC}{2}.$$

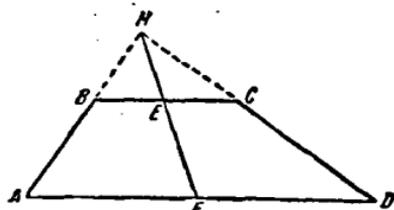


Рис. 80.

346. Пусть  $ABCD$  — данная трапеция с основаниями  $AD$  и  $BC$  и пусть  $BE \perp AD$ ,  $CF \perp AD$  (рис. 81). Имеем:

$$\begin{aligned} AC^2 - AF^2 &= CD^2 - FD^2, \\ BD^2 - ED^2 &= AB^2 - AE^2. \end{aligned}$$

Сложив эти равенства, получим:

$$\begin{aligned} AC^2 + BD^2 &= AB^2 + CD^2 + AF^2 - FD^2 + ED^2 - AE^2 = \\ &= AB^2 + CD^2 + AD(AF - FD + ED - AE) = \\ &= AB^2 + CD^2 + AD \cdot 2EF = AB^2 + CD^2 + 2AD \cdot BC. \end{aligned}$$

347. Пусть дана трапеция  $ABCD$  с параллельными основаниями  $AD$  и  $BC$ ,  $E$  — середина  $BC$ ,  $F$  — середина  $AD$  и

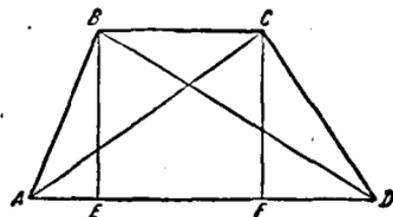


Рис. 81.

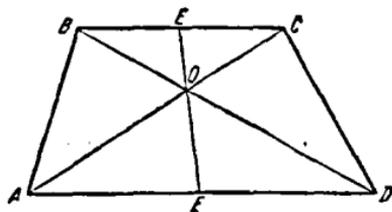


Рис. 82.

$O$  — точка пересечения диагоналей (рис. 82). Треугольники  $AOF$  и  $COE$  подобны (это следует из подобия треугольников  $AOD$  и  $COB$ ). Поэтому  $\angle AOF = \angle COE$ , т. е.  $EOF$  — прямая.

348. Найдем выражение для площади четырехугольника через диагонали и угол между диагоналями. Пусть  $O$  — точка пересечения диагоналей четырехугольника  $ABCD$  и  $\angle BOA = \alpha$

(рис. 83). Тогда площадь данного четырехугольника равна

$$S_{ABCD} = S_{AOB} + S_{COD} + S_{AOD} + S_{BOC} =$$

$$= \frac{1}{2} AO \cdot OB \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} OC \cdot OD \cdot \sin \alpha +$$

$$+ \frac{1}{2} BO \cdot OC \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} AO \cdot OD \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} \sin \alpha \cdot BD \cdot AC.$$

Из этой формулы и следует справедливость доказываемого утверждения.

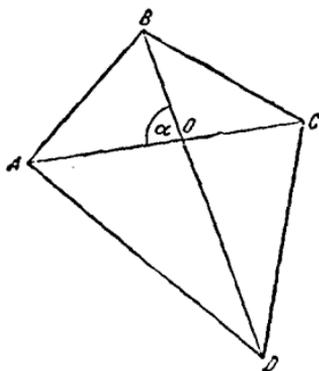


Рис. 83.

349. Пусть  $M$  — внутренняя точка выпуклого многоугольника, а  $AB$  — его сторона, наименее удаленная от  $M$ . Докажем,

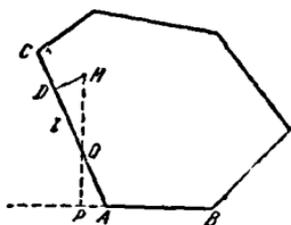


Рис. 84.

что основание перпендикуляра  $P$ , опущенного из  $M$  на  $AB$ , лежит на  $AB$ , а не на ее продолжении (рис. 84). Действительно, если  $P$  лежит вне  $AB$ , то  $MP$  пересечет некоторую сторону  $l$  многоугольника в точке  $Q$ , причем, в силу выпуклости многоугольника,  $MQ < MP$ .

Но расстояние  $DM$  от  $M$  до  $l$  меньше  $MQ$ , а значит и меньше  $MP$ , что противоречит выбору стороны  $AB$ .

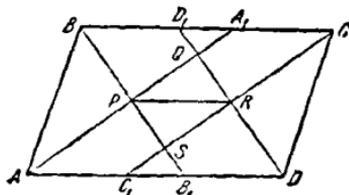


Рис. 85.

Очевидно,  $BB_1 \parallel DD_1$  и  $AA_1 \parallel CC_1$ . Кроме того,

$$\angle APB = \pi - (\angle BAP + \angle ABP) =$$

$$= \pi - \frac{1}{2} (\angle BAD + \angle ABC) = \pi - \frac{1}{2} \pi = \frac{1}{2} \pi,$$

350. Пусть  $AA_1$ ,  $BB_1$ ,  $CC_1$ ,  $DD_1$  — биссектрисы внутренних углов параллелограмма  $ABCD$ , об-

так что  $PQRS$ —прямоугольник. Треугольники  $BAB_1$  и  $CDC_1$ —равнобедренные, так как в них биссектрисы перпендикулярны основаниям. Поэтому  $BP = PB_1$ ,  $D_1R = RD$  и, следовательно,  $PR \parallel AD$ . Таким образом,  $PRDB_1$ —параллелограмм и

$$PR = B_1D = AD - AB_1 = AD - AB.$$

351. Пусть  $O_1, O_2, O_3, O_4$ —центры квадратов, построенных на сторонах параллелограмма  $ABCD$  (рис. 86). Имеем:

$$\triangle O_1BO_2 = \triangle O_3CO_2,$$

так как  $O_1B = O_3C$ ,  $BO_2 = CO_2$  и

$$\begin{aligned} \angle O_1BO_2 &= \angle MBN + \frac{\pi}{2} = \\ &= \angle DCB + \frac{\pi}{2} = \angle O_3CO_2. \end{aligned}$$

Следовательно,  $O_1O_2 = O_3O_2$  и

$$\begin{aligned} \angle O_1O_2O_3 &= \angle O_1O_2B + \\ &+ \angle BO_2C - \angle O_3O_2C = \\ &= \angle BO_2C = \frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$

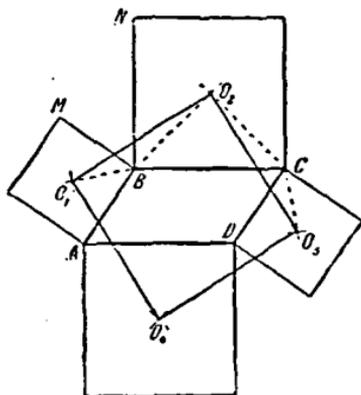


Рис. 86.

Аналогично доказывается, что  $O_2O_3 = O_3O_4 = O_4O_1$  и

$$\angle O_2O_3O_4 = \angle O_3O_4O_1 = \angle O_4O_1O_2 = \frac{\pi}{2}.$$

Следовательно,  $O_1O_2O_3O_4$ —квадрат.

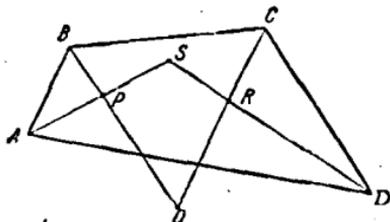


Рис. 87.

352. Пусть  $AP, BQ, CR$  и  $DS$ —биссектрисы внутренних углов четырехугольника  $ABCD$  (рис. 87). Пусть  $A, B,$

$C, D$  — величины этих углов. Тогда

$$\angle ASD = \pi - \frac{1}{2}A - \frac{1}{2}D,$$

$$\angle BQC = \pi - \frac{1}{2}B - \frac{1}{2}C.$$

Сложив эти равенства, получим:

$$\begin{aligned} \angle ASD + \angle BQC &= 2\pi - \frac{1}{2}(A + B + C + D) = \\ &= 2\pi - \frac{1}{2}2\pi = \pi. \end{aligned}$$

Следовательно, точки  $P, Q, R, S$  лежат на одной окружности.

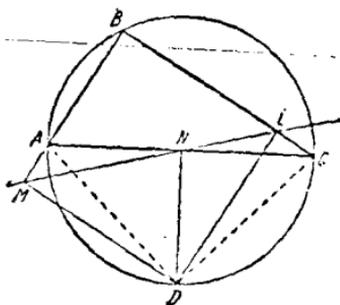


Рис. 88.

353. Пусть  $ABC$  — вписанный в окружность треугольник,  $D$  — точка окружности,  $L, M, N$  — основания перпендикуляров (рис. 88). Соединим точки  $M$  с  $N$  и  $N$  с  $L$  и докажем, что углы  $ANM$  и  $LNC$  равны.

Заметим для этого, что

$$\angle ANM = \angle ADM, \quad (1)$$

так как около четырехугольника  $MAND$  можно описать окружность. По той же причине

$$\angle LNC = \angle LDC; \quad (2)$$

с другой стороны,

$$\angle ADC = \angle MDL. \quad (3)$$

Действительно,  $\angle ADC + \angle B = 180^\circ$ , так как эти два угла в сумме опираются на полную окружность; в то же время  $\angle MDL + \angle B = 180^\circ$ , так как около четырехугольника  $MBLD$  можно описать окружность. Следовательно, равенство (3) справедливо. Из чертежа ясно, что в таком случае

$$\angle LDC = \angle ADM,$$

а тогда из (1) и (2) вытекает равенство

$$\angle ANM = \angle LNC,$$

которое и требовалось доказать.

354. Пусть  $O$  — центр меньшей окружности (рис. 89). Тогда  $AK \parallel OC$ , так как  $AK \perp BK$  и  $OC \perp BK$ . Кроме того,

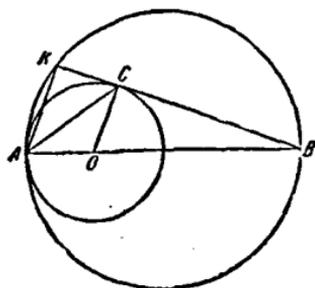


Рис. 89.

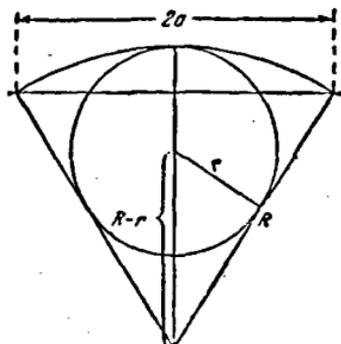


Рис. 90.

$OA = OC$ . Следовательно,

$$\angle KAC = \angle ACO = \angle CAO.$$

355. Из рассмотрения рис. 90 ясно, что

$$\frac{R-r}{r} = \frac{R}{a},$$

а это равносильно равенству

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} + \frac{1}{a}.$$

356. Пусть  $AM \parallel BN$  — неподвижные касательные,  $MN$  — подвижная касательная к окружности с центром  $O$  и  $K$  — точка касания (рис. 91). Тогда

$$\begin{aligned} \angle MON &= \angle MOK + \angle KON = \\ &= \frac{1}{2} \angle AOK + \frac{1}{2} \angle KOV = \frac{1}{2} \pi. \end{aligned}$$

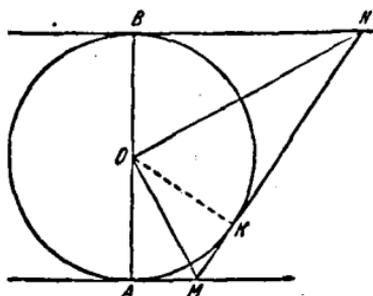


Рис. 91.

о свойству высоты, опущенной из вершины прямого угла, имеем

$K \cdot KN = OK^2$ , т. е. произведе-

ние  $MK \cdot KN$  не зависит от положения подвижной касательной.

357. Пусть  $M$  — точка пересечения взаимно-перпендикулярных хорд  $AB$  и  $CD$  (рис. 92). Проведем  $AK \parallel CD$ , тогда  $BK$  — диаметр,  $AK \perp CD$  и

$$BK^2 = AB^2 + AK^2 < AB^2 + CD^2.$$

Далее,  $KD = AC$ , так что

$$KB^2 = BD^2 + KD^2 = BM^2 + DM^2 + AM^2 + CM^2.$$

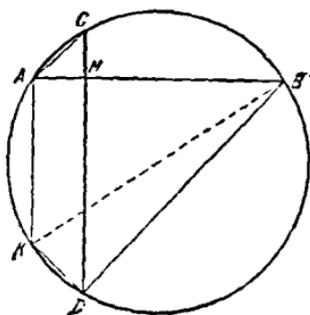


Рис. 92.

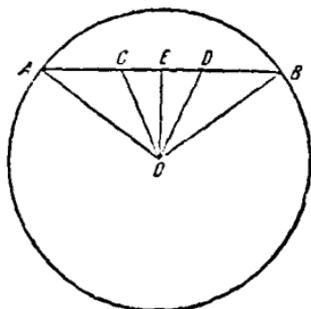


Рис. 93.

358. Пусть  $AC = CD = DB$  (рис. 93). Проведем  $OE \perp AB$ . Тогда  $OE$  — высота, а  $OC$  — медиана в  $\triangle AOD$ . Так как биссектриса  $\angle AOD$  лежит между медианой и высотой (см. задачу 328), то

$$\angle AOC < \angle COD.$$

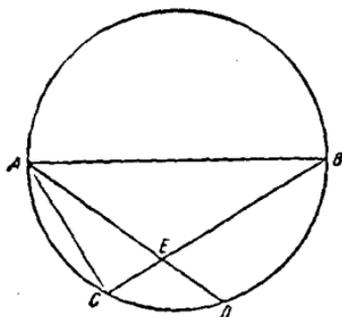


Рис. 94.

359. Пусть  $AB$  — диаметр круга и  $E$  — точка пересечения хорд  $AD$  и  $BC$  (рис. 94). Имеем:

$$\begin{aligned} AE \cdot AD &= AE^2 + AE \cdot ED = \\ &= AC^2 + EC^2 + AE \cdot ED \end{aligned}$$

По свойству пересекающихся хорд

$$AE \cdot ED = BE \cdot EC.$$

Поэтому

$$\begin{aligned} AE \cdot AD &= AC^2 + EC^2 + BE \cdot EC = AC^2 + EC \cdot BC = \\ &= AC^2 + (BC - BE) BC = AC^2 + BC^2 - BE \cdot BC, \end{aligned}$$

или окончательно

$$AE \cdot AD + BE \cdot BC = AB^2.$$

360. Пусть  $A, B$  — данные точки,  $O$  — центр данной окружности,  $R$  — радиус данной окружности и  $r$  — радиус равных вписанных окружностей с центрами  $O_1$  и  $O_2$  (рис. 95). Тогда

$$\frac{R}{r} = \frac{OA}{O_1A} = \frac{OB}{O_2B}.$$

Взяв производную пропорцию, получим:

$$\frac{OA}{OO_1} = \frac{OB}{OO_2}.$$

Следовательно,  $O_1O_2 \parallel AB$ .

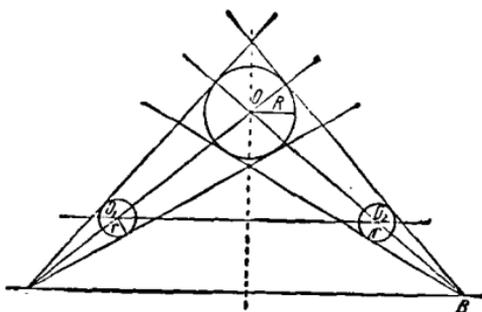


Рис. 95.

361. Пусть  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы полуокружностей, вписанных в данную полуокружность радиуса  $R$  (рис. 96). Так как,

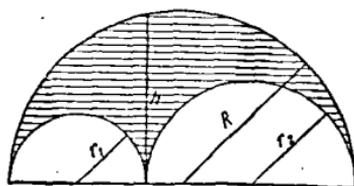


Рис. 96.

$R = r_1 + r_2$ , то заштрихованная площадь равна

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} \pi R^2 - \frac{1}{2} \pi r_1^2 - \frac{1}{2} \pi r_2^2 = \\ &= \frac{1}{2} \pi [(r_1 + r_2)^2 - r_1^2 - r_2^2] = \pi r_1 r_2. \end{aligned}$$

$$h^2 = 2r_1 \cdot 2r_2 = 4r_1 r_2.$$

следовательно,

$$S = \frac{1}{4} \pi h^2.$$

362. Если прямая, соединяющая точки  $A$  и  $B$ , не пересекает данной окружности, то касательные  $AC$  и  $BD$  можно провести так, что точка их пересечения  $M$  будет лежать на отрезках  $AC$  и  $BD$  (рис. 97). В  $\triangle AMB$  имеем:

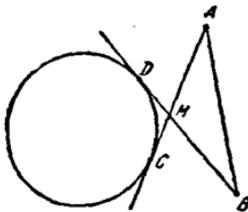


Рис. 97.

$$AM + BM > AB > |AM - BM|,$$

и так как

$$AC > AM, \quad BD > BM, \quad MC = MD,$$

то

$$AC + BD > AB > |AC - BD|.$$

Если прямая  $AB$  пересекает окружность, то возможны два случая: а) хорда, отсекаемая окружностью на прямой  $AB$ , лежит на отрезке  $AB$ ; б) эта хорда лежит вне отрезка  $AB$ .

В случае а) (рис. 98) имеем:

$$AB > AE + BF > AC + BD,$$

так как гипотенузы  $AE$ ,  $BF$  в прямоугольных треугольниках  $AEC$  и  $BFD$  больше катетов  $AC$  и  $BD$ .

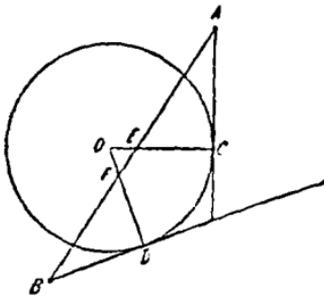


Рис. 98.

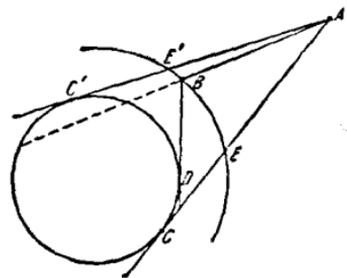


Рис. 99.

В случае б) отрезок  $AB$  лежит внутри угла  $CA$  (рис. 99). Проведем через  $B$  окружность, concentрическую с данной. Пусть она пересечет  $AC$  и  $AC'$  в точках  $E$  и  $E'$ . Тогда  $EC = BD$  и  $AE > AB$ . Следовательно,

$$AB < AE = AC - EC = AC - BD.$$

363. Введем обозначения (рис. 100):

$$\begin{aligned} \angle PCM = \angle QCN = \alpha, \quad \angle NML = \angle NKL = \gamma, \\ \angle LCP = \angle QCK = \beta, \\ QC = x, \quad PC = y, \quad AC = CB = a. \end{aligned}$$

По теореме об отрезках пересекающихся хорд окружности  $NQ \cdot QK = AQ \cdot QB = a^2 - x^2$ .

Применяя теорему синусов к треугольникам  $NQC$  и  $QCK$ , получаем:

$$NQ = \frac{x \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta + \gamma)}, \quad QK = \frac{x \sin \beta}{\sin \gamma}.$$

Следовательно,

$$NQ \cdot QK = \frac{x^2 \sin \alpha \sin \beta}{\sin \gamma \sin(\alpha + \beta + \gamma)} = a^2 - x^2,$$

откуда

$$x^2 = \frac{a^2 \sin \gamma \sin(\alpha + \beta + \gamma)}{\sin \alpha \sin \beta + \sin \gamma \sin(\alpha + \beta + \gamma)}.$$

аналогично вычисляется

$$y^2 = \frac{a^2 \sin \gamma \sin(\alpha + \beta + \gamma)}{\sin \alpha \sin \beta + \sin \gamma \sin(\alpha + \beta + \gamma)}.$$

аким образом,  $x = y$ .

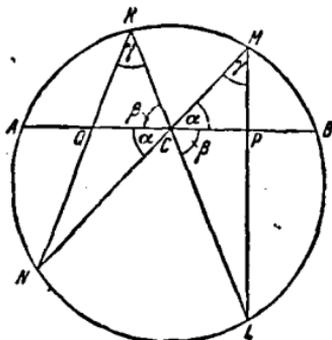


Рис. 100.

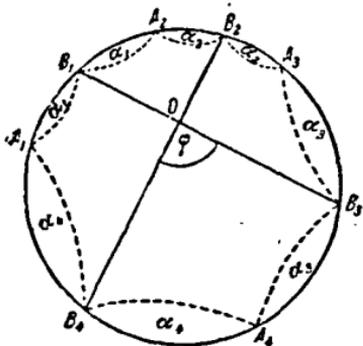


Рис. 101.

364. Пусть  $B_1, B_2, B_3, B_4$  — середины дуг  $A_1A_2, A_2A_3, A_3A_4, A_4A_1$  (рис. 101). Пусть  $\alpha_i$  — центральный угол, соответствующий дуге  $A_iB_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ). Обозначим через  $\varphi$  гол, образованный отрезками  $B_1B_3$  и  $B_2B_4$ . Тогда

$$\varphi = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{2},$$

а так как

$$2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4 = 2\pi,$$

то  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ .

365. Выберем точки  $A$  и  $B$  на ломаной так, чтобы они делили периметр на две равные части. Пусть  $O$  — середина отрезка  $AB$ , проведем окружность с центром в  $O$  радиуса  $\frac{p}{4}$ , где  $p$  — периметр всей ломаной. Докажем, что эта окружность искомая. Допустим противное, т. е. что существует точка  $M$  ломаной, лежащая вне построенного круга. Длина той части ломаной, которая содержит  $M$ , не меньше, чем  $AM + BM$ , т. е.  $AM + BM \leq \frac{p}{2}$ . Но

$$AM + BM \geq 2MO.$$

Действительно, из параллелограмма  $AMBD$  (рис. 102), имеем:

$$DM = 2MO < BM + BD = AM + BM.$$

Так как  $MO > \frac{p}{4}$ , то из неравенства  $AM + BM \geq 2MO$  следует, что  $AM + BM > \frac{p}{2}$ . Получаем противоречие.

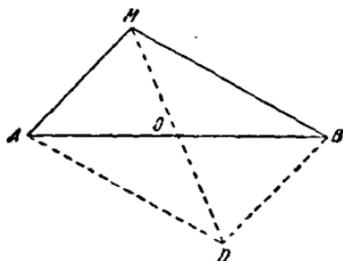


Рис. 102.

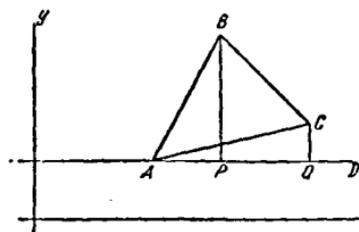


Рис. 103.

366. Проведем через вершину  $A$  данного  $\triangle ABC$  прямую  $AD$ , параллельную одной из данных прямых  $x$  и  $y$  и пересекающую треугольник, и опустим из точек  $B$  и  $C$  перпендикуляры  $BP$  и  $CQ$  на  $AD$  (рис. 103). Предположим, что расстояния вершин треугольника  $ABC$  от прямых  $x$  и  $y$  выражают целыми числами. Тогда длины отрезков  $AP$ ,  $AQ$ ,  $BP$ , также будут выражаться целыми числами. В силу этого

$$\operatorname{tg} \angle BAP = \frac{BP}{AP} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \angle CAQ = \frac{CQ}{AQ}$$

будут числами рациональными, а значит, будет рациональным и число

$$\operatorname{tg} \angle BAC = \frac{\operatorname{tg} \angle BAP - \operatorname{tg} \angle CAQ}{1 + \operatorname{tg} \angle BAP \operatorname{tg} \angle CAQ} = \frac{\frac{BP}{AP} - \frac{CQ}{AQ}}{1 + \frac{BP \cdot CQ}{AP \cdot AQ}}.$$

оэтому невозможно, чтобы  $\angle BAC = 60^\circ$ , так как  $\operatorname{tg} 60^\circ = \sqrt{3}$  есть число иррациональное. Следовательно,  $ABC$  не может быть правильным.

367. Пусть прямые  $A_1B$  и  $AB_1$  пересекаются в точке  $O$  (рис. 104). Так как  $\triangle ABA_1 \sim \triangle DBO$  и  $BAB_1 \sim \triangle DAO$ , то

$$\frac{OD}{a} = \frac{BD}{AB}, \quad \frac{OD}{b} = \frac{AD}{AB}.$$

тсюда

$$OD \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = \frac{AD + BD}{AB} = 1.$$

следовательно, расстояние

$$OD = \frac{ab}{a+b}$$

зависит от положения точек  $A$  и  $B$  (при сохранении величин  $a$  и  $b$ ).

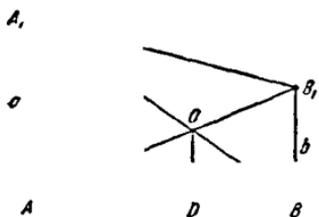


Рис. 104.

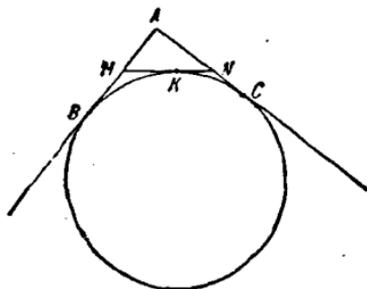


Рис. 105.

368. Если  $K$  — точка касания отрезка  $MN$  с окружностью (рис. 105), то  $BM = MK$ ,  $KN = NC$ , откуда

$$MN = BM + CN. \quad (1)$$

Но  $MN < AM + AN$ . Поэтому

$2MN < BM + AM + CN + AN = AB + AC$ ,  
откуда

$$MN < \frac{AB + AC}{2}.$$

С другой стороны,  $MN > AN$  и  $MN > AM$ , так как  $MN$  — гипотенуза в треугольнике  $AMN$ . Поэтому  $2MN > AN + AM$  и в силу (1)  $3MN > AN + NC + AM + MB = AB + AC$ .

Следовательно,

$$MN > \frac{AB + AC}{3}.$$

369. Пусть  $ABC$  — данный треугольник,  $AB = BC$ ,  $BO \parallel AC$ ,  $O$  — центр окружности, касающейся  $AC$ ;  $D$  и  $E$  — точки пересечения этой окружности с  $AB$  и  $BC$  (рис. 106). Продолжим  $AB$  до второго пересечения с окружностью в точке  $F$ . Докажем, что  $FE \perp BO$ .

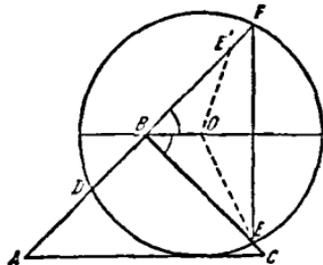


Рис. 106.

Заметим, что  $\angle OBF = \angle OBE$ , так как эти углы равны углам при основании  $AC$  в треугольнике  $ABC$ . Далее  $BF = BE$ ; действительно, если бы было  $BF > BE$ , то, отложив на  $BF$  отрезок  $BE' = BE$ , мы имели бы равные треугольники  $OBE$  и  $OBE'$

и  $OE' = OE$ , что невозможно, так как точка  $E'$  лежит внутри окружности радиуса  $OE$ ; аналогично докажем, что невозможно неравенство  $BF < BE$ . Но биссектриса  $BO$  в равнобедренном треугольнике  $FBE$  должна быть и высотой, что и требовалось доказать. Поэтому  $\angle DFE = \frac{1}{2} \angle ABC$  не зависит от положения точки  $O$  на прямой  $BO$ . Следовательно, величина дуги  $DE$ , половиной которой измеряется  $\angle DFE$ , остается при качении окружности постоянной.

370. Пользуясь обозначениями, введенными при решении задачи 298, находим:

$$n^2 = \frac{ab + cd}{bc + ad} (ac + bd), \quad m^2 = \frac{bc + ad}{ab + cd} (ac + bd).$$

Разделив почленно эти равенства, получаем:

$$\frac{n}{m} = \frac{ab + cd}{bc + ad}.$$

371. Пусть  $ABC$  — правильный треугольник со стороной  $a$  и  $r_1, r_2, r_3$  — расстояния от точки  $M$  описанной окружности до вершин треугольника (рис. 107). Сначала заметим,

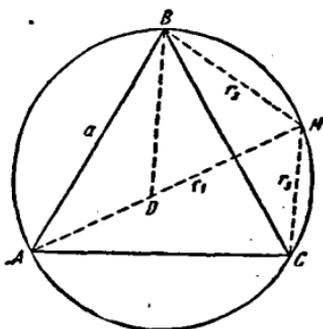


Рис. 107.

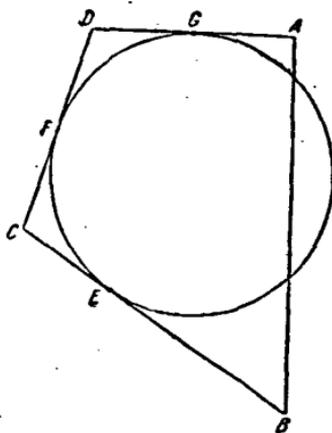


Рис. 108.

что при указанном на рис. 107 положении точки  $M$  будет

$$r_1 = r_2 + r_3.$$

ействительно, если отложить  $DM = r_2$ , то получится авносторонний треугольник  $BMD$ . Отсюда следует, что  $\angle ABD = \angle CBM$ , в силу чего  $\triangle ABD = \triangle CBM$ , так что  $AD = r_3$ . Применив к  $\triangle BMC$  теорему косинусов, получим:

$$a^2 = r_2^2 + r_3^2 - 2r_2r_3 \cos 120^\circ = r_2^2 + r_3^2 + r_2r_3.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 &= (r_2 + r_3)^2 + r_2^2 + r_3^2 = \\ &= 2(r_2^2 + r_3^2 + r_2r_3) = 2a^2. \end{aligned}$$

372. Пусть сторона  $AB$  четырехугольника  $ABCD$  пересекает окружность, а стороны  $BC, CD, DA$  касаются ее в точках  $E, F, G$  (рис. 108). Так как  $CE = CF$  и  $DF = DG$ , о неравенство

$$AB + CD > BC + DA$$

равносильно неравенству

$$AB > BE + AG,$$

а это неравенство доказано в решении задачи 362.

373. Пусть сторона  $AD$  четырехугольника  $ABCD$  не пересекает окружности, а стороны  $BC$ ,  $CD$ ,  $BA$  касаются ее в точках  $F$ ,  $E$ ,  $G$  (рис. 109)

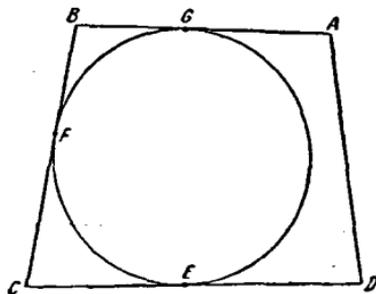


Рис. 109.

Неравенство

$$AD + CB < DC + BA$$

равносильно неравенству

$$AD < DE + AG,$$

которое доказано в решении задачи 362.

374. Пусть  $R$  — радиус данных полуокружностей. Если  $r_1, r_2, \dots, r_n$  — радиусы вписываемых кругов,  $d_1, d_2, \dots, d_n$  — их диаметры (рис. 110), то ясно, что при безгранично

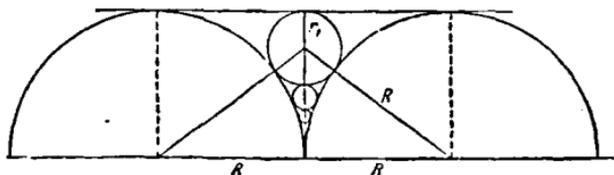


Рис. 110.

возрастании  $n$  сумма  $d_1 + d_2 + \dots + d_n$  стремится к  $R$ , т.

$$d_1 + d_2 + \dots + d_n + \dots = R. \quad ($$

Кроме того, имеем:

$$(R + r_1)^2 = R^2 + (R - r_1)^2, \quad 2r_1 = d_1 = \frac{R}{1 \cdot 2};$$

$$(R + r_2)^2 = R^2 + (R - d_1 - r_2)^2, \quad 2r_2 = d_2 = \frac{R}{2 \cdot 3}.$$

Пусть  $d_n = \frac{R}{n(n+1)}$ . Докажем, что  $d_{n+1} = \frac{R}{(n+1)(n+2)}$

Имеем:

$$(R + r_{n+1})^2 = R^2 + (R - d_1 - d_2 - \dots - d_n - r_{n+1})^2. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 0 \\ + d_1 + \dots + d_n = \\ = R \left( \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} \right) = \\ = R \left( 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = R \frac{n}{n+1}. \end{aligned}$$

одставив это выражение в (2), найдем:

$$d_{n+1} = 2r_{n+1} = \frac{R}{(n+1)(n+2)}.$$

оложив в равенстве (1)  $R=1$ , получим:

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} + \dots = 1.$$

375. Пусть  $O$  — центр биллиарда,  $B$  — первая точка отражения и  $C$  — вторая точка отражения. Докажем, что, если

$ABC \neq 0$ , то  $\triangle ABC$  равно-

едренный (рис. 111). Действи-

ельно,  $\triangle BOC$  равнобедренный,

значит,  $\angle OBC = \angle OCB$ . По

кону отражения (угол падения

авен углу отражения)  $\angle OBC =$

$\angle OBA$  и  $\angle OCB = \angle OCA$ .

оэтому  $\angle ABC = \angle ACB$ . Сле-

ваательно, центр  $O$  лежит на

соте  $AD$ , проведенной к сто-

оне  $BC$ . Положение точки  $B$ ,

которую надо направить шарик,

обы после отражения в  $B$  и

он прошел через точку  $A$ , можно фиксировать заданием

ла  $\angle BOD = \alpha$ . Имеем:

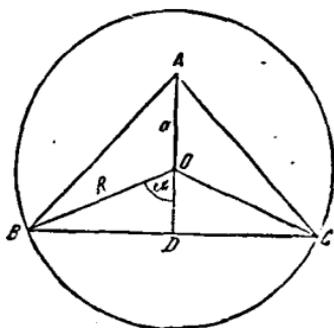


Рис. 111.

$$OD = R \cos \alpha, \quad BD = R \sin \alpha,$$

$$BA = \frac{BD}{\cos 2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right)} = \frac{BD}{\cos 2\alpha}.$$

Так как  $BO$  — биссектриса угла  $B$  в  $\triangle ABD$ , то

$$\frac{BD}{BA} = \frac{OD}{OA}$$

или

$$-\cos 2\alpha = \frac{R \cos \alpha}{a},$$

откуда для  $\cos \alpha$  получаем уравнение

$$\cos^2 \alpha + \frac{R}{2a} \cos \alpha - \frac{1}{2} = 0.$$

Решив его, найдем:

$$\cos \alpha = -\frac{R}{4a} + \sqrt{\left(\frac{R}{4a}\right)^2 + \frac{1}{2}}.$$

Второй корень отброшен, так как в силу  $R > a$  он дает значение  $\cos \alpha < -1$ .

Если мы теперь предположим, что  $\angle ABC = 0$ , то получим второе решение задачи: точки  $B$  и  $C$  находятся в концах диаметра, проходящего через точку  $A$ .

376. Пусть  $S$  — вершина данного угла  $\alpha$ ,  $A_1$  — точка первой встречи луча с зеркалом,  $SB_1$  — та сторона угла,

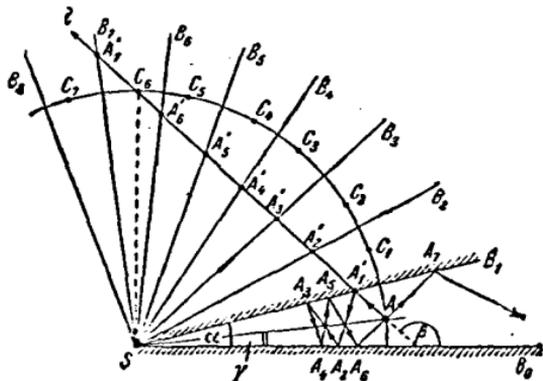


Рис. 112.

которой лежит точка  $A_1$ , и  $SB_0$  — другая его сторона. По следующие точки встречи луча со сторонами угла обозначим через  $A_2, A_3, \dots$ , так что путь луча внутри угла будет иметь вид ломаной  $AA_1A_2A_3, \dots$  (рис. 112).

В направлении вращения от  $SB_0$  к  $SB_1$  построим последовательно углы  $B_1SB_2, B_2SB_3, \dots$ , равные углу  $\alpha = \angle B_0SB_1$ . а стороне  $SB_m$  ( $m=2, 3, 4, \dots$ ) отложим отрезок  $SA'_m = SA_m$  (точки  $A'_1$  и  $A_1$  совпадают) и докажем, что точки  $A'_1, A'_2, \dots$  лежат на одной прямой. Для этого достаточно показать, что каждые три последовательные точки  $A'_m, A'_{m+1}, A'_{m+2}$  лежат на одной прямой (мы полагаем здесь  $m=0, 1, 2, \dots$ ). Для этого заметим, что  $\triangle A'_mSA'_{m+1} = \triangle A_mSA_{m+1}$ , силу чего

$$\angle A'_mA'_{m+1}S = \angle A_mA_{m+1}S.$$

аналогично  $\triangle A'_{m+1}SA'_{m+2} = \triangle A_{m+1}SA_{m+2}$  и, значит,

$$\angle SA'_{m+1}A'_{m+2} = \angle SA_{m+1}A_{m+2}.$$

о по закону отражения (угол падения равен углу отражения)

$$\angle SA_{m+1}A_{m+2} = \angle A_mA_{m+1}B.$$

следовательно,

$$\begin{aligned} \angle A'_mA'_{m+1}S + \angle SA'_{m+1}A'_{m+2} &= \\ &= \angle A_mA_{m+1}S + \angle A_mA_{m+1}B = \pi. \end{aligned}$$

Таким образом, путь луча — ломаная  $AA_1A_2 \dots$  — оказался развернутым в прямую  $l(AA_1A_2 \dots)$ . Так как эта прямая может пересечь лишь конечное число сторон  $SB_m$ , то, следовательно, число отражений луча конечно.

Ясно, что если  $SB_n$  — последняя из сторон, которую пересекает прямая  $l$ , то  $n\alpha < \beta$ , а  $(n+1)\alpha \geq \beta$ . Таким образом, число отражений равно такому целому числу  $n$ , которое удовлетворяет неравенствам

$$n < \frac{\beta}{\alpha} \leq n+1.$$

Для того чтобы выяснить условия, при которых луч после некоторого числа отражений снова пройдет через точку  $A$ , остроим ряд точек  $C_1, C_2, \dots$  так, чтобы точка  $C_1$  была симметрична точке  $A$  относительно  $SB_1$ , точка  $C_2$  симметрична точке  $C_1$  относительно  $SB_2$  и т. д., вообще, чтобы точка  $C_m$  была симметрична точке  $C_{m-1}$  относительно  $SB_m$ . Ясно, что рохождение луча снова через точку  $A$  равносильно прохождению прямой  $l$  через одну из точек  $C_m$  ( $m=1, 2, \dots$ ).

Для аналитической формулировки этого условия введем угол  $\gamma = \angle ASB_0$  и будем различать два случая:

а) точка  $C_k$ , через которую проходит прямая  $l$ , такова, что  $k$  — четное число;

б) точка  $C_k$  такова, что  $k$  — нечетное число.

В случае а) (этот случай изображен на рис. 112, г  $k=6$ )  $\angle ASC_k = k\alpha$ . Так как  $\triangle ASC_k$  равнобедренный,

$$\angle SAC_k = \frac{\pi}{2} - \frac{k\alpha}{2}.$$

С другой стороны, тот же угол равен  $\gamma + \pi - \beta$ , следовательно,

$$\frac{\pi}{2} - \frac{k\alpha}{2} = \gamma + \pi - \beta,$$

откуда

$$k = \frac{2\beta - 2\gamma - \pi}{\alpha}.$$

В случае б) будем иметь

$$\angle ASC_k = (k+1)\alpha - 2\gamma$$

и, как и выше, придем к соотношению

$$\frac{\pi}{2} - \frac{(k+1)\alpha - 2\gamma}{2} = \gamma + \pi - \beta,$$

откуда

$$k+1 = \frac{2\beta - \pi}{\alpha}.$$

Проведя рассуждение в обратном порядке, легко убедиться в том, что выполнение одного из соотношений (1) или (2) при целом значении  $k$  влечет прохождение прямой через точку  $C_k$ . Следовательно, луч снова пройдет через точку  $A$  тогда и только тогда, когда одно из чисел или (2) будет целым четным числом.

#### 4. Геометрические места точек

377. Искомое геометрическое место состоит из двух окружностей: дуги  $BE$  с центром в середине  $C$  дуги данной окружности и дуги  $BF$  с центром в середине дуги  $AB$  данной окружности, причем  $EAF$  — касатель в точке  $A$  к данной окружности (рис. 113).



**Доказательство.** Пусть  $M$  и  $N$  — точки, полученные при построении с помощью секущей  $AA'$ . Доказательство проведем только для точки  $M$  (для  $N$  оно проводится аналогично). Пусть  $MP \perp BC$ ; тогда  $\angle OAB = \angle A'MP$  (как углы с перпендикулярными сторонами). Поэтому прямоугольные треугольники  $OAB$  и  $A'MP$ , имеющие равные гипотенузы  $OA$  и  $A'M$ , равны. Значит,  $A'P = OB = BC$ . Отсюда следует, что если  $E$  — середина  $OM$ , то точки  $M, A', C, O$  лежат на одной окружности с центром  $E$  и, следовательно,  $MC \perp OC$ , т. е. точка  $M$  лежит на прямой  $l$ . Обратно, если  $M$  — какая-нибудь точка прямой  $l$  и  $\angle MA'O$  прямой, то  $A'P = BC = OB$ , откуда следует равенство треугольников  $OAB$  и  $A'MP$  и, наконец, равенство  $OA = A'M$ . Следовательно, точка  $M$  получается рассматриваемым построением.

**379.** В случае *пересекающихся* прямых искомое геометрическое место состоит из четырех отрезков, образующих прямоугольник  $ABCD$ , вершины которого лежат на данных прямых  $l, m$  и находятся от них на данном расстоянии  $a$  (рис. 115)

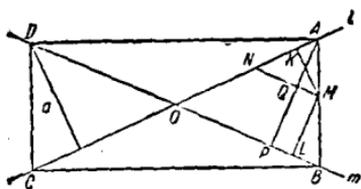


Рис. 115.

**Доказательство.** Пусть точка  $M$  такова, что  $MK \perp l$ ,  $ML \perp m$  и  $MK + ML = a$ , где  $a$  — длина данного отрезка. Проведем через  $M$  прямую  $AB$  так

чтобы  $OA = OB$  и  $MN \parallel OB$ . Пусть  $AP \perp OB$  и  $Q$  — точка пересечения  $AP$  и  $MN$ . Из равенства  $AN = MN$  следует что  $MK = AQ$  и, значит,

$$AP = AQ + QP = MK + ML = a.$$

Следовательно, точка  $A$  является вершиной упомянутого прямоугольника. То же верно и для точки  $B$ , так что лежит на стороне этого прямоугольника. Обратно, если  $M$  лежит на стороне этого прямоугольника, то, проведя рассуждения в обратном порядке, получим, что  $MK + ML = AP =$

Если данные прямые  $l$  и  $m$  *параллельны* и расстояние между ними равно  $h$ , то искомое геометрическое место существует только тогда, когда  $a \geq h$ , и представляет собой на прямых, параллельных данным, при  $a > h$  или всю полосу между  $l$  и  $m$  при  $a = h$ .

380. В случае *пересекающихся* прямых искомое геометрическое место состоит из восьми полупрямых, являющихся продолжениями сторон прямоугольника  $ABCD$ , указанного в решении задачи 379 (рис. 116). Доказательство аналогично тому, которое дано в решении этой задачи.

Если данные прямые  $l$  и  $m$  *параллельны* и расстояние между ними равно  $h$ , то искомое геометрическое место существует только тогда, когда  $a \leq h$ , и представляет собой пару прямых, параллельных данным, при  $a < h$  или часть плоскости, лежащую вне полосы между  $l$  и  $m$ , при  $a = h$ .

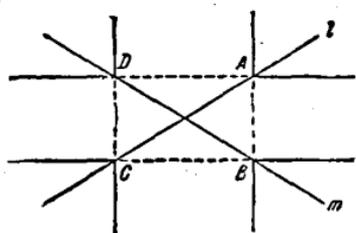


Рис. 116.

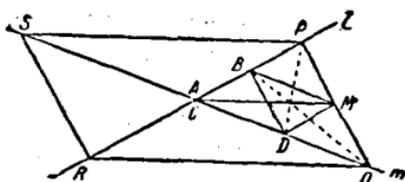


Рис. 117.

381. Если отрезок  $AB$  лежит на прямой  $l$ , а  $CD$  — на прямой  $m$ , то искомое геометрическое место состоит из четырех отрезков, образующих параллелограмм  $PQRS$ , в котором  $l$  и  $m$  — диагонали, а положение вершин  $P$  и  $Q$  определяется из соотношений

$$h_P CD = a^2, \quad h_Q AB = a^2, \quad (1)$$

где  $h_P$  и  $h_Q$  — расстояния точек  $P$  и  $Q$  от прямых  $m$  и  $l$  (рис. 117).

Доказательство. Заметим, что при фиксированных  $l$  и  $m$  искомое геометрическое место вполне определяется заданием длин отрезков  $AB$  и  $CD$  и постоянной  $a$ , но не зависит от положения этих отрезков на прямых  $l$  и  $m$ . Действительно, при изменении этого положения площади треугольников  $AMB$  и  $CMD$  не меняются. Поэтому достаточно рассмотреть частный случай, когда отрезки  $AB$  и  $CD$  имеют общий конец в точке пересечения прямых  $l$  и  $m$ . В этом случае отрезки  $AB$  и  $CD$  будут сторонами треугольника, ретя сторона которого лежит в одном из четырех углов, образующихся при пересечении прямых  $l$  и  $m$ . Например, на

рис. 117 совмещены концы  $A$  и  $C$  и третьей стороной является  $BD$ .

Пусть  $M$  — точка искомого геометрического места, лежащая внутри угла  $BAD$ . Тогда площадь  $\triangle BMD$  равна

$$S_{BMD} = |S_{AMB} + S_{CMD} - S_{ABD}| = |a^2 - S_{ABD}|.$$

Отсюда следует, что расстояние точки  $M$  от прямой  $BD$  не зависит от ее положения на прямой  $PQ \parallel BD$ . Для точек  $P$  и  $Q$  выполнены соотношения (1).

Обратно, пусть  $M$  — какая-нибудь точка на прямой  $PQ$ , где точки  $P$  и  $Q$  построены согласно (1). Из соотношений

$$\frac{AP}{AB} = \frac{S_{APD}}{S_{ABD}} = \frac{a^2}{S_{ABD}}, \quad \frac{CQ}{CD} = \frac{S_{CQB}}{S_{CDB}} = \frac{a^2}{S_{ABD}}$$

следует:

$$\frac{AP}{AB} = \frac{CQ}{CD},$$

т. е.  $PQ \parallel BD$ . Поэтому

$$S_{AMB} + S_{CMD} = S_{ABD} + S_{BMD} = S_{ABD} + S_{BPD} = S_{APD} = a^2.$$

Следовательно, точка  $M$  принадлежит искомому геометрическому месту. Остальные стороны параллелограмма  $PQRS$  получаются аналогично при совмещении других концов отрезков, а именно:  $QR$  при  $B \equiv C$ ,  $R$  при  $B \equiv D$  и  $SP$  при  $A \equiv D$ .

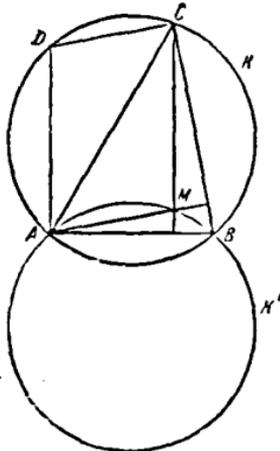


Рис. 118.

на расстояние  $AD$  в направлении хорды  $DA$ . Ясно, что эта окружность  $K'$  симметрична с  $K$  относительно  $AB$

382. Искомым геометрическим местом является окружность, симметричная с данной окружностью  $K$  относительно данной хорды  $AB$  (рис. 118).

Доказательство. Построим окружности  $K$  хорду  $AD \perp AB$ . Пусть  $\triangle ABC$  вписан в  $K$  и  $M$  — точка пересечения его высот. Легко видеть, что  $AMCD$  — параллелограмм:  $DA \parallel CM$  как перпендикуляры к  $AB$ , а  $DC \parallel AM$  как перпендикуляры к  $BC$  ( $DC \perp BC$  так как  $BD$  — диаметр в  $K$ ). Поэтому точка  $M$  лежит на окружности  $K'$  получаемой из окружности  $K$  сдвигом

Обратно, пусть  $M$  — точка на  $K'$  и  $MC \perp AB$ . Так как  $MC = AD$ , то  $AMCD$  — параллелограмм и, значит,  $AM \parallel DC$ . Но  $DC \perp BC$ , так как  $ABCD$  вписан в  $K$  и угол  $BAD$  прямой. Поэтому  $AM \perp BC$  и  $M$  — точка пересечения высот в  $\triangle ABC$ . Следовательно,  $M$  принадлежит искомому геометрическому месту.

383. Пусть  $O$  — центр и  $R$  — радиус данной окружности (рис. 119). Искомым геометрическим местом является прямая  $l$ , перпендикулярная к прямой  $OA$  и пересекающая эту прямую в точке  $B$  такой, что

$$OB = \frac{R^2}{OA}. \quad (1)$$

Доказательство. Проведем через точку  $M$  прямую  $l \perp OA$ , которая пересечет прямую  $OA$  в точке  $B$ . Пусть  $C$  — точка пересечения отрезка  $OM$  с хордой  $KL$ . Из подобия треугольников  $OAC$  и  $OMB$  следует:

$$\frac{OB}{OC} = \frac{OM}{OA},$$

откуда

$$OB = \frac{OM \cdot OC}{OA}. \quad (2)$$

По построению  $KC$  есть высота в прямоугольном треугольнике  $OKM$ , следовательно,

$$OM \cdot OC = R^2.$$

Подставив это выражение в (2), получим равенство (1).

Обратно, пусть  $M$  — какая-нибудь точка прямой  $l$ , перпендикулярной к  $OA$  и такой, что  $OB$  определяется равенством (1). Проведем касательную  $MK$  и  $KC \perp OM$ . Пусть  $KC$  пересечет прямую  $OA$  в точке  $A'$ . Тогда, повторив первую часть доказательства, найдем, что  $OB$  определяется формулой (1) с  $OA'$  вместо  $OA$ . Отсюда получим  $OA' = OA$ , т. е. точка  $A'$  совпадает с  $A$ , а это означает, что точка  $M$  принадлежит искомому геометрическому месту.

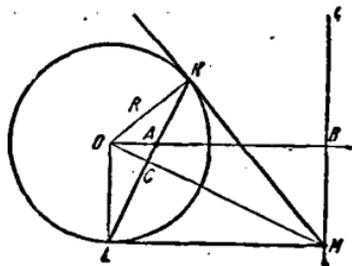


Рис. 119.

384. Пусть

$$\frac{AM}{BM} = \frac{p}{q} > 1.$$

Проведем биссектрисы  $MP$  и  $MQ$  двух смежных углов с вершиной  $M$  и сторонами  $MA$  и  $MB$  (рис. 120). Тогда по свойству биссектрис будем иметь:

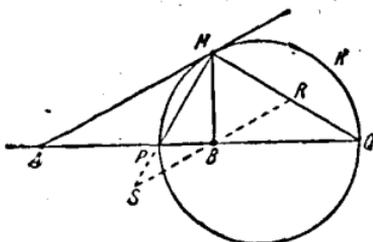


Рис. 120.

$$\frac{AP}{BP} = \frac{p}{q} \quad \text{и} \quad \frac{AQ}{BQ} = \frac{p}{q}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что положение точек  $P$  и  $Q$  не зависит от положения точки  $M$ . Так как, кроме того,  $\angle PMQ = \frac{\pi}{2}$ , то точка  $M$  лежит на окружности  $K$  с диаметром  $PQ$ . Обратно, пусть точки  $P$  и  $Q$  построены согласно (1) и  $K$  — окружность с диаметром  $PQ$ . Если точка  $M$  лежит на этой окружности, то  $\angle PMQ = \frac{\pi}{2}$ . Через точку  $B$  проведем  $RS \parallel AM$ , тогда

$$\frac{AM}{BR} = \frac{AQ}{BQ} = \frac{p}{q}, \quad \frac{AM}{BS} = \frac{AP}{BP} = \frac{p}{q}, \quad (2)$$

откуда  $BR = BS$  и  $BM$  — медиана в  $\triangle RMS$ . Так как  $\triangle RMS$  — прямоугольный, то  $BM = BR$  и в силу (2)

$$\frac{AM}{BM} = \frac{p}{q}.$$

Поэтому точка  $M$  принадлежит рассматриваемому геометрическому месту.

Чтобы выразить диаметр  $PQ$  через длину  $a$  отрезка  $AB$  из соотношений

$$PB = AB - AP = a - \frac{p}{q} PB,$$

$$BQ = AQ - AB = \frac{p}{q} BQ - a,$$

находим:

$$PB = a \frac{q}{p+q}, \quad BQ = a \frac{q}{p-q},$$

откуда

$$PQ = \frac{2a}{\frac{p}{q} - \frac{q}{p}}$$

Если  $p = q$ , то искомым геометрическим местом будет, очевидно, перпендикуляр к прямой  $AB$ , проведенный через середину отрезка  $AB$ .

385. Искомое геометрическое место есть перпендикуляр отрезку  $AC$ , проведенный через его середину  $E$ , с выброшенной точкой  $E$ .

Доказательство. Треугольник  $ADB$  — равнобедренный, так как  $\angle CAD = \angle CBD$ , ибо эти углы опираются в равных кружностях на равные дуги  $CD$  (рис. 121). Поэтому точка  $D$  лежит на перпендикуляре к отрезку  $AB$ , проведенному через его середину  $E$ . Наоборот, если взять любую точку  $D$  на этом перпендикуляре, не совпадающую

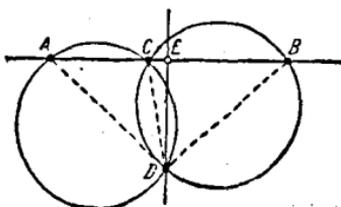


Рис. 121.

точкой  $E$ , то окружности, проходящие через  $ACD$  и  $BCD$ , равны. Это следует, например, из равенств

$$R_1 = \frac{CD}{2 \sin \alpha} = \frac{CD}{2 \sin \beta} = R_2,$$

где  $\alpha = \angle BAD$  и  $\beta = \angle CBD$ .

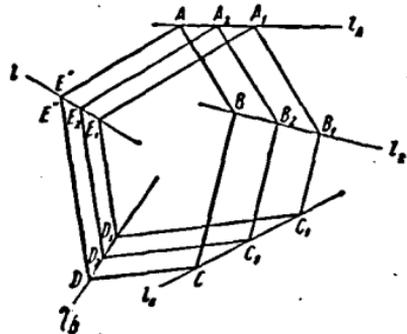


Рис. 122.

386. Искомое геометрическое место есть прямая, проведенная через какие-нибудь два различных положения последней вершины.

Доказательство. Пусть, например,  $A_1B_1C_1D_1E_1$  — одно и  $A_2B_2C_2D_2E_2$  — другое положения деформирующегося многоугольника, вершины  $A, B, C, D$  которого скользят соответственно по прямым  $l_A, l_B, l_C, l_D$  (рис. 122). Через положения  $E_1$  и  $E_2$  последней вершины проведем прямую  $l$ . Пусть вершина на прямой  $l_A$  заняла положение  $A$ , а на  $l_D$  — соот-

ветствующее положение  $D$ . Сторона, параллельная  $A_2E_2$ , пересечет  $l$  в точке  $E'$ , а сторона, параллельная  $D_2E_2$ , — в точке  $E''$ . По построению

$$\frac{E'E_2}{E_2E_1} = \frac{AA_2}{A_2A_1} = \frac{BB_2}{B_2B_1} = \frac{CC_2}{C_2C_1} = \frac{DD_2}{D_2D_1} = \frac{E''E_2}{E_2E_1},$$

откуда

$$E'E_2 = E''E_2,$$

т. е. точки  $E'$  и  $E''$  совпадают. Это означает, что последняя вершина будет лежать на прямой  $l$  в точке  $E \equiv E' \equiv E''$ .

Обратное очевидно, так как положение деформированного многоугольника можно построить, начиная с любой точки  $E$ , на прямой  $l$ .

387. Искомое геометрическое место есть окружность, проходящая через концы хорды  $AB$  и одну из точек  $M_1$ , получаемых указанным в условии построением.

Доказательство. Предварительно введем некоторые обозначения. Найдется одно и только одно такое положение  $C_1D_1$  хорды  $CD$ , когда  $C_1D_1 \parallel AB$  и когда на данной окружности  $K$  можно выбрать такое направление обхода  $\gamma$ , при движении в котором концы хорд будут встречаться в последовательности  $A, B, C_1, D_1$  (этот выбор может не быть определенным только в случае равенства  $AB = CD$ , когда прямые  $AC$  и  $BD$  параллельны). Обозначим через  $\alpha$  ту из дуг  $AB$  данной окружности  $K$ , на которой лежат точки  $C_1, D_1$ , через  $\beta$  — другую дугу  $AB$  и через  $\gamma$  — ту из дуг  $C_1D_1$ , на которой нет точек  $A, B$ . Далее, обозначим через  $M_1$  точку пересечения прямых  $AC_1$  и  $BD_1$ . Точка  $M_1$  лежит внутри  $K$ . Пусть  $K_1$  — окружность, описанная около  $\triangle ABM_1$  (рис. 123). Докажем, что при любом сдвинутом положении хорды  $C$  точка пересечения прямых  $AC$  и  $BD$  будет находиться на  $K_1$ .

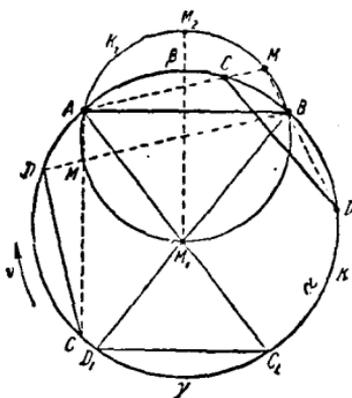


Рис. 123.

Пока обе точки  $C, D$  лежат на дуге  $\alpha$ , точка  $M$  будет находиться внутри  $K$ , а тогда

$$\angle AMB = \frac{1}{2}(\beta + \gamma). \quad (1)$$

Если же хотя бы одна из точек  $C, D$  попадет на дугу  $\beta$ , то точка  $M$  будет лежать вне  $K$  и тогда

$$\angle AMB = \frac{1}{2}(\alpha - \gamma). \quad (2)$$

В первом случае  $M$  лежит на дуге  $AM_1B$  окружности  $K_1$ , так как согласно (1)  $\angle AMB$  не зависит от положения  $CD$  и, значит, равен  $\angle AM_1B$ . Во втором случае, ввиду того что сумма правых частей (1) и (2) равна

$$\frac{1}{2}(\alpha + \beta) = \frac{1}{2} \cdot 2\pi = \pi,$$

точка  $M$  лежит на внешней относительно  $K$  дуге  $AB$  окружности  $K_1$ .

Очевидно, верно и обратное, т. е. любая точка  $M$  окружности  $K_1$  может быть получена при надлежащем выборе положения хорды  $CD$ .

388. Обозначим данную окружность через  $O$  и данную прямую через  $L$  (рис. 124). Пусть  $M$  — вторая точка пересечения прямой  $PQ$  с  $O$ . Возьмем какую-нибудь проходящую через точки  $P$  и  $Q$  окружность  $O_1$ , которая пересекает второй раз окружность  $O$  в точке  $R$  и прямую  $L$  в точке  $S$ . Пусть  $N$  — вторая точка пересечения прямой  $RS$  с окружностью  $O$ .

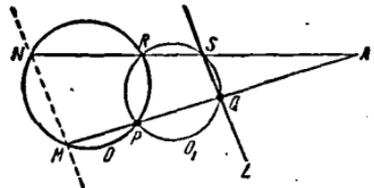


Рис. 124.

Докажем, что  $MN \parallel L$ . Для этого воспользуемся следующей известной теоремой планиметрии:

если даны окружность и точка  $A$ , то для любой прямой, проходящей через  $A$  и пересекающей эту окружность в точках  $A_1$  и  $A_2$ , произведение отрезков  $AA_1 \cdot AA_2$  есть величина постоянная, не зависящая от выбора прямой.

Обозначим через  $A$  точку пересечения прямых  $PQ$  и  $RS$ . Сначала применим упомянутую теорему к окружности  $O$ ,

точке  $A$  и прямым  $AP$  и  $AR$ . Так как  $AP$  пересекает второй раз  $O$  в точке  $M$ , а  $AR$  в точке  $N$ , то

$$AM \cdot AP = AN \cdot AR. \quad (1)$$

Теперь применим ту же теорему к окружности  $O_1$ , точке  $A$  и тем же прямым. Так как  $AP$  пересекает второй раз  $O_1$  в точке  $Q$ , а  $AR$  в точке  $S$ , то

$$AQ \cdot AP = AS \cdot AR. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует равенство

$$\frac{AM}{AN} = \frac{AQ}{AS}. \quad (3)$$

Из равенства (3) в силу теоремы, обратной теореме о пропорциональности отрезков, отсекаемых на сторонах угла параллельными прямыми, следует, что  $MN \parallel QS$ , что и требовалось доказать.

Таким образом, для любой окружности типа  $O_1$  точка  $N$  может быть определена как вторая точка пересечения прямой, проходящей через  $M$  и параллельной  $L$ , с окружностью  $O$ . Это построение определяет точку  $N$  однозначно независимо от выбора окружности  $O_1$ . Следовательно, всевозможные прямые  $RS$ , получаемые для различных окружностей  $O_1$ , пересекают окружность  $O$  в точке  $N$ .

Исключительные случаи, когда из (1) и (2) не следует (3), а именно когда совпадают точки  $R$  и  $P$  или точки  $Q$  и  $S$  или когда  $PQ \parallel RS$ , можно рассматривать как предельные для общего случая и пользоваться соображениями непрерывности.

## 5. Нахождение наибольших и наименьших значений

389. Если  $A$  — вершина прямого угла в  $\triangle ABC$ , а  $C$  и  $B$  лежат на заданных параллельных прямых  $l_1$  и  $l_2$  (рис. 125), то

$$AB = \frac{a}{\sin \varphi}, \quad AC = \frac{b}{\cos \varphi}.$$

Следовательно, площадь треугольника  $ABC$  равна

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} AB \cdot AC = \frac{ab}{\sin 2\varphi}.$$

Отсюда следует, что  $S_{ABC}$  примет наименьшее значение, равное  $ab$ , при  $\varphi = \frac{\pi}{4}$ .

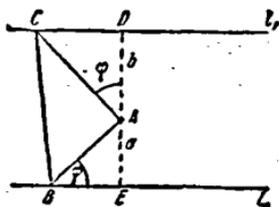


Рис. 125.

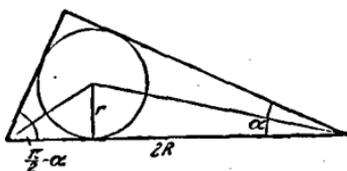


Рис. 126.

390. Если  $R$  — радиус описанной, а  $r$  — радиус вписанной окружности (рис. 126), то

$$2R = r \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + r \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right).$$

Заметив, что

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) &= \\ &= \frac{\cos \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) + \cos \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right)} = \\ &= \frac{2 \sin \frac{\pi}{4}}{\cos \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right) - \cos \frac{\pi}{4}} = \frac{2}{\sqrt{2} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right) - 1}, \end{aligned}$$

получаем:

$$\frac{R}{r} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right) - 1}.$$

Величина  $\frac{R}{r}$  имеет наименьшее значение, когда  $\cos \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right) = 1$ , т. е. (в силу ограничения  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ) когда  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ; в этом случае

$$\frac{R}{r} = \frac{1}{\sqrt{2} - 1} = \sqrt{2} + 1.$$



1) Точка  $C_0$  лежит на отрезке  $EF$ ; тогда вершина  $C_1$  искомого прямоугольника совпадает с  $C_0$ .

2) Точка  $C_0$  лежит на отрезке  $ME$ ; тогда  $C_1$  надо взять совпадающей с  $E$ .

3) Точка  $C_0$  лежит на отрезке  $FN$ ; тогда  $C_1$  надо взять совпадающей с  $F$ .

Остается найти критерий для различения этих случаев с помощью данных в условии задачи величин  $a, a_1, b, b_1$ .

Сначала найдем величину  $n$ . Из подобия треугольников  $ECF$  и  $NDF$  имеем:

$$\frac{n - b}{a - a_1} = \frac{b_1}{a_1},$$

откуда

$$n = b + \frac{b_1}{a_1}(a - a_1). \quad (2)$$

Теперь заметим, что точка  $C_0$  попадет внутрь отрезка  $EF$ , если выполняются неравенства

$$b - b_1 < x < b.$$

Подставив сюда  $x = \frac{n}{2}$  с известным значением  $n$ , получим:

$$b - b_1 < \frac{b}{2} + \frac{b_1}{2a_1}(a - a_1) < b.$$

Эти неравенства нетрудно преобразовать к виду

$$-1 < \frac{a}{a_1} - \frac{b}{b_1} < 1. \quad (3)$$

При нарушении левого неравенства точка  $C_0$  попадает на отрезок  $ME$ , а правого — на  $FN$ .

Окончательно получаем следующий результат: если для данных  $a, b, a_1, b_1$  выполнены оба неравенства (3), то вершина  $C_1$  прямоугольника наибольшей площади лежит внутри отрезка  $EF$ , а сторона  $x$  этого прямоугольника вычисляется по формуле

$$x = \frac{b}{2} + \frac{b_1}{2a_1}(a - a_1);$$

если нарушается левое неравенство (3), то вершина  $C_1$  совпадает с точкой  $E$ , а если правое, — то с точкой  $F$ .

392. Проведем окружность, проходящую через точки  $A$  и  $B$  и касающуюся второй стороны угла (рис. 128). Точка касания и будет искомой, так как для любой точки  $C'$  этой прямой угол  $AC'B$  измеряется полуразностью дуг  $AB$ .

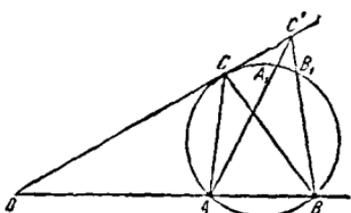


Рис. 128.

Заметим далее, что  $(OC')^2 = OB \cdot OA$ . Следовательно, задача свелась к известному построению среднего геометрического для двух данных отрезков  $OA$  и  $OB$ .

393. Рассмотрим три возможных случая расположения отрезка  $AB$  относительно  $l$ .

а)  $AB \parallel l$ . Для любой точки  $M$  прямой  $l$  имеем  $|AM - BM| \geq 0$ , причем существует точка  $M_0$ , для которой  $|AM_0 - BM_0| = 0$ . Эта точка является основанием перпендикуляра, опущенного из середины отрезка  $AB$  на  $l$ . Точка  $M$  для которой величина  $|AM - BM|$  имела бы наибольшее значение, не существует. Это следует из того, что  $|AM - BM| \leq AB$  и равенство возможно лишь в случае, когда  $A, B$  и  $M$  лежат на одной прямой.

б)  $AB \perp l$ . Так как  $|AM - BM| \leq AB$ , то для точки  $M$  пересечения прямой  $l$  с прямой  $AB$  величина  $|AM - BM|$  примет наибольшее значение, равное длине  $AB$ . Точки  $M$ , для которых величина  $|AM - BM|$  была бы наименьшей, не существуют.

в) Прямая  $AB$  не параллельна и не перпендикулярна к  $l$ . Ясно, что  $|AM - BM|$  примет наименьшее значение, если  $M$  — точка пересечения  $l$  с перпендикуляром к отрезку  $AB$  в его середине. Наибольшее значение  $|AM - BM|$  примет тогда, когда точка  $M$  будет точкой пересечения  $AB$  с  $l$ .

394. Пусть  $MN$  — какое-нибудь положение секущей  $AP \parallel ON$  и  $AQ \parallel OM$  (рис. 129).

Введем следующие обозначения:

- $x =$  площадь  $\triangle APM$ ,
- $y =$  площадь  $\triangle AQN$ ,
- $\sigma =$  площадь  $\triangle APQ$ ,
- $S =$  площадь  $\triangle OMN$ ,
- $a = AM, b = AN$ .

Имеем:

$$S = 2\sigma + x + y.$$

Ясно, что

$$\frac{x}{\sigma} = \frac{a}{b}, \quad \frac{y}{\sigma} = \frac{b}{a}.$$

Следовательно,

$$S = \sigma \left( 2 + \frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) = 4\sigma + \sigma \frac{(a-b)^2}{ab}.$$

Наименьшее значение  $S = 4\sigma$  получается при  $a = b$ , что и требовалось доказать.

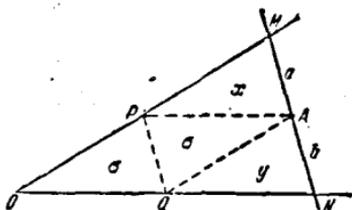


Рис. 129.

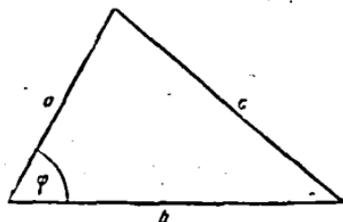


Рис. 130.

395. Пусть  $a + b = q$  (рис. 130). По теореме косинусов

$$\begin{aligned} c^2 &= a^2 + b^2 - 2ab \cos \varphi = a^2 + (q - a)^2 - 2a(q - a) \cos \varphi = \\ &= q^2 + 2a^2(1 + \cos \varphi) - 2aq(1 + \cos \varphi) = \\ &= q^2 \frac{1 - \cos \varphi}{2} + 2(1 + \cos \varphi) \left( a - \frac{q}{2} \right)^2. \end{aligned}$$

Так как  $q$  и  $\varphi$  неизменны, то наименьшее значение  $c$  будет при  $a = \frac{q}{2} = \frac{a+b}{2}$ , т. е. при  $a = b$ .

396. Первое решение. Рассмотрим  $\triangle ABC$  с основанием  $AC$  и обозначим через  $a, b, c$  длины сторон, противоположащих соответственно углам  $A, B, C$ ; положим  $a + c = p$ .

Из соотношений

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{c}{\sin(A+B)} = \frac{b}{\sin B}$$

находим:

$$p = b + b \frac{\sin A}{\sin B} + b \frac{\sin(A+B)}{\sin B} = b + \frac{b}{\sin \frac{B}{2}} \sin\left(A + \frac{B}{2}\right)$$

Так как  $b > 0$  и  $\sin \frac{B}{2} > 0$ , то  $p$  примет наибольшее значение при

$$A + \frac{B}{2} = \frac{\pi}{2}.$$

В этом случае  $A = C$  и  $\triangle ABC$  равнобедренный.

Второе решение. Построим на данном основании сегмент, вмещающий данный угол  $\varphi$  (рис. 131), и рассмотрим два треугольника, вписанных в этот сегмент: равнобедренный  $\triangle ADB$ , неравнобедренный  $\triangle ACB$ . Из точки  $D$  радиус  $AD = DB$  опишем окружность, продолжим  $AC$  до пересечения с окружностью в точке  $M$  и соединим  $M$  с  $D$  и  $B$ . Получим

$$AD + DB = AD + DM > AM = AC + CM.$$

Но в  $\triangle BCM$

$$\angle CBM = \angle ACB - \angle CMB = \angle CMB,$$

так как  $\angle ACB = \angle ADB$  и измеряется дугой  $AB$ , а  $\angle CMB$  измеряется половиной дуги  $AB$ . Следовательно,  $CM = CB$  и  $AD + DB > AC + CB$ .

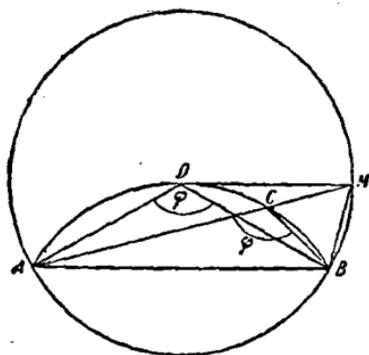


Рис. 131.

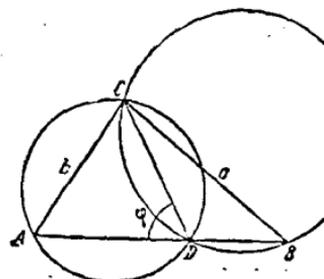


Рис. 132.

397. Обозначим через  $R_1$  и  $R_2$  радиусы окружностей, описанных соответственно около  $\triangle ACD$  и  $\triangle BCD$ , а та

положим  $\angle ADC = \varphi$ ,  $AC = b$ ,  $BC = a$  (рис. 132). Имеем:

$$2R_1 = \frac{b}{\sin \varphi},$$

$$2R_2 = \frac{a}{\sin(\pi - \varphi)} = \frac{a}{\sin \varphi}.$$

Отсюда  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{b}{a}$ . Радиусы  $R_1$  и  $R_2$  будут наименьшими тогда, когда  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ; в этом случае  $D$  — основание высоты  $CD$ .

## Б. СТЕРЕОМЕТРИЯ

### 1. Задачи на вычисление

398. Пусть  $a$  — сторона основания,  $d$  — диагональ боковой грани призмы,  $l$  — боковое ребро (рис. 133). Имеем:

$$v = \frac{a^2 \sqrt{3}}{4} l.$$

Из  $\triangle A_1BC_1$  следует, что  $\frac{1}{2} a = d \sin \frac{\alpha}{2}$ . Поэтому

$$l = \sqrt{d^2 - a^2} = \frac{a}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \sqrt{1 - 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}$$

и, следовательно,

$$v = \frac{a^2 \sqrt{3}}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \sqrt{1 - 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Отсюда

$$a = \sqrt[3]{\frac{8 v \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{3 - 12 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}}}.$$

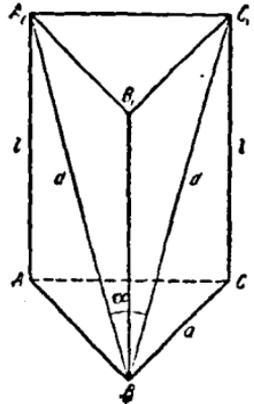


Рис. 133.

399. Пусть  $H$  — высота пирамиды,  $a$  — длина стороны основания.



400. Пусть  $H$  — высота пирамиды,  $x$  — высота боковой грани, проведенная из вершины пирамиды,  $R$  — радиус круга, вписанного в основание,  $r$  — радиус круга, описанного около основания,  $a$  — сторона основания. Из подобия треугольников  $CA_1B_1$  и  $CAB$  (рис. 135) получаем:

$$\frac{H-h}{H} = \frac{R}{r},$$

тсюда

$$H = \frac{hr}{r-R}.$$

о из  $\triangle ADB$  имеем  $r = \frac{R}{\cos \frac{\pi}{n}}$ , и по-

$$\text{тому } H = \frac{h}{1 - \cos \frac{\pi}{n}}.$$

ак как, далее, для площади основания и объема имеем следующие формулы:

$$S_{\text{осн}} = n \frac{1}{2} r^2 \sin \frac{2\pi}{n} \quad \text{и} \quad V = \frac{1}{3} S_{\text{осн}} H,$$

о

$$r^2 = \frac{6V}{Hn \sin \frac{2\pi}{n}}.$$

оставляя сюда найденное выражение для  $H$ , находим:

$$r = \sqrt{\frac{6V \left(1 - \cos \frac{\pi}{n}\right)}{nh \sin \frac{2\pi}{n}}}.$$

к как, далее,  $x = \sqrt{R^2 + H^2}$  и  $\frac{a}{2} = r \sin \frac{\pi}{n}$ , то боковая поверхность равна

$$n \frac{1}{2} xa = nr \sin \frac{\pi}{n} \sqrt{R^2 + H^2},$$

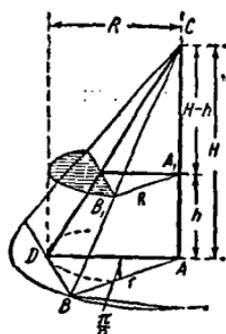


Рис. 135.

или окончательно

$$S_{\text{бок}} = n \sin \frac{\pi}{n} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{6V \left(1 - \cos \frac{\pi}{n}\right)}{nh \sin \frac{2\pi}{n}} \left[ \frac{3V \left(1 - \cos \frac{\pi}{n}\right)}{nh \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}} + \frac{h^2}{\left(1 - \cos \frac{\pi}{n}\right)} \right]}$$

401. Пусть  $M$  и  $N$  — середины ребер  $ES$  и  $DS$  (рис. 136). Легко видеть, что  $AMNC$  — трапеция, ибо  $MN \parallel ED$ , а  $ED \parallel AC$ .

Очевидно также, что

$$MN = \frac{1}{2} q.$$

Используя формулу для радиуса медианы треугольника (решение задачи 342), найдем:

$$CN = \frac{\sqrt{b^2 + 2q^2}}{2}.$$

Далее,

$$KC = \frac{AC}{2} = q \sin \frac{3\pi}{10},$$

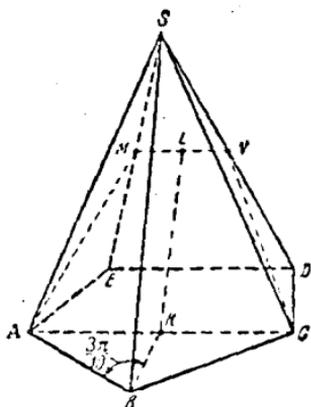


Рис. 136.

ибо  $\angle ABK = \frac{3\pi}{10}$ . Если  $KL$  — отрезок, соединяющий середины оснований трапеции  $AMNC$ , то

$$\begin{aligned} KL &= \sqrt{\frac{b^2 + 2q^2}{4} - \left(q \sin \frac{3\pi}{10} - \frac{q}{4}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{b^2 + 2q^2}{4} - q^2 \left(\frac{\sqrt{5} + 1}{4} - \frac{1}{4}\right)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{4b^2 + 3q^2}}{4} \end{aligned}$$

(Мы воспользовались здесь тем, что  $\sin \frac{3\pi}{10} = \frac{\sqrt{5} + 1}{4}$ .) Таким образом, искомая площадь

$$S_{\text{сеч}} = \frac{1}{2} (MN + AC) KL = \frac{q}{16} (2 + \sqrt{5}) \sqrt{4b^2 + 3q^2}$$

402. Пусть  $E$  и  $F$  — середины ребер правильной треугольной пирамиды  $SABC$ ,  $D$  — середина отрезка  $EF$  (рис. 137). Так как  $SD$  и  $BD$  перпендикулярны к  $EF$ , то  $\angle SDB$  прямой. Продолжив  $SD$  до пересечения с прямой  $AC$  в точке  $M$ , рассмотрим треугольник  $MBS$ . Точка  $D$ , очевидно, делит отрезок  $SM$  пополам. Так как, кроме того,  $BD \perp MS$ , то треугольник  $MBS$  равнобедренный;  $SB = MB$ . Пусть сторона основания пирамиды равна  $a$ . Тогда

$$SB = MB = \frac{a\sqrt{3}}{2}.$$

Высота боковой грани

$$SM = \sqrt{SC^2 - CM^2} = \frac{a\sqrt{2}}{2}.$$

Поэтому площадь боковой грани

$$S_{\text{бок}} = \frac{3a^2\sqrt{2}}{4},$$

и так как площадь основания

$$S_{\text{осн}} = \frac{a^2\sqrt{3}}{4}, \text{ то}$$

$$\frac{S_{\text{бок}}}{S_{\text{осн}}} = \sqrt{6}.$$

403. Пусть  $a$  — длина стороны квадрата, лежащего в основании призмы,  $l$  — длина бокового ребра призмы,  $d$  — диагональ боковой грани (рис. 138). Обозначим через  $S_{\text{сеч}}$  площадь сечения; легко видеть, что полная поверхность призмы равна  $4(S - S_{\text{сеч}})$ ; поэтому достаточно определить  $S_{\text{сеч}}$ . Имеем:

$$S_{\text{сеч}} = \frac{1}{2} d^2 \sin \alpha; \quad a = d\sqrt{2} \sin \frac{\alpha}{2};$$

$$l = \sqrt{d^2 - a^2} = d \sqrt{1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} = d \sqrt{\cos \alpha}.$$

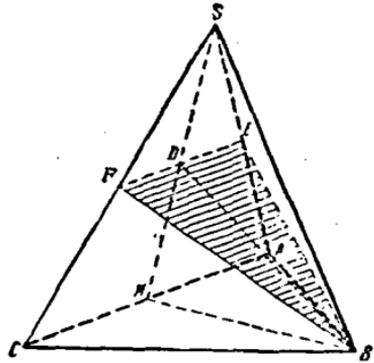


Рис. 137.

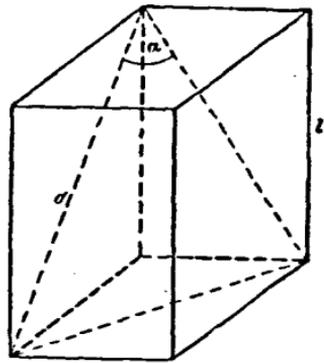


Рис. 138.

Далее,

$$S = S_{\text{сеч}} + \frac{a^2}{2} + 2 \frac{la}{2} =$$

$$= d^2 \left( \frac{\sin \alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \sqrt{2} \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\cos \alpha} \right)$$

Отсюда

$$d^2 = \frac{2S}{\sin \alpha + 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sqrt{2} \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\cos \alpha}}$$

и, значит,

$$S_{\text{сеч}} = \frac{S \sin \alpha}{\sin \alpha + 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sqrt{2} \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\cos \alpha}}$$

В итоге после упрощений находим, что полная поверхность пирамиды равна

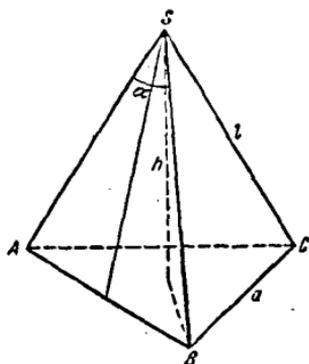


Рис. 139.

$$S_{\text{полн. пр}} = 4(S - S_{\text{сеч}}) =$$

$$= 4S \frac{\sin \frac{\alpha}{2} + \sqrt{2} \cos \alpha}{\cos \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2} + \sqrt{2} \cos \alpha}$$

404. Сторона основания пирамиды равна  $a = 2r \sin \alpha$  (по известной лемме к теореме синусов). Боковое ребро (рис. 139)

$$l = \frac{a}{2} \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} = 2r \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Поэтому высота пирамиды равна

$$h = \sqrt{l^2 - \left(\frac{a\sqrt{3}}{3}\right)^2} = 2r \sqrt{\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \frac{\sin^2 \alpha}{3}},$$

и следовательно, объем пирамиды равен

$$V = \frac{1}{3} h \frac{a^2 \sqrt{3}}{4} = \frac{2}{3} r^3 \sin^2 \alpha \sqrt{3 \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \alpha}.$$

405. Пусть  $ABC'D'$  — указанное сечение пирамиды  $OABCD$ . Через вершину  $O$  пирамиды и середину ее ребер  $AB$  и  $CD$  проведем вспомогательную плоскость  $OPN$  (рис. 140). В равнобедренном треугольнике  $OPN$  боковые стороны  $OP$  и  $ON$  равны  $\frac{a}{2 \cos 2\alpha}$ .

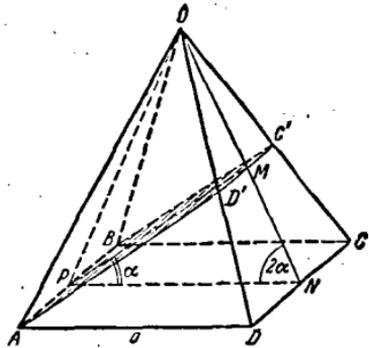


Рис. 140.

Применяя теорему синусов к треугольнику  $OPM$ , находим:

$$\frac{OM}{OP} = \frac{\sin \alpha}{\sin 3\alpha}.$$

Так как  $D'C' \parallel DC$ , то

$$D'C' = DC \frac{OM}{ON} = a \frac{\sin \alpha}{\sin 3\alpha}.$$

Применяя теорему синусов к треугольнику  $PMN$ , находим

$$\frac{PM}{PN} = \frac{\sin 2\alpha}{\sin (\pi - 3\alpha)},$$

откуда

$$PM = a \frac{\sin 2\alpha}{\sin 3\alpha}.$$

Теперь получаем искомую площадь сечения  $ABC'D'$ :

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} (AB + D'C') \cdot PM = \\ &= \frac{1}{2} \left( a + a \frac{\sin \alpha}{\sin 3\alpha} \right) a \frac{\sin 2\alpha}{\sin 3\alpha} = \\ &= a^2 \frac{\sin^2 2\alpha \cos \alpha}{\sin^2 3\alpha}. \end{aligned}$$

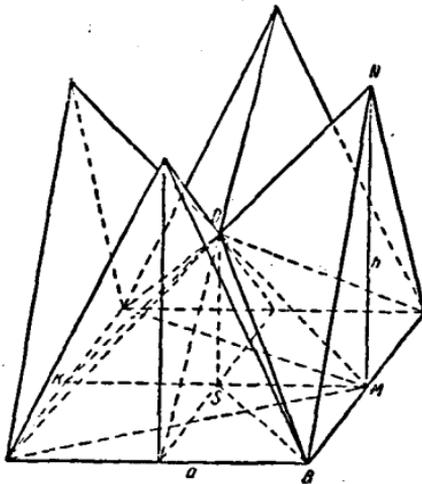


Рис. 141.

406. Пользуясь обозначениями рисунка 141, рассмотрим  $\frac{1}{8}$  часть чердака  $OSBMN$ . Она состоит из двух пирамид. Первая пирамида имеет основание  $SBM$  и вершину  $O$ ; ее объем равен

$$V_1 = \frac{1}{3} SO \cdot S_{SBM} = \frac{a^2 h}{48}.$$

Вторая пирамида имеет основание  $BMN$  и вершину  $A$ . Ее объем будет  $V_2 = \frac{a^2 h}{24}$ . Таким образом, объем чердака

$$V = 8(V_1 + V_2) = \frac{a^2 h}{2}.$$

407. Пусть  $R$  — радиус круга, описанного около основания. По условию задачи он совпадает с радиусом круга,

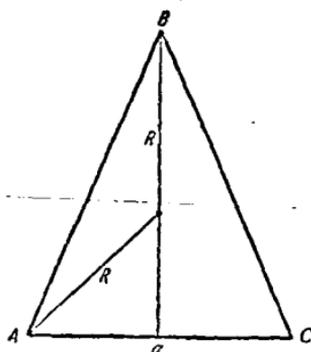


Рис. 142.

описанных около боковых граней пирамиды.

Обозначим через  $a$  сторону основания, а через  $b$  — апофему основания. Пусть, наконец,  $h$  — высота боковой грани, опущенная из вершины пирамиды и  $H$  — высота пирамиды. Имеем:

$$b = R \cos \frac{\pi}{n}, \quad a = 2R \sin \frac{\pi}{n};$$

площадь основания равна

$$S_{\text{осн}} = nR^2 \sin \frac{\pi}{n} \cos \frac{\pi}{n}.$$

Из треугольника  $ABC$  (рис. 142)

$$h = R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} = R \left(1 + \cos \frac{\pi}{n}\right),$$

следовательно,

$$S_{\text{бок}} = \frac{n}{2} ah = nR^2 \sin \frac{\pi}{n} \left(1 + \cos \frac{\pi}{n}\right)$$

и, значит,

$$S = S_{\text{осн}} + S_{\text{бок}} = nR^2 \sin \frac{\pi}{n} \left(1 + 2 \cos \frac{\pi}{n}\right).$$

Поэтому

$$R = \sqrt{\frac{S}{n \left(\sin \frac{\pi}{n} + \sin \frac{2\pi}{n}\right)}}.$$

Так как, кроме того,

$$H = \sqrt{h^2 + b^2} = R \sqrt{1 + 2 \cos \frac{\pi}{n} + 2 \cos^2 \frac{\pi}{n}},$$

то

$$V = \frac{1}{3} HS_{\text{осн}} = \frac{S^{\frac{3}{2}} \left( 1 + 2 \cos \frac{\pi}{n} + 2 \cos^2 \frac{\pi}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \sin^2 \frac{2\pi}{n}}{6 \left( \sin \frac{\pi}{n} + \sin \frac{2\pi}{n} \right)^{\frac{3}{2}} n^{\frac{1}{2}}}$$

408. Проведем плоскость через ребро  $SA$  и точку  $N$  — основание перпендикуляра  $AN$  к отрезку  $BC$  (рис. 143). Пусть  $NM$  — высота треугольника  $ASN$ . Отрезок  $NM$ , будучи перпендикулярен к  $AS$  и  $BC$ , очевидно, равен  $d$ . Обозначим через  $a$  сторону основания пирамиды. Тогда

$$SA = \frac{a}{2 \sin \frac{\alpha}{2}},$$

высота пирамиды равна

$$\begin{aligned} O &= \sqrt{SA^2 - AO^2} = \\ &= \frac{a}{6 \sin \frac{\alpha}{2}} \sqrt{9 - 12 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}. \end{aligned}$$

ак как  $AN \cdot SO = AS \cdot d$ , то

$$a = \frac{6d}{\sqrt{3} \sqrt{9 - 12 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}}.$$

результате имеем:

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{3} \frac{a^2 \sqrt{3}}{4} SO = \\ &= \frac{a^2}{3 \left( 3 - 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2}}. \end{aligned}$$

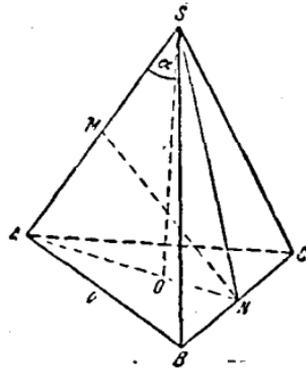


Рис. 143.

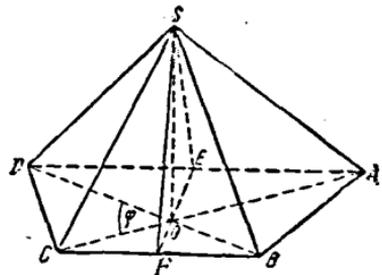


Рис. 144.

409. Пусть  $AD = a$ ,  $BC = b$  (рис. 144). Проведем отрезок  $F$ , соединяющий середины оснований трапеции. Очевидно, что двугранный угол, прилегающий к  $AD$ , меньше угла, прилежащего к  $BC$ . Пусть  $\angle SEO = \alpha$ ; тогда  $\angle SFO = 2x$ .

Имеем:

$$SO = OF \cdot \operatorname{tg} 2\alpha = OE \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Но

$$OF = \frac{b}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad OE = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2},$$

и мы приходим к уравнению  $a \operatorname{tg} \alpha = b \operatorname{tg} 2\alpha$ , решив которое найдем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{a-2b}{a}}.$$

Далее, получаем:

$$SO = OE \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \sqrt{\frac{a-2b}{a}};$$

$$S_{\text{осн}} = \frac{a+b}{2} (OE + OF) = \left(\frac{a+b}{2}\right)^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2},$$

и, наконец, объем пирамиды равен

$$V = \frac{(a+b)^2}{24} \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \sqrt{a(a-2b)}$$

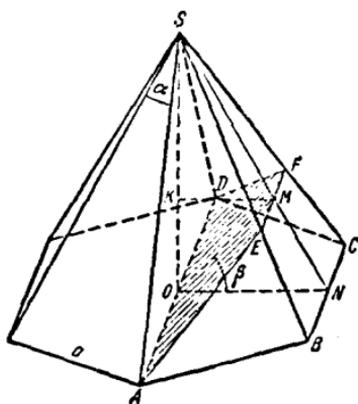


Рис. 145.

410. Пусть  $S$  — вершина пирамиды,  $SO$  — высота,  $BN$  — (рис. 145). Обозначим стороны основания пирамиды через  $a$ . Треугольников  $SON$  и  $SBC$  имеем

$$\begin{aligned} \frac{KM}{ON} &= \frac{OM \cdot \cos \beta}{ON} = \frac{EF}{BC} = \\ &= \frac{SM}{SN} = \lambda, \end{aligned}$$

причем  $ON = a \frac{\sqrt{3}}{2}$ . Отсюда

$$EF = \lambda a, \quad OM = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\lambda}{\cos \beta} a. \quad \text{Площадь сечения равна}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (AD + EF) OM &= \\ &= \frac{1}{2} (2a + \lambda a) \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\lambda}{\cos \beta} a = \frac{\sqrt{3}}{4 \cos \beta} \lambda (\lambda + 2) a^2 \end{aligned}$$

\*) Этот результат показывает, что в случае  $a \leq 2b$  задача теряет смысл.

Площадь основания, как площадь правильного шестиугольника со стороной  $a$ , равна  $6 \cdot \frac{a^2 \sqrt{3}}{4}$ , а искомое отношение площадей равно:

$$\frac{1}{6 \cos \beta} \lambda (\lambda + 2). \quad (2)$$

Следовательно, задача сводится к нахождению  $\lambda$ . Для этой цели положим  $\angle SNO = \varphi$ . Тогда по теореме синусов из  $\triangle SOM$  получим:

$$SM = SO \frac{\sin \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right)}{\sin (\beta + \varphi)} = SO \frac{\cos \beta}{\sin (\beta + \varphi)}.$$

Так как  $SO = SN \cdot \sin \varphi$ , то

$$\lambda = \frac{SM}{SN} = \frac{\cos \beta \sin \varphi}{\sin (\beta + \varphi)} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} \varphi}. \quad (3)$$

Остается найти  $\operatorname{ctg} \varphi$ . Заметим для этого, что

$$SN = \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad ON = \frac{a \sqrt{3}}{2},$$

$$SO = \sqrt{SN^2 - ON^2} = \frac{a}{2} \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha}{2} - 3}$$

и, следовательно,

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{ON}{SO} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha}{2} - 3}}.$$

оставив это значение в формулу (3), получим:

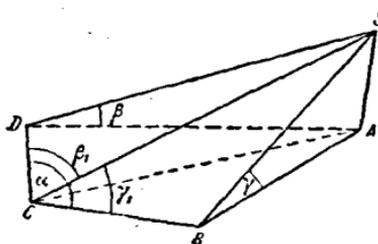
$$\lambda = \frac{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha}{2} - 3}}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha}{2} - 3} + \sqrt{3} \operatorname{tg} \beta}.$$

**411.** Из некоторой точки  $S$ , отличной от вершины  $C$  и ежащей на том из ребер трехгранного угла, которое не является стороной плоского угла  $\alpha$ , опустим перпендикуляры  $B$  и  $SD$  на стороны указанного плоского угла и перпенди-

куляра  $SA$  на соответствующую грань (рис. 146). Обозначим искомые углы через  $\beta_1$  и  $\gamma_1$ :

$$\angle SCB = \gamma_1, \quad \angle SCD = \beta_1.$$

Пусть, далее,  $\angle ACB = \alpha'$ ,  $\angle ACD = \alpha''$ . Полагая  $SA$  высотой из прямого угла треугольников  $CBA$ ,  $SBA$  и  $SBC$  на



$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma_1 &= \frac{SB}{CB} = \frac{a \sin \alpha'}{a \cos \gamma \cos \alpha'} \\ &= \sec \gamma \end{aligned}$$

Аналогично получаем:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \sec \beta \operatorname{tg} \alpha''.$$

Рис. 146.

Задача свелась, следовательно, к нахождению  $\operatorname{tg} \alpha'$  и  $\operatorname{tg} \alpha''$ . Имеем  $\alpha' + \alpha'' = \alpha$ . Вычислив разными способами отрезок  $SA$ , находим:

$$SA = a \sin \alpha' \operatorname{tg} \gamma$$

и

$$SA = a \sin \alpha'' \operatorname{tg} \beta.$$

Отсюда  $\sin \alpha' = \sin \alpha'' \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} \gamma$  и, следовательно,

$$\sin \alpha' = \sin (\alpha - \alpha'') \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \gamma} = (\sin \alpha \cos \alpha'' - \cos \alpha \sin \alpha'') \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} \gamma$$

В результате, разделив на  $\cos \alpha'$  обе части последнего равенства, получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\sin \alpha \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} \gamma}{1 + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} \gamma}.$$

Меняя местами  $\beta$  и  $\gamma$ , найдем:

$$\operatorname{tg} \alpha'' = \frac{\sin \alpha \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \beta}{1 + \cos \alpha \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \beta}.$$

Таким образом, в итоге получаем:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{\sin \alpha \operatorname{tg} \beta \operatorname{cosec} \gamma}{1 + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} \gamma};$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\sin \alpha \operatorname{tg} \gamma \operatorname{cosec} \beta}{1 + \cos \alpha \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \beta}.$$

412. Так как сумма внутренних углов правильного  $n$ -угольника равна  $n\pi$ , то число сторон  $n$ -угольника равно  $n + 2$ . Пусть  $PQ$  — высота пирамиды (рис. 147). Рассмотрим какую-нибудь боковую грань пирамиды  $\triangle QAB$  и ее проекцию на основание, т. е.  $\triangle PAB$ . Из условия задачи следует:

$$\frac{S_{\triangle PAB}}{S_{\triangle QAB}} = \frac{1}{k}.$$

Так как площади данных треугольников относятся как их высоты, опущенные на общее основание  $AB$ , то для косинуса двугранного угла при основании имеем:

$$\cos \varphi = \frac{PR}{QR} = \frac{1}{k}.$$

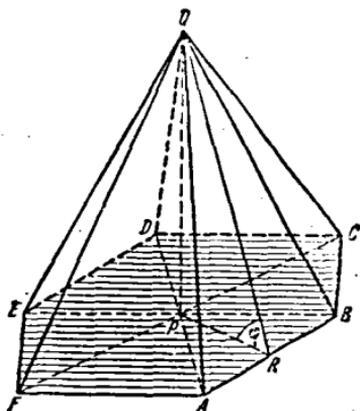


Рис. 147.

Отсюда следует, что апофема основания пирамиды равна

$$d = h \operatorname{ctg} \varphi = h \frac{1}{\sqrt{k^2 - 1}}.$$

Далее, находим сторону основания

$$a = \frac{2h}{\sqrt{k^2 - 1}} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n + 2}.$$

Так как площадь основания

$$S = \frac{1}{2} (n + 2) ad,$$

то объем пирамиды равен

$$V = \frac{1}{3} Sh = \frac{1}{3} \frac{(n + 2) h^3}{k^2 - 1} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n + 2}.$$

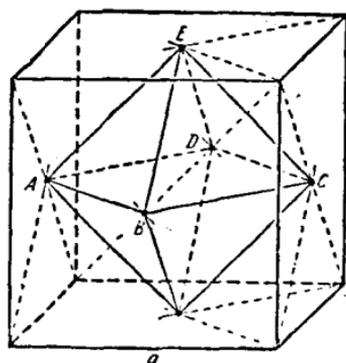


Рис. 148.

413. Полученное тело есть октаэдр, вершины которого находятся в центрах симметрии граней куба (рис. 148). Объем октаэдра равен удвоенному объему правильной четырехугольной пирамиды  $EABCD$  высоты  $\frac{a}{2}$  с площадью

основания  $ABCD$ , равной  $\frac{1}{2}a^2$ . Следовательно, искомый объем равен

$$2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{2}a^2 = \frac{a^3}{6}.$$

414. Пусть  $A_1BC_1D$  — данный тетраэдр,  $ABCD A_1B_1C_1D_1$  параллелепипед, полученный указанным построением. Легко заметить, что ребра тетраэдра являются диагоналями боковых граней параллелепипеда (рис. 149). Тетраэдр может быть

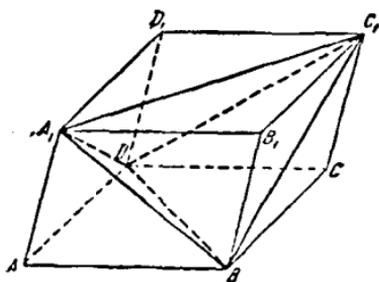


Рис. 149.

получен удалением из параллелепипеда четырех равнобоких пирамид:  $ABDA_1$ ,  $BDC_1D_1$ ,  $A_1B_1C_1B$  и  $A_1D_1C_1D$ . Так как объем каждой из пирамид очевидно, равен  $\frac{1}{6}$  объема параллелепипеда, то отношение объема  $V_n$  параллелепипеда к объему  $V_T$  тетраэдра равно

$$\frac{V_n}{V_T} = \frac{V_n}{V_n - \frac{4}{6}V_n} = 3.$$

415. Легко видеть, что наружные вершины тетраэдра лежат в вершинах некоторого квадрата. Чтобы определить длину его стороны, проведем через вершину  $S$  пирамиды и через наружную вершину  $A$  одного из тетраэдров плоскость, перпендикулярную к основанию четырехугольной пирамиды (рис. 150). Последняя пройдет через основание  $O$  высоты пирамиды, через основание  $Q$  высоты тетраэдра и через середину  $N$  ребра  $KL$ . Опустив на плоскость основания пирамиды перпендикуляр  $AB$ , рассмотрим четырехугольник  $SOBA$ . Его сторона  $OB$  является половиной диагонали упомянутого квадрата и подлежит делению. Легко, однако, обнаружить, что  $SOBA$  — прямоугольник. В самом деле, положив  $\angle OMS = \alpha$ ,  $\angle ASM =$

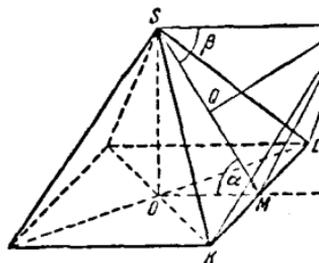


Рис. 150.

находим:

$$\cos \alpha = \frac{OM}{MS} = \frac{\frac{1}{2}a}{\frac{\sqrt{3}}{2}a} = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

и

$$\cos \beta = \frac{QS}{SA} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{3}a}{a} = \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

Поэтому  $SA$  и  $OB$  параллельны и, следовательно,

$$OB = SA = a.$$

Таким образом, искомое расстояние равно  $a\sqrt{2}$ .

416. Предположим, что секущая плоскость проведена через некоторую точку диагонали  $HP$  данного куба (рис. 151).

Рассмотрим сначала те сечения, которые пересекают диагональ в отрезке  $OP$ . Выделим сечение  $QRS$ , проходящее через три вершины куба; оно, очевидно, принадлежит рассматриваемой овокупности. Это равносторонний треугольник со стороной  $a\sqrt{2}$ . Нетрудно вычислить, что расстояние данного сечения от центра куба равно  $\frac{a\sqrt{3}}{6}$ . Очевидно, что

при  $x \geq \frac{a\sqrt{3}}{6}$  в сечении полу-

аются равносторонние треугольники. Так как отношение сторон рассматриваемых треугольников равно отношению их расстояний до точки  $P$ , то

$$\frac{MN}{QR} = \frac{OP - x}{OP - \frac{a\sqrt{3}}{6}}.$$

отсюда, принимая во внимание, что  $QR = a\sqrt{2}$  и  $OP = \frac{a\sqrt{3}}{2}$ ,

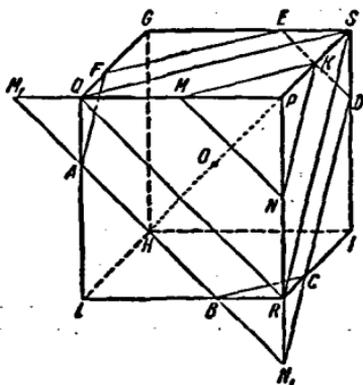


Рис. 151.

находим:

$$MN = \frac{3}{2} \sqrt{2} a - x \sqrt{6}.$$

Если же  $\frac{a\sqrt{3}}{6} > x \geq 0$ , то в сечении получаются шестиугольники  $ABCDEF$ .

Стороны шестиугольника  $AB$ ,  $FE$  и  $CD$  соответственно параллельны сторонам  $QR$ ,  $QS$  и  $RS$  равностороннего треугольника  $QRS$ . Поэтому при продолжении, пересекаясь, образуют углы в  $60^\circ$ . Учитывая еще, что  $AF \parallel CD$  и т. д., мы приходим к заключению, что все углы шестиугольника равны  $120^\circ$ . Легко видеть также, что  $AB = CD = EF$ ,  $BC = DE = AF$  (следует принять в расчет, что стороны шестиугольника отсекают на гранях равнобедренные треугольники).

Для того чтобы найти длины сторон шестиугольника, продолжим сторону  $AB$  шестиугольника до пересечения в точках  $M_1$  и  $N_1$  с продолжениями ребер  $PQ$  и  $PR$ . Длина отрезка  $M_1N_1$  может быть, очевидно, вычислена по формуле (1). Зная  $M_1N_1$ , находим отрезок

$$BN_1 = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} M_1N_1 - a \right) \sqrt{2} = \frac{a}{2} \sqrt{2} - x \sqrt{6}.$$

Отсюда

$$AB = M_1N_1 - 2BN_1 = \frac{a}{2} \sqrt{2} + x \sqrt{6}.$$

Сторону  $BC$  можно было бы определить аналогично. Трудно, однако, сообразить, что  $BC = BN_1$  и, следовательно

$$BC = \frac{a}{2} \sqrt{2} - x \sqrt{6}.$$

Отметим, что в сечении с плоскостью  $\pi$ , проходящей через точку  $O$ , получается правильный шестиугольник (формулы (2) и (3) при  $x=0$ ). Вершины этого шестиугольника лежат в серединах ребер куба (рис. 152). Легко видеть, что если одну из двух частей, на которые плоскость разбивает куб, повернуть на  $60^\circ$  около диагонали  $OP$ , шестиугольник совпадет с самим собой, и мы получим симметрично расположенных относительно плоскости  $\pi$  многогранника. Следовательно, сечение, пересекающее диагональ в точках отрезка  $HO$  на расстоянии  $x$  от точки  $O$ , по-

чается из соответствующего сечения уже рассмотренной совокупности секущих плоскостей поворотом на  $60^\circ$ .

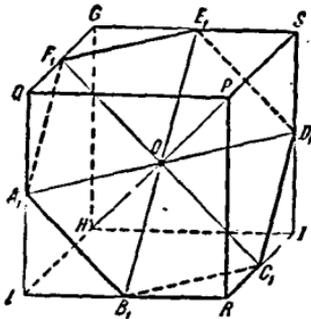


Рис. 152.

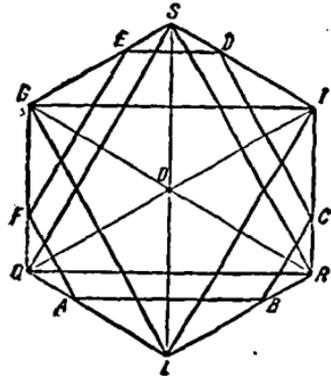


Рис. 153.

417. В проекции получится правильный шестиугольник со стороной, равной  $\frac{a\sqrt{6}}{3}$ . Чтобы в этом убедиться, удобно представить себе результат проектирования всевозможных сечений куба, рассмотренных в задаче 416 (см. рис. 151). Все указанные сечения проектируются без изменения размеров, и мы получим фигуру, показанную на рис. 153.

Пользуясь тем, что сторона треугольника  $RQS$  равна  $a\sqrt{2}$ , из треугольника  $GOS$  находим:

$$GS : \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{a\sqrt{2}}{2},$$

откуда  $GS = \frac{a\sqrt{6}}{3}$ . Так как далее сторона правильного шестиугольника  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$  (см. рис. 152) равна  $\frac{a\sqrt{2}}{2}$ , то искомое отношение площадей оказывается равным

$$\left(\frac{a\sqrt{6}}{3}\right)^2 : \left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2 = \frac{4}{3}.$$

418. Рассматриваемое тело составлено из двух пирамид общим основанием  $KMN$  (рис. 154). Высоту  $OR$  нижней

пирамиды легко найти, опустив из точки  $P$  (середины роны  $KN$ ) перпендикуляр  $PD$  на основание пирамиды. Точка при этом разделит отрезок  $QL$  пополам. Используя этот факт из  $\triangle APD$  получаем:

$$\frac{PD}{RQ} = \frac{DA}{QA} = \frac{5}{4}.$$

Отсюда  $RQ = \frac{4}{5} PD$ , и, следовательно,

$$OR = \frac{1}{5} PD = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{2} a \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{a\sqrt{6}}{30}.$$

Мы воспользовались здесь тем, что в правильном тетраэдре высота равна  $a\sqrt{\frac{2}{3}}$ . Искомый

объем равен  $V = \frac{a^3\sqrt{2}}{80}$ .

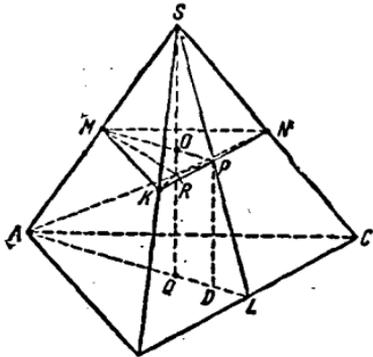


Рис. 154.

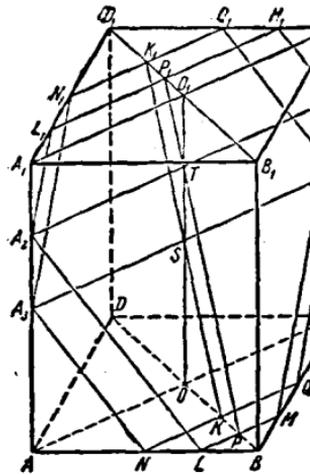


Рис. 155.

419. Пусть  $NQN_1Q_1$  и  $LML_1M_1$  — параллельные сечения призмы (рис. 155),  $a$  — длина диагонали  $AC$  основания,  $H$  — длина отрезка  $KK_1$ . Тогда площадь первого сечения равна

$$S = \frac{H}{2} \left( a + \frac{a}{2} \right) = \frac{3}{4} Ha.$$

Площадь второго сечения будет

$$S' = \frac{1}{2} PT(A_2C_2 + LM) + \frac{1}{2} P_1T(A_2C_2 + L_1M_1).$$

Но

$$A_2C_2 = a, \quad LM = \frac{a}{4},$$

$$L_1M_1 = \frac{3}{4}a, \quad PT = \frac{3}{4}H,$$

$$P_1T = \frac{1}{4}H,$$

что легко усматривается из подобия соответствующих треугольников. В силу этого получаем:

$$S' = \frac{11}{16}aH$$

и, следовательно,

$$S' = \frac{11}{12}S.$$

**Замечание.** Эта задача может быть весьма просто решена другим путем, если принять во внимание формулу

$$S_{\text{пр}} = S \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $S$  — площадь некоторого многоугольника, расположенного в плоскости  $P$ ,  $S_{\text{пр}}$  — площадь проекции этого многоугольника на плоскость  $Q$ ,  $\varphi$  — угол между плоскостями  $P$  и  $Q$ .

Согласно формуле (1) площади рассматриваемых в задаче параллельных сечений относятся как площади их проекций. И наша задача сводится к нахождению площадей двух фигур:  $L_1M_1CMLA$  и  $N_1Q_1CQNA$  (рис. 156). (Буквы со штрихами обозначают проекции соответствующих точек на сечение призмы.)

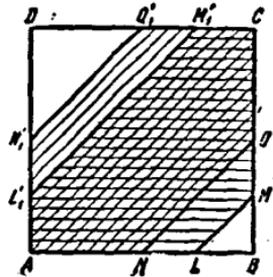


Рис. 156.

**420.** Примем грань с площадью  $S_0$  за основание  $ABC$  анной пирамиды  $ABCD$ . Пусть  $DO$  — высота пирамиды,  $DA_1, DB_1, DC_1$  — высоты боковых граней (рис. 157).

По теореме о трех перпендикулярах  $OC_1 \perp AB$ ,  $OA_1 \perp BC$ ,  $OB_1 \perp AC$ , в силу чего углы  $\angle DC_1O$ ,  $\angle DA_1O$  и  $\angle DB_1O$  являются линейными углами соответствующих двугранных глов и по условию задачи равны. Отсюда следует равенство прямоугольников  $DOC_1$ ,  $DOA_1$  и  $DOB_1$ . Для удобства вычисле-

ний введем следующие обозначения:

$$DO = H, DC_1 = DA_1 = DB_1 = h, OC_1 = OA_1 = OB_1 = r$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = S.$$

Очевидно, что  $r$  есть радиус окружности, вписанной в  $\triangle ABC$ .

Объем пирамиды  $ABCD$  равен

$$V = \frac{1}{3} S_0 H.$$

Из прямоугольного треугольника  $DOC_1$  получим:

$$H = \sqrt{h^2 - r^2}.$$

Таким образом, задача сводится к нахождению апофемы  $h$  радиуса  $r$ . Из формулы

$$S_3 = \frac{1}{2} ABh \text{ и ей аналогично}$$

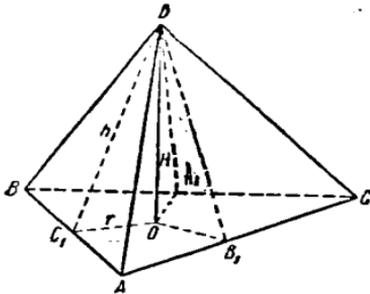


Рис. 157.

найдем выражения для сторон треугольника  $ABC$ :

$$AB = \frac{2S_3}{h}, \quad BC = \frac{2S_1}{h}, \quad AC = \frac{2S_2}{h}.$$

Следовательно, полупериметр будет

$$p = \frac{1}{2} (AB + BC + AC) = \frac{S_3}{h} + \frac{S_1}{h} + \frac{S_2}{h} = \frac{S}{h}.$$

Далее,

$$p - AB = \frac{S}{h} - \frac{2S_3}{h} = \frac{S - 2S_3}{h},$$

$$p - BC = \frac{S - 2S_1}{h}, \quad p - AC = \frac{S - 2S_2}{h},$$

и по формуле Герона

$$\begin{aligned} S_0^2 &= p(p - AB)(p - BC)(p - AC) = \\ &= \frac{S}{h} \cdot \frac{S - 2S_1}{h} \cdot \frac{S - 2S_2}{h} \cdot \frac{S - 2S_3}{h} = \frac{S(S - 2S_1)(S - 2S_2)(S - 2S_3)}{h^4} \end{aligned}$$

Отсюда

$$h = \frac{\sqrt[4]{S(S - 2S_1)(S - 2S_2)(S - 2S_3)}}{\sqrt{S_0}}.$$

Радиус  $r$  вписанной окружности найдем из формулы, выражающей площадь  $S_0$  треугольника  $ABC$  через этот радиус и полупериметр:

$$S_0 = pr = \frac{S}{h} r,$$

откуда

$$r = h \frac{S_0}{S}.$$

Подставив это значение в формулу (2), получим:

$$H = \sqrt{h^2 - h^2 \frac{S_0^2}{S^2}} = \frac{h}{S} \sqrt{S^2 - S_0^2}.$$

Подставив сюда значение  $h$  из равенства (3) и внося полученный результат в формулу (1), окончательно получим:

$$V = \frac{1}{3} \sqrt{S_0 (S^2 - S_0^2)} \sqrt{\frac{(S - 2S_1)(S - 2S_2)(S - 2S_3)}{S^3}}.$$

421. Разрежем куб пополам диагональной плоскостью, перпендикулярной к оси вращения, и получившийся многогранник повернем на  $90^\circ$ . В результате возникнет изображенная на рис. 158 конфигурация.

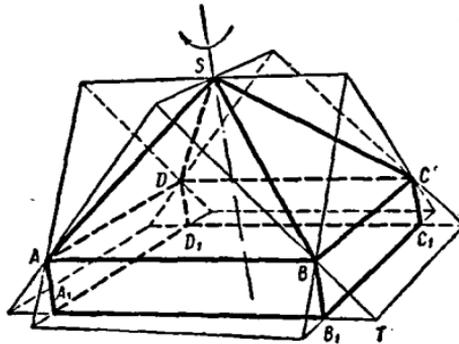


Рис. 158.

Общая часть складывается из прямоугольного параллелепипеда  $ABCDD_1A_1B_1C_1$  и правильной пирамиды  $SABCD$ . Высоту параллелепипеда находим из  $\triangle BB_1T$ :

$$h = B_1T = \frac{a\sqrt{2}}{2} - \frac{a}{2}.$$

Высота пирамиды

$$H = \frac{a\sqrt{2}}{2} - h = \frac{a}{2}.$$

Площадь общего основания параллелепипеда и пирамиды равна  $a^2$ .

Таким образом, искомый объем общей части равен

$$V = 2 \left[ a^2 \left( \frac{a\sqrt{2}}{2} - \frac{a}{2} \right) + a^2 \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{3} \right],$$

или

$$V = a^3 \left( \sqrt{2} - \frac{2}{3} \right).$$

422. Пусть  $S$  — вершина конуса,  $SO = h$  — высота конуса,  $ASB$  — треугольник, получившийся в сечении,  $C$  — середина хорды  $AB$ ,  $AO = r$  (рис. 159). Замечая,

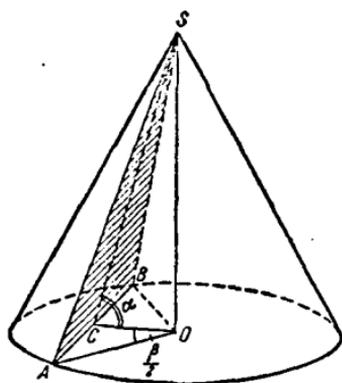


Рис. 159.

$\angle AOC = \frac{\beta}{2}$ , находим:

$$CO = \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}, \quad h = CO \operatorname{tg} \alpha$$

$$= \frac{a}{2} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}, \quad r = \frac{a}{2 \sin \frac{\beta}{2}}$$

Поэтому объем конуса равен

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h = \frac{\pi a^3 \operatorname{tg} \alpha \cos \frac{\beta}{2}}{24 \sin^3 \frac{\beta}{2}}$$

423. Пусть  $\alpha$  — искомый угол,  $l$  — образующая цилиндра,  $l_1$  — образующая конуса,  $r$  — радиус оснований конуса и цилиндра (рис. 160). По условию

$$\frac{2\pi r(r+l)}{\pi r(r+l_1)} = \frac{7}{4},$$

$$\frac{r+l}{r+l_1} = \frac{7}{8}.$$

Следовательно,

$$1 + \frac{l}{r} = \frac{7}{8}, \quad \text{или} \quad \frac{1 + \operatorname{ctg} \alpha}{1 + \operatorname{cosec} \alpha} = \frac{7}{8},$$

и, значит,

$$\sin \alpha + 8 \cos \alpha - 7 = 0.$$

Решив это уравнение, найдем:

$$\sin \alpha = \frac{3}{5}, \quad \alpha = \arcsin \frac{3}{5}.$$

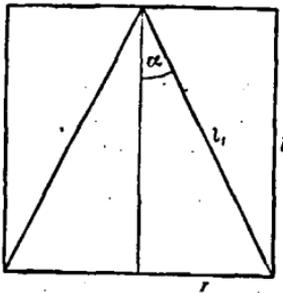


Рис. 160.

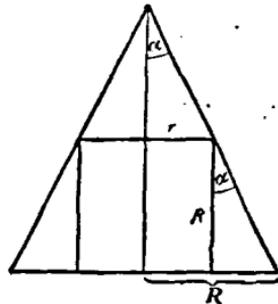


Рис. 161.

424. Пусть  $\alpha$  — искомый угол,  $R$  — радиус основания конуса,  $r$  — радиус основания цилиндра (рис. 161). Имеем (рис. 161):

$$\frac{2\pi r^2 + 2\pi rR}{\pi R^2} = 2 \left(1 + \frac{r}{R}\right) \frac{r}{R} = \frac{3}{2}.$$

о  $\frac{R-r}{R} = \operatorname{tg} \alpha$  и, значит,  $\frac{r}{R} = 1 - \operatorname{tg} \alpha$ . В результате получаем уравнение относительно  $\operatorname{tg} \alpha$ :

$$4 \operatorname{tg}^2 \alpha - 12 \operatorname{tg} \alpha + 5 = 0.$$

ешив его, находим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{5}{2} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2}.$$

егко видеть однако, что  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{R-r}{R} < 1$ , поэтому  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2}$ , следовательно,

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1}{2}.$$

425. Пусть  $l$  — длина образующей и  $R$  — радиус основания конуса,  $x$  — длина ребра призмы,  $r$  — радиус окружности, описанной около основания призмы (рис. 162). Рассмотрим треугольник, образованный высотой конуса, образующей конуса, проходящей через одну из вершин призмы, и проекцией этой образующей на основание конуса. Имеем:

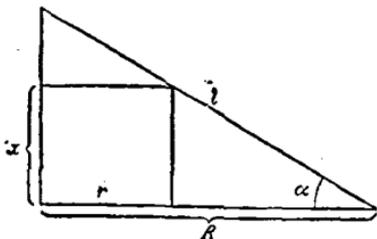


Рис. 162.

$$\frac{l \sin \alpha}{l \sin \alpha - x} = \frac{R}{r}.$$

Так как  $r = \frac{x}{2 \sin \frac{\pi}{n}}$  и  $R = l \cos \alpha$ , то мы получим:

$$x = \frac{2l \sin \alpha \sin \frac{\pi}{n}}{2 \sin \frac{\pi}{n} + \operatorname{tg} \alpha}.$$

Следовательно, полная поверхность призмы будет равна

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} nx^2 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} + nx^2 = \\ &= n \left( \frac{2l \sin \alpha \sin \frac{\pi}{n}}{2 \sin \frac{\pi}{n} + \operatorname{tg} \alpha} \right)^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} \right). \end{aligned}$$

426. Рассмотрим равнобокую трапецию  $AB_1C_1D$ , получающуюся в результате проектирования данной трапеции  $ABCD$  на плоскость, перпендикулярную к оси цилиндра (рис. 163). Так как последняя описана около окружности, то

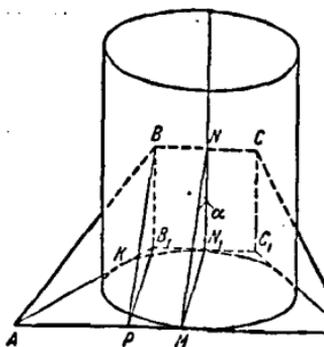


Рис. 163.

$$AB_1 = AK + KB_1 = AM + B_1N_1 = \frac{a+b}{2}.$$

Из прямоугольного треугольника  $APB_1$  получаем:

$$\left(\frac{a+b}{2}\right)^2 = \left(\frac{a-b}{2}\right)^2 + h^2 \sin^2 \alpha.$$

Отсюда

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{ab}}{h} \quad \text{и} \quad \alpha = \arcsin \frac{\sqrt{ab}}{h}.$$

427. Объем пирамиды равен сумме объемов пирамид, которые получатся, если соединить центр вписанного шара  $O$  со всеми вершинами пирамиды. Высота каждой такой пирамиды равна радиусу  $r$  шара, вписанного в данную пирамиду. Если  $S$  — площадь основания пирамиды,  $S_1$  — боковая поверхность, то объем пирамиды будет

$$V = \frac{1}{3} (S_1 + S) r. \quad (1)$$

Так как, с другой стороны,

$$V = \frac{1}{3} hS,$$

о для  $r$  получаем формулу

$$r = \frac{hS}{S_1 + S}. \quad (2)$$

Из условий задачи следует:

$$\begin{aligned} S &= \frac{na^2}{4} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}, \\ S_1 &= \frac{na}{2} \sqrt{b^2 - \frac{a^2}{4}}, \\ h &= \sqrt{b^2 - \frac{a^2}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}}}. \end{aligned}$$

оставляя эти выражения в (2), находим:

$$r = \frac{na^2 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} \sqrt{b^2 - \frac{a^2}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}}}}{4 \left( \frac{na^2}{4} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} + \frac{na}{2} \sqrt{b^2 - \frac{a^2}{4}} \right)} = \frac{a \sqrt{4b^2 - a^2 \operatorname{cosec}^2 \frac{\pi}{n}}}{2 \left( a + \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} \sqrt{4b^2 - a^2} \right)}.$$

428. Пусть  $a$  — сторона и  $b$  — апофема правильного угольника, лежащего в основании пирамиды,  $H$  — высота пирамиды. Тогда (рис. 164,

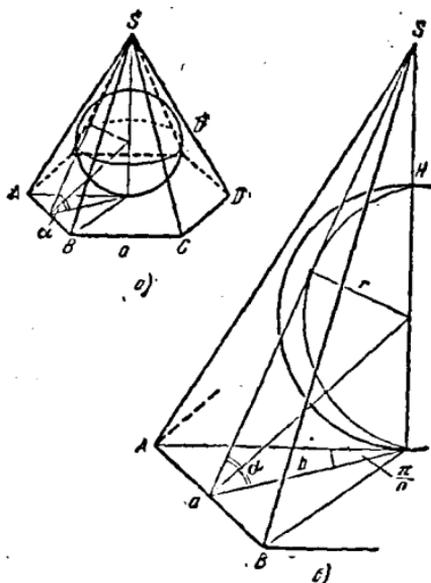


Рис. 164.

$$b = r \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2},$$

$$a = 2b \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} = 2r \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}$$

площадь основания равна

$$S_{\text{осн}} = n \frac{ab}{2} = nr^2 \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$$

Далее,  $H = b \operatorname{tg} \alpha =$

$$= r \operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}. \text{ Отсюда}$$

объем пирамиды

$$V_{\text{пир}} = \frac{1}{3} nr^2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \alpha$$

Так как объем шара  $V_{\text{шар}}$

$$= \frac{4}{3} \pi r^3, \text{ то}$$

$$\frac{V_{\text{шар}}}{V_{\text{пир}}} = \frac{4\pi}{n} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}$$

429. Пусть  $a$  — сторона основания пирамиды,  $b$  — апофема основания,  $R$  — радиус окружности, описанной около основания,  $h$  — высота пирамиды,  $r$  — радиус вписанного

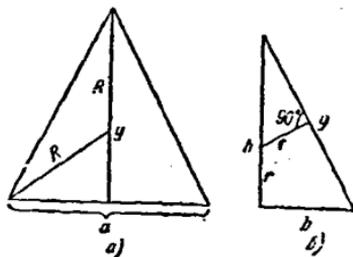


Рис. 165.

шара,  $y$  — высота боковой грани, проведенная из вершины пирамиды (рис. 165, а и б). Тогда

$$a = 2R \sin \frac{\pi}{n}, \quad b = R \cos \frac{\pi}{n},$$

кроме того

$$y = R + \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}} = R \left( 1 + \cos \frac{\pi}{n} \right),$$

$$h = \sqrt{y^2 - b^2} = R \sqrt{1 + 2 \cos \frac{\pi}{n}}.$$

Из уравнения

$$\frac{r}{h-r} = \frac{b}{y}$$

(см. рис. 165, б) находим:

$$r = \frac{hb}{y+b} = \frac{R \cos \frac{\pi}{n} \sqrt{1 + 2 \cos \frac{\pi}{n}}}{1 + 2 \cos \frac{\pi}{n}}.$$

Следовательно, искомое отношение равно

$$\frac{\frac{1}{3} h \cdot \frac{1}{2} nab}{\frac{4}{3} \pi r^2} = \frac{n \sin \frac{\pi}{n} \left( 1 + 2 \cos \frac{\pi}{n} \right)^2}{4\pi \cos^2 \frac{\pi}{n}}.$$

430. Пусть  $a$  — сторона основания пирамиды  $SABCD$ ,  $h$  — высота пирамиды,  $r$  — радиус шара, описанного около пирамиды (рис. 166). Тогда

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

и

$$r = \left( \frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Если  $SE$  — диаметр описанного шара, то из прямоугольного треугольника  $SBE$  следует:

$$\left( \frac{a\sqrt{2}}{2} \right)^2 = h(2r - h).$$

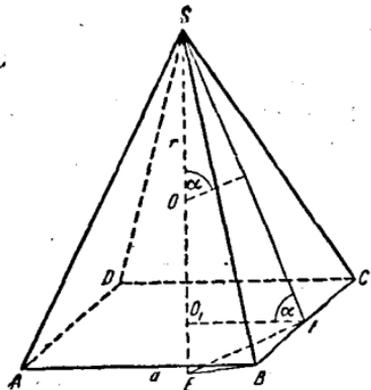


Рис. 166.

Так как, однако, из треугольника  $FO_1S$  имеем  $\frac{a}{2} = h \operatorname{ctg} \alpha$ , то, исключая  $a$ , находим:

$$h = \frac{2r}{2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + 1} = \frac{1}{1 + 2 \operatorname{ctg}^2 \alpha} \left( \frac{3V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

431. Обозначим через  $r$  радиус вписанного шара и через  $a$  длину отрезка  $OE$  (рис. 167). Тогда

$$r = a \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  — половина искомого угла (см. рис. 167). Следовательно, объем шара равен

$$V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi a^3 \operatorname{tg}^3 \alpha.$$

Так как  $DO = a \operatorname{tg} 2\alpha$ , а  $AB = 2\sqrt{3}a$ , то объем пирамиды будет

$$\begin{aligned} V_{\text{пир}} &= \frac{1}{3} DO \frac{\sqrt{3}}{4} AB^2 = \\ &= \sqrt{3} a^3 \operatorname{tg} 2\alpha. \end{aligned}$$

Так как по условию задачи

$$\frac{V_{\text{пир}}}{V_{\text{ш}}} = \frac{27\sqrt{3}}{4\pi},$$

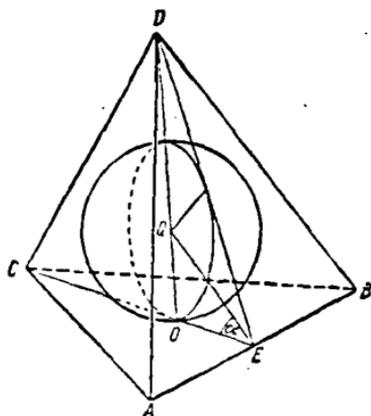


Рис. 167.

то, выражая  $\operatorname{tg} 2\alpha$  через  $\operatorname{tg} \alpha$ , получаем уравнение

$$\operatorname{tg}^2 \alpha (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) = \frac{2}{9}.$$

Отсюда  $(\operatorname{tg} \alpha)_1 = \frac{1}{3}$  и  $(\operatorname{tg} \alpha)_2 = \frac{2}{3}$ . Учитывая, что  $\alpha$  — острый угол, находим:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{6}$$

и

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{2}{3}}.$$

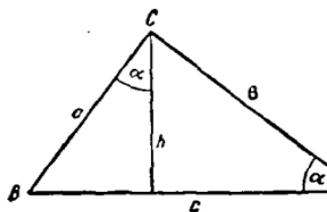


Рис. 168.

432. Пусть  $R$  — радиус шара и пусть  $a$ ,  $b$  и  $c$  — соответственно катеты и гипотенуза треугольника  $ABC$ , лежащего в сечении (рис. 168). Имеем:

$$a = \frac{h}{\cos \alpha}, \quad b = \frac{h}{\sin \alpha}, \quad c = \frac{a}{\sin \alpha} = \frac{h}{\cos \alpha \sin \alpha}.$$

чевидно, радиус  $R$  равен радиусу круга, вписанного в  $ABC$ . Поэтому

$$R = \frac{2S_{\Delta ABC}}{a+b+c} = \frac{ab}{a+b+c} = \frac{h}{1 + \sin \alpha + \cos \alpha}$$

и, следовательно, объем призмы равен

$$V = S_{\Delta ABC} 2R = \frac{2h^3}{\sin 2\alpha (1 + \sin \alpha + \cos \alpha)}.$$

433. Используя равенство двугранных углов, как и в задаче 420, нетрудно показать, что перпендикуляр, опущенный из вершины на основание, проектируется в центр симметрии ромба. Легко также видеть, что центр вписанного шара лежит на этом перпендикуляре.

Пусть  $a$  — сторона ромба,  $h$  — высота ромба,  $H$  — высота пирамиды (рис. 169). Тогда площадь основания  $S = a^2 \sin \alpha$  или, так как  $a = \frac{2h}{\sin \alpha}$ ,

$$S = \frac{4h^2}{\sin \alpha}.$$

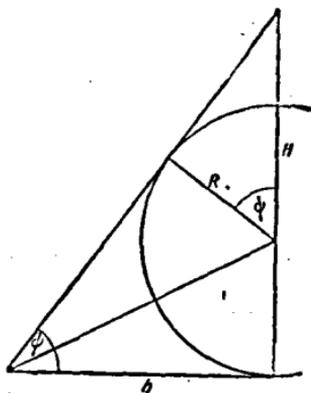


Рис. 169.

то  $h = R \operatorname{ctg} \frac{\phi}{2}$  (см. рис. 169, где изображено сечение, проходящее через высоту пирамиды и высоту ромба). Ясно также, что

$$H = R + \frac{R}{\cos \phi} = R \frac{2 \cos^2 \frac{\phi}{2}}{\cos \phi}.$$

в результате получаем объем призмы

$$V = \frac{8}{3} R^3 \frac{\cos^4 \frac{\phi}{2}}{\sin \alpha \cos \phi \sin^2 \frac{\phi}{2}}.$$

434. Проведем плоскость через вершины  $S_1$  и  $S_2$  пирамид и середину  $A$  одной из сторон основания (рис. 170). Радиус полукруга, вписанного в треугольник  $AS_1S_2$ , так, что его диаметр лежит на  $S_1S_2$ , очевидно, равен радиусу вписанного шара. Пусть  $O$  — центр полукруга. Обозначим через  $h$  высоту в треугольнике  $AS_1S_2$ , опущенную на сторону  $S_1S_2$ . Тогда как  $b$  есть апофема правильного  $n$ -угольника, то

$$b = \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}.$$

Радиус шара  $R$  найдем, подсчитав двумя способами площадь  $S$  треугольника  $AS_1S_2$ . С одной стороны,

$$S = \frac{b}{2} (H + h),$$

с другой стороны,

$$S = \frac{R}{2} S_1 A + \frac{R}{2} S_2 A =$$

$$= \frac{R}{2} (\sqrt{h^2 + b^2} + \sqrt{H^2 + b^2}).$$

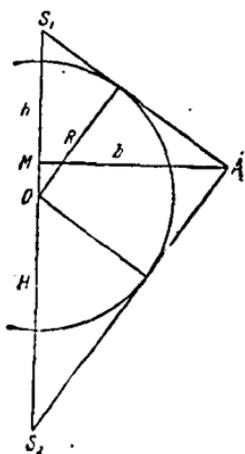


Рис. 170.

В итоге получаем окончательную формулу

$$R = \frac{\frac{1}{2} a (H + h) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}}{\sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{n}} + \sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{n}}}.$$

435. Пусть  $h_1$  и  $h_2$  — высоты пирамид,  $r$  — радиус круга описанного около основания (рис. 171). Тогда

$$\frac{a}{2} = r \sin \frac{\pi}{n}.$$

Из прямоугольного треугольника  $S_1AS_2$ , вершинами которого являются вершины данных пирамид и одна из вершин основания, найдем:

$$h_1 h_2 = r^2 = \frac{a^2}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}}.$$

Но

$$h_1 + h_2 = 2R.$$

Отсюда

$$h_1 = R + \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}}}, \quad h_2 = R - \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4 \sin^2 \frac{\pi}{n}}}.$$

Решение возможно, если  $R \geq$

$$\geq \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}}.$$

436. Легко доказать, что середина отрезка, соединяющего центры оснований призмы, является центром вписанного и описанного шаров. Радиус круга, вписанного в основание, равен радиусу вписанного шара. Пусть  $r$  — радиус вписанного шара,  $R$  — радиус описанного шара. Рассмотрим прямоугольный треугольник, вершинами которого являются одна из вершин основания, центр основания и центр шаров. Имеем  $R^2 = r^2 + r_1^2$ , где  $r_1 = \frac{r}{\cos \frac{\pi}{n}}$ . Отсюда

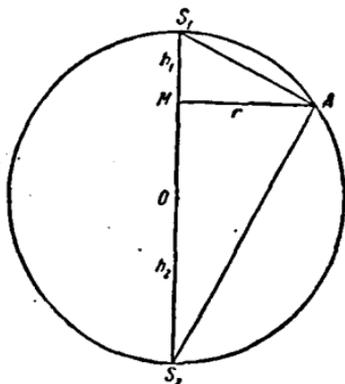


Рис. 171.

$$R = r \sqrt{1 + \frac{1}{\cos^2 \frac{\pi}{n}}}.$$

Отношение объема описанного шара к объему вписанного шара равно

$$\frac{R^3}{r^3} = \left(1 + \frac{1}{\cos^2 \frac{\pi}{n}}\right)^{\frac{3}{2}}.$$

437. Радиусы описанного и вписанного шаров равны отрезкам высоты тетраэдра, на которые она делится общим центром этих шаров. Легко обнаружить, что отношение

этих отрезков равно 3:1. В самом деле, из подобных угольников  $BQO$  и  $BPK$  (рис. 172) имеем:

$$\frac{R}{r} = \frac{BK}{PK},$$

но

$$\frac{BK}{PK} = \frac{BK}{QK} = 3.$$

Так как поверхности шаров относятся как квадраты их радиусов, то искомое отношение равно 9.

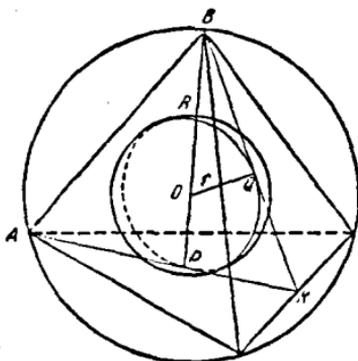


Рис. 172.

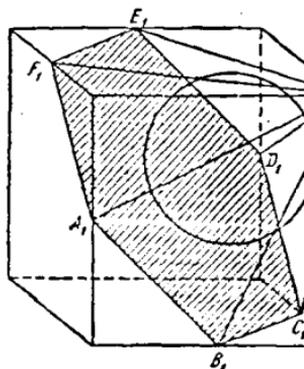


Рис. 173.

438. Объемы правильных тетраэдров относятся как кубы их радиусов вписанных в них шаров. Так как шар, вписанный в больший тетраэдр, является описанным вокруг меньшего тетраэдра, то отношение упомянутых радиусов вписанных шаров (см. решение задачи 437) равно 3:1. Следовательно, искомое отношение объемов равно  $3^3 = 27$ .

439. Пусть  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$  — правильный шестиугольник, полученный в сечении куба. Задача сводится к определению радиуса шара, вписанного в правильную шестиугольную пирамиду  $SA_1B_1C_1D_1E_1F_1$  (рис. 173). Сторона основания пирамиды равна  $\frac{a\sqrt{2}}{2}$ , а высота равна  $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ . Пользуясь тем, что радиус шара, вписанного в пирамиду, равен утроенному объему пирамиды, деленному на ее полную поверхность

формулу (1) в решении задачи 427), находим:

$$r = \frac{a(3 - \sqrt{3})}{4}.$$

Следовательно, искомое отношение равно  $\frac{2(3 + \sqrt{3})^2}{9\pi}$ .

440. Пусть  $O$  — центр сферы, а  $AS$ ,  $BS$  и  $CS$  — данные хорды. Очевидно, что треугольник  $ABC$  равносторонний (рис. 174). Легко видеть также, что перпендикуляр  $SO_1$  на плоскость  $ABC$  при продолжении проходит через центр сферы  $O$ , так как точка  $O_1$  является центром круга, описанного около  $\triangle ABC$ .

Обозначим после этих замечаний через  $d$  искомую длину хорд. Из треугольника  $SAB$  находим:

$$AB = 2d \sin \frac{\alpha}{2}$$

и, следовательно,

$$O_1A = AB \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} = \frac{2}{3} \sqrt{3} d \sin \frac{\alpha}{2}.$$

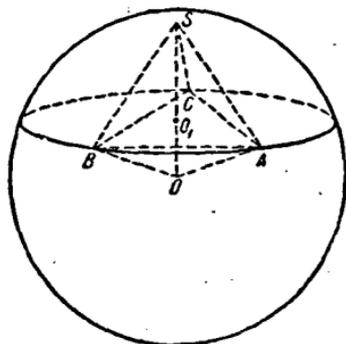


Рис. 174.

Вычисляя двумя способами площадь равнобедренного треугольника  $SOA$ , получаем:

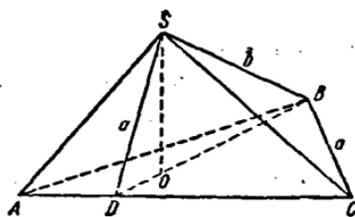


Рис. 175.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} R \frac{2}{3} \sqrt{3} d \sin \frac{\alpha}{2} &= \\ &= \frac{1}{2} d \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$d = 2R \sqrt{1 - \frac{4}{3} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

441. Радиус вписанного шара  $r$  мы найдем по формуле (ср. формулу (1) в решении задачи 427)

$$r = \frac{3V}{S},$$

где  $V$  — объем пирамиды, а  $S$  — ее полная поверхность. Найдем сначала объем пирамиды. Заметим для этого, что

прямоугольные треугольники  $BSC$  и  $BSA$  (рис. 175) по равным гипотенузам и общему катету. Ввиду этого прямоугольный треугольник  $ASC$  является равнобедренным, как

$$AS = CS = \sqrt{a^2 - b^2},$$

то, следовательно,

$$V = \frac{1}{3} BS \cdot S_{\Delta ASC} = \frac{1}{3} b \cdot \frac{(a^2 - b^2)}{2}.$$

Очевидно также, что

$$AD = \sqrt{a^2 - b^2} \frac{\sqrt{2}}{2};$$

$$BD = \sqrt{AB^2 - AD^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{a^2 + b^2}$$

и, значит,

$$S_{\Delta ABC} = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 - b^2}.$$

В итоге после сокращения получаем:

$$r = \frac{b \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{a^2 + b^2} + 2b + \sqrt{a^2 - b^2}}.$$

442. Обозначим через  $r$  радиус вписанного шара, а через  $R$  радиус описанного шара.

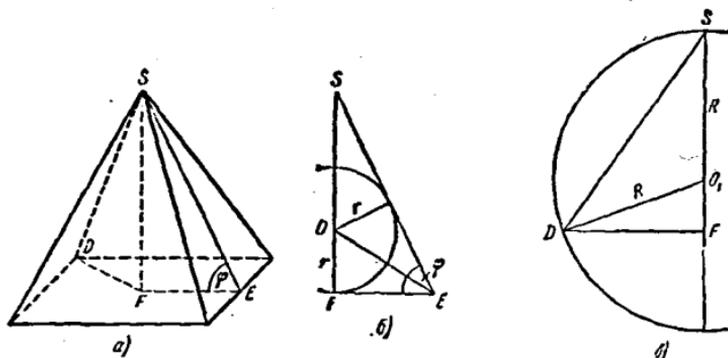


Рис. 176.

Рассмотрим сначала треугольник  $SFE$ , одна из сторон которого  $SF$  является высотой пирамиды, а другая  $SE$  — высотой боковой грани (рис. 176, а). Пусть  $O$  — центр вписанного

шара. Из треугольников  $SFE$  и  $OFE$  (рис. 176, б) имеем:

$$FE = r \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2},$$

$$SF = r \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \varphi.$$

Очевидно, далее, что

$$DF = EF \cdot \sqrt{2} = r \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \sqrt{2}.$$

Обращаясь к рис. 176, в, где изображено сечение, проведенное через ось пирамиды и ее боковое ребро, мы легко найдем:

$$DO_1^2 = O_1F^2 + DF^2$$

или

$$R^2 = (SF - R)^2 + DF^2.$$

Отсюда

$$R = \frac{SF^2 + DF^2}{2SF}. \quad (1)$$

Так как  $R = 3r$ , то, подставляя сюда найденные ранее выражения для  $SF$  и  $DF$ , получаем уравнение относительно  $\varphi$ :

$$3r = \frac{r^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} + r^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2} \cdot 2}{2r \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \varphi},$$

или после упрощения

$$6 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \varphi = 2 + \operatorname{tg}^2 \varphi.$$

Положим, далее,  $\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = z$ . Заметив, что  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2z}{1-z^2}$ , мы приходим к уравнению

$$7z^4 - 6z^2 + 1 = 0.$$

Отсюда

$$z_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{3 \pm \sqrt{2}}{7}}.$$

Так как  $z > 0$ , то возможны лишь два ответа:

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{3 + \sqrt{2}}{7}}$$

и

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2} = \sqrt{\frac{3 - \sqrt{2}}{7}}.$$

443. Всего получается 6 двугольников (по числу ребер и 4 треугольника (рис. 177). Обозначим через  $S_1$  — площадь каждого из треугольников

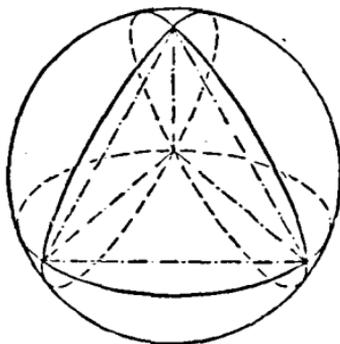


Рис. 177.

и через  $S_2$  — площадь каждого из двугольников. Имеем:

$$4S_1 + 6S_2 = 4\pi R^2. \quad (1)$$

Пусть  $S_0$  — сумма площадей одного треугольника и трех прилежащих к нему двугольников.  $S_0$  есть площадь сферического сегмента, отсеченного плоскостью грани тетраэдра. Эта площадь равна  $2\pi R h$ , где  $h$  — высота сегмента. Так как высота тетраэдра

делится центром сферы в отношении 3:1 (см. задачу 437), то

$$H = R + \frac{1}{3}R = \frac{4}{3}R,$$

откуда находим  $h = 2R - \frac{4}{3}R = \frac{2}{3}R$ . Далее,

$$S_1 + 3S_2 = 2\pi R \cdot \frac{2}{3}R = \frac{4}{3}\pi R^2. \quad (2)$$

Решив систему, состоящую из уравнений (1) и (2), относительно неизвестных  $S_1$  и  $S_2$ , получаем:

$$S_1 = \frac{2}{3}\pi R^2, \quad S_2 = \frac{2}{9}\pi R^2.$$

444. Пусть  $R$  — радиус основания конуса,  $\alpha$  — угол между осью конуса и образующей,  $r$  — радиус вписанного шара. В осевом сечении конуса имеем равнобедренный треугольник

ник  $ABC$  (рис. 178). Радиус круга, вписанного в этот треугольник, равен радиусу  $r$  вписанного в конус шара. Пусть  $O$  — центр круга,  $\angle OCA = \beta$ . Тогда очевидно, что  $\operatorname{tg} \beta = \frac{r}{R}$ . Но по условию задачи

$$\frac{4\pi r^2}{\pi R^2} = 4 \left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{4}{3}.$$

Отсюда  $\frac{r}{R} = \frac{1}{\sqrt{3}}$  и, следовательно,  $\operatorname{tg} \beta = \frac{\pi}{6}$ . Так как, кроме того,  $\alpha + 2\beta = \frac{\pi}{2}$ , то  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ . Следовательно, искомый угол  $2\alpha = \frac{\pi}{3}$ .

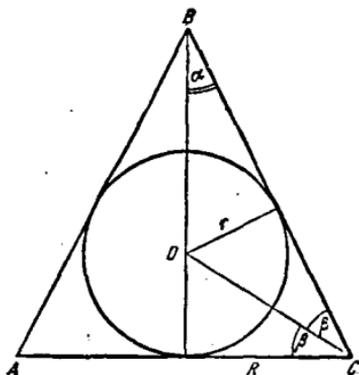


Рис. 178.

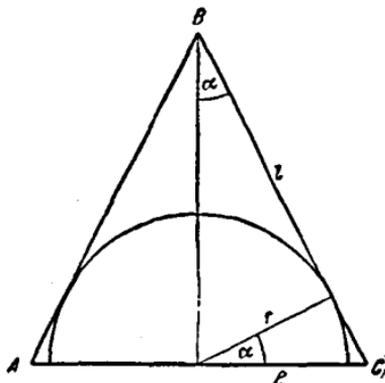


Рис. 179.

445. В осевом сечении конуса получим равнобедренный треугольник  $ABC$  (рис. 179). Пусть  $r$  — радиус полусферы,  $R$  — радиус основания конуса,  $l$  — образующая конуса,  $\alpha$  — угол между осью конуса и образующей. Тогда, с одной стороны, площадь  $\triangle ABC$  равна

$$S = \frac{1}{2} l^2 \sin 2\alpha,$$

а с другой стороны,  $S = lr$ ; следовательно,

$$\frac{l}{r} = \frac{2}{\sin 2\alpha}.$$

По условию задачи

$$\frac{\pi R(l+R)}{2\pi r^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{r} + \frac{l}{r} \right) \frac{R}{r} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{2}{\sin 2\alpha} \right) \frac{1}{\cos \alpha} = \frac{18}{5}$$

Для определения  $\alpha$  получаем уравнение

$$36 \sin^2 \alpha - 31 \sin \alpha + 5 = 0,$$

или

$$(\sin \alpha + 1)(36 \sin^2 \alpha - 36 \sin \alpha + 5) = 0.$$

Так как  $\alpha$  — острый угол, то  $\sin \alpha \neq -1$ . Поэтому получаем два ответа:

$$\sin \alpha = \frac{5}{6} \quad \text{или} \quad \sin \alpha = \frac{1}{6}.$$

Искомый угол равен  $2 \arcsin \frac{5}{6}$  или  $2 \arcsin \frac{1}{6}$ .

446. Пусть  $h$  — высота конуса,  $r$  — радиус основания,  $l$  — образующая конуса и  $\alpha$  — угол между образующей и высотой (рис. 180). По условию задачи имеем  $\pi r l = k \pi r^2$ ; отсюда

$l = kr$  и, следовательно,  $\sin \alpha =$

$\frac{1}{k}$ . Из прямоугольного треугольника  $ABS$  получаем:

$$r = 2R \cos \alpha \sin \alpha = 2R \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k^2}$$

$$h = 2R \cos \alpha \cos \alpha = 2R \frac{k^2 - 1}{k^2}$$

Искомый объем конуса равен

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h = \frac{8}{3} \pi R^3 \left( \frac{k^2 - 1}{k^2} \right)^3$$

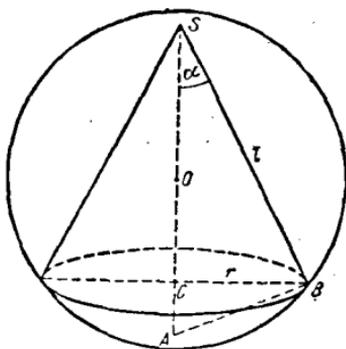


Рис. 180.

447. Пусть  $R$  — радиус шара,  $h$  — высота конуса,  $r$  — радиус основания конуса. Отношение объема конуса к объему шара равно

$$x = \frac{r^2 h}{4R^3} = \frac{q}{4} \left( \frac{r}{R} \right)^2.$$

Из треугольника  $SBA$  (рис. 181) имеем  $r^2 = h(2R - h)$ . Отсюда

$$\frac{r^2}{R^2} = \frac{h}{R} \left( 2 - \frac{h}{R} \right) = q(2 - q)$$

и, следовательно,

$$x = \frac{q^2}{4} (2 - q).$$

Задача разрешима, очевидно, только тогда, когда  $0 < q < 2$ .

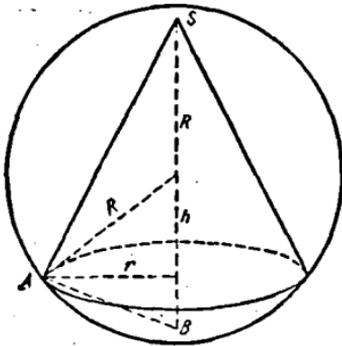


Рис. 181.

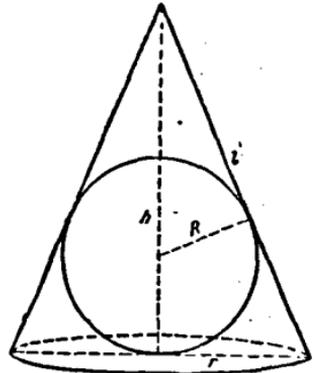


Рис. 182.

448. Пусть  $R$  — радиус шара,  $S$  и  $V$  — поверхность и объем шара,  $S_1$  и  $V_1$  — поверхность и объем конуса,  $h$  — высота конуса,  $r$  — радиус основания конуса (рис. 182). Тогда

$$\frac{V}{V_1} = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3}{\frac{1}{3} \pi r^2 h} = \frac{4R^3}{r^2 h}$$

и

$$\frac{S}{S_1} = \frac{4\pi R^2}{\pi r(l+r)} = \frac{4R^2}{r(l+r)}.$$

Заметив, однако, что

$$\frac{l}{r} = \frac{h-R}{R} = \frac{h}{R} - 1$$

и, следовательно,

$$\frac{l+r}{r} = \frac{h}{R},$$

получаем:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{S}{S_1} = \frac{1}{n}.$$

449. Пусть  $S$  — полная поверхность конуса,  $S_1$  — поверхность шара,  $r_1$  и  $r$  — радиусы верхнего и нижнего оснований конуса,  $l$  — длина его образующей. Пусть далее  $CMDL$  — трапеция, полученная в осевом сечении конуса,  $O$  — центр вписанного шара,  $AB \perp LD$  и  $OF \perp MD$  (рис. 183). Имеем:

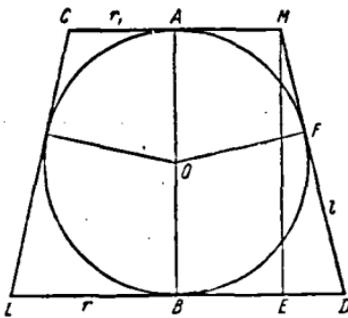


Рис. 183.

Легко видеть, что  $AM = MF$ ,  $BD = FD$ , так как  $O$  — центр вписанного в трапецию круга, поэтому

$$\frac{S}{S_1} = \frac{\pi l(r+r_1) + \pi r_1^2 + \pi r^2}{4\pi R^2} = m. \quad (1)$$

Используя это равенство, из (1) получим:

$$l = r + r_1. \quad (2)$$

Используя это равенство, из (1) получим:

$$l^2 + r_1^2 + r^2 = 4mR^2. \quad (3)$$

Из треугольника  $MED$ , далее, следует:

$$l^2 = (r - r_1)^2 + 4R^2. \quad (4)$$

Исключая  $l$  из равенств (2) и (4), найдем:

$$rr_1 = R^2. \quad (5)$$

С помощью этого равенства, исключив  $l$  из (2) и (3), получим:

$$r^2 + r_1^2 = R^2(2m - 1). \quad (6)$$

Решив теперь систему (5), (6), найдем:

$$r = \frac{R}{2} (\sqrt{2m+1} + \sqrt{2m-3});$$

$$r_1 = \frac{R}{2} (\sqrt{2m+1} - \sqrt{2m-3}).$$

450. Возможны два случая: 1) вершина конуса и шар лежат по разные стороны от касательной плоскости; 2) вершины конуса и шар лежат по одну сторону от касательной плоскости.

Рассмотрим первый случай. Проведем плоскость через ось конуса и образующую конуса  $BC$ , о которой говорится в условии задачи (рис. 184). Эта плоскость в сечении с конусом даст треугольник  $ABC$ , в сечении с шаром — окружность с центром  $O$ ; плоскость, перпендикулярная к  $BC$ , будет пересечена по прямой  $ME$  ( $M$  — точка касания). Проведем  $BD \perp AC$  и  $OF \perp BC$ . Пусть  $BD = h$ ,  $OD = OF = r$ ,  $CD = R$ . Очевидно,  $OMEF$  — квадрат, поэтому

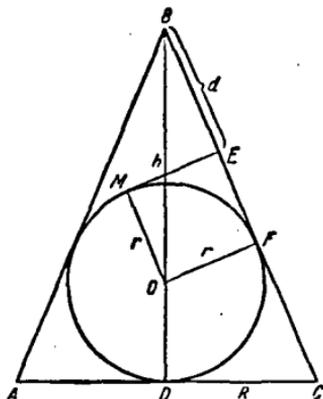


Рис. 184.

$$h = r + \sqrt{r^2 + (d+r)^2}.$$

Далее,

$$\frac{R}{h} = \frac{r}{d+r}, \quad R = \frac{hr}{d+r}.$$

Итак, в первом случае объем конуса

$$V = \frac{1}{3} \pi R^2 h = \frac{1}{3} \pi \frac{h^2 r^2}{(d+r)^2} = \frac{\pi r^2 (r + \sqrt{r^2 + (d+r)^2})^2}{3(d+r)^2}.$$

Во втором случае задача решается аналогично. Объем конуса оказывается равным

$$\frac{\pi r^2 (r + \sqrt{r^2 + (d-r)^2})}{3(d-r)^2}.$$

451. Рассмотрим осевое сечение  $ABC$  конуса. Пусть  $BF$  — высота в треугольнике  $ABC$ ,  $N$  и  $M$  — точки касания круга, вписанного в треугольник  $ABC$ , со сторонами  $AB$  и  $BC$ ,  $O$  — центр круга,  $E$  — точка пересечения меньшей дуги  $MN$  с отрезком  $BF$ ,  $D$  — точка пересечения отрезков  $MN$  и

$BF$  (рис. 185). Положим  $DM = r$ ,  $DE = H$ ,  $BD = h$ . Ис-  
 объем равен

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h - \frac{1}{3} \pi H^2 (3R - H).$$

Но

$$h = r \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} = R \cos \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} = R \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

и

$$H = R - R \sin \frac{\alpha}{2};$$

следовательно,

$$V = \frac{1}{3} \pi R^3 \left[ \frac{\cos^4 \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} - \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2}\right)^2 \left(2 + \sin \frac{\alpha}{2}\right) \right]$$

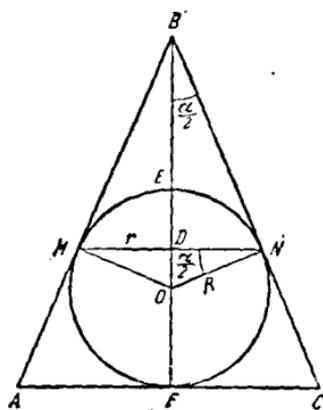


Рис. 185.

452. Обозначим через  $r$   
 радиусы шаров и рассмотрим  
 ченные шаров плоскостью, па-  
 дящей через их центры  
 $O_1$ ; пусть  $AA_1 = 2a$ ,  $KS =$

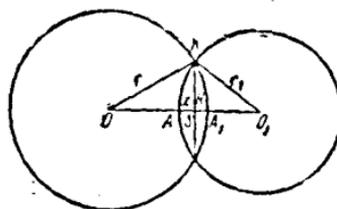


Рис. 186.

$AS = x$  (рис. 186); тогда  $A_1S = 2a - x$ . Полная поверх-  
 линзы равна

$$x2ar_1 + (2a - x)2ar = S.$$

Из треугольничка  $OKS$  имеем  $r^2 = R^2 + [r - (2a - x)]^2$

$$R^2 - 2r(2a - x) + (2a - x)^2 = 0.$$

Аналогично из треугольника  $O_1KS$  имеем  $r_1^2 = R^2 + (r_1 - x)^2$  или

$$R^2 - 2r_1x + x^2 = 0. \quad (3)$$

Из (2) и (3) находим:

$$r = \frac{R^2 + (2a - x)^2}{2(2a - x)}, \quad r_1 = \frac{R^2 + x^2}{2x}. \quad (4)$$

Подставив эти выражения для  $r$  и  $r_1$  в равенство (1), получим уравнение

$$\pi(R^2 + x^2) + \pi[R^2 + (2a - x)^2] = S$$

или

$$x^2 - 2ax + R^2 + 2a^2 - \frac{S}{2\pi} = 0,$$

откуда

$$x = a + \sqrt{\frac{S}{2\pi} - R^2 - a^2}. \quad (5)$$

Подставив это значение  $x$  в формулы (4), после упрощений получим:

$$r = \frac{\frac{S}{4\pi} - a \sqrt{\frac{S}{2\pi} - R^2 - a^2}}{a - \sqrt{\frac{S}{2\pi} - R^2 - a^2}},$$

$$r_1 = \frac{\frac{S}{4\pi} + a \sqrt{\frac{S}{2\pi} - R^2 - a^2}}{a + \sqrt{\frac{S}{2\pi} - R^2 - a^2}}.$$

Выбор другого знака перед корнем в (5) сводится к перемене обозначений  $r$  и  $r_1$ .

453. Пусть  $V_1$  и  $V_2$  суть соответственно объемы меньшего и большего шаровых сегментов, на которые разбивает шар плоскость, проходящая через линию касания шара с конусом. Пусть, далее,  $R$  — радиус шара,  $h$  — высота меньшего сегмента,  $H$  — высота конуса,  $r$  — радиус его основания

(рис. 187). Тогда

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h), \quad V_2 = \frac{4}{3} \pi R^3 - \frac{\pi}{3} h^2 (3R - h)$$

Задача сводится к нахождению отношения  $\frac{h}{R}$ . Обозначим через  $\alpha$  угол между осью конуса и образующей, из  $\triangle$  находим:

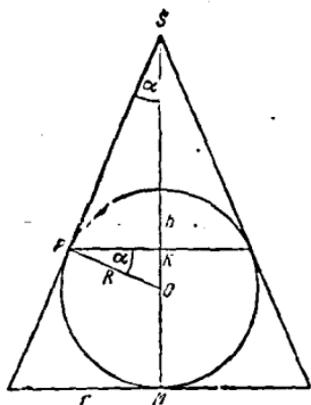


Рис. 187.

$$\frac{R-h}{R} = \sin \alpha,$$

откуда

$$\frac{h}{R} = 1 - \sin \alpha.$$

Далее, по условию задачи

$$k = \frac{\frac{1}{3} \pi r^2 H}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{1}{4} \frac{r^2 H}{R^3}.$$

Выразим теперь  $r$  и  $H$  через  $R$  и  $\alpha$ . Имеем:

$$H = \frac{R}{\sin \alpha} + R = R \cdot \frac{1 + \sin \alpha}{\sin \alpha},$$

$$r = H \operatorname{tg} \alpha = R \cdot \frac{1 + \sin \alpha}{\cos \alpha}.$$

Следовательно,

$$k = \frac{1}{4} \cdot \frac{(1 + \sin \alpha)^3}{\sin \alpha (1 - \sin^2 \alpha)} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(1 + \sin \alpha)^2}{\sin \alpha (1 - \sin \alpha)}.$$

Подставляя сюда  $\sin \alpha = 1 - \frac{h}{R}$ , получаем уравнение относительно  $\frac{h}{r} = z$ :

$$k = \frac{1}{4} \frac{(2-z)}{(1-z)} z;$$

или после упрощения

$$z^2 (4k + 1) - 4(k + 1)z + 4 = 0.$$

Решая, получаем:

$$z_{1,2} = \frac{2(k+1) \pm 2\sqrt{k(k-2)}}{4k+1}. \quad (1)$$

В заключение находим:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{z_{1,2}^3 (3 - z_{1,2})}{4 - z_{1,2}^2 (3 - z_{1,2})}.$$

Задача имеет два решения, так как оба корня квадратного уравнения при  $k > 2$  имеют смысл.

454. Радиус  $r$  каждой из восьми вписанных сфер мы найдем, рассмотрев треугольник  $AOC$  в плоскости, проходящей

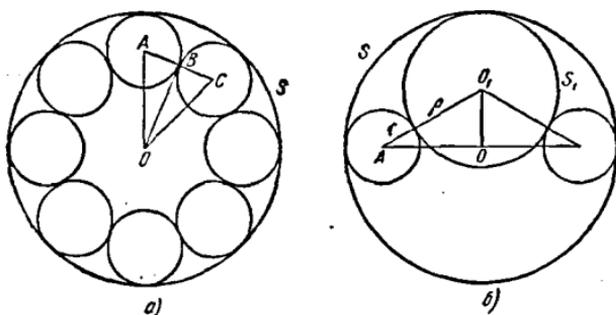


Рис. 188.

через центры этих сфер и центр  $O$  сферы  $S$  (рис. 188, а).  
Имеем:

$$\frac{AB}{AO} = \frac{r}{R-r} = \sin \frac{\pi}{8}.$$

Отсюда

$$r = R \frac{\sin \frac{\pi}{8}}{\sin \frac{\pi}{8} + 1}.$$

Проведя сечение через центр  $O$  сферы  $S$ , центр  $O_1$  сферы  $S_1$  и центры двух противоположных сфер радиуса  $r$  (рис. 188, б), мы получим из прямоугольного треугольника  $AOO_1$ :

$$AO_1^2 = AO^2 + OO_1^2$$

или

$$(r + \rho)^2 = (R - r)^2 + (R - \rho)^2.$$

Отсюда

$$\rho = R \cdot \frac{R - r}{R + r},$$

или

$$\rho = R \cdot \frac{1}{2 \sin \frac{\pi}{8} + 1} = \frac{R}{\sqrt{2} - \sqrt{2} + 1}.$$

455. Так как вписанные сферы равны между собой, то центры одинаково удалены от центра  $O$  сферы  $S$ . Следовательно, центр симметрии указанного в условии задачи куба падает с центром  $O$  сферы (рис. 189). Пусть  $x$  — искомый радиус сфер. Легко видеть, тогда ребро куба будет  $AB = 2x$ , а половина диагонали куба

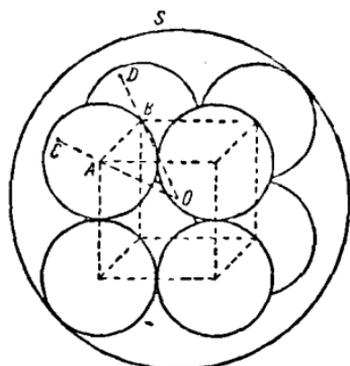


Рис. 189.

$$AO = CO - CA = R - x.$$

Так как, с другой стороны,

$$AO = \frac{1}{2} \cdot 2x\sqrt{3},$$

то получаем уравнение  $R - x = x\sqrt{3}$ , откуда

$$x = \frac{R}{\sqrt{3} + 1}.$$

456. Пусть  $r$  — радиус основания каждого из двух одинаковых конусов. Их общая часть состоит из двух равных усеченных конусов. Обозначим через  $r_1$  и  $r_2$  соответствующие радиусы верхнего и нижнего оснований усеченного конуса, а через  $H$  — его высоту. Искомое отношение объемов равно

$$q = \frac{H(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{2R^3}.$$



и  $l_1^2 + R_1^2 = l_2^2 + R_2^2 = R^2$ . Из этих двух уравнений находим

$$l_2 + l_1 = \frac{R_1^2 - R_2^2}{d}$$

и, следовательно,

$$l_2 + l_1 = \frac{S_1 - S_2}{\pi d}.$$

Из уравнений (1) и (2) получаем:

$$l_2 = \frac{S_1 - S_2}{2\pi d} + \frac{d}{2}, \quad l = \frac{S_1 - S_2}{2\pi d}.$$

Поэтому искомая площадь равна

$$\begin{aligned} S &= \pi r^2 = \pi(R^2 - l^2) = \pi(R_2^2 + l_2^2 - l^2) = \\ &= \frac{1}{2} (S_1 + S_2 + \frac{1}{2} \pi d^2) \end{aligned}$$

458. Обозначим через  $r$  искомый радиус основания конуса. Рассмотрим фигуру, получающуюся в сечении, проведенном через центр одного из шаров и ось конуса (рис. 192).

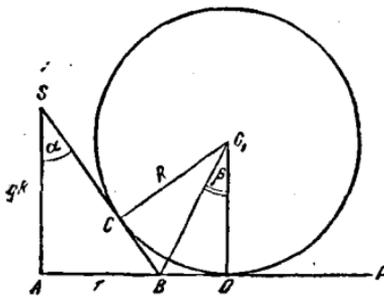


Рис. 192.

Заметим, что расстояние между центрами двух касающихся шаров равно  $2R$ . Исполняется легко доказуемый факт, что центр основания конуса  $A$  равноудален от всех трех точек касания сфер с плоскостью  $P$ , т. е.  $AD = AB$ . Имеем:

$$AD = \frac{2\sqrt{3}}{3}R.$$

Легко видеть, что  $\angle SBA = \angle C_2OD = 2\beta$  и, следовательно,

$$2\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Взяв тангенсы углов, стоящих в обеих частях этого равенства, получаем:

$$\frac{2 \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg}^2 \beta} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Из рис. 192 видно, что  $\operatorname{tg} \beta = \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} R - r \right) : R$  и  $\operatorname{tg} \alpha = r : qR$ . Если теперь положить  $\frac{r}{R} = x$ , то равенство (1) приводит нас к следующему уравнению относительно  $x$ :

$$3(q-2)x^2 - 4\sqrt{3}(q-1)x + q = 0.$$

Отсюда при  $q=2$  получаем  $x = \frac{\sqrt{3}}{6}$ , следовательно,  $r = \frac{\sqrt{3}}{6} R$ . Если же  $q \neq 2$ , то

$$x_{1,2} = \frac{2\sqrt{3}(q-1) \mp \sqrt{9q^2 - 18q + 12}}{3(q-2)}.$$

Так как  $0 < x < \frac{2\sqrt{3}}{3}$ , то в указанной формуле следует взять знак минус. Второй корень при  $q > 2$ , как нетрудно показать, больше, чем  $\frac{2\sqrt{3}}{3}$ , и отвечает конусу, касающемуся сфер извне; при  $q < 2$  второй корень отрицателен.

459. Центры четырех первых шаров лежат в вершинах правильного тетраэдра, так как расстояния между центрами любых двух касающихся шаров равны  $2R$ . Нетрудно показать, что центры пятого и шестого шаров совпадают с центром тяжести тетраэдра (рис. 193). Пусть  $r$  — радиус пятого (большого) шара, а  $\rho$  — радиус шестого шара. Очевидно,

$$r = \rho + 2R. \quad (1)$$

Пользуясь тем, что расстояние от центра тяжести до вершины рассматриваемого тетраэдра равно  $\frac{\sqrt{6}}{2} R$ , получаем:

$$\rho + R = \frac{\sqrt{6}}{2} R. \quad (2)$$

Отсюда  $\rho = R \left( \frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right)$ , а из формулы (1)  $r = R \left( \frac{\sqrt{6}}{2} + 1 \right)$ .

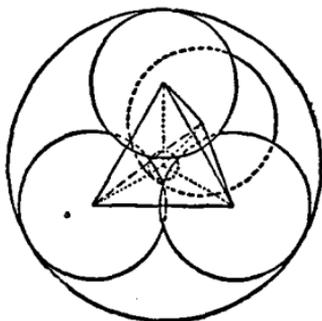


Рис. 193.

Таким образом, искомое отношение объемов равно

$$\frac{V_4}{V_5} = \left(\frac{\rho}{r}\right)^3 = \left(\frac{\sqrt{6}-2}{\sqrt{6}+2}\right)^3 = (5-2\sqrt{6})^3 = 485 - 198\sqrt{6}$$

460. Пусть  $A, B, C$  — центры шаров радиуса  $R$ ,  $A_1, C_1$  — проекции этих центров на плоскость,  $O$  — центр четвертого шара, радиус  $r$  которого нужно найти (рис. 194). Соединив центры всех шаров, мы получим, очевидно, правильную треугольную пирамиду  $OABC$ , у которой  $AB = BC = AC = 2R$ ,  $AO = BO = CO = R + r$ ,  $OQ = R - r$ . Отрезок  $AQ$  есть радиус описанной около  $\triangle ABC$  окружности, поэтому

$$AQ = \frac{AB}{\sqrt{3}} = \frac{2R}{\sqrt{3}}.$$

Из треугольника  $AQO$  по теореме Пифагора находим:

$$\left(\frac{2R}{\sqrt{3}}\right)^2 + (R - r)^2 = (R + r)^2.$$

Решив это уравнение, получаем  $r = \frac{R}{3}$ .

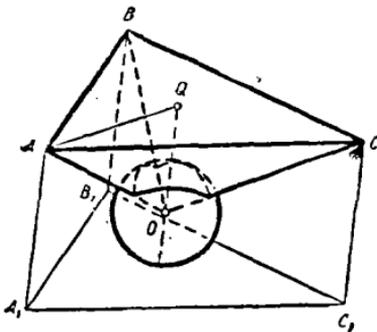


Рис. 194.

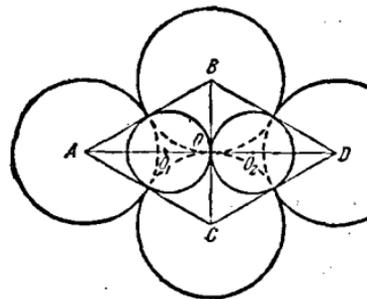


Рис. 195.

461. Пусть  $A, B, C, D$  — центры больших шаров. Рассмотрим проекцию всех шаров на плоскость  $A, B, C$  (рис. 195). Так как центры малых шаров равноудалены от центров соответствующих больших шаров, они спроектируются в центры тяжести  $O_1$  и  $O_2$  равносторонних треугольников  $ABC$  и  $B CD$ . Так как, кроме того, радиусы малых шаров по условию равны, то отрезок, соединяющий их цент

параллелен рассматриваемой плоскости и делится точкой касания шаров пополам. Ввиду этого проекция точки касания окажется на отрезке  $BC$ . Отсюда следует, что малые шары спроектируются в круги, вписанные в треугольники  $ABC$  и  $BCD$ . Поэтому радиус малых шаров равен

$$r = \frac{AB\sqrt{3}}{6} = \frac{2R\sqrt{3}}{6},$$

откуда

$$\frac{R}{r} = \sqrt{3}.$$

## 2. Задачи на доказательство

**462.** Пусть  $E$  и  $F$  — середины оснований трапеции  $ABCD$ , полученной в осевом сечении конуса. Проведем через середину  $O$  отрезка  $EF$  прямые  $OM \perp CD$ ,  $ON \perp EF$ ,  $CP \perp AD$ . Положим для сокращения письма  $CD = l$ ,  $EF = h$ ,  $OM = x$ ,  $EC = r$ ,  $DF = R$ ,  $\angle MON = \angle PCD = \alpha$ .

Для доказательства достаточно установить, что  $x = \frac{h}{2}$ . По условию  $\pi l(R+r) = \pi l^2$  и, следовательно,  $R+r=l$ . Так как, однако, из треугольников  $OMN$  и  $CPD$  имеем:

$$x = \frac{R+r}{2} \cos \alpha \text{ и } h = l \cos \alpha,$$

то  $x = \frac{h}{2}$ , что и требовалось доказать\*).

**463.** Рассмотрим трапецию  $ABCD$ , получающуюся в осевом сечении конуса (рис. 196); пусть  $E$  и  $F$  — середины ее оснований,  $O$  — середина  $EF$ .

$$OM \perp CD, ON \parallel EF, CP \perp AD, \angle MON = \angle PCD = \alpha.$$

Для решения задачи достаточно показать, что  $OM = OE$ . Введем обозначения:

$$EC = r, DF = R, OM = x, OE = \frac{h}{2}.$$

\*) Из полученного выше равенства  $R+r=l$  следует, что  $2R+r+2r=l+l$ . Это означает, что суммы противоположных сторон рассматриваемого четырехугольника равны. Последнее уже достаточно для того, чтобы в четырехугольник можно было вписать окружность. Мы, однако, не опираемся на этот факт.

Тогда

$$x = ON \cos \alpha = \frac{R+r}{2} \cos \alpha.$$

Из треугольника  $CPD$  имеем:

$$h = CD \cos \alpha = \sqrt{(R-r)^2 + CP^2} \cos \alpha.$$

Но так как по условию  $CP^2 = 4Rr$ , то

$$h = \sqrt{(R-r)^2 + 4Rr} \cos \alpha = (R+r) \cos \alpha.$$

Таким образом,  $x = \frac{h}{2}$ , что и требовалось доказать.

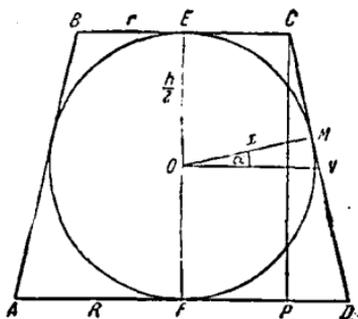


Рис. 196.

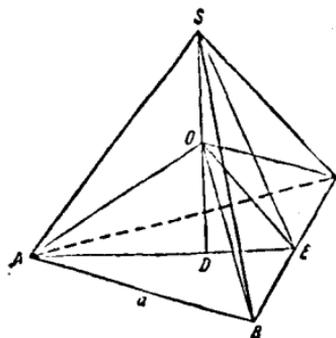


Рис. 197.

464. Пусть  $SD$  — высота пирамиды  $SABC$ ,  $O$  — середина высоты,  $E$  — середина отрезка  $BC$ , длину которого мы обозначим через  $a$  (рис. 197).

$$\text{Имеем } DE = \frac{a\sqrt{3}}{6};$$

$$SD = \sqrt{SE^2 - DE^2} = \frac{a\sqrt{6}}{3}; \quad OD = \frac{a\sqrt{6}}{6}.$$

Отсюда

$$OE = \sqrt{OD^2 + DE^2} = \frac{a}{2}.$$

Следовательно,  $OE = BE = EC$  и, значит,  $\angle BOC = 90^\circ$ .

465. Пусть  $a$  — сторона основания данной пирамиды  $SABCD$ ,  $\alpha$  — двугранный угол между боковой гранью и осью

ваннем,  $H$ — высота  $SO$  пирамиды (рис. 198). Тогда

$$r = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Кроме того (см. формулу (1) в решении задачи 442),

$$R = \frac{H^2 + \left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2}{2H}.$$

Следовательно,

$$R = \frac{a}{4} \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha + 2}{\operatorname{tg} \alpha}$$

и, значит,

$$\frac{R}{r} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha + 2}{2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

Положив  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = x$ , получаем:

$$\frac{R}{r} = \frac{1 + x^4}{2x^2(1 - x^2)}.$$

Полагая еще  $x^2 = t$ , мы сведем задачу к доказательству неравенства

$$\frac{1 + t^2}{2t(1 - t)} \geq 1 + \sqrt{2}$$

при  $0 < t < 1$ .

Умножив на знаменатель обе части неравенства и раскрывая скобки, приходим к неравенству

$$(2\sqrt{2} + 3)t^2 - 2(\sqrt{2} + 1)t + 1 \geq 0$$

для квадратного трехчлена. Вычисляя дискриминант трехчлена, обнаруживаем, что он равен нулю. Следовательно, трехчлен не изменяет знака вообще при любых значениях  $t$ . Так как при  $t = 0$  он положителен, то неравенство доказано.

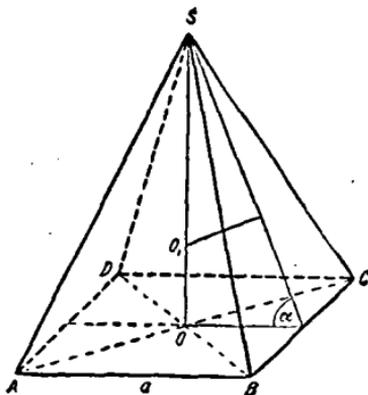


Рис. 198.

466. Пирамиды  $ASBC$  и  $OSBC$  имеют общее основание  $SBC$  (рис. 199), поэтому их объемы относятся как высоты, опущенные на их общее основание. Так как  $OA' \parallel AS$  — отношение высот пирамид  $ASBC$  и  $OSBC$ , опущенных на основание  $SBC$ , равно отношению  $SA$  к  $OA'$ . Следовательно, отношение их объемов равно

$$\frac{V_{OSBC}}{V_{ASBC}} = \frac{OA'}{SA}.$$

Аналогично

$$\frac{V_{OSCA}}{V_{ASBC}} = \frac{OC'}{SC}, \quad \frac{V_{OSAB}}{V_{ASBC}} = \frac{OB'}{SB}.$$

Сложив эти равенства, получим

$$\frac{OA'}{SA} + \frac{OB'}{SB} + \frac{OC'}{SC} = 1.$$

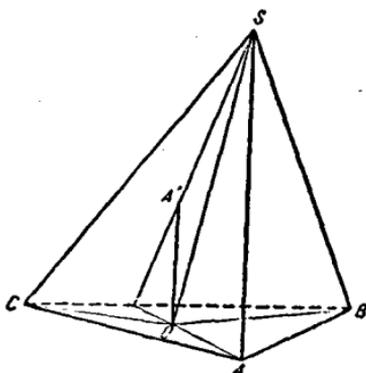


Рис. 199.

467. Пусть  $P$  есть плоскость треугольника  $ABC$ ,  $P_1$  — плоскость треугольника  $A_1B_1C_1$ ,  $l$  — линия пересечения  $P$  и  $P_1$  (рис. 200). Обозначим через  $Q_{AB}$  плоскость, проходящую через  $A$ ,  $B$  и  $O$ . Прямая  $A_1B_1$  лежит в  $Q_{AB}$  и, будучи непараллельной прямой  $AB$ , пересекается с ней в точке  $T_{AB}$ . Эта точка лежит в плоскостях  $P$  и  $P_1$ , значит, на прямой  $l$ . Аналогично докажем, что прямые  $BC$  и  $B_1C_1$  пересекаются в точке  $T_{BC}$ , лежащей на  $l$ , а прямые  $AC$  и  $A_1C_1$  — в точке  $T_{AC}$ , лежащей на  $l$ .

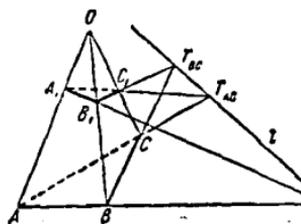


Рис. 200.

468. Пусть  $O_1$  — центр тяжести грани  $ASC$ ,  $BO_1$  — из рассматриваемых в задаче отрезков. Возьмем еще какую-нибудь грань, например  $BSC$ ; обозначим ее центр тяжести через  $O_2$  и докажем, что отрезок  $AO_2$  пересекает отрезок  $BO_1$  и при этом точка пересечения отрезков делит отрезок  $BO_1$  в отношении 1:3, считая от точки  $O_1$ . В подобном же деле, если  $M_1$  и  $M_2$  — середины отрезков  $AC$  и  $BC$  (рис. 201), то

то очевидно, что  $AB \parallel M_1M_2$ ; легко также видеть, что  $O_1O_2 \parallel M_1M_2$ , так как точки  $O_1$  и  $O_2$  делят соответственно отрезки  $M_1S$  и  $M_2S$  в одном и том же отношении. Поэтому  $AB \parallel O_1O_2$ , фигура  $ABO_2O_1$  — трапеция и, стало быть, ее диагонали  $BO_1$  и  $AO_2$  пересекаются. Обозначим точку пересечения диагоналей через  $O$ . Имеем:

$$\frac{M_1M_2}{AB} = \frac{1}{2}; \quad \frac{O_1O_2}{M_1M_2} = \frac{2}{3}.$$

Перемножив эти равенства, полу-

чим  $\frac{O_1O_2}{AB} = \frac{1}{3}$ . Но из подобия

треугольников  $AOB$  и  $O_1OO_2$  следует  $\frac{O_1O}{OB} = \frac{O_1O_2}{AB}$ . Таким образом,

$$\frac{O_1O}{OB} = \frac{1}{3},$$

что и утверждалось. Если мы теперь возьмем центр тяжести еще на одной грани и построим соответствующий отрезок, то он, в силу доказанного, также пересечет отрезок  $BO_1$  и притом в точке, которая разделит  $BO_1$  в отношении  $\frac{1}{3}$ , т.е. в точке  $O$ . Следовательно, все рассматриваемые отрезки пересекаются в точке  $O$ . Очевидно также, что точка  $O$  делит любой из них в отношении 1:3, что и требовалось доказать.

**469.** Проведем сначала одно вспомогательное рассуждение. Пусть  $PP_1$  и  $QQ_1$  — две скрещивающиеся прямые,  $A$ ,  $B$  и  $C$  — три точки на прямой  $QQ_1$ , причем точка  $B$  лежит между точками  $A$  и  $C$ ,  $A_1B_1C_1$  — основания перпендикуляров, опущенных из точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  на прямую  $PP_1$ . Обозначим через  $h_A$ ,  $h_B$ ,  $h_C$  расстояния точек  $A$ ,  $B$  и  $C$  от прямой  $PP_1$ . Докажем, что  $h_B$  меньше, по крайней мере, одного из расстояний  $h_A$  или  $h_C$ .

Для этого спроектируем изображенную на рис. 202 фигуру на плоскость  $\pi$ , перпендикулярную к прямой  $PP_1$ . Тогда прямая  $PP_1$  спроектируется в точку  $O$ , а отрезки  $AA_1$ ,  $BB_1$ ,

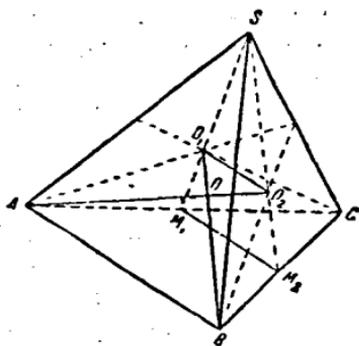


Рис. 201.



470. Вместо того чтобы сравнивать суммы плоских углов при вершинах  $S$  и  $S'$ , сравним между собой суммы плоских углов боковых граней обеих пирамид при каждой из трех вершин общего основания. Докажем, что каждая такая сумма углов внешней пирамиды больше соответствующей суммы углов внутренней. Докажем, например, что (рис. 204)

$$\angle ACS + \angle SCB > \angle ACS' + \angle S'CB. \quad (1)$$

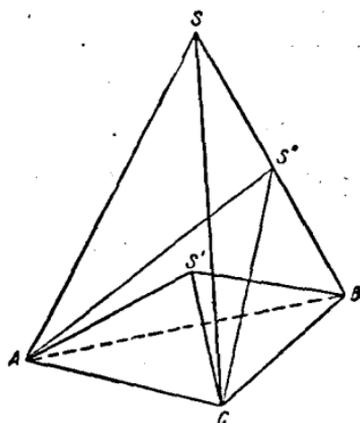


Рис. 204.

Из неравенства (1) (и ему аналогичных при вершинах  $A$  и  $B$ ) мы получим решение задачи. Действительно, сложив все три указанных неравенства, мы установим, что сумма  $\Sigma$  всех шести плоских углов боковых граней при основании внешней пирамиды больше соответствующей суммы  $\Sigma'$  для внутренней пирамиды:

$$\Sigma > \Sigma'. \quad (2)$$

Но интересующие нас в задаче величины дополняют  $\Sigma$  и  $\Sigma'$  до  $540^\circ (= 180^\circ \cdot 3)$  и, следовательно, для них имеет место неравенство противоположного смысла. Таким образом, остается доказать справедливость (1).

Продолжим плоскость  $ACS'$  до пересечения с внешней пирамидой. Рассматривая трехгранный угол  $CS'S''B$ , заключаем, что

$$\angle S'CS'' + \angle S''CB > \angle S'CB. \quad (3)$$

Прибавив к обеим частям неравенства  $\angle ACS'$ , получим:

$$\angle ACS'' + \angle S''CB > \angle ACS' + \angle S'CB. \quad (4)$$

Но для трехгранного угла  $CASS''$  имеем:

$$\angle ACS + \angle SCS'' > \angle ACS''. \quad (5)$$

Заменяя в неравенстве (4)  $\angle ACS''$  большей величиной,

согласно (5), получим:

$$\angle ACS + (\angle SCS' + \angle S'CB) > \angle ACS' + \angle S'CB,$$

т. е. неравенство (1).

471. Обозначим через  $O_1, O_2, O_3, O_4$  центры шаров и через  $P_{ik}$  — общую касательную плоскость для шаров с центрами  $O_i$  и  $O_k$  ( $i < k$ ). Таких плоскостей всего шест:  $P_{12}, P_{13}, P_{23}, P_{14}, P_{24}, P_{34}$ .

Сначала докажем, что плоскости  $P_{12}, P_{13}$  и  $P_{23}$  пересекаются по одной прямой. Действительно, каждая из этих плоскостей перпендикулярна к плоскости  $O_1O_2O_3$ , так как

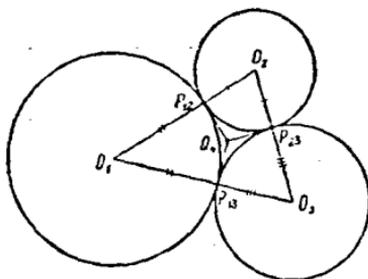


Рис. 205.

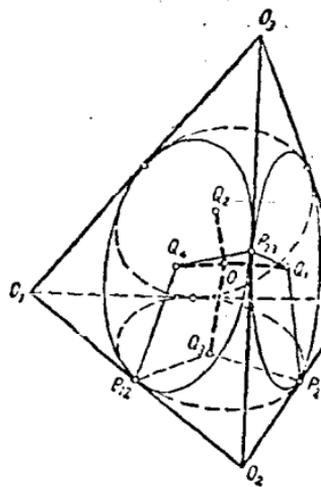


Рис. 206.

она перпендикулярна к линии центров разделяемых ею шаров, лежащей в этой плоскости.

Кроме того, легко видеть, что рассматриваемые плоскости (рис. 205) проходят через точку  $Q_4$  пересечения биссектрис  $\triangle O_1O_2O_3$ . Таким образом, плоскости  $P_{12}, P_{13}$  и  $P_{23}$  действительно пересекаются по некоторой прямой, которая, как мы попутно установили, перпендикулярна к плоскости шаров  $O_1O_2O_3$  и проходит через центр вписанной в треугольник  $O_1O_2O_3$  окружности. Обозначим эту прямую через  $L_1$ .

Совершенно так же доказывается, что плоскости  $P_{23}$  и  $P_{34}$  определяют общую им прямую  $L_2$ , перпендикулярную к плоскости треугольника  $O_2O_3O_4$  и проходящую через центр вписанной в него окружности и т. д. В результате мы приходим к следующей задаче (рис. 206): в каждую грань

угольной пирамиды  $O_1O_2O_3O_4$  вписана окружность и через ее центр проведен перпендикуляр к грани. Нужно доказать, что все четыре перпендикуляра  $L_1, L_2, L_3$  и  $L_4$  имеют общую точку, если известно, что точки касания двух окружностей с одним и тем же ребром совпадают.

Этот факт почти очевиден. Обозначим через  $O$  точку пересечения прямых  $L_1$  и  $L_4$ ; последние пересекаются, так как лежат в одной плоскости  $P_{1,4}$  и не параллельны. Докажем теперь, что прямые  $L_2$  и  $L_3$  также проходят через точку  $O$ . Действительно, точка  $O$  лежит на линии пересечения плоскостей  $P_{1,2}$  и  $P_{2,4}$ , так как прямая  $L_4$  принадлежит плоскости  $P_{1,2}$ , а прямая  $L_1$  — плоскости  $P_{2,4}$ . Но линия пересечения  $P_{1,2}$  и  $P_{2,4}$  есть прямая  $L_2$ . Следовательно,  $L_2$  проходит через точку  $O$ . Аналогично показываем, что прямая  $L_3$  проходит через точку  $O$ .

472. Если даны три точки  $A, B, C$ , не лежащие на одной прямой, то эти точки служат центрами трех шаров, попарно касающихся друг друга. Действительно, если  $P$  — точка пересечения биссектрис  $\triangle ABC$  и  $P_1, P_2, P_3$  — основания перпендикуляров, опущенных из  $P$  соответственно на стороны  $AB, BC$  и  $CA$ , то

$$AP_1 = AP_2, \quad BP_1 = BP_2, \quad CP_2 = CP_3,$$

и шары с центрами  $A, B, C$  и радиусами, соответственно равными

$$r_A = AP_1, \quad r_B = BP_2, \quad r_C = CP_3,$$

попарно касаются друг друга.

Пусть  $ABCD$  — данная пирамида (рис. 207). Рассмотрим три шара радиусов  $r_A, r_B, r_C$  с центрами в  $A, B, C$ , попарно касающихся друг друга. Обозначим через  $A_1, B_1$  и  $C_1$  точки, в которых поверхности шаров пересекаются с ребрами  $AD, BD$  и  $CD$ , и докажем, что  $A_1D = B_1D = C_1D$ .

По условию задачи

$$AD \perp BC = BD \perp AC.$$

По построению

$$\begin{aligned} AD &= r_A \perp A_1D; & BC &= r_B \perp r_C; \\ BD &= r_B \perp B_1D; & AC &= r_A \perp r_C. \end{aligned}$$

Подставив четыре последних выражения в предыдущее равенство, получим:

$$A_1D = B_1D.$$

Аналогично, используя равенство

$$BD + AC = CD + AB,$$

найдем:

$$B_1D = C_1D.$$

Следовательно, шар с центром  $D$  и радиусом

$$r_D = A_1D = B_1D = C_1D$$

касается каждого из первых трех шаров, а значит, все четыре построенных шара касаются попарно друг друга.

473. Обозначим радиусы шаров через  $r_1, r_2, r_3$  и пусть  $r_1 \geq r_2 \geq r_3$ . Проведем к двум шарам касательную плоскость. Кроме того, через центры этих шаров проведем

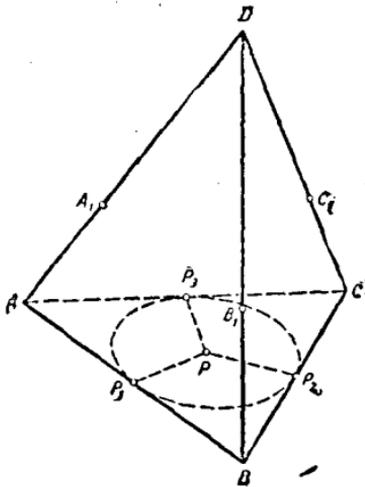


Рис. 207.

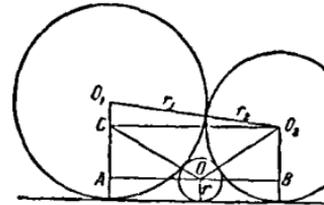


Рис. 208.

плоскость, перпендикулярную к касательной плоскости радиуса  $r$ , касающуюся двух попарно касавшихся в сечении больших кругов и их общей касательной прямой (рис. 208). Третий шар может, очевидно, касаться первых двух шаров и касающейся их плоскости, если он «не очень мал», а именно, если  $r_3 \geq r$ .

Рассматривая прямоугольные треугольники  $O_1CO_2$ ,  $O_1AO$  и  $O_2BO$ , получим:

$$\begin{aligned} \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - (r_1 - r_2)^2} &= \sqrt{(r_1 + r)^2 - (r_1 - r)^2} + \\ &+ \sqrt{(r_2 + r)^2 - (r_2 - r)^2} \end{aligned}$$

Из этого уравнения найдем:

$$r = \frac{r_1 r_2}{(\sqrt{r_1} + \sqrt{r_2})^2}.$$

Следовательно, радиусы шаров должны удовлетворять соотношению

$$r_1 \geq \frac{r_1 r_2}{(\sqrt{r_1} + \sqrt{r_2})^2}.$$

474. Пусть число боковых граней пирамиды равно  $n$ . Соединим произвольную точку  $O$ , взятую в плоскости ее основания, со всеми вершинами и рассмотрим  $n$  треугольных пирамид с общей вершиной в точке  $O$ . Очевидно, что объем  $V$  данной пирамиды равен сумме объемов получившихся треугольных пирамид. Имеем:

$$V = \frac{1}{3} S (r_1 + r_2 + \dots + r_n),$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  — расстояния от точки  $O$  до боковых граней, а  $S$  — площадь боковой грани.

Следовательно,  $r_1 + r_2 + \dots + r_n = \frac{3V}{S}$  есть величина постоянная, не зависящая от положения точки  $O$  в плоскости основания, что и требовалось доказать.

475. Рассмотрим две плоскости, заштрихованные на рис. 209, и треугольник  $ADE$  в плоскости  $P$ , проходящей через вершины  $A, D, H, E$  данного параллелепипеда. Плоскость  $P$  пересекает плоскость  $\triangle BCD$  по прямой  $KD$ , которая проходит через точку  $K$  пересечения диагоналей параллелограмма  $ABEC$ , и следовательно, отрезок  $KD$  есть медиана  $\triangle AED$ . Очевидно, что  $AO$  есть также медиана  $\triangle AED$ . Поэтому интересующая нас точка  $S$  есть точка пересечения медиан  $\triangle AED$  и, значит,

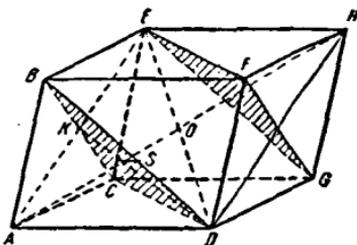


Рис. 209.

$$AS = \frac{2}{3} AO = \frac{1}{3} AH,$$

что и требуется.

476. Проведем указанную в задаче плоскость через точки  $B, D, F$  (рис. 210) и параллельную ей плоскость через вершины  $C, E, G$ . Обе плоскости образуют в пересечении с параллелепипедом различные и равные треугольники. Длину стороны каждого из этих треугольников обозначим через  $a$ . Если теперь, через середину одного из шести ребер, соединяющих вершины двух указанных треугольников, например через середину ребра  $BC$ , — провести плоскость, параллельную двум указанным плоскостям, то она даст в сечении параллелепипеда шестиугольник

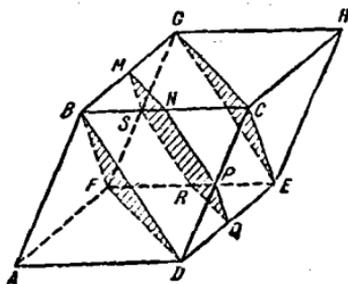


Рис. 210.

$MNPQRS$ , все стороны которого, очевидно, окажутся равными  $\frac{a}{2}$ . Заметим еще, что  $MN \parallel DF$  и  $NP \parallel BD$ . Поэтому  $\angle MNP$  дополняет  $\angle BDF$  до  $180^\circ$  и, следовательно,  $\angle MNP = 120^\circ$ . Аналогично устанавливаем, что и остальные углы шестиугольника равны  $120^\circ$ .

477. Пусть  $SABC$  — данный тетраэдр,  $P$  и  $Q$  — середины противоположных ребер  $AC$  и  $SB$ ,  $MPNQ$  — некоторое сечение тетраэдра, содержащее отрезок  $PQ$  (рис. 211). Рассмотрим плоское сечение  $SPBQ$ , которое, очевидно, разбивает тетраэдр на две равновеликие части. Задача будет решена, если мы докажем, что пирамиды  $SPQN$  и  $MPQB$  равновелики.

Опустим на плоскость  $SPBQ$  перпендикуляры из точек  $M$  и  $N$  на их основания обозначим соответственно через  $K$  и  $L$ . Так как треугольники  $PQB$  и  $SPQ$  равновелики для решения задачи достаточно показать, что  $LN = MK$ . Мы установим это равенство, доказав, что

$$MO = NO.$$

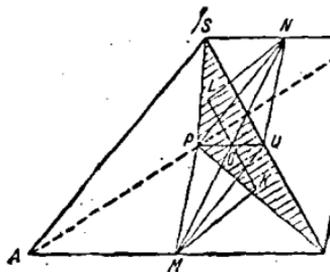


Рис. 211.

Рассмотрим с этой целью пару параллельных плоскостей, в которых лежат скрещивающиеся прямые  $SC$  и  $AB$  (рис. 212). Так как отрезок  $PQ$  соединяет середины отрезков  $AC$  и  $SB$ , то он, очевидно, лежит в плоскости, параллельной данным

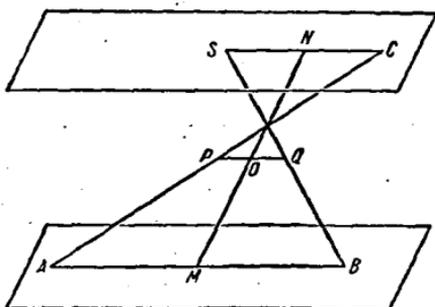


Рис. 212.

плоскостям и отстоящей от них на равном расстоянии. В силу этого отрезок  $MN$ , пересекаясь с отрезком  $PQ$ , разделится точкой пересечения пополам.

478. Пусть  $SABC$  — данная пирамида (рис. 213). Опустим из вершины  $S$  на грань  $ABC$  высоту  $SP$  и проведем, кроме того, из той же вершины высоты  $SD$ ,  $SE$  и  $SF$  остальных трех граней. Легко видеть, что треугольники  $SPD$ ,  $SPE$  и  $SPF$  в силу равенства углов  $SDP$ ,  $SEP$  и  $SFP$  равны между собой (ср. с задачей 420). Проведем далее через ребра  $AB$ ,  $BC$  и  $AC$  плоскости, делящие соответствующие двугранные углы пополам. Эти плоскости пересекаются в точке  $O$ , равноудаленной от всех четырех граней пирамиды и, следовательно, являющейся центром вписанного в пирамиду шара. Легко видеть, что в рассматриваемом случае в силу отмеченного равенства треугольников точка  $O$  окажется на высоте пирамиды  $SP$ . Повторяя рассуждения, мы установим, что все высоты пирамиды пересекаются в точке  $O$ .

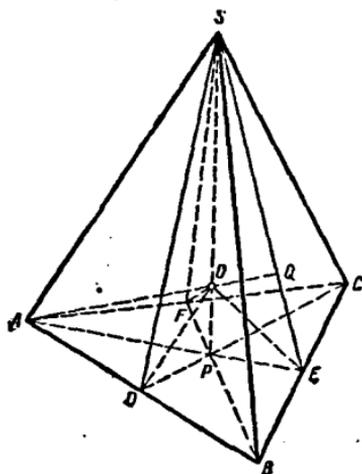


Рис. 213.

Используя этот факт, мы можем утверждать, что, например, треугольники  $APS$  и  $SPE$  лежат в одной плоскости следовательно, отрезки  $AP$  и  $PE$  расположены на одной прямой. Поэтому  $AE$  есть одновременно биссектриса и высота  $\triangle ABC$ . По аналогичной причине и остальные биссектрисы  $\triangle ABC$  являются его высотами. Следовательно  $\triangle ABC$  равносторонний. Повторяя рассуждение, мы увидим, что все грани пирамиды представляют собой равносторонние треугольники, что и завершает доказательство.

479. Пусть отрезок  $AB$  лежит в плоскости  $Q$ , а отрезок  $CD$  — в плоскости  $P$  и пусть  $P \parallel Q$  (рис. 214). Проведем через точку  $A$  прямую, параллельную  $CD$ , и отложим отрезок  $AA_1 = CD$ . На сторонах  $AB$  и  $AA_1$  построим параллелограмм  $ABB_1A_1$ . Аналогичное построение сделаем в плоскости  $P$ . Соединив  $A$  с  $C$ ,  $B$  с  $C_1$ ,  $A_1$  с  $D$  и  $B_1$  с  $D_1$ , получим параллелепипед  $ABB_1A_1DCC_1D_1$ . Рассматривая грань  $ACB$  в качестве основания пирамиды  $DACB$ , мы видим, что объем пирамиды равен  $\frac{1}{6}$  объема параллелепипеда. Так как, когда объем параллелепипеда сохраняется при перемещении отрезков (не изменяются площадь основания  $ABB_1A_1$  и высота — расстояние между плоскостями  $P$  и  $Q$ ), то сохраняется и объем пирамиды.

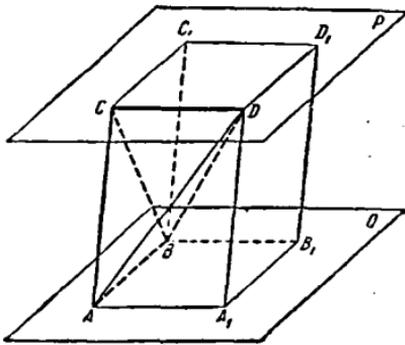


Рис. 214.

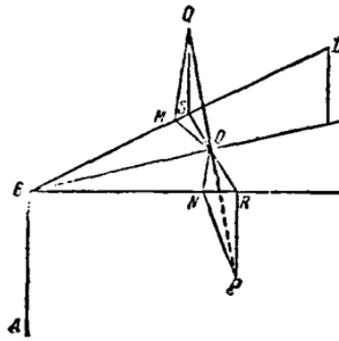


Рис. 215.

480. Пусть  $P$  и  $Q$  — точки пересечения данной прямой с гранями  $SBA$  и  $DBA$  двугранного угла (рис. 215). Проведем через ребро  $AB$  бисекторную плоскость  $ABE$ , а за

через точку  $O$  ее пересечения с прямой  $PQ$  проведем плоскость  $BCD$ , перпендикулярную к ребру  $AB$ . Пусть, далее,  $OM \perp BD$ ,  $ON \perp BC$  и пусть  $SR$  — проекция  $PQ$  на плоскость  $DBC$ , так что при этом  $QS \perp BD$ , а  $PR \perp BC$ . Если точки  $P$  и  $Q$  одинаково удалены от ребра, т. е.

$$BR = BS, \quad (1)$$

то треугольник  $BRS$  равнобедренный,  $SO = RO$  и, следовательно,  $QO = PO$  как наклонные, имеющие равные проекции. Учитывая еще, что по построению

$$MO = NO, \quad (2)$$

мы сможем заключить, что треугольники  $OMQ$  и  $ONP$  прямоугольные и равные. Отсюда следует равенство углов:

$$\angle MQO = \angle NPO. \quad (3)$$

Итак, в одну сторону утверждение доказано.

Если, наоборот, выполнено равенство углов (3), то в силу (2) имеет место равенство треугольников  $QMO$  и  $PNO$ . Вследствие этого  $QO = PO$  и, значит,  $SO = OR$ . Отсюда уже следует равенство (1).

**481.** Соединим точки  $B$  и  $C$ ,  $A$  и  $D$  отрезками прямых

(рис. 216). Через точку  $A$  проведем прямую параллельно  $MN$  до встречи в точке  $K$  с прямой, проходящей через  $B$  и  $N$ . Заметим, что  $AK = 2MN$ , так как  $MN$  — средняя линия в треугольнике  $ABK$ . Далее,  $\triangle BNC = \triangle KND$ , ибо  $BN = NK$ ,  $CN = ND$  и  $\angle BNC = \angle KND$ . Поэтому  $DK = BC$ . Из треугольника  $ADK$  следует:

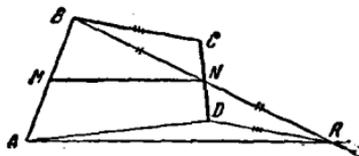


Рис. 216.

$$DK + AD > AK = 2MN$$

(здесь существенно, что точка  $D$  не лежит на прямой  $AK$ , иначе пришлось бы поставить знак  $\geq$ ). Итак,

$$BC + AD > 2MN,$$

что и требовалось доказать.

**482.** Пусть  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  — произвольные точки, лежащие на ребрах четырехгранного угла с вершиной  $E$  (рис. 217).

Докажем, например, что

$$\angle CED < \angle CEA + \angle AEB + \angle BED.$$

Проведем плоскость  $CEB$ . По свойству плоских углов трехгранного угла

$$\angle CED < \angle CEB + \angle BED$$

и по той же причине

$$\angle CEB < \angle CEA + \angle AEB.$$

Из неравенств (2) и (3) следует (1). Неравенство (1), так образом, доказано.

Легко понять, что наше рассуждение сохраняет силу в том случае, когда четырехгранный угол не является выпуклым, т. е. когда ребро  $ED$  оказывается по другую сторону плоскости  $CEB$ .

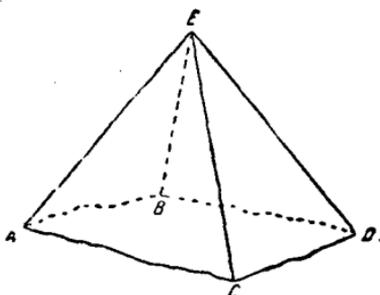


Рис. 217.

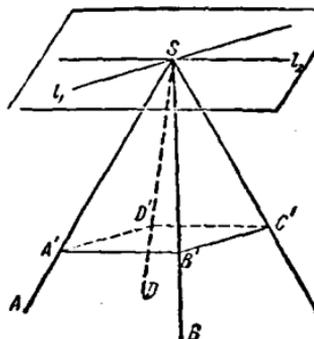


Рис. 218.

483. Пусть дан выпуклый четырехгранный угол с вершиной  $S$  (рис. 218). Продолжим плоскости  $BSC$  и  $ASD$  до их пересечения по прямой  $l_1$ . Плоскости  $ASB$  и  $DSC$  продолжим до их пересечения по прямой  $l_2$ . Прямые  $l_1$  и  $l_2$ , очевидно, не совпадают (в противном случае все грани при продолжении проходили бы через одну прямую). Обозначим через  $P$  плоскость, содержащую прямые  $l_1$  и  $l_2$ . Легко показать, используя выпуклость четырехгранного угла, что плоскость  $P$  имеет с данным углом лишь одну общую точку пересечения  $S$ , и что весь угол располагается по одну сторону от плоскости  $P$  (впрочем, этот факт почти очевиден). Покажем теперь, что всякая пересекающая угол плоскость, параллельная плоскости  $P$ , образует с ним в сечении параллелограмм. В самом деле

такая плоскость пересечет, в силу сказанного, все четыре ребра четырехгранного угла. Обозначив соответствующие точки пересечения через  $A', B', C', D'$ , заметим, что  $A'D' \parallel B'C'$ , так как оба эти отрезка порознь параллельны  $l$ ; по аналогичной причине  $A'B' \parallel D'C'$ .

Следовательно, четырехугольник  $A'B'D'C'$  — параллелограмм, что и требовалось доказать.

### 3. Геометрические места точек

484. Пусть  $P$  — одна из плоскостей, проходящих через данную точку  $A$ , а  $M$  — проекция данной точки  $B$  на плоскость  $P$ . Пусть, далее,  $C$  — середина отрезка  $AB$  (рис. 219). Так как треугольник  $AMB$  прямоугольный, то  $CM = \frac{1}{2} AB$ . Таким образом, все точки  $M$  находятся от точки  $C$  на одном и том же расстоянии  $\frac{1}{2} AB$  и, следовательно, расположены на сфере радиуса  $\frac{1}{2} AB$  с центром в точке  $C$ . Легко видеть, кроме того, что любая точка указанной сферы совпадает с одной из проекций точки  $B$ . Таким образом, искомое геометрическое место есть сфера с диаметром  $AB$ .

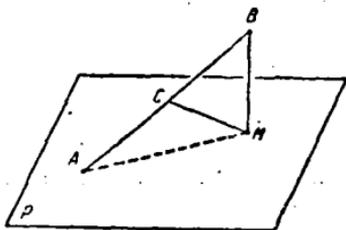


Рис. 219.

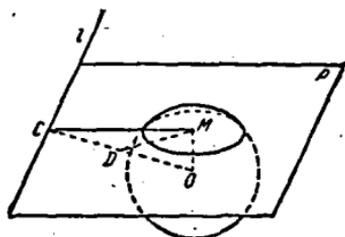


Рис. 220.

485. Пусть  $O$  — центр данного шара. Проведем через данную прямую  $l$  некоторую плоскость  $P$ , пересекающую сферу по окружности с центром в точке  $M$  (рис. 220). Как известно,  $OM \perp P$ . Проведем, далее, через точку  $O$  плоскость  $P_1$ , перпендикулярную к прямой  $l$ . Точку пересечения плоскости  $P_1$  и прямой  $l$  обозначим через  $C$ . Так как плоскости  $P_1$  и  $P$  перпендикулярны, то отрезок  $OM$  содержится в пло-



$AO_1 = \frac{a\sqrt{6}}{3}$ . Подставляя эти значения в равенство

$$OM \cdot AO_1 = OA \cdot AM$$

(мы пользуемся здесь тем, что  $\triangle OAM$  прямоугольный, и записываем двумя способами его площадь), получим:

$$OM \cdot a \frac{\sqrt{6}}{3} = Ra.$$

Отсюда

$$OM = \frac{\sqrt{6}}{2} R.$$

Таким образом, точка  $M$  лежит на указанной выше сфере. Вращая данный шар вместе с касательными  $AM$ ,  $CM$  и  $BM$  вокруг центра  $O$ , мы убедимся в том, что любая точка сферы принадлежит рассматриваемому геометрическому месту.

488. Данную точку пространства обозначим через  $A$ , точку пересечения прямых — через  $B$ , основание перпендикуляра, опущенного из  $A$  на плоскость, — через  $C$ . Возьмем, далее, любую прямую, проходящую через точку  $B$ , и опустим на нее перпендикуляр  $AD$  (рис. 222). Тогда по известной теореме  $CD \perp BD$ .

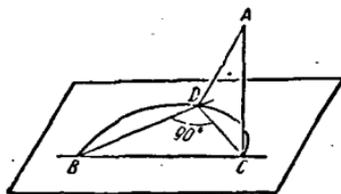


Рис. 222.

Следовательно, точка  $D$  лежит на окружности, диаметром которой является отрезок  $BC$ . Легко показать, что и, наоборот, любая точка указанной окружности есть основание перпендикуляра, опущенного из точки  $A$  на некоторую прямую рассматриваемого семейства. Поэтому искомое геометрическое место есть окружность с диаметром  $BC$ .

489. Возможны два случая. 1) Прямая  $AB$  не параллельна рассматриваемой плоскости  $P$ . Обозначим через  $D$  соответствующую точку пересечения  $AB$  и  $P$  (рис. 223). Пусть  $M$  — точка касания плоскости с одной из сфер рассматриваемой совокупности. Через прямые  $AB$  и  $DM$  проведем плоскость. Последняя пересечет сферу по окружности, касающейся прямой  $DM$  в точке  $M$ . По известному свойству касательной и

секущей, проведенных из одной точки к окружности, им

$$DB \cdot DA = DM^2.$$

Следовательно, отрезок  $DM$  имеет постоянную длину  $\sqrt{DB \cdot DA}$ , не зависящую от выбора сферы, и, значит,

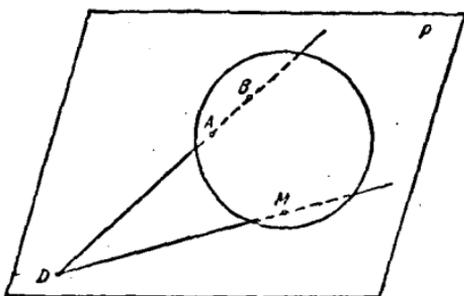


Рис. 223.

точки  $M$  лежат на окружности радиуса  $r = \sqrt{DB \cdot DA}$  с центром в точке  $D$ . Обозначим эту окружность через  $C$ .

Пусть теперь, наоборот,  $M$  есть некоторая точка окружности  $C$ ; докажем, что она принадлежит рассматриваемому геометрическому месту.

Проведем через точки  $A$ ,  $B$  и  $M$  вспомогательную окружность и центр ее обозначим через  $O$ , (рис. 224). Так

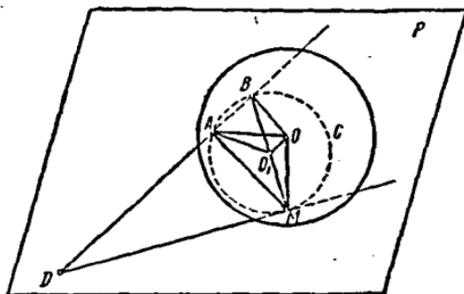


Рис. 224.

в наших условиях  $DB \cdot DA = DM^2$ , то прямая  $DM$  является касательной к этой окружности и, следовательно,  $OM \perp DM$ . Восставим теперь в точке  $M$  перпендикуляр к плоскости

а. в точке  $O_1$  — перпендикуляр к плоскости вспомогательной окружности. Эти два перпендикуляра лежат в плоскости, перпендикулярной к прямой  $DM$  в точке  $M$  и не параллельны (в противном случае точка  $O_1$ , а вместе с ней и точки  $A$  и  $B$  оказались бы в плоскости  $P$ ). Поэтому эти перпендикуляры пересекаются в некоторой точке  $O$ . Легко видеть, что  $OA = OB = OM$ , ибо проекции этих отрезков  $O_1A$ ,  $O_1B$  и  $O_1M$  равны между собой как радиусы окружности. Поэтому если построить сферу с центром в точке  $O$  и радиусом  $OM$ , то она коснется плоскости  $P$  и пройдет через точки  $A$  и  $B$ . Таким образом, обратно, любая точка окружности  $C$  принадлежит нашему геометрическому месту. Следовательно, искомое геометрическое место есть окружность  $C$ .

2) В случае, когда прямая  $AB$  параллельна плоскости, искомое геометрическое место представляет собой прямую, которая лежит в плоскости  $P$ , перпендикулярна к проекции отрезка  $AB$  на плоскость  $P$  и делит ее пополам.

490. Случай а). Пусть  $D$  — середина отрезка  $AB$  (рис. 225),  $C$  — подвижная точка,  $Q$  — центр тяжести  $\triangle ABC$ ,  $Q'$  — центр тяжести  $\triangle ASB$ . Так как точка  $Q$  делит отрезок  $DC$  в отношении 1:2, то геометрическое место этих точек есть, очевидно, луч, параллельный ребру  $SE$  и проходящий через точку  $Q'$  — центр тяжести  $\triangle ASB$ .

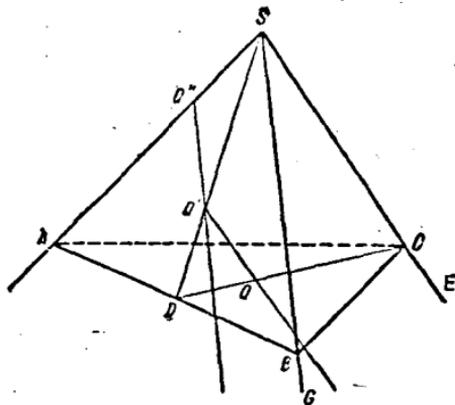


Рис. 225.

Случай б). Если теперь и точка  $B$  перемещается по ребру  $SG$ , то центры тяжести  $Q'$  треугольников  $ASB$  расположатся на луче, параллельном ребру  $SG$  и проходящем через точку  $Q''$ , которая делит отрезок  $AS$  в отношении 2:1, считая от  $A$  к  $S$ , а соответствующие каждому фиксированному положению точки  $B$  лучи, рассмотренные в случае а), заполняют сечение трехгранного угла плоскостью, проходящей через точку  $Q''$  параллельно ребрам  $SG$  и  $SE$ .

## 4. Наибольшие и наименьшие значения

491. Не нарушая общности, можно считать, что секущая плоскость пересекается с ребром куба  $CE$  (рис. 226). Легко видеть, что в сечении всегда получается некоторый параллелограмм  $AMBN$ . Площадь  $S$  параллелограмма может быть найдена по формуле

$$S = AB \cdot MK,$$

где через  $MK$  обозначен перпендикуляр, опущенный из точки  $M$  ребра  $CE$  на диагональ  $AB$ . Таким образом, площадь  $S$  будет наименьшей вместе с длиной отрезка  $MK$ .

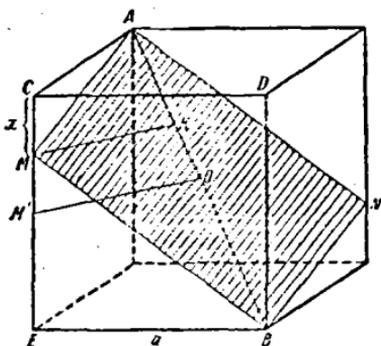


Рис. 226.

Но среди отрезков, соединяющих точки двух скрещивающихся прямых  $CE$  и  $AB$ , наименьшую длину имеет общий к ним перпендикуляр. Нетрудно сообразить, что общим перпендикуляром к указанным прямым является отрезок  $M'O$ , соединяющий середину ребра  $CE$  и диагонали  $AB$ . Действительно,  $\triangle AM'O$  равнобедренный и поэтому  $M'O \perp AB$ . Так как и  $\triangle COE$  равнобедренный, то  $M'O \perp CE$ . Таким образом, наименьшую площадь имеет сечение, делящее ребро пополам; соответствующая площадь

$$S = a\sqrt{3} \cdot \frac{a\sqrt{2}}{2} = \frac{a^2\sqrt{6}}{2}.$$

Эту же задачу можно решить и иначе, если воспользоваться следующей теоремой: квадрат площади плоского многоугольника равен сумме квадратов площадей его проекций на три взаимно-перпендикулярные плоскости. Эта теорема (с большого труда доказывается на основании формулы, по которой площадь проекции плоского многоугольника на плоскость равна площади многоугольника, умноженной на косинус угла между плоскостями (см. формулу (1) в решении задачи 419)).

Считая эту теорему доказанной, обозначим через  $x$  длину отрезка  $CM$  (см. рис. 226). Проекции интересующего

параллелограмма на плоскости  $ACD$ ,  $ECDB$  и  $BDN$  изображены в соответствующем порядке на рис. 227, а, б и в.

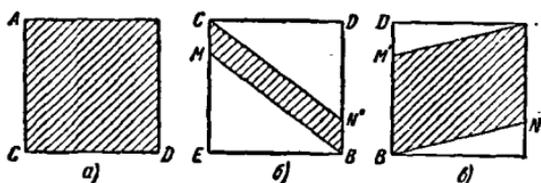


Рис. 227.

Площади проекций соответственно равны  $a^2$ ,  $ax$ ,  $a^2 - ax$ , так что в силу упомянутой теоремы

$$S^2 = (a^2)^2 + (ax)^2 + (a^2 - ax)^2 = 2a^2(x^2 - ax + a^2).$$

Представив квадратный трехчлен  $x^2 - ax + a^2$  в виде

$$\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}a^2,$$

находим (ср. (1), стр. 46), что наименьшее значение  $S^2$  будет иметь при  $x = \frac{a}{2}$ , а минимум площади равен

$$S_{\min} = \sqrt{2a^2 \cdot \frac{3}{4}a^2} = \frac{a^2 \sqrt{6}}{2}.$$

492. Четырехугольник  $MNKL$ , полученный в сечении пирамиды  $ABCD$  (рис. 228), есть параллелограмм, так как  $LK \parallel CD$  и  $MN \parallel CD$ ; следовательно,  $LK \parallel MN$  и, аналогично,  $LM \parallel KN$ . Если  $\angle LKN = \alpha$ , то площадь параллелограмма по известной формуле равна

$$S = KN \cdot KL \sin \alpha.$$

Так как  $\angle LKN$  равен углу между скрещивающимися прямыми  $AB$  и  $CD$ , то его синус есть величина постоянная для всех рассматриваемых параллельных сечений. Таким образом, площадь сечения зависит только от величины произведения  $KN \cdot KL$ . Обозначим длину отрезка  $AK$  через  $x$ . Тогда, в силу

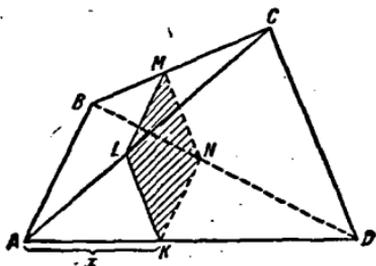


Рис. 228.

рассматриваемых параллельных сечений. Таким образом, площадь сечения зависит только от величины произведения  $KN \cdot KL$ . Обозначим длину отрезка  $AK$  через  $x$ . Тогда, в силу

подобия треугольников, имеем:

$$\frac{KN}{AB} = \frac{AD-x}{AD}; \quad \frac{KL}{CD} = \frac{x}{AD}.$$

Перемножив эти равенства, найдем:

$$KN \cdot KL = \frac{AB \cdot CD}{AD^2} (AD-x)x.$$

Так как  $\frac{AB \cdot CD}{AD^2}$  есть величина постоянная, то из предыдущей формулы следует, что интересующее нас произведение  $KN \cdot KL$  принимает наибольшее значение вместе с произведением  $(AD-x)x$ .

Рассматривая это произведение как квадратный трехчлен  $-x^2 + ADx$  и представляя его в виде

$$-\left(x - \frac{AD}{2}\right)^2 + \left(\frac{AD}{2}\right)^2,$$

убеждаемся в том, что наибольшее его значение достигается при  $x = \frac{AD}{2}$  (ср. (1), стр. 46).

---

## ТРИГОНОМЕТРИЯ

### 1. Преобразование выражений, содержащих тригонометрические функции

493. Так как по условию задачи  $\operatorname{ctg}(\alpha + \beta) = 0$ , то

$$\cos(\alpha + \beta) = 0. \quad (1)$$

Нужно доказать, что

$$\sin(\alpha + 2\beta) = \sin \alpha, \quad (2)$$

или

$$\sin(\alpha + 2\beta) - \sin \alpha = 0. \quad (3)$$

Применив формулу для разности синусов двух углов, преобразуем соотношение (3) к виду

$$2 \cos(\alpha + \beta) \sin \beta = 0. \quad (4)$$

Но из (1) следует (4), из (4) следует (3) и (2), что и требовалось доказать.

494. Рассмотрим разность

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) - 2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin(\alpha + \beta) \cos \alpha - 2 \sin \alpha \cos(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \cos(\alpha + \beta)}. \quad (1)$$

Достаточно показать, что при условии

$$3 \sin \beta = \sin(2\alpha + \beta) \quad (2)$$

эта разность равна нулю.

Пользуясь формулами, выражающими произведения тригонометрических функций через их суммы, преобразуем числитель дроби (1). Получим:

$$\begin{aligned} \sin(\alpha + \beta) \cos \alpha &= \frac{1}{2} [\sin \beta + \sin(2\alpha + \beta)], \\ 2 \sin \alpha \cos(\alpha + \beta) &= \sin(2\alpha + \beta) - \sin \beta. \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно,

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) - 2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{3 \sin \beta - \sin(2\alpha + \beta)}{2 \cos \alpha \cos(\alpha + \beta)}.$$

А из (4) в силу (2) следует равенство  $\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = 2 \operatorname{tg} \alpha$ .

495. Пользуясь формулой для  $\sin(\alpha + \beta)$ , преобразуем соотношение  $\sin \alpha = A \sin(\alpha + \beta)$  к виду

$$\sin \alpha (1 - A \cos \beta) = A \cos \alpha \sin \beta.$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A \sin \beta}{1 - A \cos \beta}$$

и, следовательно,

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{\frac{A \sin \beta}{1 - A \cos \beta} + \frac{\sin \beta}{\cos \beta}}{1 - \frac{A \sin \beta}{1 - A \cos \beta} \cdot \frac{\sin \beta}{\cos \beta}} = \frac{\sin \beta}{\cos \beta - A}.$$

496. Равенство, которое нужно доказать, можно представить в виде

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta} = \frac{m + n}{m - n} \operatorname{tg} \alpha.$$

Но левая часть этого соотношения равна  $\operatorname{tg}(\alpha + \beta)$ ; следовательно,

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{m + n}{m - n} \operatorname{tg} \alpha.$$

В соотношении (2) заменим тангенсы углов  $\alpha$  и  $\alpha + \beta$  через синусы и косинусы, приведем дроби к общему знаменателю и отбросим общий знаменатель. Получим:

$$m [\cos \alpha \sin(\alpha + \beta) - \sin \alpha \cos(\alpha + \beta)] - n [\sin \alpha \cos(\alpha + \beta) + \cos \alpha \sin(\alpha + \beta)] = 0,$$

или

$$m \sin \beta - n \sin(\alpha + 2\beta) = 0.$$

Так как соотношение (4) выполняется по условию задачи, имеет место (3), а следовательно, и (2).

Но из (2) следует (1), а из (1) следует соотношение

$$\frac{1 + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}}{m + n} = \frac{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}{m - n},$$

которое и нужно было доказать.

497. В силу формулы (12), приведенной на стр. 81, левая часть тождества равна

$$2 \sin \frac{\pi}{10} \sin \frac{3\pi}{10}. \quad (1)$$

Умножив и разделив (1) на  $2 \cos \frac{\pi}{10} \cos \frac{3\pi}{10}$  и пользуясь формулой для  $\sin 2\alpha$ , получим:

$$2 \sin \frac{\pi}{10} \sin \frac{3\pi}{10} = \frac{\sin \frac{\pi}{5} \sin \frac{3\pi}{5}}{2 \cos \frac{\pi}{10} \cos \frac{3\pi}{10}}.$$

Но

$$\cos \frac{\pi}{10} = \sin \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{10} \right) = \sin \frac{3\pi}{5},$$

а

$$\cos \frac{3\pi}{10} = \sin \left( \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{10} \right) = \sin \frac{\pi}{5}.$$

Следовательно, левая часть тождества равна  $\frac{1}{2}$ .

498. Умножив и разделив левую часть тождества на  $2 \sin \frac{\pi}{7}$  и пользуясь формулами, выражающими произведения тригонометрических функций через суммы, найдем:

$$\begin{aligned} \cos \frac{2\pi}{7} + \cos \frac{4\pi}{7} + \cos \frac{6\pi}{7} &= \\ &= \frac{2 \cos \frac{2\pi}{7} \sin \frac{\pi}{7} + 2 \cos \frac{4\pi}{7} \sin \frac{\pi}{7} + 2 \cos \frac{6\pi}{7} \sin \frac{\pi}{7}}{2 \sin \frac{\pi}{7}} = \\ &= \frac{\sin \frac{3\pi}{7} - \sin \frac{\pi}{7} + \sin \frac{5\pi}{7} - \sin \frac{3\pi}{7} + \sin \pi - \sin \frac{5\pi}{7}}{2 \sin \frac{\pi}{7}}. \end{aligned}$$

тсюда сразу следует, что рассматриваемая сумма равна  $-\frac{1}{2}$ .

499. Обозначив левую часть тождества через  $A$ , запишем  $A$  в виде

$$A = \frac{\sin 20^\circ \sin 40^\circ \sin 80^\circ}{\cos 20^\circ \cos 40^\circ \cos 80^\circ}.$$

Пользуясь формулами (13) и (15), приведенными в стр. 81, преобразуем числитель дроби (1):

$$\begin{aligned} \sin 20^\circ \sin 40^\circ \sin 80^\circ &= \frac{1}{2} (\cos 20^\circ - \cos 60^\circ) \sin 80^\circ = \\ &= \frac{1}{2} \left( \cos 20^\circ \sin 80^\circ - \frac{1}{2} \sin 80^\circ \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\sin 100^\circ + \sin 60^\circ}{2} - \frac{1}{2} \sin 80^\circ \right) = \end{aligned}$$

(мы воспользовались тем, что  $\sin 100^\circ = \sin 80^\circ$ ). Следовательно,

$$\sin 20^\circ \sin 40^\circ \sin 80^\circ = \frac{\sqrt{3}}{8}.$$

Знаменатель дроби (1) можно последовательно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} \cos 20^\circ \cos 40^\circ \cos 80^\circ &= \frac{2 \sin 20^\circ \cos 20^\circ \cos 40^\circ \cos 80^\circ}{2 \sin 20^\circ} = \\ &= \frac{\sin 40^\circ \cos 40^\circ \cos 80^\circ}{2 \sin 20^\circ} = \frac{\sin 80^\circ \cos 80^\circ}{4 \sin 20^\circ} = \frac{\sin 160^\circ}{8 \sin 20^\circ} = \\ &= \frac{\sin 20^\circ}{8 \sin 20^\circ} = \end{aligned}$$

Итак,

$$\cos 20^\circ \cos 40^\circ \cos 80^\circ = \frac{1}{8}.$$

Из (2) и (3) следует, что  $A = \sqrt{3}$ .

500. Сначала заметим, что

$$\operatorname{tg}^2 \frac{y}{2} = \frac{\sin^2 \frac{y}{2}}{\cos^2 \frac{y}{2}} = \frac{1 - \cos y}{1 + \cos y}.$$

Далее, в силу условий задачи  $\cos y = \frac{\cos z}{\cos x}$ . Следовательно,

$$\operatorname{tg}^2 \frac{y}{2} = \frac{\cos x - \cos z}{\cos x + \cos z} = \frac{2 \sin \frac{z+x}{2} \sin \frac{z-x}{2}}{2 \cos \frac{z+x}{2} \cos \frac{z-x}{2}} = \operatorname{tg} \frac{z+x}{2} \operatorname{tg} \frac{z-x}{2}.$$

501. Обозначив данную сумму через  $S$ , будем иметь:

$$S = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 2x} - \operatorname{tg}^2 2x - \frac{8 \cos^2 4x}{\sin 4x}.$$

Выразив  $\operatorname{tg}^2 2x$  по формуле (1) решения предыдущей задачи и подставив в  $S$ , получим:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1 + \cos 4x}{1 - \cos 4x} - \frac{1 - \cos 4x}{1 + \cos 4x} - \frac{8 \cos^2 4x}{\sin 4x} = \\ &= \frac{(1 + \cos 4x)^2 - (1 - \cos 4x)^2}{1 - \cos^2 4x} - \frac{8 \cos^2 4x}{\sin 4x} = \\ &= \frac{4 \cos 4x (1 - 2 \sin 4x \cos 4x)}{\sin^2 4x} = \frac{4 \cos 4x}{\sin^2 4x} (\sin 4x - \cos 4x)^2 = \\ &= \frac{8 \cos 4x}{\sin^2 4x} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 4x - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos 4x \right)^2 = \frac{8 \cos 4x \sin^2 \left( x - \frac{\pi}{4} \right)}{\sin^2 4x}. \end{aligned}$$

502. Пользуясь формулами для сумм синусов, представим левую часть тождества в следующем виде:

$$\begin{aligned} -2 \sin \frac{b+c}{2} \cos \left( a + \frac{b+c}{2} \right) + 2 \sin \frac{b+c}{2} \cos \frac{b-c}{2} &= \\ = 2 \sin \frac{b+c}{2} \left[ \cos \frac{b-c}{2} - \cos \left( a + \frac{b+c}{2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Отсюда, применив формулу для разности косинусов, легко получим, что левая часть тождества совпадает с правой.

503. По условию задачи,  $0 < a < \pi$ ,  $0 < b < \pi$ ,  $0 < c < \pi$  и  $a + b + c = \pi$ . Поэтому

$$\operatorname{tg} \left( \frac{b+c}{2} \right) = \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{a}{2} \right) = \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{a}{2}}. \quad (1)$$

С другой стороны,

$$\operatorname{tg} \left( \frac{b+c}{2} \right) = \frac{\operatorname{tg} \frac{b}{2} + \operatorname{tg} \frac{c}{2}}{1 - \operatorname{tg} \frac{b}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{c}{2}}. \quad (2)$$

Приравняв правые части равенств (1) и (2) и освободившись от знаменателей, получим требуемое равенство.

504. а) Легко проверить, что  $B + C \neq \frac{\pi}{2} + k\pi$  ( $k$  — любое целое число), так как в противном случае условие задачи не выполняется ни при каком  $A$ . Поэтому  $\operatorname{tg} B \operatorname{tg} C \neq 1$  и из исходного соотношения получим:

$$\operatorname{tg} A = -\frac{\operatorname{tg} B + \operatorname{tg} C}{1 - \operatorname{tg} B \cdot \operatorname{tg} C} = -\operatorname{tg}(B + C) = \operatorname{tg}(-B - C)$$

откуда  $A = k\pi - B - C$  и  $A + B + C = k\pi$ .

б) Используя вторую часть условий задачи, составим систему уравнений

$$A + B + C = k\pi, \quad 2A = B + C, \quad C = A + B,$$

из которой найдем:

$$A = \frac{2}{3}C, \quad B = \frac{C}{3}, \quad C = \frac{k\pi}{2}.$$

Из (2) видно, что нужные нам значения углов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  получаются при наименьшем возможном положительном значении  $k$ . Это значение  $k$  равно 2 (при  $k=1$ ,  $C = \frac{\pi}{2}$  и не существует).

Следовательно,

$$A = \frac{2}{3}\pi, \quad B = \frac{\pi}{3}, \quad C = \pi.$$

505. Используя тождество задачи 502, получим:

$$\begin{aligned} \sin \alpha + \sin \beta + \sin \gamma &= 4 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\beta + \gamma}{2} \sin \frac{\gamma + \alpha}{2} = \\ &= 4 \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \end{aligned}$$

так как

$$\frac{\alpha + \beta}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2}, \quad \frac{\beta + \gamma}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}, \quad \frac{\alpha + \gamma}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}$$

506. Рассмотрим тождество

$$\begin{aligned} \cos(x+y+z) &= \cos(x+y)\cos z - \sin(x+y)\sin z = \\ &= \cos x \cos y \cos z - \sin x \sin y \cos z - \sin x \sin z \cos y - \\ &\quad - \sin y \sin z \cos x = \\ &= \cos x \cos y \cos z (1 - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y - \operatorname{tg} y \operatorname{tg} z - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} z). \end{aligned}$$

Так как  $x+y+z = \frac{\pi}{2}k$ , то

$$\begin{aligned} S &= \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y + \operatorname{tg} y \operatorname{tg} z + \operatorname{tg} z \operatorname{tg} x = \\ &= 1 - \frac{\cos(x+y+z)}{\cos x \cos y \cos z} = 1 - \frac{\cos \frac{\pi}{2}k}{\cos x \cos y \cos z}. \end{aligned}$$

Если  $k$  нечетно, то  $S$  не зависит от  $x, y, z$ , и  $S=1$ .

507. Преобразуем левую часть тождества следующим образом:

$$\begin{aligned} \sin 2n\alpha + \sin 2n\beta + \sin 2n\gamma &= \\ &= 2 \sin n(\alpha + \beta) \cos n(\alpha - \beta) + 2 \sin n\gamma \cos n\gamma = \\ &= 2 \sin n(\pi - \gamma) \cos n(\alpha - \beta) + 2 \sin n\gamma \cos n[\pi - (\alpha + \beta)] = \\ &= (-1)^{n+1} \sin n\gamma \cdot 2 [\cos n(\alpha - \beta) - \cos n(\alpha + \beta)] = \\ &= (-1)^{n+1} \cdot 4 \sin n\alpha \sin n\beta \sin n\gamma. \end{aligned}$$

Мы воспользовались формулами:

$$\begin{aligned} \text{а) } \sin(n\pi - \varphi) &= (-1)^{n+1} \sin \varphi, \\ \text{б) } \cos(n\pi - \psi) &= (-1)^n \cos \psi. \end{aligned}$$

508. Обозначив левую часть тождества через  $S$ , покажем, что левая часть тождества совпадает с правой.

$$\begin{aligned} S &= \sin^3 x \cos^5 x = (\sin x \cos x)^3 \cos^2 x = \\ &= \frac{1}{16} \sin^2 2x (1 + \cos 2x) = \frac{1}{16} \sin^2 2x + \frac{1}{32} \sin^2 2x \sin 4x. \end{aligned}$$

Но

$$\sin^2 2x = \frac{1 - \cos 4x}{2};$$

следовательно,

$$S = \frac{1}{32} (1 - \cos 4x) \sin 2x + \frac{1}{64} (1 - \cos 4x) \sin 4x.$$

Преобразуя произведение  $\sin 2x \cos 4x$  в сумму, получим:

$$S = \frac{1}{32} \sin 2x - \frac{1}{32} \left( \frac{\sin 6x - \sin 2x}{2} \right) + \frac{1}{64} \sin 4x - \\ - \frac{1}{128} \sin 8x = \frac{3}{64} \sin 2x + \frac{1}{64} \sin 4x - \frac{1}{64} \sin 6x - \frac{1}{128} \sin 8x$$

Итак, левая часть тождества равна правой, что и требовалось доказать.

## 2. Тригонометрические уравнения и системы уравнений

509. Данное уравнение теряет смысл при  $x = k\pi$ . При  $x \neq k\pi$  исходное уравнение можно представить в виде

$$\cos^3 x + \cos^2 x = \sin^3 x + \sin^2 x.$$

Переносим все члены уравнения в левую часть и разделив левую часть на множители, получаем:

$$(\cos x - \sin x)(\sin^2 x + \cos^2 x + \sin x \cos x + \sin x + \cos x) = 0$$

Отсюда вытекают две возможности:

$$a) \quad \sin x - \cos x = 0, \quad \sin \left( x - \frac{\pi}{4} \right) = 0;$$

тогда

$$x_1 = \frac{\pi}{4} + k\pi.$$

$$b) \quad \sin^2 x + \cos^2 x + \sin x \cos x + \sin x + \cos x = 0.$$

Положив  $\sin x + \cos x = t$ , будем иметь

$$t^2 = (\sin x + \cos x)^2 = 1 + 2 \sin x \cos x,$$

$$\text{откуда } \sin x \cos x = \frac{t^2 - 1}{2}.$$

Уравнение (2) преобразуется к виду

$$1 + \frac{t^2 - 1}{2} + t = 0, \quad \text{откуда } t = -1.$$

Следовательно,  $\sin x + \cos x = -1$  или

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin x + \frac{1}{\sqrt{2}} \cos x = -\frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \sin \left( x + \frac{\pi}{4} \right) = -\frac{1}{\sqrt{2}}$$

откуда

$$x_2 = -\frac{\pi}{2} + 2k\pi$$

и

$$x_3 = (2m + 1)\pi. \quad (5)$$

Но значения  $x$ , содержащиеся в формуле (5), не являются корнями исходного уравнения, так как при  $x = k\pi$  уравнение теряет смысл. Следовательно, уравнение имеет корни, определяемые формулами (1) и (4).

510. Перепишем уравнение в виде

$$\left(\frac{1}{2} \sin 2x + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2x\right)^2 - \frac{1}{4} \cos\left(2x - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{5}{4} = 0$$

или

$$4 \cos^2\left(2x - \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(2x - \frac{\pi}{6}\right) - 5 = 0. \quad (1)$$

Отсюда

$$\cos\left(2x - \frac{\pi}{6}\right) = -1, \quad x = -\frac{5\pi}{12} + k\pi.$$

Второй корень квадратного уравнения (1), равный  $\frac{5}{4}$ , не дает решений, так как  $|\cos \alpha| \leq 1$ .

511. Запишем уравнение следующим образом:

$$2 \left( \frac{\sin 3x}{\cos 3x} - \frac{\sin 2x}{\cos 2x} \right) = \frac{\sin 2x}{\cos 2x} \left( \frac{\sin 2x}{\cos 2x} \cdot \frac{\sin 3x}{\cos 3x} + 1 \right).$$

Приводя дроби к общему знаменателю и отбрасывая его, получим уравнение

$$2(\sin 3x \cos 2x - \cos 3x \sin 2x) \cos 2x = \\ = \sin 2x (\sin 2x \sin 3x + \cos 2x \cos 3x).$$

Но выражение, стоящее в скобке слева, равно  $\sin x$ , а стоящее в скобке справа равно  $\cos x$ . Поэтому мы приходим к уравнению

$$2 \sin x (\cos 2x - \cos^2 x) = -2 \sin^3 x = 0,$$

откуда  $x = k\pi$ .

512. Пользуясь формулами

$$\sin 3x = 3 \sin x - 4 \sin^3 x, \quad \sin 2x = 2 \sin x \cos x,$$

преобразуем уравнение к виду

$$\sin 3x + \sin 2x - a \sin x = \sin x (4 \cos^2 x + 2 \cos x - a - 1) = 0.$$

Отсюда следует, что либо  $\sin x = 0$  и тогда  $x = k\pi$ ,

$$4 \cos^2 x + 2 \cos x - a - 1 = 0$$

и тогда

$$\cos x = \frac{-1 \pm \sqrt{4a+5}}{4}.$$

Подкоренное выражение здесь должно быть неотрицательным, следовательно,  $a \geq -\frac{5}{4}$ . Кроме того, необходимо, что

$$\left| \frac{-1 \pm \sqrt{4a+5}}{4} \right| \leq 1.$$

Если  $\cos x = \frac{-1 + \sqrt{4a+5}}{4}$ , то  $-3 \leq \sqrt{4a+5} \leq 1$ , т. е.  $a \leq 5$ .

Если  $\cos x = \frac{-1 - \sqrt{4a+5}}{4}$ , то  $-4 \leq \sqrt{4a+5} \leq 1$ , т. е.  $a \leq 1$ . Итак, заданное уравнение имеет следующие корни:

а) Если  $a < -\frac{5}{4}$  или  $a > 5$ , то  $x = k\pi$ , так как в этом случае уравнение (1) не имеет вещественных корней.

б) Если  $-\frac{5}{4} \leq a \leq 1$ , то  $x_1 = k\pi$ ,  $x_2 = 2k\pi \pm \arccos \frac{-1 + \sqrt{4a+5}}{4}$  и  $x_3 = 2k\pi \pm \arccos \frac{-1 - \sqrt{4a+5}}{4}$ .

в) Если  $1 < a \leq 5$ , то  $x_1 = k\pi$  и  $x_2 = 2k\pi \pm \arccos \frac{-1 + \sqrt{4a+5}}{4}$ .

513. Из данного уравнения находим:

$$m \cos 2\pi x = \frac{\pi}{6} + k\pi.$$

Подставив сюда  $x = \pm \frac{1}{6}$ , получим

$$m = 2 \left( \frac{\pi}{6} + k\pi \right), \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots$$

Внося это выражение в (1), приходим к уравнению

$$\cos 2\pi x = \frac{1}{2}.$$

Решая последнее уравнение, получим:

$$2\pi x = \pm \frac{\pi}{3} + 2k\pi, \quad x = k \pm \frac{1}{6} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

514. Приведем к общему знаменателю дроби, стоящие в правой части уравнения, и применив формулу

$$a^5 - b^5 = (a - b)(a^4 + a^3b + a^2b^2 + ab^3 + b^4),$$

получим:

$$\sin x - \cos x = \sin x \cos x (\sin^4 x + \sin^3 x \cos x + \sin^2 x \cos^2 x + \sin x \cos^3 x + \cos^4 x) (\sin x - \cos x).$$

Отсюда следует, что либо

$$\sin x - \cos x = 0, \quad (1)$$

либо

$$\sin x \cos x (\sin^4 x + \sin^3 x \cos x + \sin x \cos^3 x + \cos^4 x + \sin^2 x \cos^2 x) - 1 = 0. \quad (2)$$

Преобразуем теперь уравнение (2), пользуясь тем, что

$$\sin^4 x + \cos^4 x = (\sin^2 x + \cos^2 x)^2 - 2 \sin^2 x \cos^2 x,$$

а

$$\sin^3 x \cos x + \cos^3 x \sin x = \sin x \cos x.$$

Положив еще в уравнении (2)  $\sin x \cos x = y$ , запишем уравнение (2) в виде

$$y^5 - y^2 - y + 1 = 0 \quad (3)$$

или (после разложения левой части на множители)

$$(y - 1)^2 (y + 1) = 0.$$

Если  $y = 1$ , т. е.  $\sin x \cos x = 1$ , то  $\sin 2x = 2$ , что невозможно. Если же  $y = -1$ , то  $\sin 2x = -2$ , что также невозможно.

Итак, уравнение (2) не имеет корней. Следовательно, корни исходного уравнения суть корни уравнения (1), т. е.

$$x = \frac{\pi}{4} + \pi n.$$

515. Преобразуем данное уравнение, умножая обе части его на  $32 \sin \frac{\pi x}{31}$ . Применяв несколько раз формулу  $\sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \sin 2\alpha$ , получим:

$$\sin \frac{32}{31} \pi x = \sin \frac{\pi x}{31}$$

или

$$\sin \frac{\pi x}{2} \cos \frac{33}{62} \pi x = 0.$$

Отсюда находим две серии корней:

$$x_1 = 2n, \quad x_2 = \frac{31}{33}(2n + 1) \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Так как в процессе решения производилось умножение обеих частей данного уравнения на множитель  $32 \sin \frac{\pi x}{31}$ , который может обращаться в нуль, то уравнение (1) может иметь корни, являющиеся посторонними для исходного уравнения. Посторонними корнями будут те и только те корни уравнения

$$\sin \frac{\pi x}{31} = 0,$$

которые не удовлетворяют исходному уравнению.

Корни уравнения (2) даются формулой

$$x = 31k \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

и, как легко видеть, не удовлетворяют исходному уравнению. Поэтому из найденной серии корней уравнения (1) следует исключить все те, которые имеют вид (3). Для корней первой серии это приводит к равенству  $2n = 31k$ , возможно только при четном  $k$ , т. е. при  $k = 2l$  и  $n = 31l$  ( $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Для корней второй серии аналогично получено равенство  $\frac{31}{33}(2n + 1) = 31k$  или  $2n + 1 = 33k$ , возможно только при нечетном  $k$ , т. е. при  $k = 2l + 1$  и  $n = 33l + 16$  ( $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Итак, корни исходного уравнения таковы:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 2n, \quad \text{где } n \neq 31l, \\ x_2 &= \frac{31}{33}(2n + 1), \quad \text{где } n \neq 33l + 16, \end{aligned} \right\} l = 0, \pm 1, \pm 2,$$

516. Правая часть уравнения теряет смысл при  $x = \frac{\pi}{2}$  и при  $x = \frac{\pi}{2} + m\pi$ , так как при  $x = 2l\pi$  не определена функция  $\operatorname{ctg} \frac{x}{2}$ , при  $x = (2l + 1)\pi$  не определена функ

$\operatorname{tg} \frac{x}{2}$ , а при  $x = \frac{\pi}{2} + m\pi$  знаменатель правой части обращается в нуль. При  $x \neq k\pi$  имеем:

$$\operatorname{tg} \frac{x}{2} - \operatorname{ctg} \frac{x}{2} = \frac{\sin^2 \frac{x}{2} - \cos^2 \frac{x}{2}}{\sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2}} = -\frac{2 \cos x}{\sin x}.$$

Следовательно, при  $x \neq k\pi$  и  $x \neq \frac{\pi}{2} + m\pi$  ( $k, m$  — любые целые числа) правая часть уравнения равна  $-2 \sin x \cos x$ .

Левая часть уравнения не имеет смысла при  $x = \frac{\pi}{2} + k\pi$  и  $x = \frac{\pi}{4} + l \cdot \frac{\pi}{2}$  ( $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), а при прочих значениях равна  $-\operatorname{tg} x$ , так как

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) \operatorname{tg} \left( x + \frac{\pi}{4} \right) &= \operatorname{tg} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) \operatorname{ctg} \left[ \frac{\pi}{2} - \left( x + \frac{\pi}{4} \right) \right] = \\ &= -\operatorname{tg} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) \operatorname{ctg} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) = -1 \end{aligned}$$

Итак, если  $x \neq k\pi$ ,  $x \neq \frac{\pi}{2} + m\pi$  и  $x \neq \frac{\pi}{4} + l \cdot \frac{\pi}{2}$ , то исходное уравнение имеет вид

$$\operatorname{tg} x = 2 \sin x \cos x.$$

Это уравнение имеет корни

$$x = k\pi \text{ и } x = \frac{\pi}{4} + l \cdot \frac{\pi}{2}.$$

Отсюда следует, что исходное уравнение не имеет корней.

**517.** Пользуясь формулой для суммы кубов двух чисел, преобразуем левую часть уравнения к виду

$$\begin{aligned} (\sin x + \cos x)(1 - \sin x \cos x) &= \\ &= \left( 1 - \frac{1}{2} \sin 2x \right) (\sin x + \cos x). \end{aligned}$$

Исходное уравнение распадается на два уравнения:

$$1 - \frac{1}{2} \sin 2x = 0, \quad (1)$$

$$\sin x + \cos x = 1. \quad (2)$$

Уравнение (1) не имеет корней, а уравнение (2) можно писать в виде

$$\sin\left(x + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

откуда

$$x_1 = 2\pi n$$

и

$$x_2 = \frac{\pi}{2} + 2\pi n \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

518. Положив  $\sin x - \cos x = t$  и используя тождество  $(\sin x - \cos x)^2 = 1 - 2 \sin x \cos x$ , запишем исходное уравнение в виде

$$t^2 - 12t + 11 = 0.$$

Это уравнение имеет корни  $t_1 = 11$ ,  $t_2 = 1$ . Но  $t = \sin x - \cos x = \sqrt{2} \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right)$  и, следовательно,  $|t| \leq \sqrt{2}$ . Так как уравнение

$$\sqrt{2} \sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) = 11$$

не имеет решений, то исходное уравнение равносильно уравнению

$$\sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Ответ:  $x_1 = \pi + 2k\pi$ ,  $x_2 = \frac{\pi}{2} + 2k\pi$ .

519. Воспользуемся формулой

$$\cos 2\alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}.$$

Из этой формулы в силу условий задачи следует, что

$$\cos 2\alpha = \frac{2 - a \operatorname{tg} \alpha}{a \operatorname{tg} \alpha} = -1 + \frac{2}{a \operatorname{tg} \alpha}.$$

Решив уравнение  $\operatorname{tg}^2 \alpha - a \operatorname{tg} \alpha + 1 = 0$ , найдем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4}}{2}.$$

Следовательно,  $|a| \geq 2$ , и так как по условию  $a > 0$ , то  $a \geq 2$ .

Если  $\frac{\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{2}$ , то  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{a + \sqrt{a^2 - 4}}{2}$ , и из (1) после простых преобразований получим:

$$\cos 2\alpha = -\frac{\sqrt{a^2 - 4}}{a}.$$

Если же  $0 < \alpha < \frac{\pi}{4}$ , то  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4}}{2}$ , и тогда

$$\cos 2\alpha = \frac{\sqrt{a^2 - 4}}{a}.$$

520. Применив формулу  $\cos^2 \varphi = \frac{1 + \cos 2\varphi}{2}$ , запишем уравнение в виде

$$\cos 2(\alpha + x) + \cos 2(\alpha - x) = 2a - 2$$

или

$$\cos 2\alpha \cos 2x = a - 1.$$

Тогда

$$\cos 2x = \frac{a - 1}{\cos 2\alpha}.$$

Но, с другой стороны,

$$\cos 2x = \frac{\operatorname{ctg}^2 x - 1}{\operatorname{ctg}^2 x + 1}.$$

Следовательно,

$$\operatorname{ctg} x = \pm \sqrt{\frac{a - 1 + \cos 2\alpha}{1 - a + \cos 2\alpha}}.$$

Так как  $|\cos 2x| \leq 1$ , то возможные значения  $\alpha$  определяются неравенством  $|\cos 2\alpha| \geq |a - 1| = b$ , откуда

$$-\frac{\arccos b}{2} + \frac{k\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{k\pi}{2} + \frac{\arccos b}{2} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

521. Данное уравнение можно записать в виде

$$3 \left( \frac{\cos 2x}{\sin 2x} - \frac{\cos 3x}{\sin 3x} \right) = \frac{\sin 2x}{\cos 2x} + \frac{\cos 2x}{\sin 2x}$$

или

$$\frac{3 \sin x}{\sin 2x \sin 3x} = \frac{1}{\sin 2x \cos 2x}. \quad (1)$$

Заметим, что это уравнение имеет смысл, если  
 $\sin 2x \neq 0$ ,  $\sin 3x \neq 0$ ,  $\cos 2x \neq 0$ .

Для тех  $x$ , при которых уравнение (1) имеет смысл:

$$3 \sin x \cos 2x = \sin 3x,$$

или

$$\sin x (3 - 4 \sin^2 x - 3 \cos 2x) = 0,$$

или

$$2 \sin^3 x = 0.$$

Так как последнее уравнение равносильно уравнению  $\sin x = 0$  то ввиду сделанного выше замечания исходное уравнение решений не имеет.

522. Исходное уравнение можно записать в виде  
 $\sin \alpha + [\sin (2\varphi + \alpha) - \sin (2\varphi - \alpha)] = \sin (\varphi + \alpha) - \sin (\varphi - \alpha)$   
 или после преобразований в виде

$$\sin \alpha + 2 \sin \alpha \cos 2\varphi = 2 \sin \alpha \cos \varphi.$$

Пусть  $\sin \alpha \neq 0$  (в противном случае имеет место тождество)  
 Тогда

$$1 + \cos 2\varphi - 2 \cos \varphi = 0, \quad 4 \cos^2 \varphi - 2 \cos \varphi - 1 = 0,$$

$$\cos \varphi = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{4}.$$

Так как угол  $\varphi$  лежит в третьей четверти, то  $\cos \varphi < 0$   
 Следовательно,

$$\cos \varphi = \frac{1 - \sqrt{5}}{4}.$$

523. Преобразуем левую часть исходного равенства  
 помощью формулы  $1 + \cos 2x = 2 \cos^2 x$ . Получим:

$$1 + \cos 2x + \cos x + \sin 2x + \sin x = \\ = \cos x (1 + 2 \cos x) + \sin x (1 + 2 \cos x) = 0$$

Отсюда либо  $1 + 2 \cos x = 0$ , либо  $\sin x + \cos x = 0$ .

Если  $1 + 2 \cos x = 0$ , то  $\cos x = -\frac{1}{2}$  и

$$\operatorname{tg} 2x = \frac{\sin 2x}{\cos 2x} = \frac{2 \sin x \cos x}{\cos^2 x - \sin^2 x} = \pm \sqrt{3}.$$

Если  $\sin x + \cos x = 0$ , то  $\operatorname{tg} x = -1$  и  $\operatorname{tg} 2x$  не существует.  
 Ответ:  $\operatorname{tg} 2x = \pm \sqrt{3}$ .

**524.** Данное уравнение теряет смысл, когда  $\cos x = 0$ ; поэтому можно считать, что  $\cos x \neq 0$ . Заметив, что правая часть уравнения равна  $3 \sin x \cos x + 3 \cos^2 x$ , и разделив обе части на  $\cos^2 x$ , получим:

$$\operatorname{tg}^2 x (\operatorname{tg} x + 1) = 3 (\operatorname{tg} x + 1),$$

или

$$(\operatorname{tg}^2 x - 3) (\operatorname{tg} x + 1) = 0.$$

Это уравнение равносильно исходному и имеет следующие решения:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) } \operatorname{tg} x = -1, \quad x = -\frac{\pi}{4} + k\pi, \\ \text{б) } \operatorname{tg} x = \sqrt{3}, \quad x = \frac{\pi}{3} + k\pi, \\ \text{в) } \operatorname{tg} x = -\sqrt{3}, \quad x = -\frac{\pi}{3} + k\pi \end{array} \right\} (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

**525.** Можно считать, что  $a^2 + b^2 \neq 0$ , так как в противном случае уравнение принимает вид  $c = 0$  и не позволяет найти  $\sin x$  и  $\cos x$ . Известно, что если  $a^2 + b^2 \neq 0$ , то всегда существует угол  $\varphi$ ,  $0 \leq \varphi < 2\pi$ , такой, что

$$\sin \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (1)$$

Разделив данное уравнение почленно на  $\sqrt{a^2 + b^2}$  и используя (1), получим равносильное уравнение

$$\sin(x + \varphi) = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (2)$$

Так как всегда  $|\sin(x + \varphi)| \leq 1$ , то это уравнение имеет решения тогда и только тогда, когда  $|c| \leq \sqrt{a^2 + b^2}$  или когда  $c^2 \leq a^2 + b^2$ . Это и есть условие разрешимости задачи. Далее, находим:

$$\cos(x + \varphi) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(x + \varphi)} = \pm \frac{\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (3)$$

Заметив, что

$$\begin{aligned} \sin x &= \sin(x + \varphi - \varphi) = \sin(x + \varphi) \cos \varphi - \cos(x + \varphi) \sin \varphi, \\ \cos x &= \cos(x + \varphi - \varphi) = \cos(x + \varphi) \cos \varphi + \sin(x + \varphi) \sin \varphi, \end{aligned}$$

и подставив в правую часть выражения (1), (2) и (3), окончательно получим два решения:

$$а) \sin x = \frac{bc - a\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a^2 + b^2},$$

$$\cos x = \frac{ac + b\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a^2 + b^2};$$

$$б) \sin x = \frac{bc + a\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a^2 + b^2},$$

$$\cos x = \frac{ac - b\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a^2 + b^2}.$$

526. Так как левая часть уравнения равна

$$\begin{aligned} 2 - (7 + \sin 2x)(\sin^2 x - \sin^4 x) &= \\ &= 2 - (7 + \sin 2x)\sin^2 x \cos^2 x = \\ &= 2 - (7 + \sin 2x)\frac{1}{4}\sin^2 2x, \end{aligned}$$

то уравнение можно записать в виде

$$\sin^2 2x + 7 \sin^2 2x - 8 = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет очевидный корень  $\sin 2x = 1$ . Два других его корня находятся из уравнения

$$\sin^2 2x + 8 \sin 2x + 8 = 0. \quad (2)$$

Они равны

$$-4 + 2\sqrt{2} \text{ и } -4 - 2\sqrt{2}.$$

Оба эти значения не годятся, так как они по абсолютной величине больше единицы. Следовательно, корни исходного уравнения суть корни уравнения  $\sin 2x = 1$ .

$$\text{Ответ: } x = \frac{\pi}{4} + k\pi.$$

527. Применяв формулу перехода от одной системы логарифмов к другой:

$$\lg_{\frac{1}{2}} a = \frac{\lg_4 a}{\lg_{\frac{1}{2}} 4} = \lg_4 \frac{1}{a^2},$$

преобразуем данное уравнение к виду

$$(\sin^2 x + 5 \sin x \cos x + 5)^2 = 9.$$

Полученное уравнение распадается на два:

$$\sin^2 x + 5 \sin x \cos x + 2 = 0. \quad (1)$$

$$\sin^2 x + 5 \sin x \cos x + 8 = 0. \quad (2)$$

Уравнение (1) имеет корни  $\operatorname{tg} x = -1$  и  $\operatorname{tg} x = -\frac{2}{3}$ , откуда

$$x_1 = -\frac{\pi}{4} + \pi n, \quad x_2 = -\operatorname{arctg} \frac{2}{3} + \pi n.$$

Уравнение (2) не имеет вещественных решений.

528. Используя условие задачи, находим:

$$\cos x = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{1 + \cos \alpha \cos \beta}. \quad (1)$$

Подставив  $\cos x$  из (1) в тождество

$$\operatorname{tg}^2 \frac{x}{2} = \frac{1 - \cos x}{1 + \cos x},$$

получим:

$$\operatorname{tg}^2 \frac{x}{2} = \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \frac{x}{2} = \pm \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

529. Перепишем уравнение следующим образом:

$$\frac{1}{2} \cos 7x + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 7x = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 5x + \frac{1}{2} \sin 5x,$$

или

$$\sin \frac{\pi}{6} \cos 7x + \cos \frac{\pi}{6} \sin 7x = \sin \frac{\pi}{3} \cos 5x + \cos \frac{\pi}{3} \sin 5x,$$

т. е.

$$\sin \left( \frac{\pi}{6} + 7x \right) = \sin \left( \frac{\pi}{3} + 5x \right).$$

Но  $\sin \alpha = \sin \beta$  тогда и только тогда, когда либо  $\alpha - \beta = 2k\pi$ , либо  $\alpha + \beta = (2m + 1)\pi$  ( $k, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Следовательно,

$$\frac{\pi}{6} + 7x - \frac{\pi}{3} - 5x = 2k\pi$$

или

$$\frac{\pi}{6} + 7x + \frac{\pi}{3} + 5x = (2m + 1)\pi.$$

Таким образом, корнями уравнения будут:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\pi}{12}(12k + 1), \\ x &= \frac{\pi}{24}(4m + 1) \end{aligned} \right\} (k, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

530. Уравнение записываем в виде

$$6(\operatorname{tg} x + \operatorname{ctg} 3x) = \operatorname{tg} 2x + \operatorname{ctg} 3x,$$

после чего преобразуем следующим образом:

$$6 \left( \frac{\sin x}{\cos x} + \frac{\cos 3x}{\sin 3x} \right) = \frac{\sin 2x}{\cos 2x} + \frac{\cos 3x}{\sin 3x};$$

$$6 \cdot \frac{\sin x \sin 3x + \cos x \cos 3x}{\cos x \sin 3x} = \frac{\sin 2x \sin 3x + \cos 2x \cos 3x}{\cos 2x \sin 3x};$$

$$6 \cdot \frac{\cos(3x - x)}{\cos x \sin 3x} = \frac{\cos(3x - 2x)}{\cos 2x \sin 3x};$$

$$6 \cos^2 2x = \cos^2 x; \quad 6 \cos^2 2x = \frac{1 + \cos 2x}{2};$$

$$12 \cos^2 2x - \cos 2x - 1 = 0.$$

Решив последнее уравнение, найдем:

$$\cos 2x = \frac{1 \pm 7}{24},$$

откуда

$$1) \cos 2x = \frac{1}{3}, \quad x = \pm \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{3} + k\pi;$$

$$2) \cos 2x = -\frac{1}{4}, \quad x = \pm \frac{1}{2} \arccos \left(-\frac{1}{4}\right) + k\pi.$$

В процессе решения было произведено умножение обеих частей уравнения на  $\cos x \cos 2x \sin 3x$ . Но легко видеть, что ни при одном из найденных значений  $x$  это произведение обращается в нуль. Следовательно, все найденные значения для  $x$  являются корнями исходного уравнения.

531. Заметив, что  $(b \cos x + a)(b \sin x + a) \neq 0$  (в противном случае уравнение теряет смысл), освобождаемся от знаменателей. В результате получаем:

$$\begin{aligned} ab \sin^2 x + (a^2 + b^2) \sin x + ab &= \\ &= ab \cos^2 x + (a^2 + b^2) \cos x + \end{aligned}$$

откуда

$$(a^2 + b^2)(\sin x - \cos x) - ab(\sin^2 x - \cos^2 x) = 0,$$

и уравнение распадается на два:

$$1^\circ. \sin x = \cos x, \text{ откуда } x = \frac{\pi}{4} + 2k\pi,$$

и

$$2^\circ. \sin x + \cos x = \frac{a^2 + b^2}{ab}.$$

Но последнее уравнение не имеет решений, так как  $\frac{a^2 + b^2}{|ab|} \geq 2$ , в то время как

$$\begin{aligned} |\sin x + \cos x| &= \sqrt{2} \left| \sin x \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \cos x \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right| = \\ &= \sqrt{2} \left| \sin \left( x + \frac{\pi}{4} \right) \right| \leq \sqrt{2}. \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } x = \frac{\pi}{4} + 2k\pi.$$

532. Используя формулы

$$\sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}},$$

приведем данное соотношение  $\sin \alpha + \cos \alpha = \frac{\sqrt{7}}{2}$  к виду

$$(2 + \sqrt{7}) \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} - 4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - (2 - \sqrt{7}) = 0.$$

Разрешая это уравнение относительно  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , получим:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{3}{2 + \sqrt{7}} = \sqrt{7} - 2 > 0,6$$

и

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{7} - 2}{3} < 0,3.$$

Проверим, удовлетворяют ли найденные значения  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$  условиям задачи.

$$\text{Так как } 0 < \frac{\alpha}{2} < \frac{\pi}{8}, \text{ то } 0 < \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < \operatorname{tg} \frac{\pi}{8}.$$

Но

$$\operatorname{tg} \frac{\pi}{8} = \frac{\sin \frac{\pi}{8}}{\cos \frac{\pi}{8}} = \sqrt{\frac{1 - \cos \frac{\pi}{4}}{1 + \cos \frac{\pi}{4}}} = \sqrt{2} - 1,$$

и поэтому  $\operatorname{tg} \frac{\pi}{8} < 0,5$ . Итак,  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < 0,5$ . Следовательно, значение  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{7} - 2$  не удовлетворяет условию задачи.

$$\text{Ответ: } \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{7} - 2}{3}.$$

533. Выражая  $\sin 2x$  через  $\operatorname{tg} x$  по формуле  $\sin 2x = \frac{2 \operatorname{tg} x}{1 + \operatorname{tg}^2 x}$ , преобразуем уравнение к виду

$$t^3 - 2t^2 + 3t - 2 = 0,$$

где  $t = \operatorname{tg} x$ . Разлагая левую часть уравнения на множители, получим

$$(t - 1)(t^2 - t + 2) = 0.$$

Уравнение  $t^2 - t + 2 = 0$  не имеет действительных корней. Следовательно,

$$\operatorname{tg} x = 1, \quad x = \frac{\pi}{4} + k\pi \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

534. Так как  $\cos x = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{x}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{x}{2}}$ , то, положив  $\operatorname{tg} \frac{x}{2} = t$ , по-

репишем данное уравнение в виде  $2t^3 - t^2 + 2t - 3 = 0$ , или  $2(t^3 - 1) - (t^2 - 2t + 1) = 0$ , или

$$(t - 1)(2t^2 + t + 1) = 0.$$

Уравнение  $2t^2 + t + 1 = 0$  не имеет действительных корней.

Следовательно,  $\operatorname{tg} \frac{x}{2} = 1$ ,  $x = \frac{\pi}{2} + 2k\pi$ .

535. Представим уравнение в виде

$$1 + \frac{1}{\sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2}} = -\frac{1}{2 \cos^2 \frac{x}{2}}.$$

После приведения к общему знаменателю получим:

$$2 \sin \frac{x}{2} \cos^2 \frac{x}{2} + 2 \cos \frac{x}{2} = -\sin \frac{x}{2}. \quad (1)$$

Разделим обе части уравнения (1) на  $\cos \frac{x}{2}$  и положим  $\operatorname{tg} \frac{x}{2} = t$ . Тогда получим:

$$\frac{2t}{1+t^2} + 2 = -t,$$

откуда

$$t^3 + 2t^2 + 3t + 2 = 0, \text{ или } (t+1)(t^2 + t + 2) = 0.$$

Уравнение  $t^2 + t + 2 = 0$  не имеет действительных корней. Следовательно,

$$\operatorname{tg} \frac{x}{2} = -1, \quad x = -\frac{\pi}{2} + 2\pi.$$

536. Преобразуем уравнение к виду

$$2 + 2(\cos x - \sin x) - 5 \sin x \cos x = 0. \quad (1)$$

Положим  $\cos x - \sin x = t$ ; тогда  $t^2 = 1 - 2 \sin x \cos x$ , и уравнение (1) примет вид

$$5t^2 + 4t - 1 = 0. \quad (2)$$

Полученное уравнение имеет корни  $-1$  и  $\frac{1}{5}$ .

Если  $\cos x - \sin x = -1$ , то

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cos x - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin x = -\frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \cos \left( x + \frac{\pi}{4} \right) = -\frac{1}{\sqrt{2}},$$

$$x = -\frac{\pi}{4} + 2k\pi \pm \frac{3}{4}\pi.$$

Если  $\cos x - \sin x = \frac{1}{5}$ , то

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cos x - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin x = \frac{1}{5\sqrt{2}}, \quad \cos \left( x + \frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{5\sqrt{2}},$$

$$x = -\frac{\pi}{4} \pm \arccos \frac{1}{5\sqrt{2}} + 2\pi.$$

537. Воспользуемся формулой  $\cos 2x = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 x}{1 + \operatorname{tg}^2 x}$  и положим  $\operatorname{tg} x = t$ . Тогда данное уравнение примет вид  $(1 - t) \left[ 1 - \frac{1 + t}{2(1 + t^2)} \right] = 0$ , или

$$(t - 1)(2t^2 - t + 1) = 0.$$

Отсюда  $\operatorname{tg} x = 1$ ,  $x = \frac{\pi}{4} + \pi n$ .

538. Так как  $\sin 2x = \frac{2 \operatorname{tg} x}{1 + \operatorname{tg}^2 x}$ , то уравнение можно представить в виде

$$\operatorname{ctg} x - \frac{4 \operatorname{tg} x}{1 + \operatorname{tg}^2 x} = 1. \quad (1)$$

Положив здесь  $\operatorname{tg} x = t$ , получим уравнение

$$t^3 + 3t^2 + t - 1 = 0, \quad (2)$$

или после разложения левой части на множители уравнения

$$(t + 1) \left( t - \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \right) \left( t + \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \right) = 0.$$

Если  $\operatorname{tg} x = -1$ , то  $x = -\frac{\pi}{4} + \pi n$ ;

если  $\operatorname{tg} x = -\frac{1 + \sqrt{5}}{2}$ , то  $x = -\operatorname{arctg} \frac{1 + \sqrt{5}}{2} + \pi n$ ;

если  $\operatorname{tg} x = \frac{\sqrt{5} - 1}{2}$ , то  $x = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{5} - 1}{2} + \pi n$ .

539. Применяя формулу

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)],$$

преобразуем уравнение к виду  $\cos(2x - \beta) = 0$ , откуда

$$x = \pm \frac{\pi}{4} + k\pi + \frac{\beta}{2}, \quad \operatorname{tg} x = \operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} \pm \frac{\pi}{4} \right).$$

540. Запишем данное уравнение в виде

$$(1 + k) \cos x \cos(2x - \alpha) = \cos(x - \alpha) + k \cos 2x \cos(x - \alpha). \quad (1)$$

Так как

$$\cos x \cos (2x - \alpha) = \frac{1}{2} [\cos (3x - \alpha) + \cos (x - \alpha)],$$

$$\cos (x - \alpha) \cos 2x = \frac{1}{2} [\cos (3x - \alpha) + \cos (x + \alpha)],$$

то уравнение (1) примет вид

$$k [\cos (x - \alpha) - \cos (x + \alpha)] = \cos (x - \alpha) - \cos (3x - \alpha)$$

или

$$k \sin x \sin \alpha = \sin (2x - \alpha) \sin x. \quad (2)$$

Уравнение (2) распадается на два:

а)  $\sin x = 0$ ; тогда  $x = k\pi$ ;

б)  $\sin (2x - \alpha) = k \sin \alpha$ ; тогда

$$x = \frac{\alpha}{2} + (-1)^n \cdot \frac{1}{2} \arcsin (k \sin \alpha) + \frac{\pi}{2} n,$$

при этом  $k$  и  $\alpha$  должны быть связаны условием

$$|k \sin \alpha| \leq 1.$$

541. Так как числа  $a, b, c, d$  являются последовательными членами арифметической прогрессии, то можно положить  $b = a + r, c = a + 2r, d = a + 3r$  ( $r$  — разность прогрессии). Пользуясь формулой

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos (\alpha - \beta) - \cos (\alpha + \beta)],$$

представим уравнение в виде

$$\cos (2a + r)x - \cos (2a + 5r)x = 0,$$

или

$$\sin (2a + 3r)x \cdot \sin 2rx = 0,$$

откуда

$$x_1 = \frac{k\pi}{2a + 3r}, \quad x_2 = \frac{k\pi}{2r}.$$

Написанные формулы имеют смысл, так как

$$2a + 3r = b + c > 0 \text{ и } r \neq 0.$$

542. Пользуясь тождеством

$$\cos^4 x = \left( \frac{1 + \cos 2x}{2} \right)^2 = \frac{1}{8} (1 + 3 \cos 2x + 3 \cos^2 2x + \cos^3 2x)$$

и формулой

$$\cos 6x = 4 \cos^3 2x - 3 \cos 2x,$$

приведем уравнение к виду

$$4 \cos^2 2x + 5 \cos 2x + 1 = 0.$$

Тогда

а)  $\cos 2x = -1$ ,  $x = \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi$ ;

б)  $\cos 2x = -\frac{1}{4}$ ,  $x = \pm \frac{1}{2} \arccos\left(-\frac{1}{4}\right) + k\pi$ .

543. Используя тождество

$$\begin{aligned} \sin^4 \frac{x}{3} + \cos^4 \frac{x}{3} &= \\ &= \left( \sin^2 \frac{x}{3} + \cos^2 \frac{x}{3} \right)^2 - 2 \sin^2 \frac{x}{3} \cos^2 \frac{x}{3} = \\ &= 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \frac{2x}{3}. \end{aligned}$$

преобразуем уравнение к виду

$$1 - \frac{1}{2} \sin^2 \frac{2x}{3} = \frac{5}{8}, \text{ или } \sin^2 \frac{2x}{3} = \frac{3}{4},$$

откуда

$$\sin \frac{2x}{3} = \pm \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad x = \frac{3n \pm 1}{2} \pi \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

544. Применяя формулы

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \text{ и } \cos 2\alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1,$$

представим уравнение в виде

$$(1 - \cos 2x)^2 + 3 \cos 2x + 2(2 \cos^2 2x - 1) + 1 = 0,$$

или

$$7 \cos^2 2x - \cos^3 2x = 0,$$

откуда

$$\cos 2x = 0, \quad x = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2}.$$

545. Из формул для  $\sin 3x$  и  $\cos 3x$  найдем:

$$\cos^3 x = \frac{\cos 3x + 3 \cos x}{4}, \quad \sin^3 x = \frac{3 \sin x - \sin 3x}{4}.$$

Следовательно, уравнение можно представить в виде

$$\cos 3x (\cos 3x + 3 \cos x) + \sin 3x (3 \sin x - \sin 3x) = 0,$$

или

$$3 (\cos 3x \cos x + \sin 3x \sin x) + \cos^2 3x - \sin^2 3x = 0,$$

или

$$3 \cos 2x + \cos 6x = 0. \quad (1)$$

Но так как  $\cos^2 2x = \frac{\cos 6x + 3 \cos 2x}{4}$ , то уравнение (1) примет вид

$$4 \cos^2 2x = 0,$$

откуда

$$\cos 2x = 0, \quad x = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2} n.$$

546. Используя тождество  $(\sin^2 x + \cos^2 x)^2 = 1$ , получим:

$$\sin^4 x + \cos^4 x = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2x,$$

откуда

$$\sin^8 x + \cos^8 x = \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2x\right)^2 - \frac{1}{8} \sin^4 2x = \frac{17}{32},$$

$$1 - \sin^2 2x + \frac{1}{8} \sin^4 2x = \frac{17}{32}, \quad \sin^4 2x - 8 \sin^2 2x + \frac{15}{4} = 0.$$

Решая полученное биквадратное уравнение, найдем:

$$\sin^2 2x = 4 \pm \frac{7}{2}, \quad \sin^2 2x = \frac{1}{2}, \quad 2x = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2};$$

отсюда

$$x = \frac{2k+1}{8} \pi.$$

547. Заменяя  $\sin^2 x$  и  $\cos^2 x$  соответственно через  $\frac{1 - \cos 2x}{2}$  и  $\frac{1 + \cos 2x}{2}$ , перепишем уравнение следующим образом:

$$\left(\frac{1 - \cos 2x}{2}\right)^2 + \left(\frac{1 + \cos 2x}{2}\right)^2 = \frac{29}{16} \cos^4 2x,$$

или

$$(1 - \cos 2x)^5 + (1 + \cos 2x)^5 = 58 \cos^4 2x.$$

Положив  $\cos 2x = y$ , после простых преобразований приходим к биквадратному уравнению относительно  $y$ :

$$24y^4 - 10y^2 - 1 = 0.$$

Это уравнение имеет только два вещественных корня  $y_{1,2} = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$ . Следовательно,  $\cos 2x = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$ , откуда  $x = \frac{\pi}{8}(2k \pm 1)$ , где  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

548. Положим  $\sin x = a$ ,  $\sin 2x = b$ ,  $\sin 3x = c$ . Используя формулы разложения суммы и разности кубов на множители, находим:

$$\begin{aligned} (a + b + c)^3 - a^3 - b^3 - c^3 &= \\ &= (b + c)[(a + b + c)^2 + a(a + b + c) + a^2] - \\ &- (b + c)(b^2 - bc + c^2) = (b + c) \cdot 3(a^2 + ab + bc + ac) = \\ &= 3(a + b)(b + c)(a + c) \end{aligned}$$

В силу этого преобразования заданное уравнение эквивалентно уравнению

$$3(\sin x + \sin 2x)(\sin 2x + \sin 3x)(\sin x + \sin 3x) = 0.$$

По формулам разложения суммы синусов в произведение получаем:

$$\begin{aligned} \sin x + \sin 2x &= 2 \sin \frac{3x}{2} \cos \frac{x}{2}, \\ \sin 2x + \sin 3x &= 2 \sin \frac{5x}{2} \cos \frac{x}{2}, \\ \sin x + \sin 3x &= 2 \sin 2x \cos x. \end{aligned}$$

Подставив найденные значения в предыдущее уравнение и сократив на числовой множитель, приходим к уравнению

$$\sin \frac{3x}{2} \sin 2x \sin \frac{5x}{2} \cos x \cos^2 \frac{x}{2} = 0.$$

Приравнивая нулю каждый из сомножителей, получим пять серий решений:

$$1) x = \frac{2n_1}{3} \pi; \quad 2) x = \frac{n_2}{2} \pi; \quad 3) x = \frac{2n_3}{5} \pi;$$

$$4) x = \frac{2n_4 + 1}{2} \pi; \quad 5) x = (2n_5 + 1) \pi,$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$  — любые целые числа.

Заметив, что решения серий 4) и 5) содержатся в серии 2), окончательно получим следующие три серии решений:

$$1) x = \frac{2n_1}{3} \pi; \quad 2) x = \frac{n_2}{2} \pi; \quad 3) x = \frac{2n_3}{5} \pi,$$

где  $n_1, n_2, n_3$  — любые целые числа.

549. Первое решение. При  $n=1$  уравнение превращается в тождество. Если  $n > 1$ , то из тождества

$$1 = (\sin^2 x + \cos^2 x)^n = \sin^{2n} x + C_n^1 \sin^{2(n-1)} x \cos^2 x + \dots \\ \dots + C_n^{n-1} \sin^2 x \cos^{2(n-1)} x + \cos^{2n} x$$

в силу данного уравнения получаем:

$$C_n^1 \sin^{2(n-1)} x \cos^2 x + \dots + C_n^{n-1} \sin^2 x \cos^{2(n-1)} x = 0.$$

Следовательно, либо  $\sin^2 x = 0$ , либо  $\cos^2 x = 0$  и  $x = \frac{\pi}{2} k$ .

Второе решение. Очевидно, уравнение удовлетворится, если  $x$  принимает значения, кратные  $\frac{\pi}{2}$ , т. е. если  $x = \frac{\pi}{2} k$  ( $k$  — целое число). Покажем, что уравнение  $\sin^{2n} x + \cos^{2n} x = 1$  не имеет других корней. Пусть  $x_0 \neq k \cdot \frac{\pi}{2}$ ;

тогда  $\sin^2 x_0 < 1$  и  $\cos^2 x_0 < 1$ , откуда следует, что при  $n > 1$  будет  $\sin^{2n} x_0 < \sin^2 x_0$  и  $\cos^{2n} x_0 < \cos^2 x_0$  и, значит,  $\sin^{2n} x_0 + \cos^{2n} x_0 < \sin^2 x_0 + \cos^2 x_0 = 1$ . Этим доказательство завершается.

550. Так как  $|\cos \alpha| \leq 1$ ,  $\sin \alpha \geq -1$ , то

$$|\cos 4x - \cos 2x| \leq 2, \quad \sin 3x + 5 \geq 4.$$

Итак, левая часть уравнения не превосходит 4, правая часть не меньше 4. Следовательно,  $|\cos 4x - \cos 2x| = 4$  (и тогда либо  $\cos 4x = -1$  и  $\cos 2x = 1$ , либо  $\cos 4x = 1$  и  $\sin 2x = -1$ ) и  $\sin 3x = -1$ . Рассмотрим возможные случаи

$$\begin{aligned} \text{а) } \cos 4x &= -1, & x &= \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{4}\right)\pi; \\ \cos 2x &= 1, & x &= \pi k; \\ \sin 3x &= -1, & x &= -\frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}l. \end{aligned}$$

Общих корней нет.

$$\begin{aligned} \text{б) } \cos 4x &= 1, & x &= \frac{\pi n}{2}; \\ \cos 2x &= -1, & x &= \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi; \\ \sin 3x &= -1, & x &= -\frac{\pi}{6} + \frac{2}{3}\pi l = \frac{4l-1}{6}\pi. \end{aligned}$$

Общие корни:  $x = \left(2m + \frac{1}{2}\right)\pi$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

551. Преобразуем уравнение к виду

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2}} \sin x + \frac{1}{\sqrt{2}} \cos x &= \frac{1}{2 \sin x \cos x}, \\ \sin \left(x + \frac{\pi}{4}\right) &= \frac{1}{\sin 2x} \end{aligned}$$

или

$$\sin \left(x + \frac{\pi}{4}\right) \sin 2x = 1.$$

Так как  $|\sin \alpha| \leq 1$ , то (1) имеет место, если либо

$$\sin \left(x + \frac{\pi}{4}\right) = -1 \text{ и } \sin 2x = -1,$$

либо

$$\sin \left(x + \frac{\pi}{4}\right) = 1 \text{ и } \sin 2x = 1.$$

Но первые два уравнения не имеют общих корней, а вторые два уравнения имеют общие корни  $x = \frac{\pi}{4} + 2k\pi$ . Следовательно, данное уравнение имеет корни  $x = \frac{\pi}{4} + 2k\pi$ .

552. Разделив данное уравнение почленно на 2 и заметив, что  $\frac{1}{2} = \cos \frac{\pi}{3}$  и  $\frac{\sqrt{3}}{2} = \sin \frac{\pi}{3}$ , получим равносильное уравнение

$$\sin \left( x + \frac{\pi}{3} \right) \sin 4x = 1.$$

Полученное равенство возможно лишь в том случае, когда  $\sin \left( x + \frac{\pi}{3} \right) = \pm 1$  и  $\sin 4x = \pm 1$ , откуда

$$x = -\frac{\pi}{3} \pm \frac{\pi}{2} + 2\pi \quad \text{и} \quad x = \frac{1}{4} \left( \pm \frac{\pi}{2} + 2m\pi \right),$$

где  $n, m$  — целые числа. Приравняв оба значения, придем после сокращения на  $\pi$  к равенству

$$-\frac{1}{3} \pm \frac{1}{2} + 2n = \pm \frac{1}{8} + \frac{m}{2},$$

или после умножения на 24

$$12m - 48n = -8 \pm 9.$$

При любых целых  $m$  и  $n$  слева стоит четное целое число, а справа — нечетное (1 или  $-17$ ). Последнее равенство при целых  $m, n$  невозможно, что и требовалось доказать.

553. Первое решение. Задача равносильна следующей: какие значения может принимать функция  $\lambda = \sec x + \operatorname{cosec} x$ , если аргумент  $x$  меняется в пределах  $0 < x < \frac{\pi}{2}$ ?

Рассмотрим функцию

$$\begin{aligned} \lambda^2 &= (\sec x + \operatorname{cosec} x)^2 = \frac{1}{\cos^2 x} + \frac{2}{\sin x \cos x} + \frac{1}{\sin^2 x} = \\ &= \frac{1}{\sin^2 x \cos^2 x} + \frac{2}{\sin x \cos x} = \frac{4}{\sin^2 2x} + \frac{4}{\sin 2x}. \end{aligned}$$

Каждое из слагаемых, стоящих справа, при возрастании  $x$  от нуля до  $\frac{\pi}{2}$  ведет себя следующим образом: сначала убывает от  $+\infty$  до 4 (когда  $0 < x \leq \frac{\pi}{4}$ ), затем возрастает от 4 до  $+\infty$  (когда  $\frac{\pi}{4} \leq x < \frac{\pi}{2}$ ); оба слагаемых при  $x = \frac{\pi}{4}$

одновременно принимают наименьшие значения, значит, и сумма будет иметь наименьшее значение при  $x = \frac{\pi}{4}$ . При этом  $\lambda^2 = 8$ . Поэтому если  $0 < x < \frac{\pi}{2}$ , то  $\lambda^2 \geq 8$ , а так как  $\sin x$  и  $\cos x$  в первой четверти положительны, то  $\lambda \geq 2\sqrt{2}$ . График функции  $\lambda(x)$  показан на рис. 229.

Второе решение. Заметим сразу, что мы должны ограничиться рассмотрением лишь положительных значений  $\lambda$ , ибо при  $0 < x < \frac{\pi}{2}$  функции  $\sin x$  и  $\cos x$  положительны.

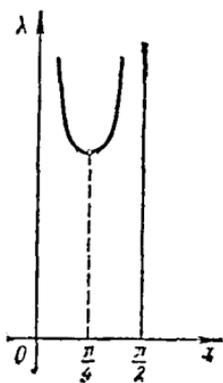


Рис. 229.

Преобразував уравнение к виду

$$\sin x + \cos x = \lambda \sin x \cos x,$$

возведем обе части его в квадрат; в результате получим:

$$1 + 2 \sin x \cos x = \lambda^2 \sin^2 x \cos^2 x.$$

Полагая теперь  $\sin 2x = z$ , будем иметь

$$\lambda^2 z^2 - 4z - 4 = 0,$$

откуда

$$z_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{4 + 4\lambda^2}}{\lambda^2}.$$

Так как по условию  $0 < x < \frac{\pi}{2}$ , то  $z = \sin 2x > 0$ , и мы должны взять в равенстве (1) знак плюс, т. е.

$$z = \frac{2 + \sqrt{4 + 4\lambda^2}}{\lambda^2}.$$

Если теперь нам удастся удовлетворить неравенству

$$\frac{2 + \sqrt{4 + 4\lambda^2}}{\lambda^2} \leq 1,$$

то уравнение

$$\sin 2x = \frac{2 + \sqrt{4 + 4\lambda^2}}{\lambda^2}$$

будет иметь решение  $x$  такое, что  $0 < x < \frac{\pi}{2}$ . Это последнее удовлетворит и исходному уравнению, в чем легко убедиться. Если же неравенство (2) не удовлетворяется, то нужного решения не существует. Итак, вся задача свелась к решению неравенства (2). Освободив его от знаменателя, легко получаем  $\lambda \geq 2\sqrt{2}$ .

554. Из данной системы сразу получаем:

$$x + y = k\pi, \quad x - y = l\pi.$$

Отсюда

$$x = \frac{k+l}{2}\pi, \quad y = \frac{k-l}{2}\pi.$$

По условию задачи  $0 \leq k+l \leq 2$ ,  $0 \leq k-l \leq 2$ . Поэтому получаем следующие результаты:

- 1)  $k=0, l=0$ ;  $x_1=0, y_1=0$ ;
- 2)  $k=1, l=0$ ;  $x_2=\frac{\pi}{2}, y_2=\frac{\pi}{2}$ ;
- 3)  $k=1, l=-1$ ;  $x_3=0, y_3=\pi$ ;
- 4)  $k=1, l=1$ ;  $x_4=\pi, y_4=0$ ;
- 5)  $k=2, l=0$ ;  $x_5=\pi, y_5=\pi$ .

555. Преобразуем систему к виду

$$\left. \begin{aligned} \sin^2 x &= 1 + \sin x \sin y, \\ \cos^2 x &= 1 + \cos x \cos y. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Складывая и вычитая уравнения системы (1), получаем систему

$$\left. \begin{aligned} \cos 2x - \cos(x+y) &= 0, \\ 1 + \cos(x-y) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Первое из уравнений системы (2) можно записать так:

$$\cos 2x - \cos(x+y) = 2 \sin\left(\frac{3x+y}{2}\right) \sin(y-x) = 0.$$

Если  $\sin(x-y) = 0$ , то  $x-y = k\pi$ . Но из второго уравнения системы (2) находим:

$$\cos(x-y) = -1, \quad x-y = (2n+1)\pi.$$

Следовательно, в этом случае имеем бесчисленное множество решений:  $x - y = (2n + 1)\pi$ .

Если  $\sin\left(\frac{3x+y}{2}\right) = 0$ , то  $3x + y = 2k\pi$ . Но  $x - y = (2n + 1)\pi$ . Следовательно,

$$x = \frac{2k + 2n + 1}{4}\pi, \quad y = \frac{2k - 6n - 3}{4}\pi.$$

556. Первое уравнение можно записать в виде

$$\frac{\sin x}{\cos x} + \frac{\sin y}{\cos y} = \frac{\sin(x+y)}{\cos x \cos y} = 1,$$

откуда в силу второго уравнения получаем:

$$\sin(x+y) = \cos x \cos y = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Отсюда  $x + y = \frac{\pi}{4}(-1)^k + k\pi$ , или

$$x + y = \frac{\pi}{4} + 2k\pi$$

и

$$x + y = -\frac{\pi}{4} + (2k + 1)\pi.$$

Второе уравнение исходной системы преобразуем так:

$$\cos(x+y) + \cos(x-y) = \sqrt{2}.$$

Отсюда

$$\cos(x-y) = \sqrt{2} - \cos(x+y).$$

Если имеет место (1), то  $\cos(x+y) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , и из находим:

$$\cos(x-y) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad x-y = \pm \frac{\pi}{4} + 2k\pi.$$

Если имеет место (2), то  $\cos(x+y) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$   
 $\cos(x-y) = \frac{3\sqrt{2}}{2}$ , что невозможно.

Итак, для нахождения  $x$  и  $y$  мы получили систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} x + y &= \frac{\pi}{4} + 2k\pi, \\ x - y &= \pm \frac{\pi}{4} + 2l\pi. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В соответствии с выбором знака во втором уравнении системы (4) получим две серии решений:

$$x_1 = \frac{\pi}{4} + (k + l)\pi, \quad y_1 = (k - l)\pi$$

и

$$x_2 = (k + l)\pi, \quad y_2 = \frac{\pi}{4} + (k - l)\pi.$$

**557.** Разделив первое уравнение почленно на второе, получим:

$$\cos x \cos y = \frac{3}{\sqrt{2}}. \quad (1)$$

Складывая это уравнение с первым и вычитая из (1) первое уравнение, найдем:

$$\cos(x - y) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \cos(x + y) = \frac{1}{2\sqrt{2}},$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} x - y &= \pm \frac{\pi}{4} + 2k\pi, \\ x + y &= \pm \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} + 2l\pi. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В соответствии с выбором знаков в уравнениях (2) получаем следующие четыре серии решений:

$$\text{а) } x_1 = (k + l)\pi + \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{\pi}{8},$$

$$y_1 = (k - l)\pi + \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8};$$

$$\text{б) } x_2 = (k + l)\pi + \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8},$$

$$y_2 = (k - l)\pi + \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{\pi}{8};$$

$$в) x_3 = (k + l)\pi - \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{\pi}{8};$$

$$y_3 = (k - l)\pi - \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8};$$

$$г) x_4 = (k + l)\pi - \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8};$$

$$y_4 = (k - l)\pi - \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{\pi}{8}.$$

558. Преобразуем второе уравнение к виду

$$\frac{1}{2} [\cos(x + y) - \cos(x - y)] = a.$$

Но так как  $x + y = \varphi$ , то  $\cos(x - y) = \cos \varphi - 2a$ . Получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} x + y &= \varphi, \\ x - y &= \pm \arccos(\cos \varphi - 2a) + k\pi. \end{aligned} \right\}$$

Ответ:

$$x = \frac{\varphi}{2} \pm \frac{1}{2} \arccos(\cos \varphi - 2a) + k\pi,$$

$$y = \frac{\varphi}{2} \mp \frac{1}{2} \arccos(\cos \varphi - 2a) - k\pi,$$

причем  $a$  и  $\varphi$  должны быть связаны условием  $|\cos \varphi - 2a| \leq 1$ .

559. Заметим, что  $\cos y$  не может быть равен нулю. Действительно, если  $\cos y = 0$ , то  $y = \frac{\pi}{2} + k\pi$  и

$$\cos(x - 2y) = \cos(x - \pi) = -\cos x = 0,$$

$$\sin(x - 2y) = \sin(x - \pi) = -\sin x = 0.$$

Но  $\sin x$  и  $\cos x$  не могут быть одновременно равны нулю, так как  $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ . Очевидно,  $a \neq 0$  (в противном случае  $\cos(x - 2y) = \sin(x - 2y) = 0$ ).

Разделив второе уравнение на первое почленно (в сделанных выше замечаниях деление возможно), получим:

$$\operatorname{tg}(x - 2y) = 1, \quad x - 2y = \frac{\pi}{4} + k\pi.$$

Рассмотрим два случая:

а)  $k$  четное. В этом случае

$$\cos(x-2y) = \frac{1}{\sqrt{2}} = a \cos^3 y, \quad \cos y = \sqrt[3]{\frac{1}{a\sqrt{2}}} = \lambda;$$

$$y = \pm \arccos \lambda + 2m\pi.$$

Подставляя это значение  $y$  в (1), получаем:

$$x = \pm 2 \arccos \lambda + (4m + k)\pi + \frac{\pi}{4}.$$

б)  $k$  нечетное. Тогда  $\cos(x-2y) = -\frac{1}{\sqrt{2}} = a \cos^3 y$ ,

$$y = \pm \arccos(-\lambda) + 2m\pi.$$

Из (1) найдем:

$$x = \pm 2 \arccos(-\lambda) + (4m + k)\pi + \frac{\pi}{4}.$$

Система разрешима при  $a > \frac{1}{\sqrt{2}}$ .

560. Возводя данные соотношения в квадрат, получим:

$$\sin^2 x + 2 \sin x \sin y + \sin^2 y = a^2, \quad (1)$$

$$\cos^2 x + 2 \cos x \cos y + \cos^2 y = b^2. \quad (2)$$

Складывая и вычитая (1) и (2) почленно, найдем:

$$2 + 2 \cos(x-y) = a^2 + b^2, \quad (3)$$

$$\cos 2x + \cos 2y + 2 \cos(x+y) = b^2 - a^2. \quad (4)$$

Уравнение (4) можно преобразовать к виду

$$2 \cos(x+y) [\cos(x-y) + 1] = b^2 - a^2. \quad (5)$$

Из (3) и (5) найдем:

$$\cos(x+y) = \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2}.$$

561. Пользуясь формулой

$$\cos 2x + \cos 2y = 2 \cos(x+y) \cos(x-y),$$

запишем второе уравнение системы в виде

$$4 \cos(x-y) \cos(x+y) = 1 + 4 \cos^2(x-y). \quad (1')$$

Из (1) следует, что  $\cos(x-y) \neq 0$ , и поэтому из (1) можно выразить  $\cos(x+y)$  по формуле

$$\cos(x+y) = \frac{1+4\cos^2(x-y)}{4\cos(x-y)}.$$

Подставив в (2) вместо  $x-y$  значение  $a$ , получаем:

$$\cos(x+y) = \frac{1+4\cos^2 a}{4\cos a},$$

причем  $\cos a \neq 0$ .

Так как для любых вещественных  $a$  и  $b$ , отличных нуля, выполняется неравенство  $\frac{a^2+b^2}{2|ab|} \geq 1$  (равенство возможно лишь при  $|a|=|b|$ ), то  $\left| \frac{1+4\cos^2 a}{4\cos a} \right| \geq 1$  (равенство имеем лишь при  $|\cos a| = \frac{1}{2}$ ). Следовательно, система может иметь решение только при условии, что  $|\cos a| = \frac{1}{2}$ .

Рассмотрим два случая:

а)  $\cos a = \frac{1}{2}$ . В этом случае из (3) найдем, что  $\cos(x+y) = 1$ , откуда

$$x+y = 2k\pi.$$

Кроме того,  $x-y = a$ . Решив полученную систему, находим

$$x_1 = \frac{a}{2} + k\pi, \quad y_1 = k\pi - \frac{a}{2}.$$

б)  $\cos a = -\frac{1}{2}$ . В этом случае  $\cos(x+y) = -1$ . По определению  $x$  и  $y$  получаем систему

$$x+y = (2k+1)\pi, \quad x-y = a,$$

откуда

$$x_2 = \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi + \frac{a}{2}, \quad y_2 = \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi - \frac{a}{2}.$$

562. Применив формулу

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2} [\cos(x+y) + \cos(x-y)],$$

представим первое уравнение системы в виде

$$4\cos^2(x-y) + 4\cos(x+y)\cos(x-y) + 1 = 0.$$

Положив  $\cos(x-y) = t$  и пользуясь тем, что  $x+y = a$ , получим уравнение

$$4t^2 + 4t \cos a + 1 = 0,$$

откуда

$$t = \frac{-2 \cos a \pm \sqrt{4 \cos^2 a - 4}}{4}. \quad (1)$$

Уравнение имеет решения только в том случае, когда  $\cos^2 a = 1$ , т. е. при  $a = \pi n$ . Из (1) находим

$$\cos(x-y) = -\frac{\cos a}{2}.$$

Если  $\cos a = 1$ , то  $\cos(x-y) = -\frac{1}{2}$ . Получаем систему

$$x-y = \pm \frac{2}{3} \pi + 2k\pi, \quad x+y = a,$$

из которой находим:

$$x_1 = \pm \frac{\pi}{3} + k\pi + \frac{a}{2}, \quad y_1 = \mp \frac{\pi}{3} - k\pi + \frac{a}{2}.$$

Если  $\cos a = -1$ , то  $\cos(x-y) = \frac{1}{2}$ . В этом случае получаем систему

$$x-y = \pm \frac{\pi}{3} + 2k\pi, \quad x+y = a,$$

откуда

$$x_2 = k\pi + \frac{a}{2} \pm \frac{\pi}{6}, \quad y_2 = \frac{a}{2} - k\pi \mp \frac{\pi}{6}.$$

563. Применяя формулу для  $\operatorname{tg} 2\alpha$ , находим:

$$\operatorname{tg} 2x + \operatorname{tg} 2y = \frac{2 \operatorname{tg} x}{1 - \operatorname{tg}^2 x} + \frac{2 \operatorname{tg} y}{1 - \operatorname{tg}^2 y}.$$

Приведя дроби к общему знаменателю, после простых преобразований получим:

$$\operatorname{tg} 2x + \operatorname{tg} 2y = 2 \cdot \frac{(\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y) - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y (\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y)}{1 - [(\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y)^2 - 2 \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y] + (\operatorname{tg} x \operatorname{tg} y)^2},$$

откуда, в силу условий задачи,

$$\operatorname{tg} 2x + \operatorname{tg} 2y = \frac{2a(1-b)}{(1+b)^2 - a^2}.$$

564. Заметим, что  $\cos x \neq 0$ ,  $\cos y \neq 0$ , так как в противном случае третье уравнение системы не имеет смысла. Поэтому первые два уравнения можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned}(a-1)\operatorname{tg}^2 x &= 1-b, \\ (b-1)\operatorname{tg}^2 y &= 1-a.\end{aligned}$$

Но  $a \neq 1$ , так как если  $a=1$ , то из (1) будем иметь  $b=1$ , что противоречит условию  $a \neq b$ . Аналогично, если  $b=1$ , то и  $a=1$ . Следовательно, (1) можно почленно разделить на (2). Разделив, получим:

$$\left(\frac{\operatorname{tg} x}{\operatorname{tg} y}\right)^2 = \left(\frac{1-b}{1-a}\right)^2.$$

Убедимся еще в том, что  $a \neq 0$ . Действительно, если  $a=0$ , то из второго уравнения получим, что  $\sin y \neq 0$ , а из третьего тогда получим, что  $b=0$ , т. е.  $a=b=0$ , что не возможно.

В силу этого замечания можем из третьего уравнения найти  $\left(\frac{\operatorname{tg} x}{\operatorname{tg} y}\right)^2 = \frac{b^2}{a^2}$ .

Итак,

$$\left(\frac{b}{a}\right)^2 = \left(\frac{1-b}{1-a}\right)^2.$$

Если  $\frac{b}{a} = \frac{1-b}{1-a}$ , то  $a=b$ , что невозможно.

Если же  $\frac{b}{a} = -\frac{1-b}{1-a}$ , то  $a+b=2ab$ .

Ответ:  $a+b=2ab$ .

565. Второе соотношение можно, в силу первого, переписать так:

$$\frac{A \sin \beta}{\cos \alpha} = \frac{B \sin \beta}{\cos \beta}$$

или

$$\sin \beta (A \cos \beta - B \cos \alpha) = 0.$$

Это соотношение может быть выполнено либо при  $\sin \beta = 0$ , и тогда также  $\sin \alpha = 0$ ,  $\cos \beta = \pm 1$ ,  $\cos \alpha = \pm 1$ , либо при  $A \cos \beta - B \cos \alpha = 0$ . В общем случае получаем систему

$$\left. \begin{aligned}\sin \alpha &= A \sin \beta, \\ A \cos \beta &= B \cos \alpha.\end{aligned} \right\}$$

Возведя каждое из этих уравнений в квадрат и сделав замену по формулам  $\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha$  и  $\cos^2 \beta = 1 - \sin^2 \beta$ , получим систему

$$\left. \begin{aligned} \cos^2 \alpha + A^2 \sin^2 \beta &= 1, \\ B^2 \cos^2 \alpha + A^2 \sin^2 \beta &= A^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Отсюда  $\cos^2 \alpha$  и  $\sin^2 \beta$  находятся единственным образом тогда и только тогда, когда  $A^2(1 - B^2) \neq 0$ ; в этом случае

$$\cos \alpha = \pm \sqrt{\frac{1 - A^2}{1 - B^2}}, \quad \sin \beta = \pm \frac{1}{A} \sqrt{\frac{A^2 - B^2}{1 - B^2}}.$$

Рассмотрим особые случаи, когда  $A^2(1 - B^2) = 0$ . Если  $A = 0$ , то из (2) получаем  $\cos^2 \alpha = 1$  и  $B = 0$ ; в этом случае  $\cos \alpha = \pm 1$ , а  $\sin \beta$  остается неопределенным. Если  $B^2 = 1$ , то из (2) получаем также  $A^2 = 1$ , и данные уравнения не содержат параметров  $A$  и  $B$ ; поэтому задача о выражении  $\cos \alpha$  и  $\sin \beta$  через  $A$  и  $B$  теряет смысл.

566. Из второго уравнения заключаем, что

$$\sin x = \sin \left( \frac{\pi}{2} - 2y \right),$$

и, следовательно, либо

$$x = \frac{\pi}{2} - 2y + 2k\pi, \quad (1)$$

либо

$$x = 2y - \frac{\pi}{2} + (2l + 1)\pi. \quad (2)$$

Обращаясь к первому уравнению данной системы, в случае (1) находим:

$$\operatorname{ctg} 2y = \operatorname{tg}^3 y \quad \text{или} \quad \frac{1 - \operatorname{tg}^2 y}{2 \operatorname{tg} y} = \operatorname{tg}^3 y.$$

Решив биквадратное уравнение, получим  $\operatorname{tg} y = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$  и, в силу первого уравнения,  $\operatorname{tg} x = \operatorname{tg}^3 y = \pm \frac{\sqrt{2}}{4}$ . Во втором случае, внося  $x$  из формулы (2) в уравнение  $\operatorname{tg} x = \operatorname{tg}^3 y$ , убеждаемся в отсутствии вещественных решений. Итак,

$$\operatorname{tg} y = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad x = \frac{\pi}{2} - 2y + 2k\pi,$$

откуда

$$y_1 = \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} + m\pi, \quad x_1 = \frac{\pi}{2} + 2k\pi - 2\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} - 2m\pi$$

и

$$y_2 = -\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} + m\pi, \quad x_2 = \frac{\pi}{2} + 2k\pi + 2\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} - 2m\pi$$

или

$$x_1 = \frac{\pi}{2} - 2\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} + 2m\pi,$$

$$y_1 = \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} + m\pi$$

и

$$x_2 = \frac{\pi}{2} + 2\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} + 2m\pi,$$

$$y_2 = -\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} + m\pi,$$

где  $m, n$  — любые целые числа.

567. Преобразуя левую и правую части первого уравнения, получим:

$$2 \sin \frac{x+y}{2} \left( \cos \frac{x-y}{2} - \cos \frac{x+y}{2} \right) = 0.$$

Решая это уравнение, находим:

$$1^\circ. x = -y + 2k\pi \quad (k = 0, \pm 1, \dots).$$

$$2^\circ. y = 2l\pi, \quad x \text{ — любое число } (l = 0, \pm 1, \dots).$$

$$3^\circ. x = 2m\pi, \quad y \text{ — любое число } (m = 0, \pm 1, \dots).$$

Соотношение  $1^\circ$  совместимо со вторым уравнением системы  $|x| + |y| = 1$  лишь при условии  $k = 0$ ; действительно,  $1^\circ$  следует неравенство

$$|x| + |y| \geq 2|k|\pi,$$

которое при условии  $|x| + |y| = 1$  возможно лишь в случае  $k = 0$ .

Решая тогда систему

$$x = -y, \quad |x| + |y| = 1,$$

находим два решения:

$$x_1 = \frac{1}{2}, \quad y_1 = -\frac{1}{2} \quad \text{и} \quad x_2 = -\frac{1}{2}, \quad y_2 = \frac{1}{2}.$$

Рассуждая аналогично в случаях 2° и 3°, находим еще две пары решений:

$$x_3 = 1, \quad y_3 = 0; \quad x_4 = -1, \quad y_4 = 0,$$

а также

$$x_5 = 0, \quad y_5 = 1; \quad x_6 = 0, \quad y_6 = -1.$$

Таким образом, рассматриваемая в задаче система имеет шесть указанных решений.

568. Возведем обе части каждого уравнения системы в квадрат и, сложив полученные равенства, будем иметь:

$$\sin^2(y - 3x) + \cos^2(y - 3x) = 4(\sin^6 x + \cos^6 x),$$

т. е.

$$\sin^6 x + \cos^6 x = \frac{1}{4}. \quad (1)$$

Рассмотрим тождество

$$\begin{aligned} 1 &= (\sin^2 x + \cos^2 x)^3 = \\ &= \sin^6 x + \cos^6 x + 3 \sin^2 x \cos^2 x = \\ &= \sin^6 x + \cos^6 x + \frac{3}{4} \sin^2 2x; \end{aligned}$$

отсюда

$$\sin^6 x + \cos^6 x = 1 - \frac{3}{4} \sin^2 2x. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), находим:

$$\begin{aligned} \sin^2 2x &= 1, \quad \sin 2x = \pm 1, \\ x &= \frac{\pi}{4} (2n + 1) \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \end{aligned}$$

Перемножив уравнения заданной системы, будем иметь:

$$\sin(y - 3x) \cos(y - 3x) = 4 \sin^3 x \cos^3 x,$$

т. е.

$$\sin 2(y - 3x) = \sin^3 2x.$$

Но  $\sin 2x = \pm 1$ , поэтому

$$\begin{aligned} \sin 2(y - 3x) &= \pm 1, \\ y - 3x &= \frac{\pi}{4}(2m + 1) \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$y = \frac{3\pi}{4}(2n + 1) + \frac{\pi}{4}(2m + 1).$$

В процессе решения системы производилось умножение обеих частей уравнений на выражения, содержащие неизменные, поэтому могли получиться посторонние решения. Проверим, все ли найденные пары значений  $x$  и  $y$  являются решениями. Должно быть:

$$\begin{aligned} \sin \frac{\pi}{4}(2m + 1) &= 2 \sin^3 \frac{\pi}{4}(2n + 1), \\ \cos \frac{\pi}{4}(2m + 1) &= 2 \cos^3 \frac{\pi}{4}(2n + 1), \end{aligned}$$

или, полагая

$$\sin \frac{\pi}{4}(2m + 1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi m}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \frac{\pi m}{2}$$

и

$$\cos \frac{\pi}{4}(2m + 1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \frac{\pi m}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi m}{2},$$

и делая аналогичную замену в правой части, получим после сокращения на постоянный множитель:

$$\begin{aligned} \sin \frac{\pi m}{2} + \cos \frac{\pi m}{2} &= \left( \sin \frac{\pi n}{2} + \cos \frac{\pi n}{2} \right)^3, \\ \cos \frac{\pi m}{2} - \sin \frac{\pi m}{2} &= \left( \cos \frac{\pi n}{2} - \sin \frac{\pi n}{2} \right)^3. \end{aligned}$$

Так как основание степени в правой части этих новых равенств может принимать при целых  $n$  только значения  $\pm 1$ ,  $-1$  и эти значения не изменяются при возведении в третью степень, то

$$\begin{aligned} \sin \frac{\pi n}{2} + \cos \frac{\pi n}{2} &= \left( \sin \frac{\pi n}{2} + \cos \frac{\pi n}{2} \right)^3, \\ \cos \frac{\pi n}{2} - \sin \frac{\pi n}{2} &= \left( \cos \frac{\pi n}{2} - \sin \frac{\pi n}{2} \right)^3; \end{aligned}$$

отсюда получаем:

$$\begin{aligned}\sin \frac{\pi}{2} m - \sin \frac{\pi}{2} n &= \cos \frac{\pi}{2} n - \cos \frac{\pi}{2} m, \\ -\sin \frac{\pi}{2} m + \sin \frac{\pi}{2} n &= \cos \frac{\pi}{2} n - \cos \frac{\pi}{2} m.\end{aligned}$$

Складывая и вычитая последние соотношения, получим:

$$\begin{aligned}\sin \frac{\pi}{2} m - \sin \frac{\pi}{2} n &= 0, \\ \cos \frac{\pi}{2} n - \cos \frac{\pi}{2} m &= 0,\end{aligned}\quad (3)$$

или

$$\begin{aligned}\sin \frac{\pi}{4} (m - n) \cos \frac{\pi}{4} (m + n) &= 0, \\ \sin \frac{\pi}{4} (m - n) \sin \frac{\pi}{4} (m + n) &= 0.\end{aligned}$$

Так как  $\cos \frac{\pi}{4} (m + n)$  и  $\sin \frac{\pi}{4} (m + n)$  одновременно в нуль не обращаются, то полученная система равносильна уравнению  $\sin \frac{\pi}{4} (m - n) = 0$ , откуда

$$m - n = 4k \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4)$$

Таким образом, полученные пары значений  $x$  и  $y$

$$x = \frac{\pi}{4} (2n + 1), \quad y = \frac{3\pi}{4} (2n + 1) + \frac{\pi}{4} (2m + 1)$$

дают решения системы тогда и только тогда, когда целые числа  $n$  и  $m$  связаны соотношением (4). Следовательно,

$$x = \frac{\pi}{4} (2n + 1),$$

$$y = \frac{\pi}{4} [3(2n + 1) + 2(n + 4k) + 1] = \pi [2(n + k) + 1].$$

Но  $n + k$  есть произвольное целое число. Обозначив его через  $p$ , будем иметь окончательно

$$\begin{aligned}x &= \frac{\pi}{4} (2n + 1), \\ y &= \pi (2p + 1) \quad (n, p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).\end{aligned}$$

569. Возведя в квадрат обе части первого и второго уравнений и переписав третье уравнение без изменений, приходим к системе

$$\left. \begin{aligned} (\sin x + \sin y)^2 &= 4a^2, \\ (\cos x + \cos y)^2 &= 4b^2, \\ \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tg} y &= c. \end{aligned} \right\}$$

Будем искать условия, которым должны удовлетворять числа  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , чтобы система (1) имела хотя бы одно решение. Так как данную систему мы заменяем не равносильной системой (1), то надо показать, что обе системы имеют хотя бы одно решение при одних и тех же условиях, наложенных на числа  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

Если данная система при некоторых  $a$ ,  $b$ ,  $c$  имеет решение, то, очевидно, при тех же  $a$ ,  $b$ ,  $c$  имеет решение и система (1). Верно и обратное утверждение: если при некоторых  $a$ ,  $b$ ,  $c$  система (1) имеет решение, то при тех же значениях  $a$ ,  $b$ ,  $c$  имеет решение и данная система.

В самом деле, пусть  $x_1$ ,  $y_1$  есть решение системы, тогда осуществляется одна из четырех возможностей: л

$$\sin x_1 + \sin y_1 = 2a, \quad \cos x_1 + \cos y_1 = 2b,$$

либо

$$\sin x_1 + \sin y_1 = -2a, \quad \cos x_1 + \cos y_1 = 2b,$$

либо

$$\sin x_1 + \sin y_1 = -2a, \quad \cos x_1 + \cos y_1 = -2b,$$

либо

$$\sin x_1 + \sin y_1 = 2a, \quad \cos x_1 + \cos y_1 = -2b.$$

Если имеет место первый случай, то  $x_1$ ,  $y_1$  есть решение данной системы; во втором случае данная система имеет, например, решение  $-x_1$ ,  $-y_1$ ; в третьем случае — решение  $\pi + x_1$ ,  $\pi + y_1$ ; в четвертом — решение  $\pi - x_1$ ,  $\pi - y_1$ . Следовательно, данная система имеет хотя бы одно решение тогда и только тогда, когда имеет хотя бы одно решение система (1).

Когда же система (1) имеет решение? Складывая и вычитая первое и второе уравнения системы (1), найдем:

$$\begin{aligned} \cos(x - y) &= 2(a^2 + b^2) - 1, \\ \cos 2x + \cos 2y + 2 \cos(x + y) &= 4(b^2 - a^2), \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}\cos(x-y) &= 2(a^2 + b^2) - 1, \\ \cos(x+y) \cos(x-y) + \cos(x+y) &= 2(b^2 - a^2),\end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}\cos(x-y) &= 2(a^2 + b^2) - 1, \\ (a^2 + b^2) \cos(x+y) &= b^2 - a^2.\end{aligned}$$

Мы пришли к системе

$$\begin{aligned}\cos(x-y) &= 2(a^2 + b^2) - 1, \\ (a^2 + b^2) \cos(x+y) &= b^2 - a^2, \\ \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tg} y &= c,\end{aligned}$$

равносильной системе (1).

Если  $a^2 + b^2 = 0$ , то второе уравнение удовлетворяется при любых  $x$  и  $y$ . Из первого уравнения получаем  $x - y = \pi + 2k\pi$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), третье уравнение дает  $\operatorname{tg}(y + \pi + 2k\pi) \operatorname{tg} y = c$  или  $\operatorname{tg}^2 y = c$ . Последнее уравнение имеет решение при любом  $c \geq 0$ . Если  $a^2 + b^2 \neq 0$ , то имеем:

$$\left. \begin{aligned}\cos(x-y) &= 2(a^2 + b^2) - 1, \\ \cos(x+y) &= \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2}.\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Эта система имеет решение тогда и только тогда, когда

$$|2(a^2 + b^2) - 1| \leq 1, \quad (3)$$

$$\left| \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2} \right| \leq 1. \quad (4)$$

Неравенство (4) при наличии условия

$$a^2 + b^2 \neq 0,$$

очевидно, справедливо, а неравенство (3) равносильно следующему:

$$0 < a^2 + b^2 \leq 1.$$

Представим левую часть третьего уравнения системы (1) следующим образом:

$$\operatorname{tg} x \operatorname{tg} y = \frac{\sin x \sin y}{\cos x \cos y} = \frac{\frac{1}{2} [\cos(x-y) - \cos(x+y)]}{\frac{1}{2} [\cos(x-y) + \cos(x+y)]} \quad (5)$$

и подставим в (5) значения  $\cos(x+y)$  и  $\cos(x-y)$  из (3). В результате получим, что решение системы (2) будет удовлетворять третьему уравнению исходной системы, если

$$c = \frac{2(a^2 + b^2) - 1 - \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2}}{\frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2} + 2(a^2 + b^2) - 1} = \frac{(a^2 + b^2)^2 - b^2}{(a^2 + b^2)^2 - a^2}.$$

Мы пришли к следующему результату: данная система имеет хотя бы одно решение в двух случаях:

- 1)  $0 < a^2 + b^2 \leq 1$  и  $c = \frac{(a^2 + b^2)^2 - b^2}{(a^2 + b^2)^2 - a^2}$ ;
- 2)  $a = b = 0$  и  $c$  — любое неотрицательное число.

### 3. Обратные тригонометрические функции

570. Из определения главных значений обратных тригонометрических функций следует, что

$$\arccos(\cos x) = x, \text{ если } 0 \leq x \leq \pi.$$

Чтобы использовать эту формулу, заменим  $\sin\left(-\frac{\pi}{7}\right)$  с помощью формул приведения на косинус угла, заключенного между 0 и  $\pi$ . Найдём следующие равенства:

$$\sin\left(-\frac{\pi}{7}\right) = -\sin\frac{\pi}{7} = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{7}\right) = \cos\frac{9\pi}{14}.$$

В итоге получаем:

$$\arccos\left[\sin\left(-\frac{\pi}{7}\right)\right] = \arccos\left(\cos\frac{9\pi}{14}\right) = \frac{9\pi}{14}.$$

571. По аналогии с решением предыдущей задачи имеем

$$\cos\frac{33}{5}\pi = \cos\left(6\pi + \frac{3}{5}\pi\right) = \cos\frac{3}{5}\pi =$$

$$= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{3}{5}\pi\right) = \sin\left(-\frac{\pi}{10}\right).$$

Следовательно,

$$\arcsin\left(\cos\frac{33}{5}\pi\right) = \arcsin\left[\sin\left(-\frac{\pi}{10}\right)\right] = -\frac{\pi}{10}.$$

572. Пусть

$$\operatorname{arctg} \frac{1}{3} = \alpha_1, \quad \operatorname{arctg} \frac{1}{5} = \alpha_2, \quad \operatorname{arctg} \frac{1}{7} = \alpha_3, \quad \operatorname{arctg} \frac{1}{8} = \alpha_4.$$

Очевидно,  $0 < \alpha_i < \frac{\pi}{4}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ . Поэтому

$$0 < \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 < \pi.$$

Для доказательства тождества достаточно установить, что

$$\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) = 1.$$

Так как  $\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2) = \frac{4}{7}$ ,  $\operatorname{tg}(\alpha_3 + \alpha_4) = \frac{3}{11}$ , то

$$\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) = \frac{\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2) + \operatorname{tg}(\alpha_3 + \alpha_4)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2) \operatorname{tg}(\alpha_3 + \alpha_4)} = 1.$$

573. Положив  $\arcsin x = \alpha$ ,  $\arccos x = \beta$ , будем иметь:

$$x = \sin \alpha \text{ и } x = \cos \beta = \sin \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right).$$

По определению главных значений имеем  $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$  и  $0 \leq \beta \leq \pi$ . Из последнего неравенства следует неравенство  $-\frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{2} - \beta \leq \frac{\pi}{2}$ . Мы можем утверждать, что  $\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta$ , так как углы  $\alpha$  и  $\frac{\pi}{2} - \beta$  заключены между  $-\frac{\pi}{2}$  и  $\frac{\pi}{2}$  и синусы этих углов равны. Формула доказана.

574. Пользуясь тем, что  $\arcsin x + \arccos x = \frac{\pi}{2}$  (см. решение задачи 573), преобразуем уравнение к виду

$$12\pi t^2 - 6\pi^2 t + (1 + 8\alpha)\pi^3 = 0,$$

где  $t = \arcsin x$ . При  $\alpha < \frac{1}{32}$  дискриминант этого уравнения  $D = 36\pi^4 - 48\pi^4(1 - 8\alpha) < 0$ . Следовательно, исходное уравнение при  $\alpha < \frac{1}{32}$  не имеет решений.

575. Положим  $\arccos x = \alpha$ ,  $\arcsin \sqrt{1-x^2} = \beta$ .

а) Если  $0 \leq x \leq 1$ , то  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$  и  $0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$  (так как  $0 \leq \sqrt{1-x^2} \leq 1$ ). Остается лишь убедиться в том, что  $\sin \alpha = \sin \beta$ . Но в силу неравенства  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$  име-

$$\sin \alpha = +\sqrt{1-x^2}.$$

С другой стороны, при всех  $y$  ( $|y| \leq 1$ ) имеет место  $\sin \arcsin y = y$ ; в частности,

$$\sin \beta = \sin \arcsin \sqrt{1-x^2} = \sqrt{1-x^2}.$$

Следовательно, при  $0 \leq x \leq 1$  имеет место формула

$$\arccos x = \arcsin \sqrt{1-x^2}.$$

б) Если  $-1 \leq x \leq 0$ , то  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ ,  $0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$   
 $\frac{\pi}{2} \leq \pi - \beta \leq \pi$ .

Так как, кроме того,  $\sin \alpha = \sqrt{1-x^2}$  и  $\sin(\pi - \beta) = \sin \beta = \sqrt{1-x^2}$ , то  $\alpha = \pi - \beta$ , т. е. при  $-1 \leq x \leq 0$  имеет место формула

$$\arccos x = \pi - \arcsin \sqrt{1-x^2}.$$

576. Докажем, что

$$\arcsin(-x) = -\arcsin x.$$

Положим  $\arcsin(-x) = \alpha$ ; тогда  $-x = \sin \alpha$  и, по определению главных значений,

$$-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}.$$

Так как  $\sin(-\alpha) = -\sin \alpha = x$  и так как из неравенства  $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$  следует неравенство

$$-\frac{\pi}{2} \leq -\alpha \leq \frac{\pi}{2},$$

то  $-\alpha = \arcsin x$ , откуда  $\alpha = -\arcsin x$ , т. е.  $\arcsin(-x) = -\arcsin x$ .

Аналогично доказывается формула

$$\arccos(-x) = \pi - \arccos x.$$

577. Из определения главных значений обратных тригонометрических функций следует, что  $\arcsin(\sin \alpha) = \alpha$ , если  $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ . Если  $-\frac{\pi}{2} + 2k\pi \leq x \leq \frac{\pi}{2} + 2k\pi$ , то  $-\frac{\pi}{2} \leq x - 2k\pi \leq \frac{\pi}{2}$ . Но тогда

$$\arcsin(\sin x) = \arcsin[\sin(x - 2k\pi)] = x - 2k\pi.$$

578. По условию задачи

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1+x}{1-x}. \quad (1)$$

Пользуясь формулой  $\sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}$ , получим в силу (1)

$$\sin \alpha = \frac{1-x^2}{1+x^2},$$

откуда

$$y = \arcsin(\sin \alpha) = \arcsin \frac{1-x^2}{1+x^2} = \beta. \quad (2)$$

Так как  $0 < x < 1$ , то  $\frac{\pi}{4} < \operatorname{arctg} \frac{1+x}{1-x} < \frac{\pi}{2}$  и  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ .

Тогда  $-\frac{\pi}{2} < \alpha - \pi \leq 0$  и

$$\arcsin[\sin(\alpha - \pi)] = \arcsin(-\sin \alpha) = -\arcsin(\sin \alpha) = -y.$$

Но угол  $\alpha - \pi$  лежит в пределах главного значения  $\operatorname{Arcsin} x$ . Следовательно,

$$y = \arcsin(\sin \alpha) = \pi - \alpha. \quad (3)$$

Из (2) и (3) получаем, что  $\alpha + \beta = \pi$ .

579. В формулах  $\arcsin \cos \arcsin x$  и  $\arccos \sin \arccos x$  берутся главные значения обратных тригонометрических функций. Рассмотрим  $\cos \arcsin x$ . Это косинус дуги, синус которой равен  $x$ . Значит,

$$\cos \arcsin x = +\sqrt{1-x^2}, \text{ где } -1 \leq x \leq 1.$$

Здесь, конечно, существенно, что  $-\frac{\pi}{2} \leq \arcsin x \leq \frac{\pi}{2}$ . Ана-

логично

$$\sin \arccos x = +\sqrt{1-x^2}, \text{ где } -1 \leq x \leq 1.$$

Обозначим  $y = +\sqrt{1-x^2}$ ; тогда  $0 \leq y \leq 1$ .

Таким образом, надо найти соотношение между  $\arcsin y$  и  $\arccos x$  при  $0 \leq y \leq 1$ . Эти два угла дополняют друг друга до  $\frac{\pi}{2}$  (см. решение задачи 573). Таким образом,

$$\arcsin \cos \arcsin x + \arccos \sin \arccos x = \frac{\pi}{2}.$$

#### 4. Тригонометрические неравенства

580. В силу того что

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}^2 x - 1 &= \frac{\cos 2x}{\sin^2 x}, \\ 3 \operatorname{ctg}^2 x - 1 &= \frac{3 \cos^2 x - \sin^2 x}{\sin^2 x}, \\ \operatorname{ctg} 3x \cdot \operatorname{tg} 2x - 1 &= \frac{\cos 3x \sin 2x - \sin 3x \cos 2x}{\sin 3x \cos 2x} = \\ &= -\frac{\sin x}{\sin 3x \cos 2x}, \end{aligned}$$

левая часть неравенства может быть записана в виде

$$-\frac{\sin x (3 \cos^2 x - \sin^2 x)}{\sin^3 x \sin 3x}.$$

Но

$$\begin{aligned} \sin 3x &= \sin (x + 2x) = \sin x \cos 2x + \cos x \sin 2x = \\ &= \sin x (3 \cos^2 x - \sin^2 x), \end{aligned}$$

поэтому заданное неравенство сводится к неравенству

$$-\frac{1}{\sin^4 x} \leq -1,$$

которое очевидно.

581. Используя формулу  $\operatorname{tg}(\theta - \varphi) = \frac{\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \varphi}$  и учитывая  $\operatorname{tg} \theta = n \operatorname{tg} \varphi$ , получим:

$$\operatorname{tg}^2(\theta - \varphi) = \frac{(n-1)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{(1+n \operatorname{tg}^2 \varphi)^2} = \frac{(n-1)^2}{(\operatorname{ctg} \varphi + n \operatorname{tg} \varphi)^2}.$$

Нужно доказать, что

$$(\operatorname{ctg} \varphi + n \operatorname{tg} \varphi)^2 \geq 4n$$

или

$$(1 + n \operatorname{tg}^2 \varphi)^2 \geq 4n \operatorname{tg}^2 \varphi.$$

Приходим, таким образом, к очевидному неравенству  $(1 - n \operatorname{tg}^2 \varphi)^2 \geq 0$ .

582. Так как  $\cos \varphi = \cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2}$ , то неравенство, которое нужно доказать, можно записать в виде

$$\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} > \frac{\cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2} + \sin \varphi}{\sin \varphi}.$$

Так как  $\sin \varphi > 0$  при  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ , то после умножения обеих частей неравенства на  $\sin \varphi$  получим равносильное неравенство

$$2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} > \cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2} + \sin \varphi$$

или  $1 > \sin \varphi$ . Так как последнее неравенство имеет место при  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ , то справедливо и исходное неравенство.

583. Исследуемое выражение не имеет смысла при  $x = \frac{\pi}{2} + k\pi$ . При прочих значениях  $x$  умножим обе части неравенства на  $\cos^2 x$ . Получим равносильное неравенство

$$(\sin 2x)^2 + \frac{3}{2} \sin 2x - 2 > 0.$$

Решив полученное квадратное неравенство, найдем, что либо  $\sin 2x < \frac{-3 - \sqrt{41}}{4}$ , либо  $\sin 2x > \frac{\sqrt{41} - 3}{4}$ . Первое из этих неравенств не может выполняться. Следовательно,

$$k\pi + \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sqrt{41} - 3}{4} < x < \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sqrt{41} - 3}{4} + k\pi.$$

584. Положив  $\operatorname{tg} x = t$ , получим:

$$\operatorname{tg} 2x = \frac{2t}{1-t^2},$$

$$\operatorname{tg} 3x = \frac{\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} 2x}{1 - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} 2x} = \frac{3t - t^3}{1 - 3t^2}.$$

Левая часть теряет смысл для тех значений  $x$ , при которых  $t^2 = 1$ ,  $t^3 = \frac{1}{3}$ . При всех прочих значениях  $x$  левая часть неравенства равна  $t^4 + 2t^2 + 1$  и, следовательно, принимает положительные значения.

585. Из формул для  $\sin 3x$  и  $\cos 3x$  (см. стр. 81) находим

$$\cos^3 x = \frac{\cos 3x + 3 \cos x}{4},$$

$$\sin^3 x = \frac{3 \sin x - \sin 3x}{4}.$$

Пользуясь формулами (1) и (2), запишем данное неравенство в виде

$$(\cos 3x + 3 \cos x) \cos 3x - (3 \sin x - \sin 3x) \sin 3x > \frac{5}{2}$$

или

$$\sin^2 3x + \cos^2 3x + 3(\cos 3x \cos x - \sin 3x \sin x) > \frac{5}{2},$$

или

$$\cos 4x > \frac{1}{2};$$

тогда

$$-\frac{\pi}{3} + 2\pi n < 4x < \frac{\pi}{3} + 2\pi n,$$

или

$$-\frac{\pi}{12} + \frac{1}{2}\pi n < x < \frac{\pi}{12} + \frac{1}{2}\pi n \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2,$$

586. Обозначим левую часть рассматриваемого неравенства через  $f$ . Тогда

$$f = \frac{1}{2} \left( \cos \frac{A-B}{2} - \cos \frac{A+B}{2} \right) \cos \frac{A+B}{2},$$

так как

$$\sin \frac{C}{2} = \cos \frac{A+B}{2}.$$

Положив

$$\cos \frac{A+B}{2} = x,$$

после очевидных преобразований получим:

$$t = -\frac{1}{2} \left( x^2 - 2x \cdot \frac{1}{2} \cos \frac{A-B}{2} + \frac{1}{4} \cos^2 \frac{A-B}{2} \right) + \\ + \frac{1}{8} \cos^2 \frac{A-B}{2} = \frac{1}{8} \cos^2 \frac{A-B}{2} - \frac{1}{2} \left( x - \frac{1}{2} \cos \frac{A-B}{2} \right)^2.$$

Следовательно,

$$t \leq \frac{1}{8} \cos^2 \frac{A-B}{2} \leq \frac{1}{8}.$$

587. Установим сначала, что

$$|\sin x| \leq |x|.$$

Рассмотрим тригонометрический круг радиуса 1 и предположим, что  $x$  обозначает радианную меру некоторого положительного или отрицательного угла  $АОМ$  (рис. 230). При любом положении точки  $M$

$$\widetilde{AM} = |x| \cdot OA = |x|, \\ |BM| = |\sin x|.$$

Так как  $|BM| \leq \widetilde{AM}$ , то  $|\sin x| \leq |x|$  (равенство имеем лишь при  $x=0$ ). В частности, если  $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ , то

$$0 \leq \cos \varphi \leq 1 < \frac{\pi}{2}$$

и

$$\sin \cos \varphi < \cos \varphi.$$

Но  $0 \leq \sin \varphi \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$  и поэтому  $\cos \varphi \leq \cos \sin \varphi$ .

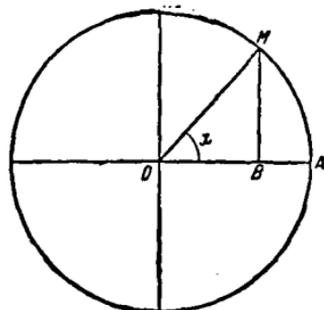


Рис. 230.

Окончательно имеем

$$\cos \sin \varphi \geq \cos \varphi > \sin \cos \varphi.$$

Неравенство доказано.

588. Так как большему углу первой четверти соответствует большее значение тангенса, то

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \leq \operatorname{tg} \alpha_i \leq \operatorname{tg} \alpha_n$$

для  $i = 1, 2, \dots, n$ . Кроме того,  $\cos \alpha_i > 0$  ( $i = 1, 2, \dots$ ). Поэтому неравенства (1) можно записать в виде

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \cos \alpha_i \leq \sin \alpha_i \leq \operatorname{tg} \alpha_n \cos \alpha_i.$$

Будем в неравенстве (2) придавать  $i$  значения 1, 2, ... и сложим все полученные неравенства. Получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 (\cos \alpha_1 + \dots + \cos \alpha_n) \leq \sin \alpha_1 + \dots + \sin \alpha_n \leq \operatorname{tg} \alpha_n (\cos \alpha_1 + \dots + \cos \alpha_n)$$

Разделив все части неравенства (3) на  $\cos \alpha_1 + \dots + \cos \alpha_n$  (что возможно, так как  $\cos \alpha_1 + \dots + \cos \alpha_n > 0$ ), имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 < \frac{\sin \alpha_1 + \dots + \sin \alpha_n}{\cos \alpha_1 + \dots + \cos \alpha_n} < \operatorname{tg} \alpha_n.$$

589. Запишем неравенство в виде

$$\begin{aligned} (\cos x - \sin x) [1 - (\cos x + \sin x)] &= \\ &= 2 \sin \frac{x}{2} \left( \sin \frac{x}{2} - \cos \frac{x}{2} \right) (\cos x - \sin x) > 0. \end{aligned}$$

Но  $\sin \frac{x}{2} > 0$ , так как  $0 < x < 2\pi$ . Рассмотрим два возможных случая, при которых выполняется неравенство (1):

Случай 1.

$$\begin{cases} \cos x - \sin x > 0, \\ \sin \frac{x}{2} - \cos \frac{x}{2} > 0. \end{cases}$$

Этой системе неравенств удовлетворяют все те значения  $x$ , которые удовлетворяют и первому и второму неравенству.

Первое неравенство выполняется при  $0 < x < \frac{\pi}{4}$  или  $\frac{5}{4}\pi < x < 2\pi$ , второе — при  $\frac{\pi}{2} < x < \frac{5}{2}\pi$ . Но по условию задачи  $0 < x < 2\pi$ . Следовательно, в этом случае  $\frac{5}{4}\pi < x < 2\pi$ .

Случай 2.

$$\begin{cases} \cos x - \sin x < 0, \\ \sin \frac{x}{2} - \cos \frac{x}{2} < 0. \end{cases}$$

Первое неравенство справедливо при  $\frac{\pi}{4} < x < \frac{5}{4}\pi$ ; второе — при  $0 < x < \frac{\pi}{2}$  или  $\frac{5}{2}\pi < x < 4\pi$ . Но  $0 < x < 2\pi$  и, значит, во втором случае  $\frac{\pi}{4} < x < \frac{\pi}{2}$ . Следовательно, неравенство выполняется при  $\frac{\pi}{4} < x < \frac{\pi}{2}$  и  $\frac{5}{4}\pi < x < 2\pi$ .

590. Положим  $\operatorname{tg} \frac{x}{2} = t$ . Тогда неравенство примет вид

$$t > \frac{2t - 2 + 2t^2}{2t + 2 - 2t^2}$$

или

$$\frac{t^2 - 1}{t^2 - t - 1} > 0. \quad (1)$$

Так как  $t^2 + t + 1 > 0$  при всех действительных значениях  $t$ , то неравенство (1) равносильно неравенству

$$\frac{t - 1}{t^2 - t - 1} > 0. \quad (2)$$

Трехчлен  $t^2 - t - 1$  имеет корни  $\frac{1 - \sqrt{5}}{2}$  и  $\frac{1 + \sqrt{5}}{2}$ . Решив неравенство (2), найдем, что

$$\operatorname{tg} \frac{x}{2} > \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

или

$$\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \leq \operatorname{tg} \frac{x}{2} < 1.$$

Ответ. а)  $2k\pi + 2 \operatorname{arctg} \frac{1 + \sqrt{5}}{2} < x < \pi + 2k\pi.$

б)  $2k\pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{5} - 1}{2} < x < \frac{\pi}{2} + 2k\pi.$

591. Воспользуемся методом полной индукции. При  $n = 1$   
 $0 < \alpha < \frac{\pi}{4}$ , получим

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} > 2 \operatorname{tg} \alpha,$$

так как  $0 < 1 - \operatorname{tg}^2 \alpha < 1$ .

Пусть

$$\operatorname{tg} n\alpha > n \operatorname{tg} \alpha$$

при условии

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{4(n-1)}.$$

Докажем, что

$$\operatorname{tg}(n+1)\alpha > (n+1) \operatorname{tg} \alpha,$$

если  $0 < \alpha < \frac{\pi}{4n}$ .

Применим формулу

$$\operatorname{tg}(n+1)\alpha = \frac{\operatorname{tg} n\alpha + \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} n\alpha}.$$

Так как неравенство (1) выполняется при условии (1), то оно тем более будет иметь место при  $0 < \alpha < \frac{\pi}{4n}$ .

$$0 < \operatorname{tg} \alpha < 1,$$

и так как  $0 < n\alpha < \frac{\pi}{4}$ , то

$$0 < \operatorname{tg} n\alpha < \operatorname{tg} \frac{\pi}{4}.$$

Из (4) и (5) получим:

$$0 < 1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} n\alpha < 1.$$

Из (6) и (3) следует  $\operatorname{tg}(n+1)\alpha > (n+1) \operatorname{tg} \alpha$ , что и требовалось доказать.

592. Первое решение. Преобразуем левую часть неравенства, выразив все тригонометрические функции через  $\operatorname{tg} x$ . Для этого удобно числитель и знаменатель дроби разделить на  $\cos^2 x$ . В результате получим:

$$\frac{\cos x}{\sin^2 x (\cos x - \sin x)} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 x}{\operatorname{tg}^2 x (1 - \operatorname{tg} x)}. \quad (1)$$

Правую часть (1) представим в виде произведения дробей:

$$\frac{1 + \operatorname{tg}^2 x}{\operatorname{tg} x} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} x (1 - \operatorname{tg} x)}. \quad (2)$$

Так как при  $0 < x < \frac{\pi}{4}$  имеем  $1 + \operatorname{tg}^2 x > 2 \operatorname{tg} x$ , то  $\frac{1 + \operatorname{tg}^2 x}{\operatorname{tg} x} > 2$ . Покажем теперь, что для второй дроби в формуле (2) при  $0 < x < \frac{\pi}{4}$  выполняется неравенство

$$\frac{1}{\operatorname{tg} x (1 - \operatorname{tg} x)} \geq 4. \quad (3)$$

Действительно, при рассматриваемых значениях  $x$  выражение  $\operatorname{tg} x (1 - \operatorname{tg} x)$  положительно и поэтому для доказательства неравенства (3) достаточно показать, что

$$\operatorname{tg} x (1 - \operatorname{tg} x) < \frac{1}{4}. \quad (4)$$

Но

$$\operatorname{tg} x (1 - \operatorname{tg} x) = -\operatorname{tg}^2 x + \operatorname{tg} x = -\left(\operatorname{tg} x - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1}{4}$$

и, следовательно, неравенство (4) действительно имеет место. Таким образом, при  $0 < x < \frac{\pi}{4}$  выполняются неравенства (2) и (3), а значит и исходное неравенство.

Второе решение. Левую часть данного неравенства можно записать в такой форме:

$$\begin{aligned} \frac{\cos x}{\sin^2 x (\cos x - \sin x)} &= \frac{1}{\sin x \cos x} \cdot \frac{\cos^2 x}{\cos x \sin x - \sin^2 x} = \\ &= \frac{2}{\sin 2x} \cdot \frac{\cos^2 x}{\cos x \sin x - \sin^2 x}. \end{aligned}$$

При  $0 < x < \frac{\pi}{4}$  первая дробь, очевидно, больше 2. Для доказательства справедливости данного неравенства, поэтому достаточно убедиться в том, что

$$\frac{\cos^2 x}{\cos x \sin x - \sin^2 x} \geq 4.$$

Когда  $0 < x < \frac{\pi}{4}$ , знаменатель левой части неравенства положителен, поэтому после приведения к общему знаменателю и перенесения всех членов в левую часть находим:

$$\cos^2 x - 4 \cos x \sin x + 4 \sin^2 x \geq 0.$$

Так как слева получился полный квадрат, то это неравенство верно, а следовательно, верно и неравенство (1).

### 5. Разные задачи

593. Первое решение. Выразим  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$  через  $a$ . Остальные тригонометрические функции угла  $\varphi$  по известным формулам можно выразить через  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$ . Преобразуем сумму  $\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi$ . Так как

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}, \quad \operatorname{ctg} \varphi = \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi}, \quad \sin 2\varphi = 2 \sin \varphi \cos \varphi,$$

то

$$\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi = \frac{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi}{\sin \varphi \cos \varphi} = \frac{1}{\sin \varphi \cos \varphi} = \frac{2}{\sin 2\varphi} = a.$$

Следовательно,

$$\sin 2\varphi = \frac{2}{a}.$$

Так как  $(\sin \varphi + \cos \varphi)^2 = 1 + \sin 2\varphi$ , то в силу (1)

$$\sin \varphi + \cos \varphi = \pm \sqrt{1 + \frac{2}{a}}.$$

Если в формуле (2) взять знак плюс, то для определения  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$  получим систему уравнений

$$\sin \varphi + \cos \varphi = \sqrt{1 + \frac{2}{a}}, \quad \sin \varphi \cos \varphi = \frac{1}{a}.$$

Если же в формуле (2) взять знак минус, то получим систему

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi + \cos \varphi &= -\sqrt{1 + \frac{2}{a}}, \\ \sin \varphi \cos \varphi &= \frac{1}{a}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Система (3) имеет два решения:

$$1) \sin \varphi = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} - \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right),$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} + \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right).$$

$$2) \sin \varphi = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} + \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right),$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} - \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right).$$

Система (4) также имеет два решения:

$$1) \sin \varphi = -\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} + \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right),$$

$$\cos \varphi = -\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} - \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right).$$

$$2) \sin \varphi = -\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} - \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right),$$

$$\cos \varphi = -\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{a}} + \sqrt{1 - \frac{2}{a}} \right).$$

Итак, задача в общем случае имеет четыре решения. Заметим, что задача разрешима, если  $|a| \geq 2$ , так как  $\sin 2\varphi = \frac{2}{a}$  и  $|\sin 2\varphi| \leq 1$ .

Второе решение. Из условий задачи получаем квадратное уравнение относительно  $\operatorname{tg} \varphi$ :

$$\operatorname{tg}^2 \varphi - a \operatorname{tg} \varphi + 1 = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет корни

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a + \sqrt{a^2 - 4}}{2} \quad (2)$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4}}{2}.$$

Заметим, что решения уравнения (1) существуют, если  $a^2 \geq 4$  или  $|a| \geq 2$ .

Зная  $\operatorname{tg} \varphi$ , нетрудно определить остальные тригонометрические функции угла  $\varphi$ . Пользуясь формулой  $1 + \operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{1}{\cos^2 \varphi}$ , найдем:

$$\cos \varphi = \pm \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}};$$

затем определим  $\sin \varphi$  по формуле

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi \cos \varphi.$$

Если найдены значения  $\sin \varphi$ ,  $\cos \varphi$ , то остальные тригонометрические функции угла  $\varphi$  можно по известным формулам выразить через  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$ .

В случае, когда  $\operatorname{tg} \varphi$  выражается формулой (2), получим

$$\text{а) } \cos \varphi = \sqrt{\frac{2}{a^2 + a\sqrt{a^2 - 4}}}, \quad \sin \varphi = \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - 4}}{2a}}$$

$$\text{б) } \cos \varphi = -\sqrt{\frac{2}{a^2 + a\sqrt{a^2 - 4}}},$$

$$\sin \varphi = -\sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - 4}}{2a}}.$$

Аналогично для случая, когда  $\operatorname{tg} \varphi$  выражается формулой (3) будем иметь:

$$\text{в) } \cos \varphi = \sqrt{\frac{2}{a^2 - a\sqrt{a^2 - 4}}}, \quad \sin \varphi = \sqrt{\frac{a - \sqrt{a^2 - 4}}{2a}}$$

$$\text{г) } \cos \varphi = -\sqrt{\frac{2}{a^2 - a\sqrt{a^2 - 4}}},$$

$$\sin \varphi = -\sqrt{\frac{a - \sqrt{a^2 - 4}}{2a}}.$$

Таким образом, задача имеет в общем случае четыре решения. Их можно преобразовать к виду, указанному в пе

вом способе решения задачи, если использовать формулу

$$\sqrt{a \pm \sqrt{b}} = \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - b}}{2}} \pm \sqrt{\frac{a - \sqrt{a^2 - b}}{2}}.$$

594. Положим  $\operatorname{arctg} \frac{1}{5} = \alpha$ ,  $\operatorname{arctg} \frac{5}{12} = \beta$  и рассмотрим  $\operatorname{tg}(2\alpha - \beta)$ .

Пользуясь формулой для тангенса разности двух углов, получаем:

$$\operatorname{tg}(2\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} 2\alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} 2\alpha \operatorname{tg} \beta}. \quad (1)$$

Но так как  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{5}$ , то

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} = \frac{5}{12}.$$

Подставляя значения  $\operatorname{tg} 2\alpha$  и  $\operatorname{tg} \beta$  в формулу (1), находим  $\operatorname{tg}(2\alpha - \beta) = 0$ . Тогда

$$\sin(2\alpha - \beta) = \sin\left(2 \operatorname{arctg} \frac{1}{5} - \operatorname{arctg} \frac{5}{12}\right) = 0.$$

595. Покажем, что  $\operatorname{tg}(\alpha + 2\beta) = 1$ . Для нахождения  $\operatorname{tg}(\alpha + 2\beta)$  применим формулу

$$\operatorname{tg}(\alpha + 2\beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} 2\beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} 2\beta}. \quad (1)$$

Предварительно вычислим  $\operatorname{tg} 2\beta$  по формуле

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{\sin 2\beta}{\cos 2\beta} = \frac{2 \sin \beta \cos \beta}{\cos 2\beta}.$$

Нужно найти  $\cos \beta$  и  $\cos 2\beta$ . Но  $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \frac{3}{\sqrt{10}}$  (так как  $\beta$  — угол первой четверти), а  $\cos 2\beta = \cos^2 \beta - \sin^2 \beta = \frac{4}{5}$ . Следовательно,  $\operatorname{tg} 2\beta = \frac{3}{4}$ .

Подставив найденное значение  $\operatorname{tg} 2\beta$  в (1), получим  $\operatorname{tg}(\alpha + 2\beta) = 1$ .

Докажем теперь, что  $\alpha + 2\beta = \frac{\pi}{4}$ .

Так как  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{7}$ ,  $\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{1}{3}$  и, кроме того, по условию задачи  $\alpha$  и  $\beta$  — углы первой четверти, то  $0 < \alpha < \frac{\pi}{4}$  и  $0 < \beta < \frac{\pi}{4}$ . Отсюда находим, что  $0 < \alpha + 2\beta < \frac{3}{4}\pi$ . Но единственный угол, заключенный между 0 и  $\frac{3}{4}\pi$ , тангенс которого равен 1, есть угол  $\frac{\pi}{4}$ . Итак,  $\alpha + 2\beta = \frac{\pi}{4}$ .

596. Данное равенство можно представить в виде

$$2 \sin \frac{a+b}{2} \cos \frac{a-b}{2} = 2 \sin \frac{a+b}{2} \cos \frac{a+b}{2}.$$

Отсюда получим:

$$\sin \frac{a+b}{2} \sin \frac{a}{2} \sin \frac{b}{2} = 0.$$

Следовательно, либо  $a = 2k\pi$ , либо  $b = 2l\pi$ , либо  $a + b = 2n\pi$ . Итак, при выполнении хотя бы одного из условий:  $a = 2k\pi$ ,  $b = 2l\pi$ ,  $a + b = 2n\pi$ , имеет место равенство

$$\sin a + \sin b = \sin(a + b).$$

597. Необходимо, чтобы  $\cos x \neq 0$ ,  $\sin x \neq 0$ ,  $\sin x \neq -1$ , откуда  $x \neq k\frac{\pi}{2}$  ( $k$  — целое). При всех значениях  $x$ , кроме  $x = k\frac{\pi}{2}$ ,  $y$  имеет смысл и

$$y = \frac{\sin x \left(1 + \frac{1}{\cos x}\right)}{\cos x \left(1 + \frac{1}{\sin x}\right)} = \frac{\sin^2 x}{\cos^2 x} \frac{1 + \cos x}{1 + \sin x}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что  $y > 0$ , так как  $\cos x < 1$  и  $\sin x < 1$ .

598. Если  $n$  — целое число, удовлетворяющее условию задачи, то при всех  $x$  имеем:

$$\cos n(x + 3\pi) \cdot \sin \frac{5}{n}(x + 3\pi) = \cos nx \cdot \sin \frac{5}{n}x. \quad (1)$$

Полагая, в частности,  $x=0$ , мы из (1) заключаем, что  $n$  должно удовлетворять уравнению

$$\sin \frac{15\pi}{n} = 0.$$

Этому уравнению удовлетворяют только те целые числа, которые являются делителями числа 15:

$$n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 15. \quad (2)$$

Непосредственной проверкой убеждаемся в том, что при каждом из этих значений функция

$$\cos nx \cdot \sin \frac{5}{n} x$$

имеет период  $3\pi$ . Формулой (2) исчерпываются все искомые значения  $n$ .

599. Так как исследуемая сумма равна нулю при  $x=x_1$ , то

$$\begin{aligned} a_1 \cos(\alpha_1 + x_1) + \dots + a_n \cos(\alpha_n + x_1) &= \\ &= (a_1 \cos \alpha_1 + \dots + a_n \cos \alpha_n) \cos x_1 - \\ &\quad - (a_1 \sin \alpha_1 + \dots + a_n \sin \alpha_n) \sin x_1 = 0. \end{aligned}$$

Но по условию задачи

$$a_1 \cos \alpha_1 + \dots + a_n \sin \alpha_n = 0. \quad (1)$$

Кроме того,  $\sin x_1 \neq 0$ , так как  $x_1 \neq k\pi$ . Следовательно,

$$a_1 \sin \alpha_1 + \dots + a_n \sin \alpha_n = 0. \quad (2)$$

Пусть теперь  $x$  — любое число. Тогда

$$\begin{aligned} a_1 \cos(\alpha_1 + x) + \dots + a_n \cos(\alpha_n + x) &= \\ &= (a_1 \cos \alpha_1 + \dots + a_n \cos \alpha_n) \cos x + \\ &\quad + (a_1 \sin \alpha_1 + \dots + a_n \sin \alpha_n) \sin x = 0, \end{aligned}$$

так как в силу (1) и (2) суммы, стоящие в скобках, равны нулю.

600. Предположим противное, т. е. допустим, что существует  $T \neq 0$  такое, что при всех  $x \geq 0$  будет

$$\cos \sqrt{x+T} = \cos \sqrt{x}. \quad (1)$$

(Ограничение  $x \geq 0$  необходимо потому, что при  $x < 0$  радикал  $\sqrt{x}$  будет мнимым.) Положим сначала в формуле (1)  $x = 0$ ; тогда

$$\cos \sqrt{T} = \cos 0 = 1 \quad (2)$$

и, стало быть,

$$\sqrt{T} = 2k\pi. \quad (3)$$

Затем подставим в (1) значение  $x = T$ . Тогда, очевидно, будем иметь согласно (1) и (2):

$$\cos \sqrt{2T} = \cos \sqrt{T} = 1,$$

откуда

$$\sqrt{2T} = 2l\pi.$$

Так как по предположению  $T \neq 0$ , то, разделив (4) на (3), получим  $\sqrt{2} = \frac{l}{k}$ , где  $l$  и  $k$  — целые числа. Последнее, как известно, невозможно.

**601.** Преобразуем  $\varphi(x)$  следующим образом:

$$\varphi(x) = \sin^6 x + \cos^6 x = \frac{(1 - \cos 2x)^3}{8} + \frac{(1 + \cos 2x)^3}{8}.$$

Раскрыв скобки и приведя подобные члены, получим:

$$\varphi(x) = \frac{1 + 3 \cos^2 x}{4},$$

откуда следует, что наибольшее значение  $\varphi(x)$  равно 1, а наименьшее  $\frac{1}{4}$ .

**602.** Обозначим искомую сумму через  $A$  и прибавим к ней вторую сумму

$$B = \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{2} + \frac{\sin \frac{2\pi}{4}}{2^2} + \dots + \frac{\sin \frac{\pi n}{4}}{2^n},$$

умножив ее предварительно на  $i$ , получим:

$$A + Bi = \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) + \\ + \frac{1}{2^2} \left( \cos \frac{2\pi}{4} + i \sin \frac{2\pi}{4} \right) + \dots \\ \dots + \frac{1}{2^n} \left( \cos n \frac{\pi}{4} + i \sin n \frac{\pi}{4} \right).$$

Известно, что при перемножении комплексных чисел аргументы их складываются, следовательно,

$$\cos \frac{2\pi}{4} + i \sin \frac{2\pi}{4} = \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) = \\ = \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^2,$$

$$\cos \frac{3\pi}{4} + i \sin \frac{3\pi}{4} = \\ = \left( \cos \frac{2\pi}{4} + i \sin \frac{2\pi}{4} \right) \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) = \\ = \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^3$$

и так далее:

$$\cos n \frac{\pi}{4} + i \sin n \frac{\pi}{4} = \\ = \left( \cos (n-1) \frac{\pi}{4} + i \sin (n-1) \frac{\pi}{4} \right) \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) = \\ = \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^{n-1} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) = \\ = \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^n$$

(формула Муавра). Таким образом,

$$A + Bi = \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) + \frac{1}{2^2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^2 + \dots \\ \dots + \frac{1}{2^n} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^n = \\ = \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) \frac{1 - \frac{1}{2^n} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^n}{1 - \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)}.$$

В последнем выражении применена формула для суммы членов геометрической прогрессии. Искомая сумма  $A$  может быть найдена как вещественная часть полученного выражения. Полагая

$$\cos \frac{\pi}{4} = \sin \frac{\pi}{4} = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

последовательно находим:

$$\begin{aligned} A + Bi &= \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) \frac{1 - \frac{1}{2^n} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)^n}{1 - \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right)} = \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} (1 + i) \frac{1 - \frac{1}{2^n} \left( \cos n \frac{\pi}{4} + i \sin n \frac{\pi}{4} \right)}{1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} - \frac{i}{2\sqrt{2}}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} (1 + i) \times \\ &\times \frac{\left[ 1 - \frac{1}{2^n} \left( \cos n \frac{\pi}{4} + i \sin n \frac{\pi}{4} \right) \right] \left[ \left( 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) + \frac{i}{2\sqrt{2}} \right]}{\left[ \left( 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) - \frac{i}{2\sqrt{2}} \right] \left[ \left( 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) + \frac{i}{2\sqrt{2}} \right]} = \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} (1 + i) \times \\ &\times \frac{\left( 1 - \frac{\cos n \frac{\pi}{4}}{2^n} - \frac{i}{2^n} \sin n \frac{\pi}{4} \right) \left[ \left( 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) + \frac{i}{2\sqrt{2}} \right]}{\left( 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{8}} = \\ &= \frac{[(2\sqrt{2} - 2) + 2i\sqrt{2}] \left[ \left( 2^n - \cos n \frac{\pi}{4} \right) - i \sin n \frac{\pi}{4} \right]}{2^n (10 - 4\sqrt{2})} = \\ &= \frac{(\sqrt{2} - 1) \left[ \left( 2^n - \cos n \frac{\pi}{4} \right) + \sqrt{2} \sin n \frac{\pi}{4} \right]}{2^n (5 - 2\sqrt{2})} + \\ &+ \frac{i \left[ \sqrt{2} \left( 2^n - \cos n \frac{\pi}{4} \right) - (\sqrt{2} - 1) \sin n \frac{\pi}{4} \right]}{2^n (5 - 2\sqrt{2})}. \end{aligned}$$

Выделяя вещественную часть, находим:

$$A = \frac{(\sqrt{2}-1) \left(2^n - \cos n \frac{\pi}{4}\right) + \sqrt{2} \sin n \frac{\pi}{4}}{2^n (5 - 2\sqrt{2})}.$$

603. Утверждение будет доказано, если мы установим, что  $A=B=0$ . Пусть  $A^2 + B^2 \neq 0$ , т. е., по крайней мере, одно из чисел  $A, B$  отлично от нуля. Тогда

$$\begin{aligned} f(x) &= \left( \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin x \right) \sqrt{A^2 + B^2} = \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \sin(x + \varphi), \end{aligned}$$

где  $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A}{B}$ .

Пусть теперь  $x_1$  и  $x_2$  — два указанных в задаче значения аргумента; тогда

$$f(x_1) = f(x_2) = 0,$$

и так как  $\sqrt{A^2 + B^2} \neq 0$ , то

$$\sin(x_1 + \varphi) = \sin(x_2 + \varphi) = 0.$$

Отсюда  $x_1 + \varphi = m\pi$ ,  $x_2 + \varphi = n\pi$  и, следовательно,  $x_1 - x_2 = k\pi$  при некотором целом  $k$ . Это равенство приводит к противоречию, так как по условию

$$x_1 - x_2 \neq k\pi.$$

Следовательно,  $A^2 + B^2 = 0$ , откуда  $A=B=0$ .



*Виктор Борисович Лидский,  
Лев Васильевич Овсянников,  
Анатолий Николаевич Тулайков,  
Михаил Иванович Шабунин*  
Задачи по элементарной математике

Редактор *В. А. Солодков*  
Техн. редактор *В. Н. Крючкова*  
Корректор *А. С. Бакулова*

---

Печать с матриц. Подписано к печати  
16/1 1962 г. Бумага  $84 \times 103/32$ . Физ.  
печ. л. 14,5. Условн. печ. л. 23,78. Уч.-  
изд. л. 22,91. Тираж 100 000 экз.  
Цена 79 коп. Заказ № 2628.

---

Государственное издательство  
физико-математической литературы.  
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

---

Первая Образцовая типография имени  
А. А. Жданова  
Московского городского совнархоза.  
Москва, Ж-54, Валовая, 28.