

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**



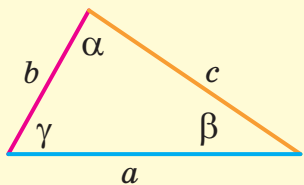
Інтернет-  
підтримка

# Геометрія 9



# Трикутники

## Довільний трикутник



### Теорема синусів

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} = 2R$$

### Теорема косинусів

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

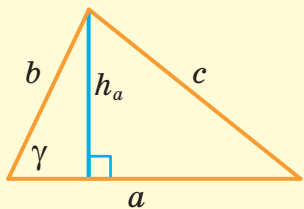
### Площа трикутника

$$S = \frac{1}{2} a h_a; \quad S = \frac{1}{2} ab \sin \gamma$$

### Формула Герона

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

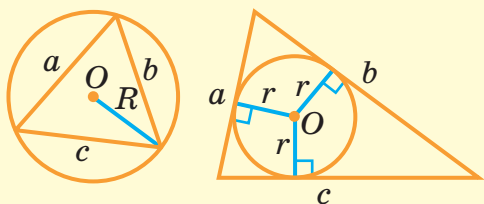
де  $p = \frac{a+b+c}{2}$  — півпериметр



### Формули радіусів

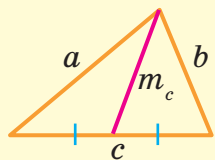
$$R = \frac{abc}{4S},$$

$$r = \frac{2S}{a+b+c} = \frac{S}{p}$$



### Формула медіани

$$m_c = \frac{1}{2} \sqrt{2a^2 + 2b^2 - c^2}$$

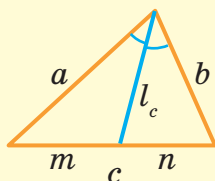


### Формула бісектриси

$$l_c^2 = ab - mn$$

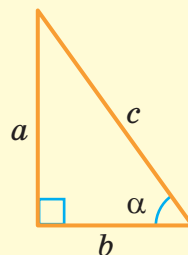
### Властивість бісектриси

$$\frac{a}{b} = \frac{m}{n}$$



## Прямокутний трикутник

Терема Піфагора  $a^2 + b^2 = c^2$



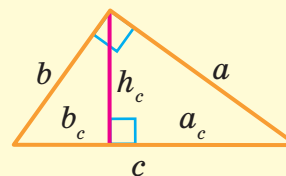
### Тригонометричні функції

$$\sin \alpha = \frac{a}{c}, \quad \cos \alpha = \frac{b}{c}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{b}, \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{b}{a}$$

### Метричні співвідношення

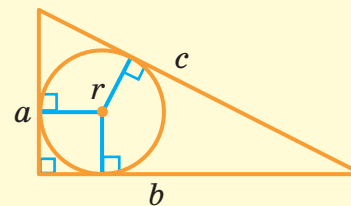
$$h_c = \frac{ab}{c} = \sqrt{a_c b_c}, \quad a^2 = a_c \cdot c, \quad b^2 = b_c \cdot c$$

$$\text{Площа } S = \frac{1}{2} ab = \frac{1}{2} ch_c$$



### Формули радіусів

$$R = \frac{c}{2}, \quad r = \frac{a+b-c}{2}$$



## Тригонометричні функції

$\alpha$	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$135^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$
$\sin \alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\cos \alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1
$\operatorname{tg} \alpha$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	—	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0
$\operatorname{ctg} \alpha$	—	$\sqrt{3}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	-1	$-\sqrt{3}$	—

# Геометрія

**Підручник для 9 класу  
загальноосвітніх навчальних закладів**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Харків  
Видавництво «Ранок»  
2017

УДК [37.016:514](075.3)  
ГЗ6

**Авторський колектив:**

А. П. Єршова, В. В. Голобородько, О. Ф. Крижановський, С. В. Єршов

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 20.03.2017 № 417)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Експерти, які здійснили експертизу даного підручника під час проведення конкурсного відбору проектів підручників для 9 класу загальноосвітніх навчальних закладів і зробили висновок про доцільність надання підручнику грифа «Рекомендовано Міністерством освіти і науки України»:

*Л. І. Невидома*, вчитель-методист, вчитель Королівської ЗОШ І–ІІІ ступенів  
Макарівського району Київської області;

*Т. В. Трачук*, кандидат педагогічних наук, учитель-методист, доцент кафедри теорії та методик викладання шкільних предметів Волинського інституту післядипломної педагогічної освіти;

*Н. М. Федів*, учитель-методист, методист ММК Новороздільського відділу освіти виконавчого комітету Новороздільської міської ради,  
учитель математики Новороздільського НВК імені Володимира Труша  
«гімназія-загальноосвітня школа І ступеня з поглибленим вивченням англійської мови»  
Новороздільської міської ради Львівської області

**Рецензент:**

*Є. П. Нелін*, кандидат педагогічних наук, професор кафедри математики  
Харківського національного педагогічного університету ім. Г. С. Сковороди

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

**ГЗ6 Геометрія** : підруч. для 9 кл. загальноосвіт. навч. закл. / [А. П. Єршова, В. В. Голобородько, О. Ф. Крижановський, С. В. Єршов]. — Харків : Вид-во «Ранок», 2017. — 256 с. : іл.

ISBN 978-617-09-3353-9

УДК [37.016:514](075.3)



**Інтернет-підтримка**  
Електронні матеріали  
до підручника розміщено на сайті  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

- © Єршова А. П., Голобородько В. В.,  
Крижановський О. Ф., Єршов С. В., 2017
- © Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2017
- © ТОВ Видавництво «Ранок», 2017

ISBN 978-617-09-3353-9

## Дорогі друзі!

У цьому навчальному році завершується вивчення планіметрії — геометрії на площині. Радимо ще перед початком занять пригадати основні поняття й теореми, що їх ви вивчали в 7–8 класах. Усі вони відомі з часів Давньої Греції і належать до елементарної (евклідової) геометрії. Але в дев'ятому класі ви познайомитеся з геометричними методами, які було винайдено значно пізніше, в XIV–XX ст.: координатним, векторним і методом геометричних перетворень. Вони набули широкого застосування в техніці й природничих науках, насамперед у фізиці, тому, вивчаючи їх, ви краще зрозумієте деякі фізичні закони. Узагалі геометрію 9 класу можна без перебільшення назвати *геометрією методів*.

За допомогою цього підручника ви навчитеся розв'язувати будь-які, а не тільки прямокутні, трикутники; поглибите свої знання у галузі логіки; дізнаєтесь про життя і здобутки відомих учених минулого. Майже в кожному параграфі вам запропоновано довести математичне твердження або навести приклад, провести аналогію, тобто самостійно ринути до нових знань.

Отже, скарби геометрії чекають на вдумливих і спостережливих шукачів, які зможуть не тільки віднайти, але й оцінити справжню красу й витонченість геометричних знань. Ми дуже сподіваємось, що такими винахідниками станете саме ви.



Бажаємо вам успіхів!



## Як користуватися підручником


Підручник має п'ять розділів, кожний із яких складається з параграфів, а параграфи — з пунктів. У тексті міститься як теоретичний матеріал, так і приклади розв'язування задач. Найважливіші поняття і факти виділено **напівжирним шрифтом**.

Вправи і задачі, які подано в підручнику, поділяються на декілька груп. **Усні вправи** допоможуть вам зрозуміти, наскільки успішно ви засвоїли теоретичний матеріал. Ці вправи не обов'язково виконувати подумки — для їх розв'язування ви можете використати рисунки, провести необхідні міркування в чернетці. Після них можна переходити до **графічних вправ**, які виконуються в зошиті або на комп'ютері. Далі йдуть **письмові задачі**.

---

Спочатку перевірте свої знання, виконуючи завдання *рівня А*. Більш складними є задачі *рівня Б*. Якщо ви добре опанували матеріал і бажаєте виявити свої творчі здібності, на вас чекають задачі *рівня В*. Значки  і  біля номерів вправ означають, що ці вправи на розсуд вчителя можуть бути використані відповідно для роботи в парах і групах. Після кожного параграфу у рубриці **Повторення** зазначено, які саме поняття й факти слід пригадати для успішного вивчення нового матеріалу, а також вказано відповідні параграфи у підручниках для 7 і 8 класів\*, та наведено задачі, які підготують вас до сприйняття наступної теми. Більшість задач підручника супроводжуються відповідями, які наведені наприкінці підручника.

Для самостійної роботи вдома призначені задачі, номери яких позначено значком . Наприкінці кожного розділу подано контрольні запитання й типові задачі для контрольних робіт, завдяки яким ви зможете систематизувати свої знання та удосконалити вміння і навички. На сайті [interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua) ви зможете переглянути відеоматеріали до кожного розділу, а також самостійно перевірити рівень вашої підготовки, пройшовши онлайн-тестування. Про можливість скористатися матеріалами сайту вам нагадуватиме значок . Додаткові задачі до розділів допоможуть вам узагальнити вивчене, а задачі підвищеної складності відкриють нові грані геометрії та красу нестандартного мислення. Зверніть увагу також на матеріали рубрики **«Готуюся до ДПА»**, зокрема **задачі для повторення курсу геометрії 7–9 класів**, подані після останнього розділу, — вони допоможуть вам краще підготуватися до підсумкової атестації.

**Підсумки** наприкінці кожного розділу — своєрідний геометричний компас, за допомогою якого ви зможете орієнтуватися у вивченому матеріалі. Відомості рубрики **«Для тих, хто хоче знати більше»**, що мають позначку , сприятимуть поглибленню знань з окремих тем. Рубрики **«Історична довідка»** і **«Математичні олімпіади»** познайомлять з цікавими фактами про розвиток геометрії та математичного олімпіадного руху, з діяльністю відомих українських та зарубіжних учених.

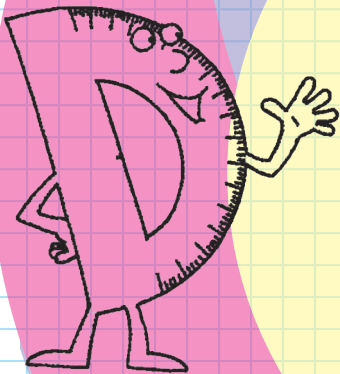
---

\* Єршова, А. П. Геометрія : підруч. для 7 кл. загальноосвіт. навч. закл. [Текст] / А. П. Єршова, В. В. Голобородько, О. Ф. Крижановський. — Х. : Вид-во «Ранок». — 2015. — 224 с. : іл.; Єршова, А. П. Геометрія : Підруч. для 8 кл. загальноосвіт. навч. закл. [Текст] / А. П. Єршова, В. В. Голобородько, О. Ф. Крижановський, С. В. Єршов. — Х. : Вид-во «Ранок», 2016. — 256 с. : іл.

# Розділ I

## Розв'язування трикутників

- § 1. Тригонометричні функції кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$
- § 2. Теорема косинусів та наслідки з неї
- § 3. Теорема синусів та наслідки з неї
- § 4. Розв'язування трикутників
- § 5. Застосування тригонометричних функцій до знаходження площ



Трикутник є першою фігурою, яка не може розклатися в простіші фігури... і тому є першим фундаментом будь-якої речі, яка має межу й форму.

*Джордано Бруно, італійський учений*

У восьмому класі ви навчилися розв'язувати прямокутні трикутники, тобто знаходити їхні невідомі елементи за відомими. Теоретичним підґрунтям для розв'язування прямокутних трикутників були теорема Піфагора й властивості *тригонометричних функцій* гострого кута прямокутного трикутника — синуса, косинуса, тангенса й котангенса. За допомогою теорем і співвідношень, які розглядаються в цьому розділі, можна розв'язати не тільки прямокутний, але й узагалі будь-який трикутник.

Застосування тригонометричних функцій дозволяє отримати нові формули для знаходження окремих елементів та площ многокутників і значно розширює можливості використання алгебри в процесі розв'язування геометричних задач.





# § 1

## Тригонометричні функції кутів від $0^\circ$ до $180^\circ$

### 1.1. Означення тригонометричних функцій на колі

Нагадаємо, що в прямокутному трикутнику з катетами  $a$  і  $b$ , гіпотенузою  $c$  та гострим кутом  $\alpha$  (рис. 1) за раніше даним означенням

$$\sin \alpha = \frac{a}{c}, \quad \cos \alpha = \frac{b}{c}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{b}, \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{b}{a}.$$

Дамо означення тригонометричних функцій для будь-якого кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Для цього в прямокутній системі координат, з якою ви добре знайомі, побудуємо коло радіуса 1 з центром у початку координат (рис. 2). Таке коло називають **тригонометричним**. Від додатної півосі осі  $Ox$  відкладемо у напрямі проти ходу годинникової стрілки гострий кут  $\alpha$ . Нехай  $M(x; y)$  — точка, у якій сторона цього кута перетинає дане коло (рис. 2, а). Проведемо перпендикуляр  $MN$  до осі  $Ox$ . Утворився прямокутний трикутник  $OMN$  з гострим кутом  $\alpha$ , гіпотенузою  $OM = 1$  і катетами, довжини яких дорівнюють координатам точки  $M$ :  $ON = x$ ,  $MN = y$ . Із трикутника  $OMN$  маємо:

$$\sin \alpha = \frac{MN}{OM} = \frac{y}{1} = y, \quad \cos \alpha = \frac{ON}{OM} = \frac{x}{1} = x,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{MN}{ON} = \frac{y}{x}, \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{ON}{MN} = \frac{x}{y}.$$

Отже, в тригонометричному колі синус і косинус гострого кута дорівнюють відповідно ординаті й абсцисі точки, у якій сторона даного кута перетинає коло, а тангенс і котангенс цього кута дорівнюють відношенням ординати до абсциси й абсциси до ординати відповідно:

$$\sin \alpha = y, \quad \cos \alpha = x, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x}, \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{x}{y}.$$

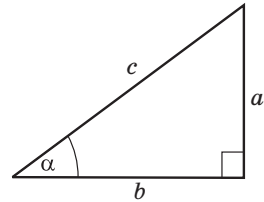


Рис. 1. До означення тригонометричних функцій гострого кута прямокутного трикутника

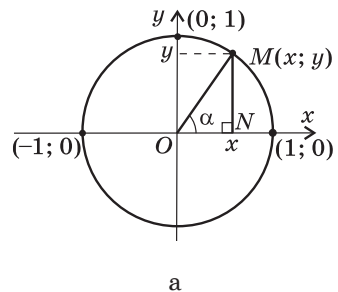
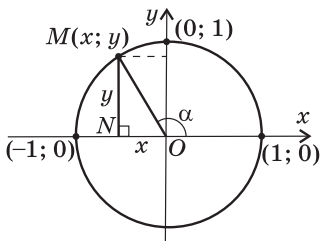


Рис. 2. До означення тригонометричних функцій кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  [Див. також с. 8]

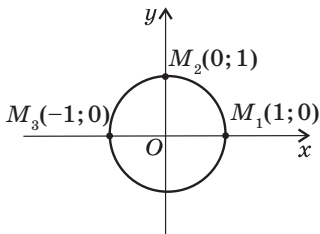
Зазначимо, що значення тригонометричних функцій залежать лише від градусної міри кута. Використаємо отримані рівності для означення тригонометричних функцій будь-якого кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

### Означення

Для будь-якого кута  $\alpha$  з проміжку  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   $\sin \alpha = y$ ,  $\cos \alpha = x$ ,  
 $\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x}$  ( $\alpha \neq 90^\circ$ ),  $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{x}{y}$  ( $\alpha \neq 0^\circ, \alpha \neq 180^\circ$ ), де  $x, y$  — координати відповідної точки  $M$  тригонометричного кола (рис. 2).



б



в

Рис. 2. [Закінчення]

Отже, якщо кут  $\alpha$  тупий ( $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ , рис. 2, б), то ордината точки  $M$  додатна (тобто  $\sin \alpha > 0$ ), а абсциса від'ємна (тобто  $\cos \alpha < 0$ ). Очевидно, що відношення координат у цьому випадку також від'ємні, тобто  $\operatorname{tg} \alpha < 0$ ,  $\operatorname{ctg} \alpha < 0$ . Узагалі, **косинуси, тангенси й котангенси тупих кутів є від'ємними числами**. І навпаки, **якщо косинус, тангенс або котангенс кута  $\alpha$  ( $\alpha < 180^\circ$ ) від'ємні, то кут  $\alpha$  тупий**.

Визначимо значення тригонометричних функцій кутів  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  (рис. 2, в). Якщо  $\alpha = 0^\circ$ , то точка  $M_1$  має координати  $(1; 0)$ . Звідси  $\sin 0^\circ = 0$ ,  $\cos 0^\circ = 1$ ,  $\operatorname{tg} 0^\circ = 0$ . Оскільки ділення на нуль не визначене, то  $\operatorname{ctg} 0^\circ$  не існує.

Якщо  $\alpha = 90^\circ$ , то точка  $M_2$  має координати  $(0; 1)$ . Звідси  $\sin 90^\circ = 1$ ,  $\cos 90^\circ = 0$ ,  $\operatorname{ctg} 90^\circ = 0$ . Оскільки ділення на нуль не визначене, то  $\operatorname{tg} 90^\circ$  не існує.

І, нарешті, якщо  $\alpha = 180^\circ$ , то точка  $M_3$  має координати  $(-1; 0)$ . Звідси  $\sin 180^\circ = 0$ ,  $\cos 180^\circ = -1$ ,  $\operatorname{tg} 180^\circ = 0$ . Оскільки ділення на нуль не визначене, то  $\operatorname{ctg} 180^\circ$  не існує.

Зауважимо також, що абсциси точок  $M$  для кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  змінюються в межах від  $-1$  до  $1$ , тобто  $-1 \leq \cos \alpha \leq 1$ , а ординати — в межах від  $0$  до  $1$ , тобто  $0 \leq \sin \alpha \leq 1$ .

## 1.2. Тригонометричні тотожності

Нагадаємо, що для будь-якого гострого кута  $\alpha$  прямокутного трикутника було доведено основну тригонометричну тотожність  $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ . Покажемо, що це співвідношення справджується для будь-якого кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

Справді, якщо кут  $\alpha$  тупий (див. рис. 2, б), то з прямокутного трикутника  $OMN$  ( $\angle N = 90^\circ$ ,  $ON = |x|$ ,  $MN = y$ ,  $OM = 1$ ) за теоремою Піфагора маємо  $MN^2 + ON^2 = OM^2$ , тобто  $x^2 + y^2 = 1$ , і, з урахуванням означень синуса й косинуса,  $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ . У випадку, коли кут  $\alpha$  дорівнює  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  або  $180^\circ$ , цю тотожність легко перевірити безпосередньою підстановкою значень синуса й косинуса відповідного кута (зробіть це самостійно).

Отже, для будь-якого кута  $\alpha$  з проміжку  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1.$$

З основної тригонометричної тотожності з урахуванням знаків тригонометричних функцій для кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  випливає, що

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}, \quad \cos \alpha = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}.$$

Знак  $\cos \alpha$  обирають залежно від того, чи є кут  $\alpha$  гострим (знак «+») або тупим (знак «-»).

Безпосередньо з означень тригонометричних функцій випливають такі тотожності:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (\alpha \neq 90^\circ), \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (0^\circ < \alpha < 180^\circ),$$

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1 \quad (\alpha \neq 0^\circ, \alpha \neq 90^\circ, \alpha \neq 180^\circ).$$

У восьмому класі для гострого кута  $\alpha$  було доведено формули доповнення, які виражають функції кута  $(90^\circ - \alpha)$  через функції кута  $\alpha$ :

$$\sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha, \quad \cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha,$$

$$\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) = \operatorname{ctg} \alpha, \quad \operatorname{ctg}(90^\circ - \alpha) = \operatorname{tg} \alpha.$$

Доведемо формули, що дозволяють звести розгляд тригонометричних функцій кутів  $(180^\circ - \alpha)$  до розгляду функцій кута  $\alpha$ .



**Теорема (формули зведення для кутів  $180^\circ - \alpha$ )**

Для будь-якого кута  $\alpha$  з проміжку  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   
 $\sin(180^\circ - \alpha) = \sin \alpha$ ,  $\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha$ .

**Доведення**

□ Нехай від додатної півосі осі  $Ox$  відкладемо кути  $\alpha$  і  $180^\circ - \alpha$ , причому сторони цих кутів перетинають тригонометричне коло в точках  $M$  і  $M_1$  відповідно (рис. 3). Розглянемо випадок, коли кут  $\alpha$  гострий (для тупих кутів доведення аналогічне). Проведемо з точок  $M$  і  $M_1$  перпендикуляри  $MN$  і  $M_1N_1$  до осі  $Ox$ . Оскільки кут  $N_1OM_1$  доповнює кут  $180^\circ - \alpha$  до розгорнутого, то  $\angle N_1OM_1 = 180^\circ - (180^\circ - \alpha) = \alpha$ , а прямокутні трикутники  $OMN$  і  $OM_1N_1$  рівні за гіпотенузою і гострим кутом. Із рівності катетів  $MN$  і  $M_1N_1$  випливає, що точки  $M$  і  $M_1$  мають однакові ординати, тобто

$$\sin(180^\circ - \alpha) = y_1 = y = \sin \alpha.$$

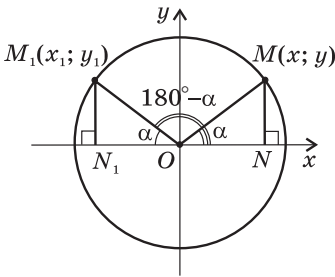
Крім того, з рівності катетів  $ON$  і  $ON_1$  випливає, що абсиси точок  $M$  і  $M_1$  протилежні, тобто

$$\cos(180^\circ - \alpha) = x_1 = -x = -\cos \alpha.$$

Для випадків, коли кут  $\alpha$  дорівнює  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $180^\circ$ , перевірте правильність формул зведення самостійно. ■

**Наслідок**

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) &= -\operatorname{tg} \alpha \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ, \alpha \neq 90^\circ), \\ \operatorname{ctg}(180^\circ - \alpha) &= -\operatorname{ctg} \alpha \quad (0^\circ < \alpha < 180^\circ). \end{aligned}$$



**Рис. 3.** До доведення формул зведення для кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$

**Задача**

Обчисліть значення тригонометричних функцій кута  $150^\circ$ .

**Розв'язання**

$$\sin 150^\circ = \sin(180^\circ - 30^\circ) = \sin 30^\circ = \frac{1}{2}, \quad \cos 150^\circ = \cos(180^\circ - 30^\circ) = -\cos 30^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$\operatorname{tg} 150^\circ = \operatorname{tg}(180^\circ - 30^\circ) = -\operatorname{tg} 30^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{3}, \quad \operatorname{ctg} 150^\circ = \operatorname{ctg}(180^\circ - 30^\circ) = -\operatorname{ctg} 30^\circ = -\sqrt{3}.$$

$$\text{Відповідь: } \sin 150^\circ = \frac{1}{2}, \quad \cos 150^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \operatorname{tg} 150^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{3}, \quad \operatorname{ctg} 150^\circ = -\sqrt{3}.$$

Наведемо значення тригонометричних функцій деяких кутів у вигляді таблиці.

$\alpha$	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$135^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$
$\sin \alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\cos \alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1
$\operatorname{tg} \alpha$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	—	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0
$\operatorname{ctg} \alpha$	—	$\sqrt{3}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	-1	$-\sqrt{3}$	—

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- Сторона кута  $\alpha$ , відкладеного від додатної півосі осі  $Ox$  у напрямі проти годинникової стрілки, перетинає тригонометричне коло в точці  $M$ .
  - Назвіть координати точки  $M$ , якщо  $\alpha = 90^\circ$ .
  - Визначте величину кута  $\alpha$ , якщо  $M\left(\frac{\sqrt{2}}{2}; \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$ .
- Визначте, чи є кут  $\alpha$  ( $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ) гострим, прямим або тупим, якщо:
  - $\cos \alpha = 0$ ;
  - $\sin \alpha \cdot \cos \alpha < 0$ ;
  - $\operatorname{tg} \alpha > 0$ .
- Чи може косинус тупого кута дорівнювати  $0,01$ ;  $-0,8$ ;  $-3$ ? Чи може косинус тупого кута дорівнювати синусу того самого кута?
- Дано гострий кут  $\beta$ , причому  $\sin \beta = n$ ,  $\cos \beta = m$ . Знайдіть синус і косинус кута  $(180^\circ - \beta)$ .
- Чи є правильним твердження:
  - синуси суміжних кутів є протилежними числами;
  - тангенси суміжних кутів є протилежними числами?



## Графічні вправи

- 6.** У прямокутній системі координат на тригонометричному колі позначте точку  $M$ , яка відповідає куту  $120^\circ$ .
- Проведіть із точки  $M$  перпендикуляри до осей координат. Визначте координати основ цих перпендикулярів.
  - Позначте на тригонометричному колі точку  $M_1$ , що відповідає гострому куту, синус якого дорівнює синусу  $120^\circ$ . Виміряйте цей гострий кут і обґрунтуйте отриманий результат.
- 7.** У прямокутній системі координат на тригонометричному колі позначте точку  $M$ , яка відповідає куту  $150^\circ$ .
- Визначте координати  $x$  і  $y$  точки  $M$ . Яка з координат більша?
  - Обчисліть значення виразу  $x^2 + y^2$ . Обґрунтуйте отриманий результат.



## Письмові вправи

### Рівень А

- 8.** За допомогою формул зведення для кутів  $(180^\circ - \alpha)$  обчисліть синус, косинус і тангенс кутів  $120^\circ$  і  $135^\circ$ .
- 9.** За допомогою формул зведення і тригонометричних таблиць (калькулятора) обчисліть:
- $\sin 160^\circ$ ;
  - $\cos 115^\circ$ ;
  - $\operatorname{tg} 95^\circ$ .
- 10.** Визначте всі значення  $\alpha$  від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , для яких справджується рівність:
- $\sin \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$ ;
  - $\cos \alpha = -0,5$ ;
  - $\operatorname{tg} \alpha = -1$ .
- 11.** За допомогою формул зведення і таблиці значень тригонометричних функцій (див. Довідкові матеріали на с. 237–238) знайдіть:
- $\sin \alpha$  і  $\operatorname{tg} \alpha$ , якщо  $\alpha = 170^\circ$ ;
  - гострий і тупий кути, синуси яких дорівнюють  $0,643$ .
- 12.** Знайдіть:
- $\sin \alpha$ , якщо  $\cos \alpha = -0,8$ ;
  - $\cos \alpha$ , якщо  $\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{5}}$ ,  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ;
  - $\operatorname{tg} \alpha$ , якщо  $\cos \alpha = -1$ .
- 13.** Знайдіть  $\cos \alpha$  і  $\operatorname{tg} \alpha$ , якщо  $\sin \alpha = 0,6$  і кут  $\alpha$  тупий.

14. Порівняйте:

- а)  $\cos 65^\circ$  і  $\cos 115^\circ$ ;  
 б)  $\operatorname{tg} 48^\circ$  і  $\operatorname{tg} 148^\circ$ ;  
 в)  $\sin 35^\circ$  і  $\sin 145^\circ$ .

15. Доведіть тотожність:

а)  $-\operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) \cdot \cos \alpha = \sin \alpha$ ;      б)  $\cos^2 \alpha + \sin \alpha \sin(180^\circ - \alpha) = 1$ .



16. Доведіть тотожність:

а)  $\frac{-\sin \alpha}{\cos(180^\circ - \alpha)} = \operatorname{tg} \alpha$ ;      в)  $\frac{\sin(180^\circ - \alpha)}{\sin \alpha} = 1$ .

б)  $1 - \cos^2 \alpha = \sin \alpha \sin(180^\circ - \alpha)$ ;

### Рівень Б

17. Знайдіть тангенс і котангенс кута  $\alpha$ , якщо:

а)  $\cos \alpha = -\frac{5}{13}$ ;      в)  $\sin \alpha = -\cos \alpha$ .

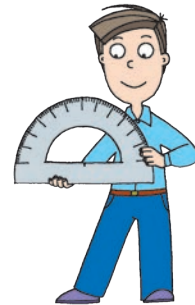
б)  $\sin \alpha = \frac{8}{17}$ ,  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ;



18. Знайдіть:

а)  $\operatorname{tg} \alpha$ , якщо  $\cos \alpha = -0,28$ ;

б)  $\operatorname{ctg} \alpha$ , якщо  $\sin \alpha = \frac{12}{13}$  і кут  $\alpha$  тупий.



19 (опорна). Доведіть, що:

а)  $1 + \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$  ( $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ,  $\alpha \neq 90^\circ$ );

б)  $1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$  ( $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ).

20. Спростіть вираз:

а)  $1 - \sin(180^\circ - \alpha) \cos(180^\circ - \alpha) \operatorname{tg}(180^\circ - \alpha)$ ;

б)  $1 - \operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) \operatorname{tg} \alpha$ .



21. Спростіть вираз:

а)  $\operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \alpha + \cos \alpha \cos(180^\circ - \alpha)$ ;

б)  $(\sin \alpha - \cos \alpha)^2 - 2 \operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) \cos^2 \alpha$ .

22. Відомо, що  $\operatorname{tg} \alpha = -0,75$ . Знайдіть  $\sin \alpha$  і  $\cos \alpha$ .
23. Знайдіть  $\sin \alpha$  і  $\cos \alpha$ , якщо  $\operatorname{ctg} \alpha = -2,4$ .
24. Доведіть, що синуси будь-яких двох кутів паралелограма рівні.
25. Доведіть, що сума косинусів усіх кутів трапеції дорівнює нулю.
26. Побудуйте кут  $\alpha$ , якщо:
- а)  $\sin \alpha = \frac{4}{5}$  і кут  $\alpha$  гострий;      б)  $\cos \alpha = -\frac{3}{5}$ .
27. Побудуйте кут  $\alpha$ , якщо  $\operatorname{tg} \alpha = -\frac{1}{3}$ .

### Рівень В

28. Знайдіть  $\sin \alpha$  і  $\cos \alpha$ , якщо  $\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha = -2,5$ . Скільки розв'язків має задача?
29. Знайдіть  $\operatorname{tg} \alpha$ , якщо  $\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 0,5$ . Скільки розв'язків має задача?
30. Розташуйте кути  $50^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $170^\circ$  у порядку зростання значень їхніх тригонометричних функцій:
- а) косинусів;      б) синусів;      в) тангенсів.
31. Відомо, що  $\alpha$  і  $\beta$  — тупі кути, причому  $\cos \alpha > \cos \beta$ . Порівняйте:
- а)  $\sin \alpha$  і  $\sin \beta$ ;      б)  $\operatorname{tg} \alpha$  і  $\operatorname{tg} \beta$ ;      в)  $\operatorname{ctg} \alpha$  і  $\operatorname{ctg} \beta$ .



## Повторення перед вивченням § 2

### Теоретичний матеріал

- розв'язування прямокутних трикутників;
- теорема Піфагора.

8 клас, § 19–21

8 клас, § 13

### Задачі

32. У прямокутному трикутнику з гострим кутом  $30^\circ$  гіпотенуза дорівнює 6 см. Знайдіть катети трикутника.
33. Висота ромба, проведена з вершини тупого кута, ділить сторону ромба на відрізки завдовжки 8 см і 9 см. Знайдіть площу ромба. Скільки розв'язків має задача?



# § 2

## Теорема косинусів та наслідки з неї

### 2.1. Теорема косинусів

Під час розв'язування задач часто виникає необхідність обчислити невідому сторону трикутника за двома відомими сторонами й кутом між ними. Теорема Піфагора дозволяє зробити це у випадку, коли даний кут прямий. Наступна теорема є узагальненням теореми Піфагора і дозволяє знаходити невідому сторону в довільному трикутнику.

#### Теорема (косинусів)

Квадрат будь-якої сторони трикутника дорівнює сумі квадратів двох інших сторін без подвоєного добутку цих сторін на косинус кута між ними:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C,$$

де  $a, b, c$  — сторони трикутника, кут  $C$  — кут між сторонами  $a$  і  $b$ .

#### Доведення

□ Нехай у трикутнику  $ABC$   $BC = a$ ,  $AC = b$ ,  $AB = c$ . Розглянемо одночасно два випадки, коли кути  $A$  і  $C$  обидва гострі (рис. 4, а) та коли кут  $A$  тупий, а кут  $C$  гострий (рис. 4, б). Проведемо висоту  $BD$ . Із прямокутного трикутника  $BDC$  маємо:

$$BD = a \sin C, \quad CD = a \cos C.$$

Тоді  $AD = |b - a \cos C|$ . Із прямокутного трикутника  $ABD$  за теоремою Піфагора:

$$AB^2 = BD^2 + AD^2, \quad c^2 = (a \sin C)^2 + (b - a \cos C)^2,$$

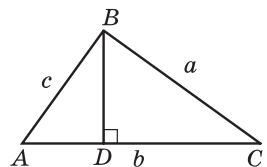
$$c^2 = a^2 \sin^2 C + b^2 - 2ab \cos C + a^2 \cos^2 C,$$

$$c^2 = a^2 (\sin^2 C + \cos^2 C) + b^2 - 2ab \cos C,$$

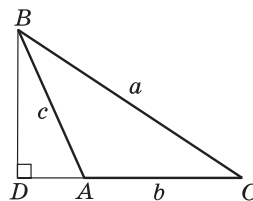
$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C.$$

У випадку, коли кут  $C$  прямий, маємо  $\cos C = \cos 90^\circ = 0$ . Тоді твердження теореми набуває вигляду  $c^2 = a^2 + b^2$ , тобто збігається з твердженням вже доведеної теореми Піфагора.

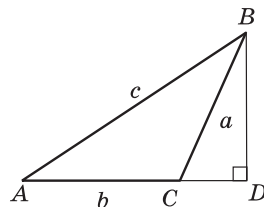
Доведення для випадку, коли кут  $C$  тупий (рис. 4, в), проведіть самостійно. ■



а



б



в

Рис. 4. До доведення теореми косинусів

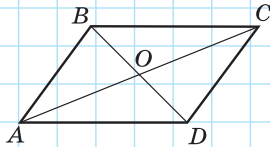


Рис. 5

**Задача**

Знайдіть сторони паралелограма, якщо його діагоналі завдовжки 10 см і 16 см перетинаються під кутом  $60^\circ$ .

**Розв'язання**

Нехай діагоналі паралелограма  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$ ,  $AC = 16$  см,  $BD = 10$  см,  $\angle AOB = 60^\circ$  (рис. 5). Оскільки діагоналі паралелограма точкою перетину діляться навпіл, то  $AO = OC = 8$  см,  $BO = OD = 5$  см. За теоремою косинусів із трикутника  $AOB$  маємо:

$$AB^2 = AO^2 + OB^2 - 2AO \cdot OB \cos \angle AOB,$$

$$AB^2 = 8^2 + 5^2 - 2 \cdot 8 \cdot 5 \cos 60^\circ.$$

Оскільки  $\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$ , то  $AB^2 = 49$ ,  $AB = 7$  (см).

Оскільки  $\angle AOD = 120^\circ$  як суміжний з кутом  $AOB$ , то з трикутника  $AOD$  за теоремою косинусів маємо:

$$AD^2 = AO^2 + OD^2 - 2AO \cdot OD \cos \angle AOD,$$

$$AD^2 = 8^2 + 5^2 - 2 \cdot 8 \cdot 5 \cos 120^\circ.$$

Оскільки  $\cos 120^\circ = -\cos 60^\circ = -\frac{1}{2}$ , то  $AD^2 = 129$ ,

$$AD = \sqrt{129} \text{ (см)}.$$

**Відповідь:** 7 см і  $\sqrt{129}$  см.

**2.2. Наслідки з теореми косинусів**

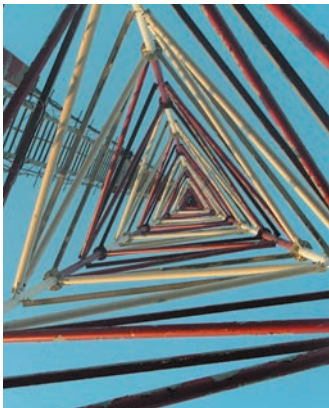
Завдяки своїм наслідкам теорема косинусів дає можливість не тільки знаходити невідому сторону трикутника, але й визначати кути трикутника за відомими сторонами (див. рис. 4).

**Наслідок 1**

$$\text{У трикутнику } ABC \cos C = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}.$$

**Наслідок 2**

Якщо в трикутнику зі сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  справджується нерівність  $a^2 + b^2 > c^2$ , то кут, протилежний стороні  $c$ , гострий; якщо  $a^2 + b^2 < c^2$ , то кут, протилежний стороні  $c$ , тупий.



Дійсно, якщо у формулі, наведеній у наслідку 1,  $a^2 + b^2 > c^2$ , то  $\cos C > 0$ , отже, кут  $C$  гострий, якщо  $a^2 + b^2 < c^2$ , то  $\cos C < 0$ , отже, кут  $C$  тупий.

Нагадаємо, що у випадку, коли  $a^2 + b^2 = c^2$ , за теоремою, оберненою до теореми Піфагора, кут, протилежний стороні  $c$ , прямий.

Таким чином, за допомогою теореми косинусів можна однозначно встановити, чи є трикутник із заданими сторонами гострокутним, прямокутним або тупокутним.

Наслідком із теореми косинусів можна вважати також таку властивість паралелограма.



### Опорна задача

#### (про співвідношення діагоналей і сторін паралелограма)

Сума квадратів діагоналей паралелограма дорівнює сумі квадратів усіх його сторін:  $d_1^2 + d_2^2 = 2(a^2 + b^2)$ , де  $d_1$  і  $d_2$  — діагоналі паралелограма,  $a$  і  $b$  — сусідні сторони паралелограма.

Доведіть.

#### Розв'язання

Нехай у паралелограмі  $ABCD$   $AB = CD = a$ ,  $AD = BC = b$ ,  $BD = d_1$ ,  $AC = d_2$ ,  $\angle BAD = \gamma$  (рис. 6). Оскільки сума сусідніх кутів паралелограма дорівнює  $180^\circ$ , то  $\angle ABC = 180^\circ - \gamma$ . Виразимо квадрати діагоналей паралелограма за допомогою теореми косинусів.

Із трикутника  $ABD$  маємо:

$$BD^2 = AB^2 + AD^2 - 2AB \cdot AD \cos \gamma, \quad d_1^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma.$$

Із трикутника  $ABC$  маємо:

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2AB \cdot BC \cos(180^\circ - \gamma),$$

або, враховуючи, що  $\cos(180^\circ - \gamma) = -\cos \gamma$ ,

$$d_2^2 = a^2 + b^2 + 2ab \cos \gamma.$$

Додаючи праві й ліві частини отриманих рівностей, одержимо:  $d_1^2 + d_2^2 = 2(a^2 + b^2)$ , що й треба було довести.

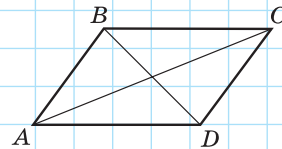


Рис. 6

## Запитання і задачі



### Усні вправи

34. У трикутнику зі сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  визначте, чи є кут, протилежний стороні  $a$ , гострим, прямим або тупим, якщо:
- а)  $a^2 > b^2 + c^2$ ;      б)  $a^2 < b^2 + c^2$ ;      в)  $a^2 = b^2 + c^2$ .
35. Чи можуть два кути трикутника мати від'ємні косинуси?
36. Назвіть найбільший кут трикутника  $ABC$ , якщо  $AB^2 > BC^2 + AC^2$ .



### Графічні вправи

37. Накресліть трикутник зі сторонами 3 см і 5 см та кутом між ними  $120^\circ$ . За теоремою косинусів обчисліть довжину найбільшої сторони трикутника. Перевірте отриманий результат вимірюванням.
38. Накресліть рівносторонній трикутник і виміряйте його сторони.
- а) Обчисліть значення виразу  $a^2 + b^2 - c^2$ , де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — довжини сторін трикутника, причому  $a < b < c$ .
- б) За результатом обчислення визначте, чи є найбільший кут трикутника гострим, прямим або тупим. Перевірте отриманий результат вимірюванням.



### Письмові вправи

#### Рівень А

39. Знайдіть невідому сторону трикутника, якщо дві його сторони і кут між ними дорівнюють відповідно:
- а)  $3\sqrt{3}$  см, 11 см і  $30^\circ$ ;      в) 5 см, 16 см і  $120^\circ$ .
- б) 8 см, 15 см і  $60^\circ$ ;
40. Знайдіть периметр трикутника, якщо його сторони завдовжки 7 см і 15 см утворюють кут  $60^\circ$ .
41. Сторони трикутника дорівнюють  $3\sqrt{2}$ , 1 і 5. Визначте градусну міру найбільшого кута трикутника.
42. Доведіть, що рівнобедрений трикутник з основою 7 см і бічною стороною 4 см є тупокутним.



43. Дві сторони трикутника дорівнюють 4 і 8. Яке найменше ціле значення повинна мати довжина третьої сторони, щоб кут між двома даними сторонами був тупим?
44. Дві сторони трикутника дорівнюють  $4\sqrt{2}$  см і 1 см, а синус кута між ними дорівнює  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ . Знайдіть третю сторону трикутника. Скільки розв'язків має задача?
45. У трикутнику  $ABC$   $AB=6$  см,  $BC=5$  см, а косинус зовнішнього кута при вершині  $B$  дорівнює  $-0,2$ . Знайдіть сторону  $AC$ .

### Рівень Б

46. У паралелограмі знайдіть довжини:  
 а) сторін, якщо діагоналі завдовжки  $6\sqrt{2}$  см і 14 см перетинаються під кутом  $45^\circ$ ;  
 б) діагоналей, якщо сторони дорівнюють 10 см і 16 см, а один із кутів паралелограма вдвічі більший за інший.
47. Знайдіть діагоналі ромба з периметром  $4a$  і гострим кутом  $\alpha$ . Розв'яжіть задачу двома способами.
48. Діагональ паралелограма дорівнює 6 см і утворює зі стороною завдовжки 8 см кут  $60^\circ$ . Знайдіть невідому сторону й невідому діагональ паралелограма.
49. Не обчислюючи кутів трикутника, визначте його вид (за величиною кутів), якщо сторони трикутника дорівнюють:  
 а) 2, 3 і 4;                      б) 7, 24 і 25;                      в) 6, 10 і 11.
50. Сторони трикутника дорівнюють 5 м, 6 м і 7 м. Знайдіть косинуси кутів трикутника і визначте його вид (за величиною кутів).
51. У паралелограмі знайдіть:  
 а) периметр, якщо діагоналі дорівнюють 11 см і 17 см, а одна зі сторін — 13 см;  
 б) діагоналі, якщо їхні довжини відносяться як 4 : 7, а сторони дорівнюють 7 см і 9 см.
52. Знайдіть сторони паралелограма, якщо його периметр дорівнює 34 см, а діагоналі 11 см і 13 см.

### Рівень В

53. У трикутнику  $ABC$   $\angle A = 90^\circ$ ,  $AC = 4$  см,  $BC = 8$  см. На катеті  $AC$  зовні даного трикутника побудовано рівносторонній трикутник  $ACD$ . Знайдіть довжину відрізка  $BD$ .

-  **54.** У паралелограмі  $ABCD$   $\angle A = 60^\circ$ ,  $AB = 2$ ,  $BC = 4$ . Точки  $M$  і  $N$  — середини сторін  $BC$  і  $CD$  відповідно. Знайдіть косинус кута  $MAN$ .
- 55.** Сторони трикутника завдовжки 10 см і 42 см утворюють кут  $120^\circ$ . Знайдіть довжину медіани, проведеної з вершини даного кута.
- 56 (опорна).** У трикутнику зі сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  медіана, проведена до сторони  $c$ , обчислюється за формулою  $m_c = \frac{1}{2}\sqrt{2(a^2 + b^2) - c^2}$ . Доведіть.
-  **57.** Якщо для медіан трикутника  $m_a$ ,  $m_b$  і  $m_c$  справджується рівність  $m_a^2 + m_b^2 = 5m_c^2$ , то цей трикутник є прямокутним із гіпотенузою  $c$ . Доведіть. Чи справджується обернене твердження?
- 58.** У трапеції  $ABCD$   $AD \parallel CB$ ,  $AD = 8$  см,  $CD = 4\sqrt{3}$  см. Коло, яке проходить через точки  $A$ ,  $B$  і  $C$ , перетинає відрізок  $AD$  в точці  $K$ , причому  $\angle AKB = 60^\circ$ . Знайдіть  $BK$ .



## Повторення перед вивченням § 3

### Теоретичний матеріал

- пропорції;
- розв'язування прямокутних трикутників;
- коло, описане навколо трикутника.



6 клас



8 клас, § 19–21



7 клас, п. 23.1

### Задачі

- 59.** У трикутнику  $ABC$   $\angle A = 60^\circ$ ,  $\angle C = 45^\circ$ ,  $BD = 4$  см — висота трикутника. Знайдіть довжини сторін  $AB$  і  $BC$ .
- 60.** На колі позначено точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$  так, що кут  $ABC$  утричі менший, ніж кут  $ADC$ . Знайдіть градусні міри цих кутів.

# § 3

## Теорема синусів та наслідки з неї

### 3.1. Теорема синусів

Розглянемо ще одну теорему, за допомогою якої можна знаходити невідомі сторони й кути трикутника.

#### Теорема (синусів)

Сторони трикутника пропорційні синусам протилежних кутів:

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

де  $a, b, c$  — сторони трикутника, протилежні кутам  $A, B, C$  відповідно.

#### Доведення

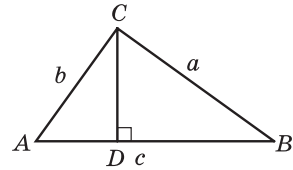
□ Нехай у трикутнику  $ABC$   $BC = a$ ,  $AC = b$ ,  $AB = c$ . Проведемо висоту  $CD$ .

Якщо кут  $A$  гострий (рис. 7, а), то з прямокутного трикутника  $ACD$  маємо  $CD = b \sin A$ ; якщо кут  $A$  тупий (рис. 7, б), то  $CD = b \sin(180^\circ - A) = b \sin A$ . Аналогічно з трикутника  $BCD$  маємо  $CD = a \sin B$ . Прирівняємо отримані вирази:

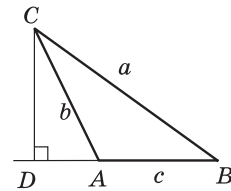
$$b \sin A = a \sin B, \text{ або } \frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B}.$$

Аналогічно доводиться рівність  $\frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$ .

У випадку, коли кут  $A$  прямий, твердження теореми випливає з означення синусів кутів трикутника  $ABC$  (обґрунтуйте це самостійно). ■



а



б

Рис. 7. До доведення теореми синусів

#### Задача

Діагональ паралелограма дорівнює  $d$  і утворює зі сторонами паралелограма кути  $\alpha$  і  $\beta$ . Знайдіть сторони паралелограма.

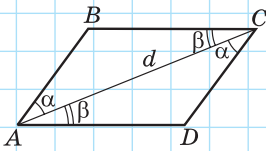


Рис. 8

**Розв'язання**

Нехай у паралелограмі  $ABCD$   $AC = d$ ,  $\angle BAC = \alpha$ ,  $\angle CAD = \beta$  (рис. 8). Знайдемо сторони паралелограма. Куты  $CAD$  і  $ACB$  – внутрішні різносторонні при паралельних прямих  $AD$  і  $BC$  та січній  $AC$ , тому  $\angle ACB = \beta$ .

Тоді в трикутнику  $ABC$   $\angle B = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ . Застосувавши теорему синусів для цього трикутника, одержимо:

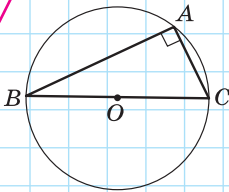
$$\frac{AC}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta))} = \frac{AB}{\sin \beta} = \frac{BC}{\sin \alpha}, \text{ або}$$

$$\frac{d}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{AB}{\sin \beta} = \frac{BC}{\sin \alpha}.$$

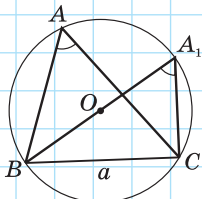
Звідси  $AB = \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$ ,  $BC = \frac{d \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$ .

**Відповідь:**  $\frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$ ,  $\frac{d \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$ .

### 3.2. Зв'язок між пропорційними відношеннями теореми синусів і діаметром описаного кола



а



б

**Опорна задача**

**(повне формулювання теореми синусів)**

Відношення сторони трикутника до синуса протилежного кута дорівнює діаметру кола, описаного навколо трикутника:

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

де  $a, b, c$  – сторони трикутника, протилежні кутам  $A, B, C$  відповідно,  $R$  – радіус описаного кола. Доведіть.

**Розв'язання**

Нехай навколо трикутника  $ABC$  ( $BC = a$ ) описано коло радіуса  $R$ . Враховуючи пропорційні співвідношення теореми синусів, достатньо довести, що  $\frac{a}{\sin A} = 2R$ , або  $a = 2R \sin A$ .

Рис. 9. [Див. також с. 23]

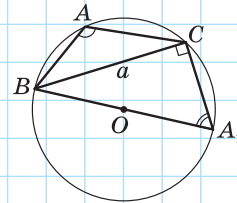


1) Нехай  $\angle A = 90^\circ$  (рис. 9, а). Тоді вписаний кут  $A$  спирається на півколо, тобто  $a = BC = 2R = 2R \cdot 1 = 2R \sin 90^\circ = 2R \sin A$ .

2) Нехай  $\angle A < 90^\circ$  (рис. 9, б). Проведемо діаметр  $BA_1$  і розглянемо трикутник  $A_1BC$ .

У цьому трикутнику  $\angle BCA_1 = 90^\circ$  як кут, що спирається на півколо, тобто  $BC = BA_1 \sin A_1$ . Оскільки вписані кути  $A$  і  $A_1$  спираються на ту саму дугу, то  $\angle A = \angle A_1$ . Тоді  $BC = BA_1 \sin A = 2R \sin A$ , або  $a = 2R \sin A$ .

3) Нехай  $\angle A > 90^\circ$  (рис. 9, в). Проведемо діаметр  $BA_1$ . Тоді  $\angle A + \angle A_1 = 180^\circ$ , звідки  $\sin A_1 = \sin(180^\circ - A) = \sin A$ . Отже,  $BC = BA_1 \sin A$ , або  $a = 2R \sin A$ , що й треба було довести.



в

Рис. 9. [Закінчення]

### Задача

Знайдіть радіус кола, описаного навколо рівнобічної трапеції з основами 1 і 3 та бічною стороною 2.

### Розв'язання

Нехай у трапеції  $ABCD$   $AD \parallel BC$ ,  $AD = 3$ ,  $BC = 1$ ,  $AB = CD = 2$  (рис. 10). Проведемо з вершин тупих кутів трапеції висоти  $BB_1$  і  $CC_1$ . Тоді  $AB_1 = B_1C_1 = C_1D = 1$  (доведіть це самостійно).

З прямокутного трикутника  $ABB_1$   $\cos A = \frac{AB_1}{AB}$ ,  $\cos A = \frac{1}{2}$ , звідки  $\angle A = 60^\circ$ ,  $\sin A = \frac{\sqrt{3}}{2}$ . Із трикутника  $ABD$  за теоремою косинусів маємо:

$$BD^2 = AB^2 + AD^2 - 2AB \cdot AD \cos A,$$

$$BD^2 = 2^2 + 3^2 - 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{1}{2}, \quad BD^2 = 7, \quad BD = \sqrt{7}.$$

Коло, описане навколо трапеції, є також описаним навколо трикутника  $ABD$ . За щойно доведеним

$$\frac{BD}{\sin A} = 2R, \quad \text{отже, } R = \frac{BD}{2 \sin A}, \quad R = \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{21}}{3}.$$

$$\text{Відповідь: } \frac{\sqrt{21}}{3}.$$

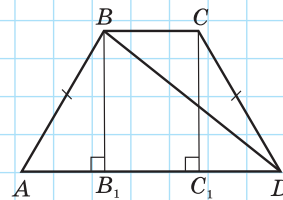


Рис. 10

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 61.** За допомогою теореми синусів відновіть відношення синусів кутів трикутника  $ABC$  у правій частині рівності  $BC : AC : AB = \dots$ .
- 62.** Назвіть найбільшу та найменшу сторони трикутника  $ABC$ , якщо  $\sin B > \sin A > \sin C$ .
- 63.** У трикутнику  $ABC$   $\sin A = \sin C$ . Чи може один із кутів  $A$  і  $C$  бути тупим? Чи має даний трикутник рівні сторони?
- 64.** У трикутнику  $ABC$   $AB = 6$ ,  $BC = 3$ . Чи може бути, що  $\sin A = 1$ ?



### Графічні вправи

- 65.** Накресліть рівнобедрений трикутник із кутом при основі  $30^\circ$ . Виміряйте довжини сторін трикутника та обчисліть їх відношення до синусів протилежних кутів. Порівняйте отримані результати.
- 66.** Накресліть коло радіуса 2 см і впишіть у нього трикутник із кутом  $30^\circ$ . Виміряйте сторону, протилежну до цього кута, і порівняйте її довжину з радіусом кола. Поясніть отриманий результат.



Аа

### Письмові вправи


#### Рівень А

- 67.** У трикутнику  $ABC$  знайдіть відношення сторін  $AB : AC$  і  $BC : AC$ , якщо  $\angle A = 120^\circ$ ,  $\angle B = 30^\circ$ .
- 68.** У трикутнику  $ABC$  знайдіть:
- сторону  $BC$ , якщо  $AB = 2\sqrt{2}$  см,  $\angle B = 105^\circ$ ,  $\angle C = 30^\circ$ ;
  - кут  $A$ , якщо  $AB = 4\sqrt{2}$  см,  $BC = 4$  см,  $\angle C = 45^\circ$ .
- 69.** У трикутнику  $ABC$  знайдіть:
- сторону  $AC$ , якщо  $AB = 6\sqrt{2}$  см,  $\angle B = 30^\circ$ ,  $\angle C = 45^\circ$ ;
  - кут  $B$ , якщо  $AB = \sqrt{3}$  см,  $AC = \sqrt{2}$  см,  $\angle C = 60^\circ$ .
- 70.** У трикутнику  $MNK$  сторона  $MN$  удвічі менша, ніж  $NK$ ,  $\sin K = \frac{1}{4}$ . Знайдіть кут  $M$ . Скільки розв'язків має задача?
- 71.** У трикутнику  $MNK$   $\sin N : \sin K = 1 : 3$ . Знайдіть сторону  $MN$ , якщо  $MK = 3$  м.
- 72.** За допомогою теореми синусів знайдіть відношення основи рівнобедреного прямокутного трикутника до бічної сторони.
- 73.** За допомогою теореми синусів доведіть, що в прямокутному трикутнику катет, протилежний куту  $30^\circ$ , дорівнює половині гіпотенузи.


## Рівень Б

**74.** У прямокутному трикутнику  $ABC$  з гіпотенузою  $AC$  знайдіть бісектрису  $BD$ , якщо  $\angle C = 30^\circ$ ,  $CD = 8\sqrt{2}$  см.


**75.** Знайдіть сторони трикутника  $ABC$ , якщо  $\angle A = 45^\circ$ ,  $\angle C = 30^\circ$ , а висота  $AD$  дорівнює 6 м.

 **76.** У трикутнику  $ABC$   $\angle C = 90^\circ$ ,  $\angle B = 75^\circ$ ,  $CD$  — бісектриса. Знайдіть  $AD$ , якщо  $AC = 2\sqrt{3}$ .

**77.** Одна зі сторін трикутника дорівнює  $a$ , а кути, прилеглі до цієї сторони, дорівнюють  $\alpha$  і  $\beta$ . Знайдіть довжини бісектрис цих кутів.


 **78.** Діагональ паралелограма утворює з його сторонами кути  $\alpha$  і  $\beta$ . Знайдіть цю діагональ, якщо сторона, прилегла до кута  $\alpha$ , дорівнює  $a$ .


**79.** Радіус кола, описаного навколо рівнобедреного трикутника з кутом  $120^\circ$ , дорівнює  $8\sqrt{3}$  см. Знайдіть сторони трикутника.


 **80.** Радіус кола, описаного навколо трикутника, дорівнює 4 см. Знайдіть кути трикутника, якщо дві його сторони дорівнюють 4 см і  $4\sqrt{3}$  см. Скільки розв'язків має задача?

## Рівень В

**81.** Знайдіть довжини двох сторін трикутника, які лежать проти кутів  $60^\circ$  і  $45^\circ$ , якщо різниця цих довжин складає  $m$ .

 **82.** Знайдіть сторони трикутника, периметр якого дорівнює  $P$ , а два кути  $\alpha$  і  $\beta$ .

 **83.** Доведіть, що коло, описане навколо трикутника, і коло, яке проходить через ортоцентр і дві вершини цього трикутника, мають рівні радіуси.


 **84.** Основи рівнобедреної трапеції дорівнюють 9 см і 21 см, а висота 8 см. Знайдіть радіус кола, описаного навколо трапеції.



## Повторення перед вивченням § 4

### Теоретичний матеріал

- розв'язування прямокутних трикутників;
- означення тригонометричних функцій.

 8 клас, § 19–21

 9 клас, п. 1.1

### Задачі

**85.** Знайдіть кути ромба, діагоналі якого дорівнюють 4 і  $4\sqrt{3}$ .

**86.** У трикутнику  $ABC$   $\angle C = 90^\circ$ ,  $CD$  — висота. Порівняйте відрізки  $AD$  і  $DB$ , якщо  $\sin A < \sin B$ .

## § 4

# Розв'язування трикутників

## 4.1. Основні задачі на розв'язування трикутників

За допомогою теорем косинусів і синусів можна розв'язати довільний трикутник за трьома основними елементами, якщо хоча б один із них є стороною трикутника. Розглянемо чотири основні задачі на розв'язування трикутників.



### Задача 1 (розв'язування трикутника за стороною та двома кутами)

Дано:  $a, \angle B, \angle C$  (рис. 11). Знайти:  $b, c, \angle A$ .

#### Розв'язання

- 1) За теоремою про суму кутів трикутника  $\angle A = 180^\circ - (\angle B + \angle C)$ .
- 2) За теоремою синусів  $\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$ , звідки  $b = \frac{a \sin B}{\sin A}$ ,  $c = \frac{a \sin C}{\sin A}$ .

### Задача 2 (розв'язування трикутника за двома сторонами й кутом між ними)

Дано:  $a, b, \angle C$ . Знайти:  $c, \angle A, \angle B$ .

#### Розв'язання

- 1) За теоремою косинусів  $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos C}$ .
- 2) За наслідком з теореми косинусів  $\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$ .  
За допомогою калькулятора або таблиць знаходимо кут  $A$ .
- 3) За теоремою про суму кутів трикутника  $\angle B = 180^\circ - (\angle A + \angle C)$ .

### Задача 3 (розв'язування трикутника за трьома сторонами)

Дано:  $a, b, c$ . Знайти:  $\angle A, \angle B, \angle C$ .

#### Розв'язання

- 1) За наслідком з теореми косинусів  $\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$ .

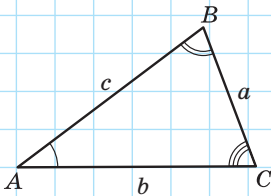


Рис. 11. До задач на розв'язування трикутників

За допомогою калькулятора або таблиць знаходимо кут  $A$ .

$$2) \text{ Аналогічно } \cos B = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}.$$

За допомогою калькулятора або таблиць знаходимо кут  $B$ .

3) За теоремою про суму кутів трикутника  $\angle C = 180^\circ - (\angle A + \angle B)$ .

Зауважимо, що для знаходження кутів у задачах 2 і 3 можна скористатися також теоремою синусів. Але при цьому слід пам'ятати, що будь-якому значенню  $\sin A$ , меншому від одиниці, відповідатимуть два кути — гострий і тупий. Щоб уникнути помилки, рекомендуємо позначити через  $a$  найменшу зі сторін. У такому випадку кут  $A$ , протилежний стороні  $a$ , обов'язково має бути гострим. Обґрунтуйте це самостійно.

#### Задача 4 (розв'язування трикутника за двома сторонами й кутом, протилежним одній із них)

Дано:  $a, b, \angle A$ . Знайти:  $c, \angle B, \angle C$ .

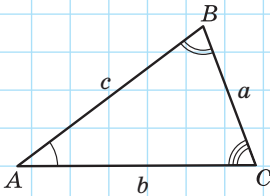
##### Розв'язання

$$1) \text{ За теоремою синусів } \frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B}, \text{ звідки } \sin B = \frac{b \sin A}{a}.$$

За допомогою калькулятора або таблиць знаходимо кут  $B$ , враховуючи, що проти більшої сторони трикутника лежить більший кут (якщо  $a > b$ , то кут  $B$  гострий).

2) За теоремою про суму кутів трикутника  $\angle C = 180^\circ - (\angle A + \angle B)$ .

$$3) \text{ За теоремою синусів } \frac{a}{\sin A} = \frac{c}{\sin C}, \text{ звідки } c = \frac{a \sin C}{\sin A}.$$



[Рис. 11]

Задачу 4 можна розв'язати і в інший спосіб, склавши квадратне рівняння відносно змінної  $c$  на підставі теореми косинусів:  $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$ . Це рівняння може мати один або два корені чи не мати жодного. Тому задача 4 залежно від значень  $a, b$  і  $\angle A$  може мати один або два розв'язки чи не мати жодного.

Звернемо увагу, що задачі 1–3 завжди мають не більш ніж один розв'язок. Подумайте, як це пов'язане з ознаками рівності трикутників.

Домовимося під час розв'язування трикутників округляти довжини сторін до сотих, а градусні міри кутів — до одиниць.

## 4.2. Застосування розв'язування трикутників у задачах

Щойно розглянуті задачі на розв'язування трикутників часто є окремими фрагментами складніших геометричних задач. У цих випадках варто дотримуватись такого плану.

1. Визначити елемент даної фігури (відрізок або кут), який необхідно знайти.
2. Виділити на рисунку допоміжний трикутник, який містить шуканий елемент і може бути розв'язаний за наявними даними задачі. Якщо на рисунку такого трикутника немає, його можна отримати, провівши додаткові побудови. Іноді для пошуку необхідного відрізка або кута треба послідовно розв'язати декілька допоміжних трикутників зі спільними елементами.
3. Розв'язавши допоміжний трикутник (або трикутники), знайти шуканий елемент і використати його для подальшого розв'язування початкової задачі.

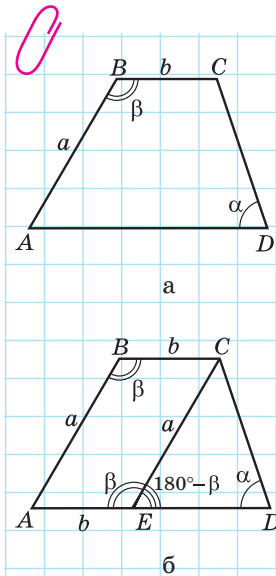


Рис. 12

### Задача

За даними рис. 12, а знайдіть середню лінію трапеції  $ABCD$ .

### Розв'язання

Нехай у трапеції  $ABCD$   $AD \parallel BC$ ,  $AB = a$ ,  $BC = b$ ,  $\angle B = \beta$ ,  $\angle D = \alpha$  (рис. 12, а). Знайдемо середню лінію трапеції.

Проведемо через вершину  $C$  пряму, паралельну стороні  $AB$ . Нехай вона перетинає основу  $AD$  в точці  $E$  (рис. 12, б). Тоді  $ABCE$  — паралелограм,  $CE = AB = a$ ,  $AE = BC = b$ ,  $\angle AEC = \angle B = \beta$ . Звідси в трикутнику  $ECD$   $\angle CED = 180^\circ - \beta$  як суміжний із кутом  $\beta$  паралелограма. Із трикутника  $ECD$  за теоремою синусів

$$\frac{EC}{\sin D} = \frac{ED}{\sin \angle ECD}, \text{ тобто } \frac{a}{\sin \alpha} = \frac{ED}{\sin(\beta - \alpha)}.$$

Звідси  $ED = \frac{a \sin(\beta - \alpha)}{\sin \alpha}$ . Тоді у даній трапеції

$AD = b + \frac{a \sin(\beta - \alpha)}{\sin \alpha}$ . Оскільки середня лінія трапеції дорівнює півсумі її основ, то вона має довжину  $\frac{1}{2} \left( b + b + \frac{a \sin(\beta - \alpha)}{\sin \alpha} \right)$ , тобто  $b + \frac{a \sin(\beta - \alpha)}{2 \sin \alpha}$ .

**Відповідь:**  $b + \frac{a \sin(\beta - \alpha)}{2 \sin \alpha}$ .

Зауважимо, що цю задачу можна розв'язати і без застосування теореми синусів, провівши висоти трапеції з вершин  $B$  і  $C$ . Спробуйте самостійно розв'язати задачу цим способом і зробити висновок про те, який зі способів є зручнішим.

Розв'язування трикутників широко застосовується на практиці, зокрема під час проведення вимірювань на місцевості. Нехай, наприклад, необхідно виміряти відстань від точки  $A$  до певної недосяжної точки  $B$  (рис. 13). Оберемо на місцевості точку  $C$ , прохід від якої до точки  $A$  можливий, і виміряємо відстань  $AC$ . Потім за допомогою спеціальних приладів для вимірювання кутів на місцевості визначимо градусні міри кутів  $BAC$  і  $BCA$ . Отже, нехай  $AC = b$ ,  $\angle BAC = \alpha$ ,  $\angle BCA = \gamma$ . Ці дані дозволяють знайти шукану відстань  $AB$  (див. задачу 1, п. 4.1).

За теоремою про суму кутів трикутника

$$\angle B = 180^\circ - (\alpha + \gamma);$$

за теоремою синусів  $\frac{AC}{\sin B} = \frac{AB}{\sin C}$ , тобто

$$\frac{b}{\sin(180^\circ - (\alpha + \gamma))} = \frac{AB}{\sin \gamma},$$

звідки  $AB = \frac{b \sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)}$ .

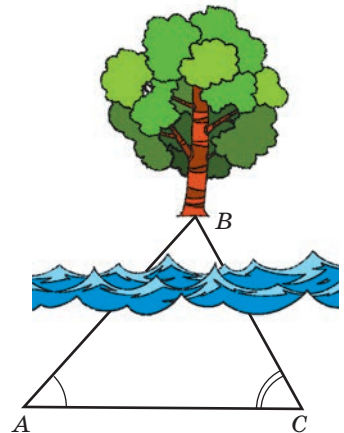


Рис. 13

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 87.** За якою теоремою можна знайти невідому сторону трикутника, у якому задано:
- дві сторони й кут між ними;
  - дві сторони й кут, протилежний одній із них;
  - сторону й прилеглі до неї кути?
- 88.** Чи можна знайти:
- кути трикутника, в якому задано три сторони;
  - сторони трикутника, в якому задано три кути?
- 89.** Скільки розв'язків може мати задача на розв'язування трикутника:
- за трьома сторонами;
  - за двома сторонами й кутом, протилежним одній із них;
  - за стороною та двома кутами?



### Графічні вправи

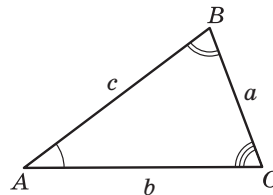
- 90.** Накресліть трикутник  $ABC$ , у якому  $\angle A = 20^\circ$ ,  $\angle B = 100^\circ$ ,  $\angle C = 60^\circ$ . Знайдіть на стороні  $AC$  точку  $C_1$  таку, щоб трикутники  $ABC$  і  $ABC_1$  були двома розв'язками задачі на розв'язування трикутника за двома сторонами й кутом  $20^\circ$ , протилежним одній із них. Сполучіть точки  $B$  і  $C_1$  та виміряйте кут  $AC_1B$ .
- 91.** Накресліть трикутник зі стороною 4 см і прилеглими до неї кутами  $45^\circ$  і  $60^\circ$ . Обчисліть довжини сторін трикутника, протилежних заданим кутам. Перевірте отримані результати вимірюванням.



### Аа Письмові вправи

#### Рівень А

- 92.** Розв'яжіть рівнобедрений трикутник за основою 6 см і кутом при основі  $15^\circ$ .
- 93.** Розв'яжіть трикутник за стороною 10 см і прилеглими до неї кутами  $30^\circ$  і  $60^\circ$ .
- 94.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11) за стороною та двома кутами:
- $a = 10$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 30^\circ$ ;
  - $b = 6$ ,  $\alpha = 100^\circ$ ,  $\beta = 50^\circ$ .



[Рис. 11]



**95.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11) за двома сторонами й кутом між ними:

а)  $a = 5$ ,  $b = 21$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ;

б)  $b = 7$ ,  $c = 8$ ,  $\alpha = 120^\circ$ .

**96.** Дороги між селищами Липове, Веселе і Семенівка вирішили заасфальтувати. Відстань між Липовим і Веселим дорівнює 1 км, між Веселим і Семенівкою — 4,2 км, а відрізок дороги між Липовим і Семенівкою видно з Веселого під кутом  $60^\circ$ . Бригада ремонтників асфальтує за день 0,5 км дороги. Чи встигнуть ремонтники впоратися до приїзду комісії, якщо роботи розпочато 21 червня, а комісія приїздить 7 липня?



**97.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11), якщо:

а)  $a = 12$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 64^\circ$ ;

б)  $a = 5\sqrt{2}$ ,  $b = 7$ ,  $\gamma = 135^\circ$ .

**98.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11) за трьома сторонами:

а)  $a = 3\sqrt{3}$ ,  $b = 2$ ,  $c = 7$ ;

б)  $a = 8$ ,  $b = 15$ ,  $c = 17$ .

**99.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11) за двома сторонами й кутом, протилежним одній із них:

а)  $a = 12$ ,  $b = 5$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ;

в)  $a = 1$ ,  $c = 2$ ,  $\alpha = 45^\circ$ .

б)  $b = 2$ ,  $c = 10$ ,  $\beta = 6^\circ$ ;

**100.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11), якщо:

а)  $a = 5$ ,  $b = 21$ ,  $c = 19$ ;

б)  $a = 6$ ,  $b = 8$ ,  $\alpha = 22^\circ$ .

## Рівень Б

**101.** Розв'яжіть трикутник\* (див. рис. 11), якщо:

а)  $c = 3$ ,  $\gamma = 30^\circ$ ,  $h_b = 2$ ;

б)  $a = 17$ ,  $b = 5\sqrt{2}$ ,  $h_a = 5$ .

**102.** У трикутнику  $ABC$   $\angle C = 90^\circ$ ,  $\angle A = 30^\circ$ ,  $BC = 2$  см,  $AD$  — бісектриса. Розв'яжіть трикутник  $ABD$ .

**103.** Який вид (за величиною кутів) може мати трикутник  $ABC$ , якщо:

а)  $BC = 8$  см,  $AC = 6$  см,  $\angle A = 60^\circ$ ;

б)  $BC = 8$  см,  $AC = 4$  см,  $\angle A = 60^\circ$ ;

в)  $BC = 8$  см,  $AC = 9$  см,  $\angle A = 60^\circ$ .

\* Тут і далі медіану, бісектрису й висоту трикутника, проведені до сторони  $a$ , позначатимемо  $m_a$ ,  $l_a$  і  $h_a$  відповідно.

104. За даними рис. 14 знайдіть  $AD$ .

105. За даними рис. 15 знайдіть  $\sin D$ .

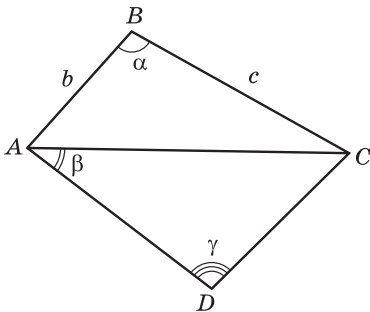


Рис. 14

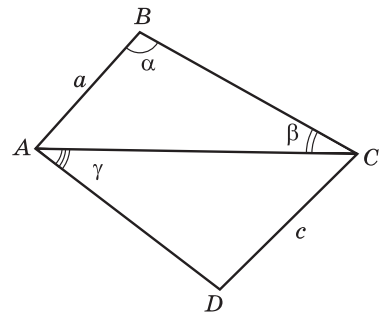


Рис. 15

106. На горі, схил якої знижується під кутом  $\alpha$  до горизонту, росте дерево (рис. 16). Його тінь завдовжки  $l$  падає вниз по схилу при куті сонця над горизонтом  $\beta$ . Знайдіть висоту дерева.

107. Вершину пагорба з точки  $A$  видно під кутом  $\alpha$ , а в разі наближення до пагорба на відстань  $a$  — під кутом  $\beta$  (рис. 17). Знайдіть висоту пагорба.

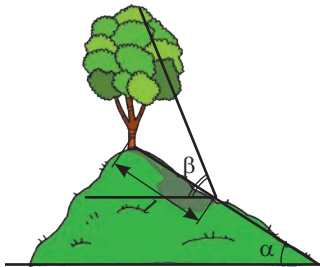


Рис. 16

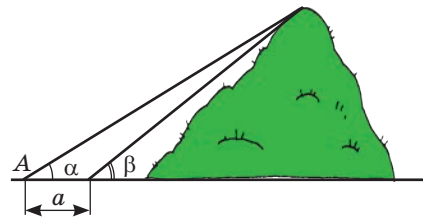


Рис. 17

108. Спостережна вежа заввишки 100 м розташована на горі (рис. 18). Об'єкт спостереження  $A$  видно з вершини вежі під кутом  $60^\circ$ , а від основи вежі — під кутом  $30^\circ$  до горизонту. Знайдіть висоту гори.

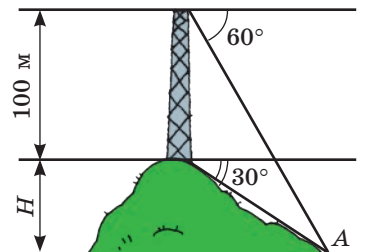


Рис. 18

**109.** Більша основа рівнобічної трапеції дорівнює 10 см, а менша основа дорівнює бічній стороні. Знайдіть периметр трапеції, якщо один із її кутів дорівнює  $110^\circ$ . Відповідь округліть до сантиметрів.

**110.** Більша основа й бічні сторони рівнобічної трапеції дорівнюють 10 см, а діагональ трапеції утворює з основою кут  $50^\circ$ . Знайдіть середню лінію трапеції.

### Рівень В

**111.** Дослідіть залежність кількості розв'язків задачі розв'язування трикутника за двома сторонами  $a$  і  $b$  та кутом  $\alpha$ , протилежним одній із них, від значень  $a$ ,  $b$  і  $\alpha$ .

**112.** Розв'яжіть трикутник (див. рис. 11), якщо:

а)  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $a + b = 24,14$ ;

б)  $b = 9$ ,  $c = 19$ ,  $m_a = 11$ .

**113.** Знайдіть сторони трикутника (див. рис. 11), якщо:

а)  $\alpha = 47^\circ$ ,  $\beta = 120^\circ$ ,  $a - c = 11$ ;

б)  $m_a = 12$ ,  $m_b = 15$ ,  $m_c = 9$ .

**114.** За даними рис. 19 знайдіть сторони трикутника  $AOB$ .

**115.** Сторони  $a$  і  $b$  трикутника утворюють кут  $120^\circ$ . Знайдіть бісектрису трикутника, проведену з вершини цього кута.

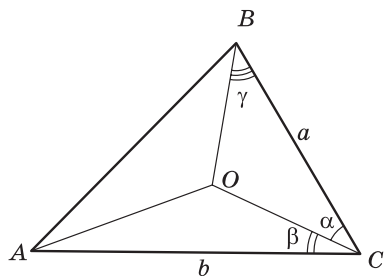


Рис. 19



## Повторення перед вивченням § 5

### Теоретичний матеріал

- площа паралелограма;
- площа трикутника;
- вписане й описане кола трикутника.

8 клас, п. 16.1

8 клас, п. 17.1

7 клас, § 23

### Задачі

**116.** Дві сторони трикутника дорівнюють 10 см і 12 см, а кут між ними  $30^\circ$ . Знайдіть площу трикутника.

**117.** Знайдіть площу паралелограма з висотами  $6\sqrt{2}$  см і 8 см та гострим кутом  $45^\circ$ .

# § 5

## Застосування тригонометричних функцій до знаходження площ

### 5.1. Площі трикутника і чотирикутника



Досі у формулах площ многокутників використовувалися лише довжини їхніх лінійних елементів (сторін, висот, діагоналей). Тригонометричні функції дозволяють залучити для знаходження площі многокутника величини його кутів.

**Теорема (формула обчислення площі трикутника за двома сторонами й кутом між ними)**

Площа трикутника дорівнює половині добутку його сторін на синус кута між ними:

$$S = \frac{1}{2} ab \sin \gamma,$$

де  $a$  і  $b$  — сторони трикутника,  $\gamma$  — кут між ними.

#### Доведення

□ Нехай у трикутнику  $ABC$   $BC = a$ ,  $AC = b$ ,  $AB = c$ ,  $\angle C = \gamma$ . Проведемо висоту  $BH$ . За відомою формулою площі трикутника  $S = \frac{1}{2} AC \cdot BH$ . Однак із прямокутного трикутника  $BCH$  ( $\angle H = 90^\circ$ ) маємо  $BH = BC \sin \angle BCH$ . При цьому у випадку, коли кут  $\gamma$  гострий (рис. 20, а),  $\angle BCH = \gamma$ , а коли кут  $\gamma$  тупий (рис. 20, б),  $\angle BCH = 180^\circ - \gamma$ ,  $\sin \angle BCH = \sin(180^\circ - \gamma) = \sin \gamma$ . Отже,  $BH = BC \sin \gamma$ . Тоді

$$S = \frac{1}{2} AC \cdot BC \cdot \sin \gamma = \frac{1}{2} ab \sin \gamma.$$

Випадок, коли кут  $\gamma$  прямий, розгляньте самостійно. ■

#### Наслідок

Площа паралелограма дорівнює добутку його сторін на синус кута між ними:

$$S = ab \sin \gamma,$$

де  $a$  і  $b$  — сторони паралелограма,  $\gamma$  — кут між ними.

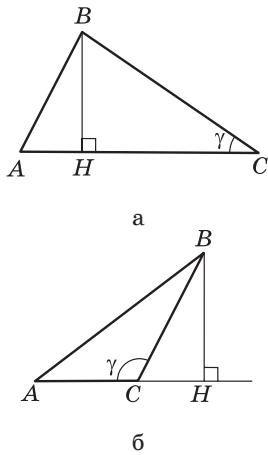


Рис. 20. До доведення формули площі трикутника

**Задача**

Знайдіть найменшу сторону трикутника, площа якого дорівнює  $8\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>, найбільша сторона — 8 см, а один із кутів —  $30^\circ$ .

**Розв'язання**

Нехай дано трикутник  $ABC$ ,  $AC = 8$  см,  $S_{ABC} = 8\sqrt{3}$  см<sup>2</sup> (рис. 21). Із теореми про суму кутів трикутника випливає, що кут  $30^\circ$  не може бути найбільшим кутом, отже, він не є протилежним даній стороні.

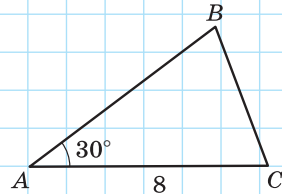


Рис. 21

Нехай  $\angle A = 30^\circ$ . За формулою площі трикутника  $S = \frac{1}{2} AB \cdot AC \cdot \sin A$ , тобто  $8\sqrt{3} = \frac{1}{2} AB \cdot 8 \cdot \frac{1}{2}$ , звідки

$$AB = 4\sqrt{3} \text{ (см)}.$$

За теоремою косинусів  $BC^2 = AB^2 + AC^2 - 2AB \cdot AC \cos A$ ,

$$BC^2 = 48 + 64 - 2 \cdot 4\sqrt{3} \cdot 8 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ звідки } BC = 4 \text{ (см)}.$$

Отже,  $BC$  — найменша сторона даного трикутника.

**Відповідь:** 4 см.

Формула площі трикутника застосовується і для доведення формули площі чотирикутника із заданими діагоналями й кутом між ними.

**Опорна задача**

**(формула площі чотирикутника)**

Площа опуклого чотирикутника дорівнює половині добутку діагоналей на синус кута між ними:

$$S = \frac{1}{2} d_1 d_2 \sin \gamma,$$

де  $d_1, d_2$  — діагоналі чотирикутника,  $\gamma$  — кут між ними.

Доведіть.

**Розв'язання**

Нехай діагоналі чотирикутника  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$  під кутом  $\gamma$  (рис. 22). Площа чотирикутника  $ABCD$  дорівнює сумі площ чотирьох трикутників:

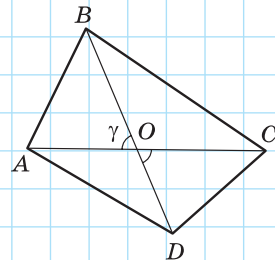


Рис. 22. До доведення формули площі чотирикутника

$$S_{AOB} = \frac{1}{2} AO \cdot BO \cdot \sin \gamma, \quad S_{BOC} = \frac{1}{2} BO \cdot OC \cdot \sin (180^\circ - \gamma),$$

$$S_{COD} = \frac{1}{2} OC \cdot OD \cdot \sin \gamma, \quad S_{AOD} = \frac{1}{2} AO \cdot OD \cdot \sin (180^\circ - \gamma).$$



Враховуючи, що  $\sin(180^\circ - \gamma) = \sin \gamma$ , маємо:

$$S_{ABCD} = \frac{1}{2} \sin \gamma (BO \cdot (AO + OC) + OD \cdot (AO + OC)) = \frac{1}{2} \sin \gamma \cdot AC \cdot BD = \frac{1}{2} d_1 d_2 \sin \gamma.$$

### Наслідок

Площа прямокутника обчислюється за формулою  $S = \frac{1}{2} d^2 \sin \gamma$ , де  $d$  — діагональ прямокутника,  $\gamma$  — кут між діагоналями. Зокрема, площа квадрата з діагоналлю  $d$  обчислюється за формулою  $S = \frac{d^2}{2}$ .

Нагадаємо також, що площа ромба з діагоналями  $d_1$  і  $d_2$  обчислюється за формулою  $S = \frac{d_1 d_2}{2}$ .

## 5.2. Формула Герона



Ще одна формула площі трикутника, для доведення якої можна використати тригонометричні функції, була запропонована давньогрецьким математиком Героном Александрійським (прибл. I ст. до н. е.) і отримала його ім'я. Тільки у XX ст. з'ясувалося, що раніше за Герона цю формулу винайшов Архімед.

### Теорема (формула Герона)

Площа трикутника обчислюється за формулою

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

де  $a, b, c$  — сторони трикутника,  $p = \frac{a+b+c}{2}$  — його півпериметр.



Дано:  $a, b, c$  — сторони трикутника.

Довести:  $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$ , де  $p = \frac{a+b+c}{2}$ .

Доведення

$$\square S = \frac{1}{2} ab \sin \gamma; \quad \cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (\text{за наслідком з теореми косинусів}).$$

З основної тригонометричної тотожності маємо:

$$\begin{aligned} \sin^2 \gamma &= 1 - \cos^2 \gamma = (1 - \cos \gamma)(1 + \cos \gamma) = \frac{2ab - a^2 - b^2 + c^2}{2ab} \cdot \frac{2ab + a^2 + b^2 - c^2}{2ab} = \\ &= \frac{c^2 - (a-b)^2}{2ab} \cdot \frac{(a+b)^2 - c^2}{2ab} = \frac{1}{4a^2b^2} (c-a+b)(c+a-b)(a+b-c)(a+b+c). \end{aligned}$$

Оскільки  $p = \frac{a+b+c}{2}$ , то  $a+b+c = 2p$ ,  $c-a+b = 2p-2a$ ,  $c+a-b = 2p-2b$ ,  
 $a+b-c = 2p-2c$ . Тоді  $\sin^2 \gamma = \frac{16p(p-a)(p-b)(p-c)}{4a^2b^2}$ ,  $\sin \gamma = \frac{2\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}{ab}$ .

Підставивши одержаний вираз у формулу  $S = \frac{1}{2}ab\sin \gamma$ , отримаємо:  
 $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$ , що й треба було довести. ■

### Задача

Знайдіть найбільшу висоту трикутника зі сторонами завдовжки 12, 39 і 45.

### Розв'язання

Оскільки найбільша висота трикутника перпендикулярна до його найменшої сторони, знайдемо висоту, проведену до сторони  $a=12$ . Скористаємось методом площ. За формулою Герона  $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$ . У нашому

випадку  $p = \frac{12+39+45}{2} = 48$ ,  $S = \sqrt{48(48-12)(48-39)(48-45)} = 216$ .

З іншого боку,  $S = \frac{1}{2}ah_a$ , тобто  $216 = \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot h_a$ , звідки  $h_a = 36$ .

**Відповідь:** 36.

## 5.3. Формули радіусів вписаного й описаного кіл трикутника

### Теорема (формули радіусів вписаного й описаного кіл трикутника)

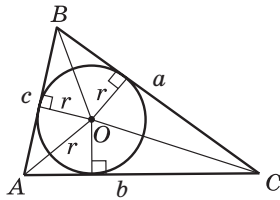
Радіуси вписаного й описаного кіл трикутника обчислюються за формулами

$$r = \frac{S}{p} = \frac{2S}{a+b+c}, \quad R = \frac{abc}{4S},$$

де  $r$  — радіус вписаного кола,  $R$  — радіус описаного кола,  $S$  — площа трикутника,  $a, b, c$  — сторони трикутника,  $p = \frac{a+b+c}{2}$  — півпериметр.

### Доведення

□ Доведемо спочатку формулу для обчислення  $r$ . Нехай у трикутнику  $ABC$  зі сторонами  $BC = a$ ,  $AC = b$ ,  $AB = c$  точка  $O$  — центр



**Рис. 23.** До доведення формули радіуса вписаного кола

вписаного кола (рис. 23). Тоді площа цього трикутника дорівнює сумі площ трикутників  $BOC$ ,  $AOC$  і  $AOB$ :

$$S = \frac{1}{2}ar + \frac{1}{2}br + \frac{1}{2}cr = \frac{1}{2}(a+b+c)r = pr.$$

$$\text{Звідси } r = \frac{S}{p} = \frac{2S}{a+b+c}.$$

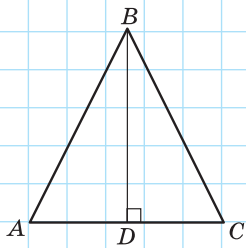
Щоб довести формулу для  $R$ , скористаємось повним формулюванням теореми синусів, згідно з яким  $\frac{a}{\sin A} = 2R$ , звідки  $R = \frac{a}{2\sin A}$ . Оскільки

$$S = \frac{1}{2}bc\sin A, \text{ то } \sin A = \frac{2S}{bc}.$$

Підставивши цей вираз у формулу для  $R$ , маємо:  $R = \frac{abc}{4S}$ . Теорему доведено. ■

Нагадаємо:

- 1) для прямокутного трикутника з катетами  $a$  і  $b$  та гіпотенузою  $c$  часто застосовують раніше отримані формули  $r = \frac{a+b-c}{2}$  і  $R = \frac{c}{2}$ ;
- 2) центр кола, вписаного в трикутник, є точкою перетину бісектрис трикутника; центр кола, описаного навколо трикутника, є точкою перетину серединних перпендикулярів до сторін трикутника;
- 3) для обчислення радіуса описаного кола в трикутнику зі стороною  $a$  і протилежним кутом  $\alpha$  можна скористатися формулою  $R = \frac{a}{2\sin\alpha}$ .



**Рис. 24**

### Задача

Основа рівнобедреного трикутника дорівнює 48 см, а проведена до неї висота — 32 см. Знайдіть радіус кола, описаного навколо трикутника.

### Розв'язання

Нехай у трикутнику  $ABC$   $AB=BC$ ,  $AC=48$  см,  $BD=32$  см — висота (рис. 24). Оскільки висота  $BD$  є також медіаною трикутника  $ABC$ , то  $AD=DC=24$  см. Із трикутника  $ABD$  ( $\angle D=90^\circ$ ) за теоремою Піфагора  $AB = \sqrt{24^2 + 32^2} = 40$  (см).

За формулою радіуса описаного кола

$$R = \frac{AB \cdot BC \cdot AC}{4S} = \frac{AB^2 \cdot AC}{4 \cdot 0,5AC \cdot BD} = \frac{AB^2}{2BD}, \quad R = \frac{40^2}{2 \cdot 32} = 25 \text{ (см)}.$$

**Відповідь:** 25 см.



Зазначимо, що цю задачу можна розв'язати і без застосування формули радіуса описаного кола. Але такий спосіб може виявитися більш складним, особливо тоді, коли він потребує обґрунтування розміщення центра описаного кола в даному трикутнику.

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 118.** Дві сторони трикутника дорівнюють 5 см і 6 см. Чи може площа цього трикутника дорівнювати  $10 \text{ см}^2$ ;  $15 \text{ см}^2$ ;  $30 \text{ см}^2$ ?
- 119.** Серед усіх паралелограмів із заданими сторонами  $a$  і  $b$  визначте той, площа якого є найбільшою. Відповідь обґрунтуйте.
- 120.** Два трикутники описані навколо одного кола. Відомо, що периметр першого трикутника менший, ніж периметр другого. Який із цих трикутників має більшу площу?



### Графічні вправи





- 121.** Накресліть паралелограм із кутом  $30^\circ$  і виміряйте довжини його сторін.
- Обчисліть площу побудованого паралелограма.
  - Накресліть прямокутник, сторони якого дорівнюють сторонам побудованого паралелограма. У скільки разів площа прямокутника більша за площу паралелограма?
- 122.** Накресліть гострокутний трикутник, площа якого дорівнює  $12 \text{ см}^2$ . Накресліть тупокутний трикутник, рівновеликий побудованому гострокутному, так, щоб побудовані трикутники мали спільну сторону.



### Письмові вправи

#### Рівень А

- 123.** Знайдіть площу трикутника  $ABC$ , якщо:
- $AB = 10$ ,  $BC = 12$ ,  $\angle B = 30^\circ$ ;
  - $AB = AC = 6$ ,  $\angle A = 120^\circ$ ;
  - $AC = 5\sqrt{2}$ ,  $BC = 8$ ,  $\angle A = 100^\circ$ ,  $\angle B = 35^\circ$ .






- 124.** Знайдіть площу:
- прямокутного трикутника з катетом  $6\sqrt{3}$  см і прилеглим кутом  $60^\circ$ ;
  - паралелограма зі сторонами 4 см і  $4\sqrt{3}$  см та кутом  $60^\circ$ ;
  - прямокутника з діагоналлю 12 см і кутом між діагоналями  $30^\circ$ .
-  **125.** Знайдіть площу:
- рівнобедреного трикутника з бічною стороною 10 см і кутом при основі  $75^\circ$ ;
  - ромба з периметром  $16\sqrt{2}$  см і кутом  $135^\circ$ ;
  - квадрата з діагоналлю 6 см.
- 126.** Площа трикутника  $ABC$  дорівнює  $20 \text{ см}^2$ . Знайдіть сторону  $BC$ , якщо  $AC = 5\sqrt{2}$  см,  $\angle C = 45^\circ$ .
- 127.** Знайдіть кути паралелограма зі сторонами 3 см і 12 см, якщо його площа дорівнює  $18 \text{ см}^2$ .
-  **128.** Кут при вершині рівнобедреного трикутника дорівнює  $30^\circ$ . Знайдіть бічну сторону трикутника, якщо його площа дорівнює  $36 \text{ м}^2$ .
- 129.** Знайдіть площу трикутника зі сторонами:
- |                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| а) 13, 14 і 15; | в) 8, 29 і 35;  |
| б) 15, 26 і 37; | г) 17, 25 і 26. |
- 130.** Сторони паралелограма дорівнюють 25 см і 29 см, а одна з діагоналей — 36 см. Знайдіть площу паралелограма.
-  **131.** Знайдіть площу трикутника зі сторонами 5, 5 і 6 двома способами.
- 132.** Знайдіть радіуси вписаного й описаного кіл:
- рівнобедреного трикутника з основою 12 см, якщо медіана, проведена до основи, дорівнює 8 см;
  - трикутника зі сторонами 7 см, 15 см і 20 см.
-  **133.** Знайдіть радіуси вписаного й описаного кіл трикутника зі сторонами 16, 25 і 39.

## Рівень Б



- 134.** Знайдіть площу трикутника  $ABC$ , якщо:
- $\angle A = \alpha$ , а висоти, проведені з вершин  $B$  і  $C$ , відповідно дорівнюють  $h_b$  і  $h_c$ ;
  - $\angle A = \alpha$ ,  $\angle B = \beta$ , а висота, проведена з вершини  $B$ , дорівнює  $h_b$ .
- 135.** Знайдіть площу:
- рівнобедреного трикутника з основою  $8\sqrt{3}$  см, найменший зовнішній кут якого дорівнює  $60^\circ$ ;

б) паралелограма з кутом  $30^\circ$ , якщо бісектриса цього кута ділить сторону на відрізки завдовжки 11 см і 5 см починаючи від вершини протилежного кута;

в) прямокутника, діагональ якого дорівнює 10 см і утворює зі стороною кут  $75^\circ$ .

-  **136.** Знайдіть площу:
- ромба з периметром 80 см і відношенням кутів 1 : 5;
  - трикутника зі сторонами  $6\sqrt{3}$  см, 4 см і 14 см.
- 137.** Знайдіть периметр трикутника з площею  $6\sqrt{3}$  см<sup>2</sup> і кутом  $60^\circ$ , якщо сторони, прилеглі до даного кута, відносяться як 3 : 8.
-  **138.** Площа прямокутника з діагоналлю 6 см дорівнює  $9\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>. Знайдіть сторони прямокутника.
-  **139.** Чи може в формулі Герона хоча б одна з різниць  $p - a$ ,  $p - b$  або  $p - c$  бути від'ємною? Відповідь обґрунтуйте.
- 140.** Знайдіть найбільшу висоту і радіус вписаного кола для трикутника зі сторонами:
- 4, 13 і 15;
  - 9, 10 і 17;
  - 16, 25 і 39.
-  **141.** Знайдіть найменшу висоту і радіус описаного кола для трикутника зі сторонами:
- 10, 17 і 21;
  - 20, 34 і 42.
- 142 (опорна).** Площа описаного многокутника дорівнює добутку його півпериметра на радіус вписаного кола. Доведіть.
- 143.** Периметр рівнобедреного трикутника дорівнює 64 см, а бічна сторона відноситься до основи як 5 : 6. Знайдіть радіуси вписаного й описаного кіл трикутника.
-  **144.** Висота трикутника дорівнює 12 см і ділить його сторону на відрізки завдовжки 5 см і 9 см. Знайдіть радіуси вписаного й описаного кіл трикутника.

## Рівень В

- 145.** Основи трапеції дорівнюють 3 см і 11 см, а діагоналі — 13 см і 15 см. Знайдіть площу трапеції.
-  **146.** Паралельні сторони трапеції дорівнюють 2 см і 6 см, а непаралельні — 13 см і 15 см. Знайдіть площу трапеції.
- 147.** Точка дотику вписаного кола ділить бічну сторону рівнобічної трапеції на відрізки завдовжки 9 см і 16 см. Знайдіть радіус кола і площу трапеції.
-  **148.** Знайдіть радіус кола, описаного навколо трапеції, у якій бічна сторона дорівнює 40 см, основа — 13 см, а діагональ — 51 см.



## Повторення перед вивченням § 6

### Теоретичний матеріал

- теорема Фалеса; середні лінії трикутника і трапеції;
- теорема Піфагора.

8 клас, § 6

8 клас, § 13

### Задачі

**149.** У мотузковому містечку дві точки маршруту, що розташовані на висоті 5,6 м і 2 м, з'єднані прямим містком. Знайдіть відстань від середини цього містка до землі.

**150.** Відрізки  $AA_1 = 10$  см і  $BB_1 = 28$  см — відстані від точок  $A$  і  $B$  до прямої  $l$  (точки  $A$  і  $B$  лежать по один бік від прямої). Знайдіть відстань між точками  $A$  і  $B$ , якщо  $A_1B_1 = 24$  см.



## Онлайн-тестування для підготовки до контрольної роботи № 1

### Задачі для підготовки до контрольної роботи № 1

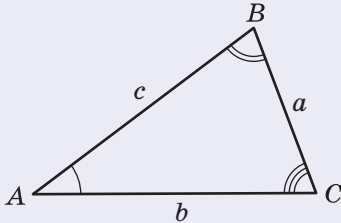
1. У трикутнику  $ABC$   $AB = 8$  м,  $BC = 15$  м,  $\angle B = 60^\circ$ . Знайдіть периметр і площу трикутника.
2. У трикутнику  $DEF$   $DE = 4$  см,  $\angle D = 30^\circ$ ,  $\angle E = 120^\circ$ . Знайдіть невідомі сторони трикутника і радіус кола, описаного навколо нього.
3. Дано трикутник зі сторонами 13, 20 і 21.
  - а) Доведіть, що даний трикутник гострокутний.
  - б) Знайдіть площу трикутника.
  - в) Знайдіть найменшу висоту трикутника.
4. Сторони паралелограма дорівнюють  $8\sqrt{2}$  см і 2 см та утворюють кут  $45^\circ$ . Знайдіть меншу діагональ і площу паралелограма.
5. Основа рівнобедреного трикутника дорівнює 24 см, а проведена до неї висота — 16 см. Знайдіть радіус кола, вписаного в трикутник.
6. Діагональ, бічна сторона і більша основа рівнобічної трапеції дорівнюють відповідно 40 см, 13 см і 51 см. Знайдіть радіус кола, описаного навколо трапеції.

# Підсумки розділу I

ТРИГОНОМЕТРИЧНІ ФУНКЦІЇ	
	$\sin \alpha = y$
	$\cos \alpha = x$
	$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x}$
	$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{x}{y}$

ТРИГОНОМЕТРИЧНІ ТОТОЖНОСТІ І ФОРМУЛИ ЗВЕДЕННЯ	
<b>Тригонометричні тотожності</b>	<b>Формули зведення</b>
$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$	Для $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (\alpha \neq 90^\circ)$	$\sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$
$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (\alpha \neq 0^\circ, \alpha \neq 180^\circ)$	$\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$
$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1 \quad (\alpha \neq 0^\circ, \alpha \neq 90^\circ, \alpha \neq 180^\circ)$	Для $0^\circ < \alpha < 90^\circ$
$1 + \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha} \quad (\alpha \neq 90^\circ)$	$\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) = \operatorname{ctg} \alpha$
$1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \quad (\alpha \neq 0^\circ, \alpha \neq 180^\circ)$	$\operatorname{ctg}(90^\circ - \alpha) = \operatorname{tg} \alpha$
	Для $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$
	$\sin(180^\circ - \alpha) = \sin \alpha$
	$\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha$
	$\operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) = -\operatorname{tg} \alpha \quad (\alpha \neq 90^\circ)$
	$\operatorname{ctg}(180^\circ - \alpha) = -\operatorname{ctg} \alpha$
	$(\alpha \neq 0^\circ, \alpha \neq 180^\circ)$

## ТЕОРЕМА КОСИНУСІВ ТА НАСЛІДКИ З НЕЇ



Квадрат будь-якої сторони трикутника дорівнює сумі квадратів двох інших сторін без подвоєного добутку цих сторін на косинус кута між ними:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C$$

**Наслідок 1**

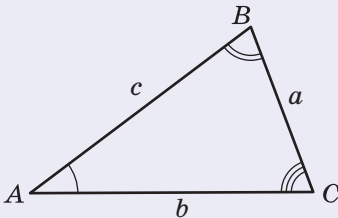
У трикутнику  $ABC$  зі сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і кутом  $C$  між сторонами  $a$  і  $b$

$$\cos C = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

**Наслідок 2**

Якщо в трикутнику зі сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  справджується нерівність  $a^2 + b^2 > c^2$ , то кут  $C$  гострий; якщо  $a^2 + b^2 < c^2$ , то кут  $C$  тупий; якщо  $a^2 + b^2 = c^2$ , то кут  $C$  прямий

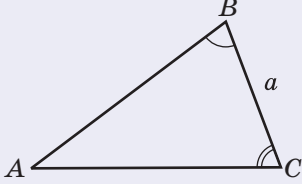
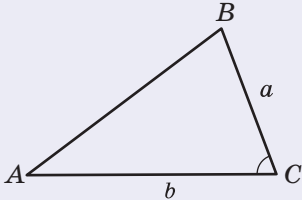
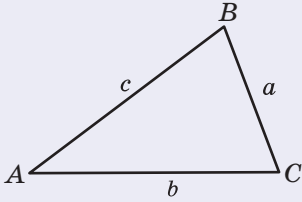
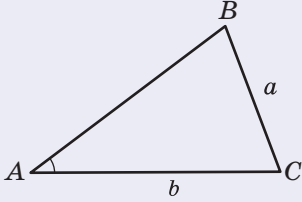
## ТЕОРЕМА СИНУСІВ



Сторони трикутника пропорційні синусам протилежних кутів:

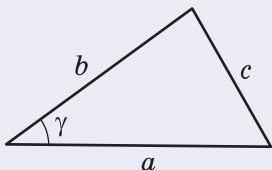
$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} = 2R,$$

де  $R$  — радіус кола, описаного навколо трикутника

ОСНОВНІ ЗАДАЧІ НА РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ТРИКУТНИКІВ		
Задача	Умова	Схема розв'язування
<b>Задача 1</b> За стороною та двома кутами	Дано: $a, \angle B, \angle C$ . Знайти: $b, c, \angle A$ 	1. $\angle A = 180^\circ - (\angle B + \angle C)$ . 2. $b = \frac{a \sin B}{\sin A}$ , $c = \frac{a \sin C}{\sin A}$
<b>Задача 2</b> За двома сторонами й кутом між ними	Дано: $a, b, \angle C$ . Знайти: $c, \angle A, \angle B$ 	1. $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos C}$ . 2. $\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$ . 3. $\angle B = 180^\circ - (\angle A + \angle C)$
<b>Задача 3</b> За трьома сторонами	Дано: $a, b, c$ . Знайти: $\angle A, \angle B, \angle C$ 	1. $\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$ . 2. $\cos B = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$ . 3. $\angle C = 180^\circ - (\angle A + \angle B)$
<b>Задача 4</b> За двома сторонами й кутом, протилежним одній із них	Дано: $a, b, \angle A$ . Знайти: $c, \angle B, \angle C$ 	1. $\sin B = \frac{b \sin A}{a}$ . 2. $\angle C = 180^\circ - (\angle A + \angle B)$ . 3. $c = \frac{a \sin C}{\sin A}$

## ФОРМУЛИ ПЛОЩ

### Площа трикутника



$$S = \frac{1}{2} ab \sin \gamma,$$

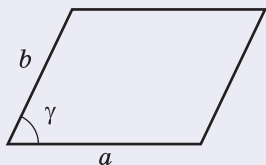
де  $a$  і  $b$  — сторони трикутника,  
 $\gamma$  — кут між ними

### Формула Герона

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

де  $a, b, c$  — сторони трикутника,

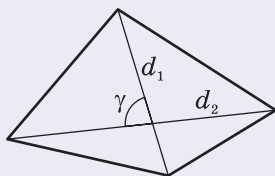
$$p = \frac{a+b+c}{2} \text{ — півпериметр}$$



### Площа паралелограма

$$S = ab \sin \gamma,$$

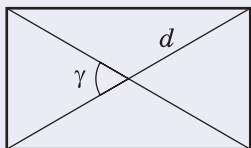
де  $a$  і  $b$  — сторони паралелограма,  
 $\gamma$  — кут між ними



### Площа опуклого чотирикутника

$$S = \frac{1}{2} d_1 d_2 \sin \gamma,$$

де  $d_1, d_2$  — діагоналі чотирикутника,  
 $\gamma$  — кут між ними



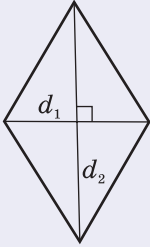
### Площа прямокутника

$$S = \frac{d^2}{2} \sin \gamma,$$

де  $d$  — діагональ прямокутника,  
 $\gamma$  — кут між діагоналями



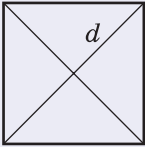
### ФОРМУЛИ ПЛОЩ



*Площа ромба*

$$S = \frac{d_1 d_2}{2},$$

де  $d_1$  і  $d_2$  — діагоналі ромба

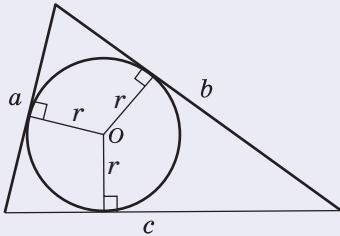


*Площа квадрата*

$$S = \frac{d^2}{2},$$

де  $d$  — діагональ квадрата

### ФОРМУЛИ РАДІУСІВ

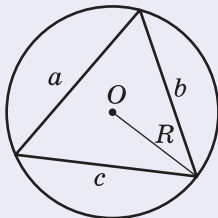


*Радіус вписаного кола трикутника*

$$r = \frac{S}{p} = \frac{2S}{a+b+c},$$

де  $S$  — площа трикутника,  
 $a, b, c$  — сторони трикутника,

$$p = \frac{a+b+c}{2} \text{ — півпериметр}$$



*Радіус описаного кола трикутника*

$$R = \frac{abc}{4S},$$

де  $S$  — площа трикутника,  
 $a, b, c$  — сторони трикутника



## Контрольні запитання до розділу I

1. Дайте означення синуса, косинуса й тангенса кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .
2. Запишіть формули зведення для кутів  $(90^\circ - \alpha)$  і  $(180^\circ - \alpha)$ .
3. Сформулюйте теорему косинусів.
4. Сформулюйте наслідки з теореми косинусів.
5. Сформулюйте теорему синусів.
6. Опишіть основні алгоритми розв'язування трикутників.
7. Запишіть формули площі довільного трикутника.
8. Запишіть формули площі довільного паралелограма.
9. Запишіть формули радіусів вписаного й описаного кіл трикутника.



## Додаткові задачі до розділу I

151. Основа рівнобедреного трикутника дорівнює  $4\sqrt{2}$  см, а медіана, проведена до бічної сторони, дорівнює 5 см. Знайдіть бічну сторону трикутника.
152. Знайдіть діагоналі паралелограма, площа якого дорівнює  $14\sqrt{3}$  м<sup>2</sup>, а сторони — 4 м і 7 м.
153. Точка  $D$  лежить на основі  $AC$  рівнобедреного трикутника  $ABC$ . Доведіть, що радіуси кіл, описаних навколо трикутників  $ABD$  і  $DBC$ , рівні.
154. Доведіть теорему синусів методом площ.
155. Доведіть за допомогою теореми синусів теорему про властивість бісектриси трикутника.
156. Розв'яжіть трикутник  $ABC$ , якщо  $\angle A = \alpha$ ,  $\angle B = \beta$ , а радіус кола, описаного навколо трикутника, дорівнює  $R$ .
- 157 (опорна). Якщо два трикутники мають по рівному куту, то відношення площ цих трикутників дорівнює відношенню добутків сторін, що утворюють рівні кути. Доведіть.
158. Знайдіть площу трикутника, в якому бісектриса кута, що дорівнює  $120^\circ$ , ділить протилежну сторону на відрізки завдовжки 21 см і 35 см.
159. Дві сторони трикутника дорівнюють  $8\sqrt{2}$  см і 7 см, а його площа —  $28$  см<sup>2</sup>. Знайдіть третю сторону.
160. До якої з вершин різностороннього трикутника центр вписаного кола є найближчим? Відповідь обґрунтуйте.

**161.** Площа рівнобедреного трикутника дорівнює  $192 \text{ см}^2$ , а радіус вписаного кола —  $6 \text{ см}$ . Знайдіть сторони трикутника, якщо його основа на  $4 \text{ см}$  більша за бічну сторону.

**162.** Основи рівнобічної трапеції дорівнюють  $22 \text{ см}$  і  $42 \text{ см}$ , а бічна сторона —  $26 \text{ см}$ . Знайдіть радіус кола, описаного навколо трапеції.

### Задачі підвищеної складності


**163.** Медіани  $AN$  і  $BM$  трикутника  $ABC$  перетинаються в точці  $O$ , причому  $AN=6$ ,  $BM=9$ ,  $\angle AOB=30^\circ$ . Знайдіть площу трикутника  $ABC$ .


**164.** У трикутнику  $ABC$   $\angle A=75^\circ$ ,  $AB=1$ ,  $AC=\sqrt{6}$ . На стороні  $BC$  позначено точку  $M$  так, що  $\angle BAM=30^\circ$ . Пряма  $AM$  перетинає коло, описане навколо трикутника  $ABC$ , в точці  $N$ , яка не збігається з точкою  $A$ . Знайдіть  $AN$ .


**165 (опорна).** Довжина бісектриси трикутника обчислюється за

формулою  $l_a = \frac{2bc \cos \frac{\alpha}{2}}{b+c}$ , де  $l_a$  — бісектриса, проведена до сторони  $a$ ,  $\alpha$  — кут між сторонами  $b$  і  $c$ . Доведіть.

**166.** У трикутнику зі стороною  $26 \text{ см}$  медіани, проведені до двох інших сторін, дорівнюють  $15 \text{ см}$  і  $30 \text{ см}$ . Знайдіть довжину третьої медіани.

 **167.** Сторони опуклого чотирикутника з площею  $S$  дорівнюють  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$ . Доведіть, що  $S \leq \frac{1}{2}(ab+cd)$ .

 **168.** Доведіть формулу площі вписаного чотирикутника (формулу Брамагупти)  $S = \sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)(p-d)}$ , де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  — сторони чотирикутника,  $p$  — його півпериметр.

 **169.** Доведіть, що для висот трикутника  $h_a$ ,  $h_b$  і  $h_c$  та радіуса вписаного кола  $r$  справджується співвідношення  $\frac{1}{r} = \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_b} + \frac{1}{h_c}$ .

**170.** Центр вписаного в прямокутний трикутник кола віддалений від кінців гіпотенузи на  $7 \text{ см}$  і  $5\sqrt{2} \text{ см}$ . Знайдіть радіус вписаного кола.

**171.** Довжини двох сторін трикутника дорівнюють  $a$  і  $b$ . Бісектриси кутів при третій стороні в результаті перетину утворюють кут  $165^\circ$ . Знайдіть площу трикутника.

**172.** У трапеції з основами  $a$  і  $b$  ( $a < b$ ) діагоналі взаємно перпендикулярні, а кут між продовженнями бічних сторін дорівнює  $45^\circ$ . Знайдіть висоту трапеції.



## Історична довідка

Приблизно до XVII ст. тригонометрія як розділ геометрії вивчала майже виключно одне питання — розв'язування трикутників. І це не дивно, адже потреби архітектури й астрономії, геодезії і мореплавання висували проблему пошуку невідомих сторін і кутів трикутника на чільне місце в процесі розв'язування практичних задач.

Теорему косинусів фактично було доведено вже в другій книзі «Начал» Евкліда, де узагальнюється теорема Піфагора і наводяться формули для обчислення квадрата сторони довільного трикутника. Математики Александрії, Давньої Індії, країн Близького та Середнього Сходу також використовували подібні формули. Однак уперше чітко формулювання теореми косинусів навів у 1579 р. французький математик Франсуа Вієт (1540–1603). Сучасного вигляду ця теорема набула в 1801 р. в роботі іншого французького вченого — Лазара Карно (1753–1823).

Значно пізніше за теорему косинусів було виведено теорему синусів. Річ у тім, що математики давнини зводили розв'язування довільних трикутників до розв'язування прямокутних трикутників, тому теорема синусів їм не була потрібна. Цю теорему довів лише в XI ст. астроном із Хорезма Аль-Беруні. Починаючи з XVI ст. теорему синусів використовують і європейські геометри, а в 1801 р. французький математик Ж. Л. Лагранж (1736–1813) вивів її з теореми косинусів.



*Гімназія (палестра)  
в Олімпії  
(Давня Греція)*



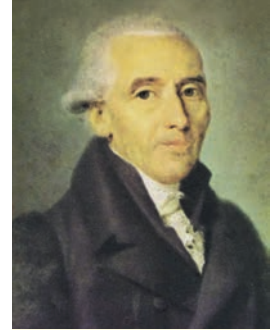
*Розкопки Мохенджо-  
Даро (Давня Індія)*



*Університет Пуатьє,  
де вчився Ф. Вієт (Франція)*



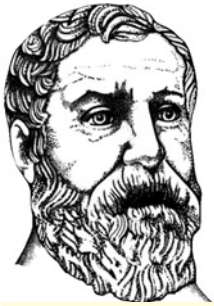
*Франсуа Вієт*



*Ж. Л. Лагранж*

Цікавою є історія виникнення формули Герона. Про життя й діяльність Герона Александрійського відомо вкрай мало — навіть роки його життя достеменно не встановлено (одні історики вважають, що він жив у III ст. до н. е., а інші — в I ст. до н. е.). Герон досяг визначних результатів у прикладних науках — геодезії та механіці (його навіть називали Герон-механік). Він виклав правила вимірювання земельних ділянок і описав деякі вимірювальні прилади, зокрема

«діоптри» — прилади для побудови й вимірювання кутів на місцевості. У своєму найважливішому геометричному творі «Метрика» Герон навів доведення формули площі трикутника, нині відомої як формула Герона. Але пізніше з'ясувалося, що першим цю формулу в III ст. до н. е. вивів славнозвісний Архімед.



*Герон*



*Римській амфітеатр  
(Александрія, Єгипет)*



## Математичні олімпіади

### Українські математичні олімпіади школярів

Для учнів, які захоплюються математикою і завжди прагнуть проявити себе в розв'язуванні нестандартних задач, матеріалів будь-якого підручника буде замало. Тому вже понад 130 років у світі проводяться різноманітні математичні змагання. Найбільш поширеними з них є математичні олімпіади школярів.

У 1884 році в Києві почав виходити «Журнал елементарної математики», в якому школярам пропонувалися задачі для самостійного розв'язання. Це була фактично перша заочна математична олімпіада на теренах України.



У 1935 році вперше було проведено очну міську олімпіаду з математики в Києві. Її фундатором став професор, дійсний член Всеукраїнської академії наук Михайло Пилипович Кравчук. У 1936 році у Київській міській олімпіаді взяли участь також учні з інших міст України. Серед переможців був харківський школяр, майбутній академік Олексій Погорелов. Після того як у 1938 році М. П. Кравчука було репресовано, організацією учнівських олімпіад активно опікувався майбутній академік, а в ті часи професор Київського університету М. М. Боголюбов. У післявоєнні роки за його ініціативою проведення математичних олімпіад у Києві відновилося. Цікаво, що у 1950 році друге місце в Київській міській олімпіаді посів запрошений до участі в ній учень ніжинської школи Михайло Ядренко, у майбутньому видатний учений і педагог. З 1961 року стали проводитися традиційні щорічні Всеукраїнські олімпіади юних математиків. У них беруть участь талановиті школярі з усіх куточків України. У 1968 році Михайло Йосипович Ядренко, який у той час уже очолював кафедру Київського університету, заснував періодичне видання «У світі математики», а починаючи з 1970 року він понад 30 років був головою журі Всеукраїнських учнівських олімпіад.

Задачі цих олімпіад завжди були надзвичайно цікавим джерелом нестандартних математичних ідей для школярів. Зокрема, традиційно пропонується багато олімпіадних завдань з геометрії. Рівень складності задач на Всеукраїнських математичних олімпіадах від їх започаткування і до сьогодні значно зріс. Але кожен із вас може спробувати отримати насолоду знайти своє, оригінальне розв'язання олімпіадної задачі.

Розглянемо, наприклад, задачу I Всеукраїнської олімпіади з математики. У даний рівносторонній трикутник вписати рівносторонній трикутник найменшої площі. Розглянемо декілька розв'язань цієї задачі, заснованих на методах і формулах розділу, який ви щойно опанували.

*1-й спосіб.* Нехай дано рівносторонній трикутник  $ABC$  зі стороною  $a$  і вписаний у нього рівносторонній трикутник  $DEF$  (рис. 25).

Очевидно, що трикутники  $ADF$ ,  $BED$  і  $CFE$  є рівними (доведіть це самостійно). Площа трикутника  $DEF$  буде дорівнювати різниці площі трикутника  $ABC$  і площ цих трикутників.

Нехай  $AD = x$ , тоді  $S_{DEF} = \frac{a^2\sqrt{3}}{4} - 3 \cdot \left( \frac{1}{2} x(a-x) \sin 60^\circ \right)$ . Отже,  $S_{DEF}$  буде найменшою, коли значення виразу  $x(a-x)$

буде найбільшим. А оскільки  $x(a-x) = -\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{a^2}{4}$ ,

то добуток  $x(a-x)$  набуде найбільшого значення, якщо

$x = \frac{a}{2}$ . Звідси шуканим є трикутник, утворений середніми лініями трикутника  $ABC$  (рис. 26).

*2-й спосіб.* Розглянемо рівносторонній трикутник  $DEF$ , вписаний у рівносторонній трикутник  $ABC$  (рис. 25).

Оскільки  $S_{DEF} = \frac{DE^2\sqrt{3}}{4}$ , то площа трикутника  $DEF$  буде найменшою, коли сторона  $DE$  буде найменшою. За теоремою косинусів з трикутника  $BED$  маємо:  $DE^2 = BD^2 + BE^2 - 2BD \cdot BE \cdot \cos 60^\circ$ .

З рівності трикутників  $ADF$  і  $BED$  маємо рівність відрізків:  $AD = BE$ , отже,  $DE^2 = BD^2 + AD^2 - BD \cdot AD = (BD - AD)^2 + BD \cdot AD =$

$$= (BD - AD)^2 + \frac{1}{4} \left( (BD + AD)^2 - (BD - AD)^2 \right) = \frac{3}{4} (BD - AD)^2 + \frac{1}{4} AB^2.$$

Оскільки  $AB^2$  є величиною сталою, то довжина відрізка  $DE$  буде найменшою за умови  $BD = AD = \frac{AB}{2}$ . Отже, шуканим є трикутник, утворений середніми лініями трикутника  $ABC$  (рис. 26).

Поверніться до розв'язання цієї задачі після опанування методів наступних розділів підручника та спробуйте розв'язати її в інший спосіб.

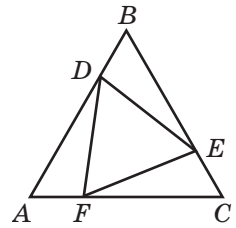


Рис. 25

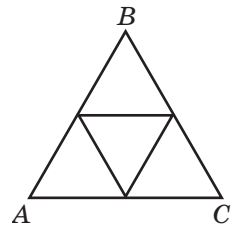


Рис. 26

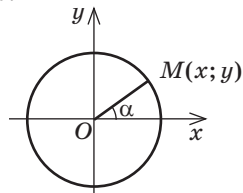


## Готуємось до ДПА

### Тест 1

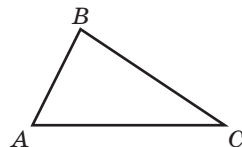
Виберіть одну правильну, на вашу думку, відповідь.

1. На тригонометричному колі точка  $M(x; y)$  відповідає куту  $\alpha$  (див. рисунок). Укажіть функцію кута  $\alpha$ , значення якої дорівнює  $y$ .



А  $\sin \alpha$     Б  $\cos \alpha$     В  $\operatorname{tg} \alpha$     Г  $\operatorname{ctg} \alpha$

2. Серед наведених співвідношень між сторонами та кутами трикутника  $ABC$  (див. рисунок) укажіть правильне.



А  $\frac{AB}{\cos C} = \frac{BC}{\cos A}$     Б  $AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2AB \cdot BC \cdot \sin B$

Б  $\frac{AC}{\sin B} = \frac{BC}{\sin A}$     Г  $BC^2 = AB^2 + AC^2 + 2AB \cdot AC \cdot \cos A$

3. Визначте вид кута  $\alpha$  ( $0^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ ), якщо  $\sin \alpha > 0$ ,  $\cos \alpha = 0$ .

А Гострий    Б Прямий    В Тупий    Г Розгорнутий

4. Спростіть вираз  $1 - \sin(180^\circ - \alpha) \sin \alpha$ .

А  $1 + \sin^2 \alpha$     Б  $1 - \cos \alpha \sin \alpha$     В  $\cos^2 \alpha$     Г  $\sin^2 \alpha$

5. Знайдіть радіус кола, вписаного в рівнобедрений трикутник з бічною стороною 5 см і основою 8 см.

А  $1\frac{1}{3}$  см    Б  $2\frac{2}{3}$  см    В 3 см    Г 2,5 см

6. Сторона трикутника, вписаного в коло, у  $\sqrt{3}$  рази більша за радіус кола. Знайдіть кут трикутника, протилежний даній стороні.

А  $30^\circ$     Б  $60^\circ$     В  $120^\circ$     Г  $60^\circ$  або  $120^\circ$ .

7. Одна зі сторін трикутника менша за його півпериметр на 2 см, друга — на 4 см, третя — на 3 см. Знайдіть площу трикутника.

А  $252 \text{ см}^2$     Б  $126 \text{ см}^2$   
В  $84 \text{ см}^2$     Г Визначити неможливо



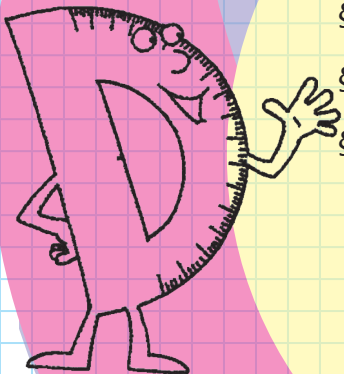
# Розділ II

## Координати на площині

§ 6. Найпростіші задачі в координатах

§ 7. Рівняння кола і прямої

§ 8. Метод координат



Мислю, отже, існую.

*Рене Декарт, французький учений*

Координатний метод, біля витоків виникнення якого стояв великий французький математик і філософ XVII ст. Рене Декарт, став справжнім переворотом у геометрії та математиці в цілому. Завдяки координатам учені отримали універсальний спосіб поставити у відповідність геометричним об'єктам алгебраїчні вирази і співвідношення. Узагалі, вміння перейти в процесі розв'язування задачі до іншої пошукової області завжди вважалося «найвищим пілотажем» математики. Відкриття Декарта дало науці можливість створити своєрідний словник для перекладу геометричних задач мовою алгебри з подальшою можливістю використовувати рівняння і тотожні перетворення виразів для розв'язування суто геометричних проблем.

У наш час жодну природничу науку або технічну галузь неможливо уявити на сучасному рівні розвитку без застосування координат. Більш того, доведення багатьох уже відомих вам геометричних тверджень завдяки координатному методу значно спрощуються. І хоча на перший погляд теореми й задачі цього розділу здаватимуться вам дещо незвичними для геометрії, але можливості, які відкриває метод координат, варті зусиль, витрачених на його засвоєння.



## § 6

# Найпростіші задачі в координатах

### 6.1. Прямокутна система координат на площині (повторення)

Нагадаємо, що для введення системи координат на площині через довільну точку  $O$  необхідно провести дві взаємно перпендикулярні прямі  $Ox$  і  $Oy$ , вибрати на кожній із них напрям (його позначають стрілкою) і одиничний відрізок (рис. 27).

Точку  $O$  називають *початком координат*, площину, на якій проведено прямі, — *координатною площиною*, а самі прямі  $Ox$  і  $Oy$  — *координатними осями* (або *осями координат*). Початок координат ділить кожну з осей на дві *півосі*: *додатну* (на ній позначається стрілка) і *від'ємну*.

Тепер будь-якій точці  $A$  даної площини можна однозначно поставити у відповідність упорядковану пару чисел — *координати* цієї точки. Для цього з точки  $A$  проведемо перпендикуляри  $AA_x \perp Ox$  і  $AA_y \perp Oy$ . Перша координата точки  $A$  — *абсциса* (позначається буквою  $x$ ) — є додатним числом, якщо точка  $A_x$  лежить на додатній півосі осі  $Ox$ , або від'ємним числом, якщо точка  $A_x$  лежить на від'ємній півосі осі  $Ox$ . При цьому модуль числа  $x$  дорівнює довжині відрізка  $OA_x$ . Аналогічно визначається друга координата точки  $A$  — *ордината* (позначається буквою  $y$ ): це додатне число, якщо точка  $A_y$  лежить на додатній півосі осі  $Oy$ , або від'ємне число, якщо точка  $A_y$  лежить на від'ємній півосі осі  $Oy$ ; модуль числа  $y$  дорівнює довжині відрізка  $OA_y$ . Координати точки  $A$  записують так:  $A(x; y)$ . При цьому абсциса точки вказують першою, а ординату — другою.

Зауважимо, що ординати точок осі  $Ox$  дорівнюють нулю, абсциси точок осі  $Oy$  також дорівнюють нулю, а початок координат має координати  $O(0; 0)$ .

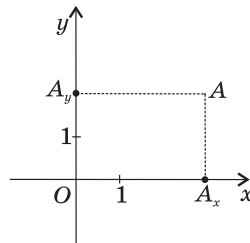
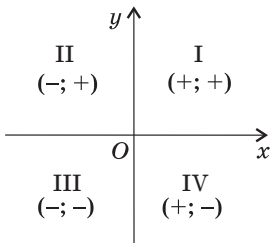


Рис. 27. Прямокутна система координат на площині

**Абсциса** — від латинського «абсцисум» — відрізаний, відсічений.

**Ордината** — від латинського «ординатус» — упорядкований. Від цього кореня походить і слово «координата».



**Рис. 28.** Знаки координат точок у різних координатних чвертях

Вісь  $Ox$  (зазвичай вона горизонтальна) називають **віссю абсцис**, вісь  $Oy$  — **віссю ординат**, а введеному таким способом систему координат — **прямокутною декартовою** на честь Рене Декарта, який першим застосував її у своїх дослідженнях.

Осі координат ділять площину на чотири частини (**координатні чверті**). У межах однієї чверті знаки координат точок зберігаються такими, які вказані на рис. 28.

Розглянемо основні випадки застосування координат для вивчення геометричних фігур та їхніх властивостей.

## 6.2. Координати середини відрізка

### Теорема (формули координат середини відрізка)

Координати середини відрізка обчислюються за формулами

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y = \frac{y_1 + y_2}{2},$$

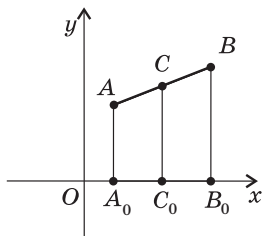
де  $A(x_1; y_1)$  і  $B(x_2; y_2)$  — кінці відрізка,  $C(x; y)$  — середина відрізка.



### Доведення

□ Нехай відрізок  $AB$  не перетинає вісь  $Ox$ . Розглянемо випадок, коли  $x_1 < x_2$  (рис. 29). Проведемо перпендикуляри  $AA_0$ ,  $BB_0$  і  $CC_0$  до осі  $Ox$ . Очевидно, що  $AA_0 \parallel BB_0 \parallel CC_0$  і основи перпендикулярів мають координати  $A_0(x_1; 0)$ ,  $B_0(x_2; 0)$  і  $C_0(x; 0)$ . Оскільки точка  $C$  — середина відрізка  $AB$ , то за теоремою Фалеса точка  $C_1$  — середина відрізка  $A_0B_0$ . Це означає, що  $A_0C_0 = C_0B_0$ , тобто  $x_2 - x = x - x_1$ , звідки  $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$ .

Той самий результат одержимо і у випадку  $x_1 > x_2$  (перевірте це самостійно). У випадку  $x_1 = x_2$  точки  $A_0$ ,  $B_0$  і  $C_0$  збігаються, тобто  $x_1 = x = x_2$ , і формула знову справджується.



**Рис. 29.** До доведення формул координат середини відрізка

Випадок, коли відрізок  $AB$  перетинає вісь  $Ox$ , зводиться до щойно розглянутого.

Рівність  $y = \frac{y_1 + y_2}{2}$  доводимо аналогічно. ■

### Задача

Вершини чотирикутника  $ABCD$  мають координати  $A(-2; 1)$ ,  $B(0; 4)$ ,  $C(4; 1)$ ,  $D(2; -2)$ . Доведіть, що  $ABCD$  — паралелограм.

### Розв'язання (1-й спосіб)

Як відомо, за ознакою паралелограма чотирикутник, діагоналі якого точкою перетину діляться навпіл, є паралелограмом. Знайдемо координати середин діагоналей  $AC$  і  $BD$  даного чотирикутника  $ABCD$ . Середина відрізка  $AC$  має координати:

$$x = \frac{-2+4}{2} = 1, \quad y = \frac{1+1}{2} = 1.$$

Середина відрізка  $BD$  має координати:

$$x = \frac{0+2}{2} = 1, \quad y = \frac{4+(-2)}{2} = 1.$$

Отже, відрізки  $AC$  і  $BD$  мають спільну середину  $(1; 1)$ , тобто чотирикутник  $ABCD$  — паралелограм за ознакою.

Інший спосіб розв'язування цієї задачі розглянемо далі.

## 6.3. Відстань між точками

### Теорема (формула відстані між двома точками)

Відстань між точками  $A(x_1; y_1)$  і  $B(x_2; y_2)$  обчислюється за формулою

$$AB = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

### Доведення

□ Розглянемо спочатку випадок, коли  $x_1 \neq x_2$  і  $y_1 \neq y_2$  (рис. 30). Проведемо через дані точки  $A$  і  $B$  прямі, перпендикулярні до осей координат, і позначимо точку їх перетину  $C$ . Відстань

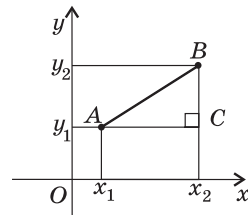


Рис. 30. До доведення формули відстані між точками

між точками  $A$  і  $C$  дорівнює  $|x_1 - x_2|$ , а відстань між точками  $B$  і  $C$  дорівнює  $|y_1 - y_2|$ . Отже, з прямокутного трикутника  $ABC$  за теоремою Піфагора маємо:  $AB^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2$ , або  $AB = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ .

У випадку, коли  $x_1 = x_2$ ,  $y_1 \neq y_2$ , відстань між точками  $A$  і  $B$  дорівнює  $|y_1 - y_2|$ . Той самий результат дає і щойно доведена формула. Аналогічно у випадку  $x_1 \neq x_2$ ,  $y_1 = y_2$  маємо:  $AB = |x_1 - x_2|$ . Якщо точки  $A$  і  $B$  збігаються, відстань між ними за доведеною формулою дорівнює нулю. ■

Як приклад застосування доведеної формули розглянемо другий спосіб розв'язування задачі з п. 6.2.

### Задача

Вершини чотирикутника  $ABCD$  мають координати  $A(-2; 1)$ ,  $B(0; 4)$ ,  $C(4; 1)$ ,  $D(2; -2)$ . Доведіть, що  $ABCD$  — паралелограм.

### Розв'язання (2-й спосіб)

Як відомо, чотирикутник, протилежні сторони якого попарно рівні, є паралелограмом (за ознакою). Знайдемо довжини сторін чотирикутника  $ABCD$ :

$$AB = \sqrt{(-2 - 0)^2 + (1 - 4)^2} = \sqrt{13}, \quad BC = \sqrt{(0 - 4)^2 + (4 - 1)^2} = 5,$$

$$CD = \sqrt{(4 - 2)^2 + (1 - (-2))^2} = \sqrt{13}, \quad AD = \sqrt{(-2 - 2)^2 + (1 - (-2))^2} = 5.$$

Отже,  $AB = CD$ ,  $BC = AD$ , тобто чотирикутник  $ABCD$  — паралелограм за ознакою.

## Запитання і задачі

### Усні вправи

- 173.** Із точки  $A(3; -5)$  проведено перпендикуляри до осей координат. Назвіть координати основ цих перпендикулярів.
- 174.** Визначте, у якій координатній чверті лежить точка  $A(x; y)$ , якщо:
- $x = -4$ ,  $y = -9$ ;
  - $x > 0$ ,  $y < 0$ ;
  - точка  $A$  лежить вище від осі абсцис і ліворуч від осі ординат.
- 175.** Визначте, які з координатних осей перетинає відрізок  $CD$ , якщо:
- $C(3; -2)$ ,  $D(8; 1)$ ;
  - $C(-4; -5)$ ,  $D(2; -3)$ ;
  - $C(1; -6)$ ,  $D(-7; 2)$ .
- 176.** Середина відрізка  $AB$  лежить на осі ординат. Назвіть абсцису точки  $A$ , якщо абсциса точки  $B$  дорівнює 12.

- 177.** Точка  $C$  — середина відрізка  $AB$ . Визначте:
- ординату точки  $B$ , якщо  $A(x_1; 3)$ ,  $C(x_2; 3)$ ;
  - абсцису точки  $A$ , якщо  $C(-1; y_1)$  і  $B(-1; y_2)$ .
- Якій із координатних осей паралельний відрізок  $AB$  у кожному випадку?
- 178.** Довжина відрізка  $AB$  дорівнює 5. Чи можуть:
- абсциси точок  $A$  і  $B$  відрізнятися на 7;
  - ординати точок  $A$  і  $B$  відрізнятися на 5?



## Графічні вправи



- 179.** Зобразіть на координатній площині геометричне місце точок  $M(x; y)$ , які задовольняють умову:

$$\begin{array}{lll} \text{а) } x \geq -3; & \text{б) } y \leq 1; & \text{в) } \begin{cases} x = y, \\ |x| < 2. \end{cases} \end{array}$$



- 180.** Через точку  $C(-3; 4)$  проведіть прямі, паралельні осям координат. Опишіть за допомогою нерівностей умови, що їх задовольняють усі внутрішні точки прямокутника, утвореного цими прямими та осями координат.



## Письмові вправи

### Рівень А

- 181.** Знайдіть координати середини відрізка  $AB$ , якщо:
- $A(-12; -3)$ ,  $B(-8; 1)$ ;
  - $A(4; -11)$ ,  $B(-4; 0)$ ;
  - $A(-2; 9)$ ,  $B(-2; -7)$ .
- 182.** Точка  $C$  — середина відрізка  $AB$ . Знайдіть координати:
- точки  $B$ , якщо  $A(2; -3)$ ,  $C(0,5; 1)$ ;
  - точки  $A$ , якщо  $C(0; -1)$ ,  $B(3; -3)$ .
- 183.** Точка  $E$  — середина відрізка  $CD$ . Знайдіть координати:
- точки  $E$ , якщо  $C(18; -2)$ ,  $D(6; 4)$ ;
  - точки  $D$ , якщо  $C(-5; 21)$ ,  $E(0; 1)$ .
- 184.** Знайдіть координати четвертої вершини паралелограма  $ABCD$ , якщо:
- $A(2; 6)$ ,  $B(4; 7)$ ,  $C(8; 10)$ ;
  - $B(-1; 4)$ ,  $C(3; 5)$ ,  $D(1; 3)$ .
- 185.** Дано точки  $A(-4; 0)$ ,  $B(-2; -2)$ ,  $C(0; -6)$ ,  $D(-2; -4)$ . Доведіть, що чотирикутник  $ABCD$  — паралелограм.





- 📌 **201.** Доведіть, що чотирикутник  $ABCD$  — ромб, якщо  $A(-1; 2)$ ,  $B(2; 3)$ ,  $C(3; 6)$ ,  $D(0; 5)$ .

### Рівень В

**202.** Середини сторін трикутника мають координати  $(-2; 2)$ ,  $(0; 7)$  і  $(4; -1)$ . Знайдіть координати вершин трикутника.

**203 (опорна).** Точка  $C$ , яка ділить відрізок з кінцями в точках  $A(x_1; y_1)$

і  $B(x_2; y_2)$  у відношенні  $AC : CB = m : n$ , має координати  $x = \frac{nx_1 + mx_2}{m + n}$ ,

$y = \frac{ny_1 + my_2}{m + n}$ . Доведіть.

- 📌 **204.** Знайдіть координати точки перетину медіан трикутника з вершинами  $(1; 2)$ ,  $(0; 7)$  і  $(5; 6)$ .

**205.** Доведіть, що чотирикутник  $ABCD$  — квадрат, якщо  $A(-5; 0)$ ,  $B(-2; 1)$ ,  $C(-1; -2)$ ,  $D(-4; -3)$ .

**206.** Знайдіть площу трикутника  $ABC$ , якщо  $A(-1; 3)$ ,  $B(2; 4)$ ,  $C(4; -2)$ .

- 📌 **207.** Знайдіть периметр і площу трикутника, серединами сторін якого є точки  $(-3; -1)$ ,  $(1; -1)$  і  $(1; 2)$ .



## Повторення перед вивченням § 7

### Теоретичний матеріал

- геометричні місця точок;
- лінійна функція та її графік.

📌 7 клас, § 22

📌 алгебра, 7 клас

### Задачі

**208.** Зобразіть на координатній площині геометричне місце точок:

- віддалених від початку координат на 4;
- рівновіддалених від точок  $A(-1; 3)$  і  $B(5; -1)$ .

**209.** Знайдіть геометричне місце точок, рівновіддалених від вершин рівнобедреного прямокутного трикутника.

# §7

## Рівняння кола і прямої

### 7.1. Рівняння фігури на площині

На уроках алгебри ви розглядали функції і будували їхні графіки у прямокутній системі координат. Так, наприклад, графіком функції  $y = x$  є пряма  $l$ , яка проходить через початок координат  $O$  (рис. 31). Це означає, що координати будь-якої точки прямої  $l$  задовольняють рівняння  $y = x$  (тобто є рівними). Також будь-які два числа, що задовольняють рівняння  $y = x$ , є координатами деякої точки прямої  $l$ . Рівняння  $y = x$  є *рівнянням прямої  $l$* . За допомогою рівнянь можна описувати й інші фігури на площині.

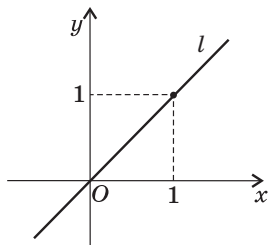


Рис. 31. Пряма  $l$  — графік функції  $y = x$

#### Означення

Рівняння з двома змінними  $x$  і  $y$  називається **рівнянням фігури  $F$  у прямокутній системі координат**, якщо:

- 1) координати будь-якої точки фігури  $F$  задовольняють це рівняння;
- 2) будь-які два числа, що задовольняють це рівняння, є координатами деякої точки фігури  $F$ .

Так, на рис. 32 координати точки  $M$  — числа  $x_1$  і  $y_1$  — задовольняють рівняння фігури  $F$ , а координати точки  $N$  — числа  $x_2$  і  $y_2$  — не задовольняють.

Зазвичай у процесі вивчення фігур на координатній площині виникають дві взаємно обернені задачі: побудова фігури за даним рівнянням і знаходження рівняння фігури за її властивостями. Перший вид задач ви неодноразово розв'язували в курсі алгебри, будуючи графіки функцій та рівнянь. Розглянемо другий вид задач щодо кола і прямої.

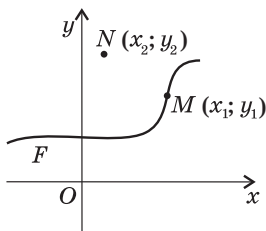


Рис. 32. До означення рівняння фігури

## 7.2. Рівняння кола

### Теорема (про рівняння кола)

У прямокутній системі координат рівняння кола радіуса  $R$  із центром у точці  $C(a; b)$  має вигляд

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2.$$

### Доведення

□ Нехай у прямокутній системі координат задано коло радіуса  $R$  ( $R > 0$ ) із центром у точці  $C(a; b)$  (рис. 33). Оберемо довільну точку кола  $M(x; y)$ . За означенням кола відстань від центра до довільної точки кола дорівнює  $R$ , тобто  $CM = R$ , отже,  $CM^2 = R^2$ . Записавши цю рівність у координатах, маємо:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2.$$

Оскільки  $M$  — довільна точка кола, то це рівняння задовольняють координати будь-якої точки кола.

Згідно з означенням рівняння фігури доведемо обернене твердження. Нехай числа  $x_0$  і  $y_0$  задовольняють наше рівняння, тобто  $(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 = R^2$ , або  $\sqrt{(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2} = R$ . За формулою відстані між точками це означає, що відстань між точками  $M_0(x_0; y_0)$  і  $C(a; b)$  дорівнює  $R$ . Отже, точка  $M_0(x_0; y_0)$  є точкою кола радіуса  $R$  із центром  $C$ .

Таким чином, обидві вимоги до рівняння фігури справджуються. Теорему доведено. ■

### Наслідок

Коло радіуса  $R$  із центром у початку координат задається рівнянням вигляду

$$x^2 + y^2 = R^2.$$

Узагалі, будь-яке рівняння вигляду

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2, \text{ де } R > 0,$$

описує коло радіуса  $R$  із центром  $C(a; b)$ .

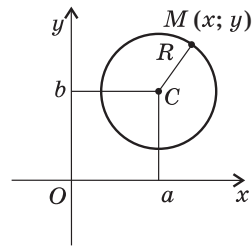


Рис. 33. До доведення теореми про рівняння кола





### Задача

Визначте центр і радіус кола, заданого рівнянням  $x^2 - 4x + y^2 + 2y - 11 = 0$ .

### Розв'язання

Зведемо дане рівняння до вигляду  $(x-a)^2 + (y-b)^2 = R^2$ . Маємо:

$$x^2 - 4x + y^2 + 2y = 11.$$

Додамо до обох частин цієї рівності числа так, щоб виділити квадрати двочленів  $(x-a)$  і  $(y-b)$ :  $(x^2 - 4x + 4) + (y^2 + 2y + 1) = 11 + 4 + 1$ ,  
 $(x-2)^2 + (y+1)^2 = 4^2$ . Отже, дане коло має радіус 4 і центр  $(2; -1)$ .

**Відповідь:**  $(2; -1)$ ,  $R=4$ .

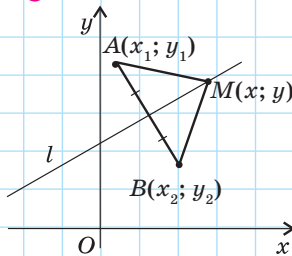
## 7.3. Рівняння прямої

Для виведення рівняння кола ми скористалися тим, що коло є геометричним місцем точок, віддалених від даної точки на задану відстань. Нагадаємо, що за теоремою про серединний перпендикуляр прямю можна описати як геометричне місце точок, рівновіддалених від кінців відрізка. Застосуємо цей факт для доведення такої теореми.

### Теорема (про рівняння прямої)

У прямокутній системі координат рівняння прямої має вигляд

$$ax + by + c = 0, \text{ де } a, b, c \text{ — деякі числа.}$$



**Рис. 34.** До доведення теореми про рівняння прямої

□ Дано:  $A(x_1; y_1)$ ,  $B(x_2; y_2)$ ,  $l$  — серединний перпендикуляр до відрізка  $AB$ ,  $M \in l$ ,  $M(x; y)$ .

Довести:  $ax + by + c = 0$  — рівняння прямої  $l$  ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  — числа, які залежать від  $A$  і  $B$ ).

Доведення

Пряма  $l$  — серединний перпендикуляр до відрізка  $AB$ , тому  $AM = MB$  (рис. 34). Запишемо цю рівність в координатах:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2;$$

$$x^2 - 2xx_1 + x_1^2 + y^2 - 2yy_1 + y_1^2 = x^2 - 2xx_2 + x_2^2 + y^2 - 2yy_2 + y_2^2;$$

зведемо подібні доданки:

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y + (x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2) = 0.$$

$x_1, y_1, x_2, y_2$  — числа; позначимо  $2(x_2 - x_1) = a$ ,  $2(y_2 - y_1) = b$ ,  $x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 = c$ , отримаємо рівняння прямої:  $ax + by + c = 0$ . Оскільки  $M(x; y)$  — довільна точка прямої  $l$ , то рівняння  $ax + by + c = 0$  задовольняють координати будь-якої точки даної прямої.

Нехай тепер числа  $x_0$  і  $y_0$  — координати деякої точки  $M_0$  — задовольняють наше рівняння. У цьому випадку  $M_0A = M_0B$ , тобто точка  $M_0$  рівновіддалена від точок  $A$  і  $B$ , отже, належить серединному перпендикуляру до відрізка  $AB$  — прямій  $l$ .

На завершення доведення зауважимо, що, оскільки  $A$  і  $B$  — дві різні точки, то хоча б одна з різниць  $(x_2 - x_1)$  або  $(y_2 - y_1)$  не дорівнює нулю, тобто хоча б одне з чисел  $a$  або  $b$  обов'язково відмінне від нуля. ■

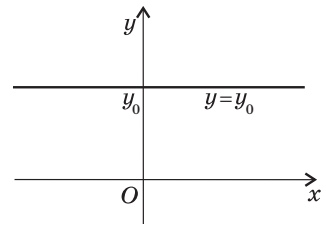
Узагалі, будь-яке рівняння вигляду  $ax + by + c = 0$ , де  $a$  і  $b$  не дорівнюють нулю одночасно, описує деяку пряму.

Виділимо три окремі випадки розміщення прямої в прямокутній системі координат.

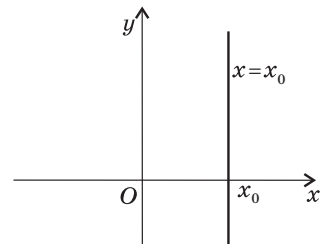
1)  $a = 0, b \neq 0$ . У цьому випадку рівняння прямої набуває вигляду  $by + c = 0$ , або  $y = y_0$ , де  $y_0 = -\frac{c}{b}$  — деяке число. Пряма  $y = y_0$  паралельна осі абсцис (рис. 35, а) або збігається з нею (рівняння осі абсцис має вигляд  $y = 0$ ).

2)  $a \neq 0, b = 0$ . У цьому випадку рівняння прямої набуває вигляду  $ax + c = 0$ , або  $x = x_0$ , де  $x_0 = -\frac{c}{a}$  — деяке число. Пряма  $x = x_0$  паралельна осі ординат (рис. 35, б) або збігається з нею (рівняння осі ординат має вигляд  $x = 0$ ).

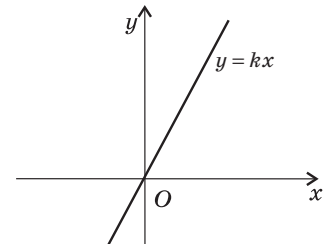
3)  $a \neq 0, b \neq 0, c = 0$ . У цьому випадку рівняння прямої набуває вигляду  $ax + by = 0$ , або  $y = kx$ , де  $k = -\frac{a}{b}$  — деяке число. Пряма  $y = kx$  проходить через початок координат (рис. 35, в).



а



б



в

**Рис. 35.** Окремі випадки розміщення прямої в системі координат [Див. також с. 68]

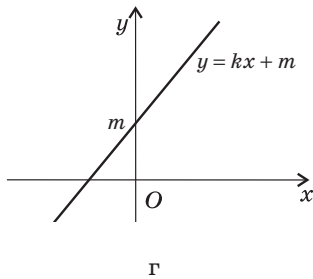


Рис. 35. [Закінчення]

Зазначимо також, що для прямих, не паралельних осі ординат, рівняння  $ax + by + c = 0$  можна подати у вигляді  $y = -\frac{a}{b}x - \frac{c}{b}$ , або  $y = kx + m$ , де  $k$  і  $m$  — деякі числа (*рівняння невертикальної прямої*) (рис. 35, г). Саме такий вигляд рівняння прямої зручно використовувати для розв'язування деяких, зокрема алгебраїчних, задач.

**Задача**

Складіть рівняння прямої, яка проходить через точки  $A(-6; -1)$  і  $B(3; 2)$ .

**Розв'язання**

Оскільки абсциси точок  $A$  і  $B$  не рівні, пряма  $AB$  не паралельна осі ординат. Отже, будемо шукати її рівняння у вигляді  $y = kx + m$ .

За умовою задачі координати точок  $A$  і  $B$  задовольняють шукане рівняння, тобто 
$$\begin{cases} -1 = -6k + m, \\ 2 = 3k + m. \end{cases}$$

Розв'язком системи цих рівнянь буде пара  $k = \frac{1}{3}$ ,  $m = 1$ . Таким чином,  $y = \frac{1}{3}x + 1$  — шукане рівняння.

Зведемо його до вигляду  $ax + by + c = 0$ :  $3y = x + 3$ ,  $x - 3y + 3 = 0$ .

**Відповідь:**  $x - 3y + 3 = 0$ .

Зауважимо, що правильною відповіддю в цій задачі є також будь-яке рівняння, яке можна отримати з наведеного множенням обох частин на число, відмінне від нуля.

**Запитання і задачі****Усні вправи**

**210.** Назвіть центр і радіус кола, заданого рівнянням:

а)  $x^2 + y^2 = 25$ ;

в)  $x^2 + (y + 3)^2 = 2$ .

б)  $(x + 4)^2 + (y - 7)^2 = 100$ ;



**211.** Центром кола радіуса  $R$  є початок координат. Скільки точок перетину з осями координат має це коло? Назвіть координати цих точок.

**212.** Коло задане рівнянням  $(x - 3)^2 + (y - 5)^2 = 16$ . Чи перетинає це коло вісь абсцис; вісь ординат?

**213.** Серед прямих  $2x - 3y = 0$ ,  $4y - 8 = 0$ ,  $3x + y + 9 = 0$ ,  $5 - 10x = 0$  виберіть прямі, які:

- а) паралельні осі абсцис;
- б) паралельні осі ординат;
- в) проходять через початок координат.

**214.** Пряма проходить через точки  $A(4; 0)$  і  $B(4; 3)$ . Чи проходить вона через точки  $C(4; -1)$  і  $D(0; 4)$ ?



## Графічні вправи

**215.** Побудуйте в прямокутній системі координат коло, задане рівнянням  $(x - 4)^2 + (y + 1)^2 = 9$ , і пряму  $x - y + 2 = 0$ . Позначте на рисунку:

- а) дві точки з цілочисловими координатами, які лежать на даному колі й не лежать на даній прямій;
- б) дві точки з цілочисловими координатами, які лежать на даній прямій і не лежать на даному колі;
- в) точки перетину кола і прямої.



**216.** Побудуйте в прямокутній системі координат коло, задане рівнянням  $(x + 4)^2 + (y + 4)^2 = 25$ , і пряму, яка проходить через центр цього кола і початок координат.

- а) Запишіть рівняння побудованої прямої.
- б) Визначте за рисунком координати точок перетину кола з осями координат. Перевірте отримані результати підстановкою у рівняння кола.








## Письмові вправи

### Рівень А

**217.** Визначте, які з точок  $A(-1; 5)$ ,  $B(-4; 0)$ ,  $C(5; -3)$ ,  $D(-3; 1)$ ,  $E(2; 1)$  лежать на колі, заданому рівнянням  $(x - 2)^2 + (y - 1)^2 = 25$ .

**218.** Складіть рівняння кола:

- а) радіуса 3 з центром  $(-2; 1)$ ;
- б) з центром у початку координат, яке проходить через точку  $(-4; -3)$ ;
- в) з діаметром  $AB$ , якщо  $A(-2; 1)$ ,  $B(2; 1)$ .

-  **219.** Складіть рівняння кола з центром  $A$  і радіусом  $AB$ , якщо  $A(1; 1)$ ,  $B(-3; -2)$ . Які з точок  $C(4; 5)$ ,  $D(-4; 1)$ ,  $E(1; 4)$  лежать на цьому колі?
- 220.** На колі, заданому рівнянням  $x^2 + y^2 = 100$ , знайдіть точки:
  - з абсцисою 8;
  - з ординатою  $-6$ .
- 221.** Визначте, чи має коло, задане рівнянням  $(x + 2)^2 + (y - 1)^2 = 5$ , спільні точки з осями координат. Знайдіть координати цих точок.
-  **222.** Коло задане рівнянням  $x^2 + (y - 1)^2 = 4$ . Знайдіть точки перетину цього кола з осями координат.
- 223.** Визначте, які з точок  $A(3; -1)$ ,  $B(-3; 0)$ ,  $C(12; 5)$ ,  $D(1; 0)$ ,  $E(-9; -2)$  лежать на прямій, заданій рівнянням  $x - 3y + 3 = 0$ .
- 224.** Складіть рівняння прямої, яка проходить через точку  $(-6; 2)$  і:
  - паралельна осі ординат;
  - паралельна осі абсцис;
  - проходить через початок координат.
-  **225.** Складіть рівняння прямої, яка проходить через початок координат і центр кола, заданого рівнянням  $(x + 3)^2 + (y - 3)^2 = 1$ . Визначте, які з точок  $A(-1; -1)$ ,  $B(-8; 8)$ ,  $C(12; 12)$  лежать на цій прямій.
- 226.** Знайдіть точки перетину:
  - прямих  $2x - 5y + 1 = 0$  і  $y = 3$ ;
  - прямої  $3x + y + 6 = 0$  з осями координат;
  - прямої  $x - y = 0$  і кола  $x^2 + y^2 = 8$ .
-  **227.** Доведіть, що коло  $(x - 2)^2 + (y + 3)^2 = 4$  дотикається до осі ординат. Знайдіть координати точки дотику.
-  **228.** Знайдіть точку перетину прямих  $2x - y - 9 = 0$  і  $y = -x$ .

## Рівень Б

- 229.** Визначте центр і радіус кола, заданого рівнянням:
  - $x^2 - 6x + y^2 + 2y - 6 = 0$ ;
  - $x^2 + y^2 + 10y + 24 = 0$ .
- 230.** Складіть рівняння кола:
  - з діаметром  $AB$ , якщо  $A(-1; 5)$ ,  $B(5; -3)$ ;
  - описаного навколо рівностороннього трикутника з точкою перетину медіан  $(-4; 9)$  і периметром  $6\sqrt{3}$ ;
  - вписаного у квадрат  $ABCD$ , якщо  $A(-1; -3)$ ,  $B(-1; -1)$ ,  $C(1; -1)$ ,  $D(1; -3)$ .



231. Складіть рівняння кола:  
 а) вписаного в ромб, діагоналі якого дорівнюють 15 і 20 і лежать на осях координат;  
 б) описаного навколо прямокутного трикутника  $ABC$ , якщо  $\angle A = 90^\circ$ ,  $B(4; 0)$ ,  $C(-2; -8)$ .
232. Коло з центром  $C(-4; 5)$  дотикається до осі абсцис. Складіть рівняння цього кола і знайдіть точки його перетину з віссю ординат.
233. Складіть рівняння кіл радіуса 2, які мають центр на осі абсцис і дотикаються до осі ординат.
234. Складіть рівняння прямої, яка:  
 а) проходить через точки  $(-1; -6)$  і  $(1; 2)$ ;  
 б) проходить через початок координат і центр кола  $x^2 + 4x + y^2 - 2y + 4 = 0$ ;  
 в) перетинає осі координат в точках  $(-3; 0)$  і  $(0; -3)$ .
235. Складіть рівняння прямих, що містять сторони трикутника  $ABC$ , якщо  $A(-1; -1)$ ,  $B(-1; 3)$ ,  $C(2; 2)$ .
236. Знайдіть точку перетину прямих:  
 а)  $3x + y + 5 = 0$  і  $x - 2y - 3 = 0$ ;  
 б)  $x - y + 1 = 0$  і  $2x - 5y + 5 = 0$ ;  
 в) дотичних до кола  $x^2 + y^2 = 4$  в точках  $(2; 0)$  і  $(0; -2)$ .
237. Знайдіть точки перетину:  
 а) прямої  $x - 3y + 6 = 0$  і кола  $(x - 2)^2 + (y - 1)^2 = 25$ ;  
 б) кіл  $(x - 2)^2 + y^2 = 1$  і  $x^2 + y^2 = 5$ .
238. Дано коло  $(x - 3)^2 + (y - 2)^2 = 8$  і прями  $x - y + 3 = 0$  та  $x + y - 9 = 0$ . Знайдіть точку перетину даних прямих і спільні точки кожної з них і кола.

## Рівень В

239. Складіть рівняння кола:  
 а) яке має центр на осі ординат і проходить через точки  $(-5; 1)$  і  $(3; 5)$ ;  
 б) яке має радіус  $2\sqrt{2}$  і проходить через точки  $(1; 4)$  і  $(5; 4)$ .
240. Складіть рівняння кола радіуса 5 з центром на осі абсцис, якщо воно проходить через точку  $(1; -3)$ . Скільки розв'язків має задача?
- 241 (опорна). Рівняння прямої, яка перетинає осі координат у точках  $(a; 0)$  і  $(0; b)$ , де  $a \neq 0$  і  $b \neq 0$ , має вигляд  $\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$  (рівняння прямої у відрізках). Доведіть.

**242.** Доведіть, що прямі  $x + y - 5 = 0$ ,  $2x - y - 4 = 0$  і  $x - 3y + 3 = 0$  перетинаються в одній точці.

**243.** Знайдіть довжину хорди, яка утворюється в результаті перетину кола  $(x + 4)^2 + (y - 3)^2 = 4$  прямою  $x - y + 9 = 0$ .

✦ **244.** Знайдіть периметр трикутника, обмеженого прямими  $4x - 3y + 3 = 0$ ,  $y = 1$ ,  $x = 3$ . Складіть рівняння прямої, що містить медіану трикутника, проведenu до середньої за довжиною сторони.



## Повторення перед вивченням § 8

### Теоретичний матеріал

- властивості й ознаки;
- взаємне розміщення графіків лінійних функцій;
- види чотирикутників.

7 клас, п. 13.2

алгебра, 7 клас

8 клас, § 4, 5

### Задачі

✦ **245.** Сформулюйте і доведіть три ознаки квадрата.

**246.** Два трикутники вписані в одне коло. Сторони одного з них дорівнюють 7 см, 15 см і 20 см. Знайдіть сторони другого трикутника, якщо він є єгипетським.\*



\* Нагадаємо, що єгипетським трикутником називається прямокутний трикутник, сторони якого відносяться як 3:4:5.

# § 8

## Метод координат

### 8.1. Розв'язування задач методом координат

Формули й рівняння, отримані в цьому розділі, дають можливість вивчати геометричні фігури та їхні властивості за допомогою рівнянь і нерівностей, тобто використовувати в геометрії засоби алгебри. Такий метод дослідження геометричних фігур називають **методом координат**, а відповідний розділ геометрії — *аналітичною геометрією*.



#### Задача

Доведіть, що сума квадратів діагоналей трапеції дорівнює сумі квадратів бічних сторін, доданій до подвоєного добутку основ.

#### Розв'язання

Сформулюємо задачу в координатах. Для цього розмістимо дану трапецію  $ABCD$  у системі координат так, щоб її вершини мали координати  $A(0; 0)$ ,  $B(a; b)$ ,  $C(c; b)$ ,  $D(d; 0)$  (рис. 36).

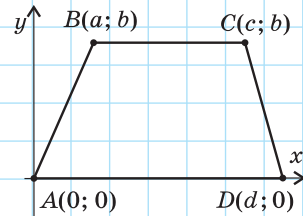


Рис. 36

Виразимо суму квадратів діагоналей трапеції через координати її вершин:

$$AC^2 + BD^2 = c^2 + b^2 + (a - d)^2 + b^2 = a^2 + 2b^2 + c^2 + d^2 - 2ad.$$

Обчислимо довжини основ трапеції:

$$AD = d, \quad BC = c - a.$$

Виразимо в координатах суму квадратів бічних сторін:

$$AB^2 + CD^2 = a^2 + b^2 + (c - d)^2 + b^2 = a^2 + 2b^2 + c^2 + d^2 - 2cd.$$

Додаючи до цього виразу подвоєний добуток основ, маємо:

$$\begin{aligned} AB^2 + CD^2 + 2AD \cdot BC &= a^2 + 2b^2 + c^2 + d^2 - 2cd + 2cd - 2ad = \\ &= a^2 + 2b^2 + c^2 + d^2 - 2ad, \end{aligned}$$

що й треба було довести.

Отже, розв'язування геометричної задачі методом координат складається з **трьох основних етапів**:

- 1) сформулювати задачу мовою координат;
- 2) перетворити алгебраїчні вирази, користуючись відомими співвідношеннями та формулами;
- 3) перекласти отриманий результат мовою геометрії.

На першому етапі розв'язування часто необхідно задати на площині систему координат. Зазвичай її вибирають так, щоб якнайбільше координат розглядуваних точок фігури дорівнювали нулю або легко виражались через невелику кількість параметрів. Це дозволяє максимально спростити подальші алгебраїчні перетворення.

## 8.2. Взаємне розміщення прямих у системі координат

Як відомо з курсу алгебри, у рівнянні невертикальної прямої  $y = kx + m$  число  $k$  називають **кутовим коефіцієнтом прямої**. Нехай пряма проходить через точки  $M(x_1; y_1)$  і  $N(x_2; y_2)$  і утворює з додатною піввіссю осі абсцис гострий кут  $\alpha$  (рис. 37, а). Виразимо з прямокутного трикутника  $MNK$  тангенс кута  $\alpha$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \angle NMK = \frac{NK}{MK},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{(kx_2 + m) - (kx_1 + m)}{x_2 - x_1} = \frac{k(x_2 - x_1)}{x_2 - x_1} = k.$$

У випадку, коли кут  $\alpha$  тупий (рис. 37, б):

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg}(180^\circ - \angle NMK) = -\operatorname{tg} \angle NMK,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = k.$$

Отже, **кутовий коефіцієнт прямої  $k$  дорівнює тангенсу кута нахилу прямої до додатної півосі осі абсцис**.

Геометричний зміст чисел  $k$  і  $m$  у рівнянні  $y = kx + m$  унаочнено на рис. 38.

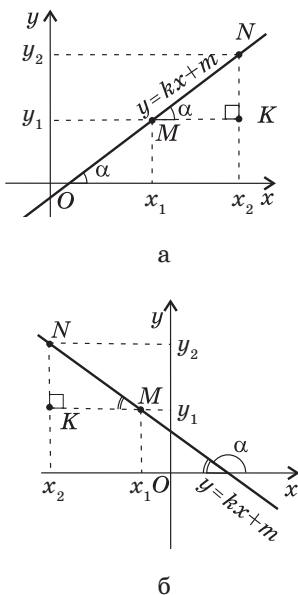


Рис. 37. Визначення кутowego коефіцієнта прямої

### Теорема (критерій паралельності прямих у системі координат)

Прямі  $l_1$  і  $l_2$ , задані рівняннями  $y = k_1x + m_1$  і  $y = k_2x + m_2$  відповідно, паралельні тоді й тільки тоді, коли  $k_1 = k_2$  і  $m_1 \neq m_2$ .

#### Доведення

□ 1) *Властивість.*

Нехай  $l_1 \parallel l_2$ . У випадку, коли обидві ці прямі паралельні осі абсцис,  $k_1 = k_2 = 0$  і твердження теореми очевидне. В іншому випадку (рис. 39)  $\alpha_1 = \alpha_2$  як відповідні кути при паралельних прямих  $l_1$  і  $l_2$  та січній  $Ox$ . Отже,  $\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_2$ , тобто  $k_1 = k_2$ . Очевидно, що  $m_1 \neq m_2$ , оскільки в іншому випадку дані прямі збігаються.

2) *Ознака.*

Якщо  $k_1 = k_2 = 0$ , твердження теореми очевидне. Проведемо доведення для випадку, коли дані прямі утворюють з додатною піввіссю осі абсцис гострі кути (інший випадок розгляньте самостійно). Нехай  $k_1 = k_2$  і  $m_1 \neq m_2$ , звідки  $\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_2$ . Оскільки різним гострим кутам  $\alpha$  відповідають різні тангенси, то  $\alpha_1 = \alpha_2$ , отже, за ознакою паралельності прямих  $l_1 \parallel l_2$ . Теорему доведено повністю. ■

### Теорема (критерій перпендикулярності прямих у системі координат)

Прямі  $l_1$  і  $l_2$ , задані рівняннями  $y = k_1x + m_1$  і  $y = k_2x + m_2$  відповідно, перпендикулярні тоді й тільки тоді, коли  $k_1 \cdot k_2 = -1$ .

#### Доведення

□ 1) *Властивість.*

Нехай  $l_1 \perp l_2$  (рис. 40). Із прямокутного трикутника  $ABC$  ( $\angle C = 90^\circ$ ) маємо:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \operatorname{tg} \angle CAB = \frac{BC}{AC} = \operatorname{ctg} \angle CBA = \frac{1}{\operatorname{tg} \angle CBA} = \\ &= \frac{1}{\operatorname{tg}(180^\circ - \alpha_2)} = -\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2}. \end{aligned}$$

Отже,  $\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 = k_1 \cdot k_2 = -1$ .

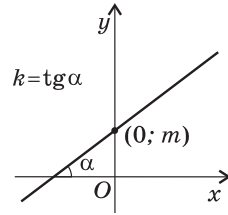


Рис. 38. Геометричний зміст  $k$  і  $m$  у рівнянні прямої

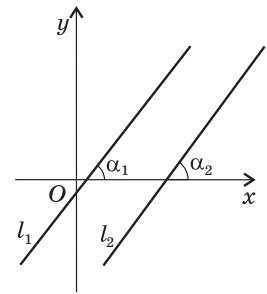


Рис. 39. До доведення властивості й ознаки паралельності прямих

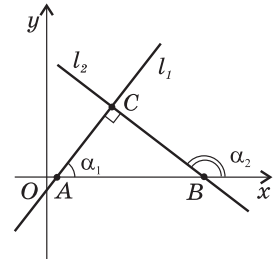


Рис. 40. До доведення властивості й ознаки перпендикулярності прямих

2) *Ознака.*

Нехай  $k_1 \cdot k_2 = -1$ , тобто  $k_1 = -\frac{1}{k_2}$ . Оскільки  $k_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$ ,  $k_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$  (див. рис. 40), то

$$\operatorname{tg} \angle CAB = -\frac{1}{\operatorname{tg}(180^\circ - \angle CBA)} = \frac{1}{\operatorname{tg} \angle CBA} = \operatorname{ctg} \angle CBA.$$

Враховуючи, що  $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)$ , маємо:  $\operatorname{tg} \angle CAB = \operatorname{tg}(90^\circ - \angle CBA)$ . Оскільки кут  $CBA$  гострий, то кут  $(90^\circ - \angle CBA)$  також гострий, отже,  $\angle CAB = 90^\circ - \angle CBA$ . Тоді  $\angle CAB + \angle CBA = 90^\circ$ , тобто  $\angle C = 90^\circ$ . Теорему доведено повністю. ■

#### Задача

Визначте, чи є серед прямих  $x - 3y - 3 = 0$ ,  $3x + y - 9 = 0$  і  $x - 3y + 12 = 0$  паралельні або перпендикулярні.

#### Розв'язання

Подано рівняння даних прямих у вигляді  $y = kx + m$ :

$$y = \frac{1}{3}x - 1, \quad y = -3x + 9, \quad y = \frac{1}{3}x + 4.$$

Отже, оскільки  $\frac{1}{3} \cdot (-3) = -1$ , прямі  $y = \frac{1}{3}x - 1$  і  $y = \frac{1}{3}x + 4$  перпендикулярні до прямої  $y = -3x + 9$ . Оскільки  $\frac{1}{3} = \frac{1}{3}$  і  $-1 \neq 4$ , то прямі  $y = \frac{1}{3}x - 1$  і  $y = \frac{1}{3}x + 4$  паралельні.

### 8.3. Застосування координат до розв'язування задач на відшукування ГМТ

Розв'язування задач на відшукування ГМТ за допомогою методу координат передбачає два основні етапи:

1) складання рівняння з двома невідомими  $x$  і  $y$ , яке задовольняють координати будь-якої точки шуканого ГМТ. На цьому етапі обґрунтовується пряме твердження: якщо точка  $M(x; y)$  — довільна точка шуканого ГМТ, то її координати задовольняють знайдене рівняння;

2) доведення оберненого твердження: будь-яка точка, координати якої задовольняють знайдене рівняння, належить шуканому ГМТ.

**Задача**

Дано точки  $A$  і  $B$ . Знайдіть геометричне місце точок площини, для яких різниця  $MA^2 - MB^2$  дорівнює сталому числу  $k$ .

**Розв'язання**

Виберемо систему координат так, щоб точки  $A$  і  $B$  лежали на осі абсцис, а середина відрізка  $AB$  збігалася з початком координат (рис. 41). Нехай  $AB = a$ ,

тоді дані точки матимуть координати  $A\left(-\frac{a}{2}; 0\right)$  і  $B\left(\frac{a}{2}; 0\right)$ .

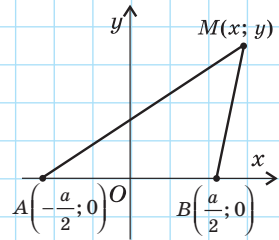
Для довільної точки  $M(x; y)$  за умовою задачі  $MA^2 - MB^2 = k$ . Записавши цю умову в координатах,

маємо:  $\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 - y^2 = k$ .

Спростуючи цей вираз, одержимо:  $2ax = k$ , тобто  $x = \frac{k}{2a}$ .

Отже, кожна точка шуканого ГМТ належить прямій  $x = \frac{k}{2a}$ , яка паралельна осі ординат (тобто перпендикулярна до прямої  $AB$ ) і проходить через точку  $\left(\frac{k}{2a}; 0\right)$ . І навпаки: якщо точка  $M(x; y)$  лежить на прямій  $x = \frac{k}{2a}$ , то її

координати задовольняють рівняння  $MA^2 - MB^2 = k$ , отже, точка  $M$  належить шуканому ГМТ.

**Рис. 41****Запитання і задачі****Усні вправи**

**247.** Квадрат зі стороною 1 розміщений у системі координат так, що три його вершини лежать на осях координат, а четверта — в першій координатній чверті. Назвіть координати вершин квадрата.

**248.** Ромб із діагоналями 6 і 8 розміщений у системі координат так, що його діагоналі лежать на осях координат, причому більша діагональ — на осі абсцис. Назвіть координати вершин ромба.

**249.** Назвіть кутовий коефіцієнт прямої, яка:

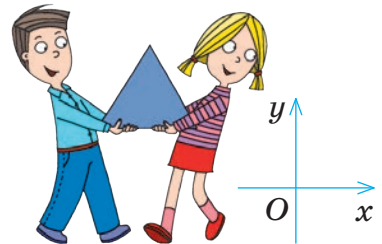
- а) паралельна прямій  $y = -0,5x + 7$ ;
- б) перпендикулярна до прямої  $y = -0,5x + 7$ .

- 250.** Одна з основ трапеції лежить на осі абсцис. Яким рівнянням задається пряма, що містить другу основу, якщо висота трапеції дорівнює 8? Скільки розв'язків має задача?



### Графічні вправи

**251.** Розмістіть у системі координат рівнобедрений трикутник з основою 6 і бічною стороною 5 так, щоб основа і вершина, протилежна основі трикутника, лежали на осях координат. Визначте координати вершин трикутника.



- 252.** Розмістіть у системі координат прямокутну трапецію з основами  $a$  і  $b$  ( $a < b$ ) і висотою  $h$  так, щоб дві сторони трапеції лежали на осях координат. Визначте координати вершин трапеції.



### Письмові вправи

#### Рівень А

**253.** Складіть рівняння прямої, яка:

- а) паралельна прямій  $2x + 3y + 1 = 0$  і проходить через точку  $(1; 1)$ ;
- б) паралельна прямій  $x + y - 14 = 0$  і проходить через початок координат.

- 254.** Дано пряму  $2x - y + 4 = 0$  і точку  $A(1; 1)$ . Через точку  $A$  проведено пряму, паралельну даній, і пряму, перпендикулярну до даної. Складіть рівняння цих прямих.

**255.** Доведіть методом координат, що паралелограм, який має рівні діагоналі, є прямокутником.

**256.** Доведіть методом координат, що сума квадратів діагоналей паралелограма дорівнює сумі квадратів усіх його сторін.


- 257.** Доведіть методом координат, що середня лінія трапеції паралельна її основам.



**258.** Складіть рівняння ГМТ:

а) рівновіддалених від початку координат і точки  $(-4; 2)$ ;

б) сума квадратів відстаней від яких до точок  $(-1; 0)$  і  $(1; 0)$  дорівнює 12.

 **259.** Складіть рівняння ГМТ, різниця квадратів відстаней від яких до точок  $(1; 0)$  і  $(-1; 2)$  дорівнює 1.


### Рівень Б

**260.** Складіть рівняння прямої, яка:


а) нахилена до додатної півосі осі абсцис під кутом  $60^\circ$  і проходить через точку  $(0; 1)$ ;


б) нахилена до додатної півосі осі абсцис під кутом  $135^\circ$  і проходить через точку  $(0; -1)$ .

**261.** Складіть рівняння дотичних до кола  $x^2 + y^2 = 25$  у точках  $(3; 4)$  і  $(-3; -4)$ . Доведіть, що ці дотичні паралельні.

 **262.** Три сторони квадрата лежать на прямих  $3x + y + 1 = 0$ ,  $3x + y - 9 = 0$ ,  $x - 3y - 3 = 0$ . Складіть рівняння прямої, на якій лежить четверта сторона квадрата. Скільки розв'язків має задача?

**263.** До стіни вертикально приставлено драбину. На середній сходинці драбини сидить кішка. Хлопець починає рухати драбину так, що один її кінець переміщується прямолінійно по землі, а інший — вертикально вниз уздовж стіни. По якій траєкторії рухатиметься кішка, якщо вона весь час сидітиме посередині драбини? Застосуйте для розв'язування задачі метод координат.

 **264.** Пряма віддалена від центра кола радіуса  $R$  на відстань  $d$ . Дослідіть взаємне розміщення кола і прямої залежно від значень  $d$  і  $R$ .

 **265.** Відстань між центрами кіл з радіусами  $R$  і  $r$  дорівнює  $d$ . Дослідіть взаємне розміщення кіл залежно від значень  $d$ ,  $R$  і  $r$ .




### Рівень В

**266 (опорна).** Рівняння прямої, що проходить через точки  $(x_1; y_1)$

і  $(x_2; y_2)$ , має вигляд  $\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}$ . Доведіть.

**267 (опорна).** Прямі  $a_1x + b_1y + c_1 = 0$  і  $a_2x + b_2y + c_2 = 0$  перпендикулярні тоді й тільки тоді, коли  $a_1a_2 + b_1b_2 = 0$ . Доведіть.

**268.** Катет і гіпотенуза прямокутного трикутника дорівнюють відповідно  $a\sqrt{2}$  і  $a\sqrt{3}$ . Доведіть, що медіани, проведені до цих сторін, взаємно перпендикулярні.

-  **269.** У прямокутнику  $ABCD$   $AB = 2a$ ,  $AD = 5a$ . На стороні  $AD$  позначено точку  $K$  так, що  $AK = a$ . Доведіть, що  $BK \perp KC$ .
-  **270.** На колі радіуса  $R$  позначено точку  $A$ . Знайдіть геометричне місце середин усіх хорд даного кола, які виходять із точки  $A$ .
-  **271.** У прямокутному трикутнику  $ABC$   $\angle C = 90^\circ$ . Знайдіть геометричне місце точок  $M$  таких, що  $MA^2 + MB^2 = 2MC^2$ .



## Повторення перед вивченням § 9

### Теоретичний матеріал

- аксіома вимірювання відрізків;
- рівні фігури.

 7 клас, п. 2.2

 7 клас, п. 7.2

### Задачі

- 272.** Діагоналі рівнобедреної трапеції  $ABCD$  ( $AD \parallel BC$ ) перетинаються в точці  $O$ . Доведіть рівність трикутників  $AOB$  і  $DOC$ .
- 273.** Вершини трикутника  $ABC$  мають координати  $A(-2; 1)$ ,  $B(-1; 4)$ ,  $C(1; 4)$ . Знайдіть на координатній площині точку  $D$  таку, що:
- а)  $\triangle ABC = \triangle ADC$ ;      б)  $\triangle ABC = \triangle CDA$ .



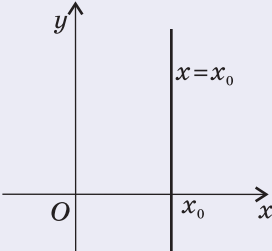
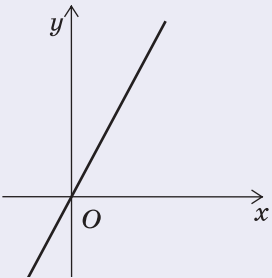
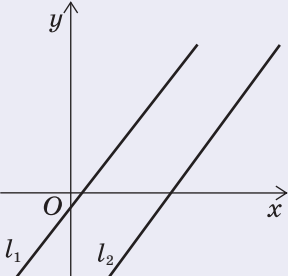
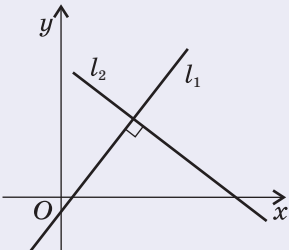
## Онлайн-тестування для підготовки до контрольної роботи № 2

### Задачі для підготовки до контрольної роботи № 2

- Відрізок  $BD$  — медіана трикутника  $ABC$ . Знайдіть координати вершини  $C$ , якщо  $A(-1; 7)$ ,  $D(3; 1)$ .
- Точки  $A(-3; -1)$  і  $B(5; 5)$  — кінці діаметра кола. Знайдіть радіус цього кола.
- Складіть рівняння кола з центром  $(3; -4)$ , яке проходить через початок координат.
- Знайдіть точки перетину прямої  $2x - 5y + 20 = 0$  з осями координат.
- Визначте, чи є відрізок  $AB$  діаметром кола  $x^2 + 6x + y^2 = 0$ , якщо  $A(-1; \sqrt{5})$ ,  $B(-5; -\sqrt{5})$ .
- Доведіть, що чотирикутник  $ABCD$  — прямокутник, якщо  $A(-2; 0)$ ,  $B(4; 3)$ ,  $C(5; 1)$ ,  $D(-1; -2)$ .

## Підсумки розділу II

<b>НАЙПРОСТІШІ ЗАДАЧІ Й РІВНЯННЯ ФІГУР У КООРДИНАТАХ</b>		
<p style="text-align: center;"><b>Координати середини відрізка</b></p> <p style="text-align: center;"><math>x = \frac{x_1 + x_2}{2}, y = \frac{y_1 + y_2}{2}</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>Відстань між точками</b></p> <p style="text-align: center;"><math>AB = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>Рівняння кола</b></p> <p style="text-align: center;"><math>(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2</math></p>
<p style="text-align: center;"><b>Рівняння прямої</b></p> <p style="text-align: center;"><math>ax + by + c = 0</math> (a і b не дорівнюють нулю одночасно)</p>	<p style="text-align: center;"><b>Рівняння непертикальної прямої</b></p> <p style="text-align: center;"><math>y = kx + m, k = \text{tg } \alpha</math></p>	
<b>ОКРЕМІ ВИПАДКИ РОЗМІЩЕННЯ ПРЯМОЇ В СИСТЕМІ КООРДИНАТ</b>		
<p style="text-align: center;"><b>Графічне подання</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Значення коефіцієнтів та вигляд рівняння</b></p> <p style="text-align: center;"><math>a = 0, b \neq 0.</math> <math>by + c = 0</math> або <math>y = y_0,</math> де <math>y_0 = -\frac{c}{b}</math> — деяке число</p>	<p style="text-align: center;"><b>Особливості розміщення</b></p> <p style="text-align: center;">Пряма паралельна осі абсцис або збігається з нею.</p> <p style="text-align: center;"><b>Рівняння осі абсцис</b> <math>y = 0</math></p>

<b>ОКРЕМІ ВИПАДКИ РОЗМІЩЕННЯ ПРЯМОЇ В СИСТЕМІ КООРДИНАТ</b>		
<b>Графічне подання</b>	<b>Значення коефіцієнтів та вигляд рівняння</b>	<b>Особливості розміщення</b>
	$a \neq 0, b = 0.$ $ax + c = 0$ або $x = x_0,$ де $x_0 = -\frac{c}{a}$ — деяке число	Пряма паралельна осі ординат або збігається з нею.  <b>Рівняння осі ординат</b> $x = 0$
	$a \neq 0, b \neq 0, c = 0.$ $ax + by = 0$ або $y = kx,$ де $k = -\frac{a}{b}$ — деяке число	Пряма проходить через початок координат
<b>ВЗАЄМНЕ РОЗМІЩЕННЯ ПРЯМИХ У СИСТЕМІ КООРДИНАТ</b>		
<b>Критерій паралельності прямих у системі координат</b>	<b>Критерій перпендикулярності прямих у системі координат</b>	
Прямі $l_1$ і $l_2$ , задані рівняннями $y = k_1x + m_1$ і $y = k_2x + m_2$ відповідно, паралельні тоді й тільки тоді, коли $k_1 = k_2$ і $m_1 \neq m_2$	Прямі $l_1$ і $l_2$ , задані рівняннями $y = k_1x + m_1$ і $y = k_2x + m_2$ відповідно, перпендикулярні тоді й тільки тоді, коли $k_1 \cdot k_2 = -1$	
		



## Контрольні запитання до розділу II

1. Опишіть прямокутну систему координат на площині.
2. Доведіть формули координат середини відрізка.
3. Доведіть формулу відстані між двома точками.
4. Запишіть рівняння кола у прямокутній системі координат.
5. Запишіть рівняння прямої у прямокутній системі координат.



## Додаткові задачі до розділу II

- 274.** Діагоналі паралелограма  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$ , причому  $A(-3; -1)$ ,  $B(0; 4)$ ,  $O(2; 1)$ . Знайдіть координати вершин  $C$  і  $D$ .
- 275.** Доведіть, що:
- а) сума абсцис середин сторін трикутника дорівнює сумі абсцис його вершин;
  - б) точка перетину медіан трикутника, утвореного середніми лініями цього трикутника, збігається з точкою перетину медіан цього трикутника.
- 276.** На осі ординат знайдіть точку, відстань від якої до точки  $A(1; 3)$  удвічі менша, ніж до точки  $B(2; -3)$ .
- 277.** Дано точки  $A(-3; 1)$  і  $B(7; 1)$ . Складіть рівняння геометричного місця точок  $C$  таких, що трикутник  $ABC$ :
- а) прямокутний з гіпотенузою  $AB$ ;
  - б) прямокутний з катетом  $AB$ .
- 278.** Коло дотикається до осей координат, а його центр лежить у другій координатній чверті й віддалений від початку координат на  $2\sqrt{2}$ . Складіть рівняння цього кола.
- 279.** Вершини трикутника  $ABC$  мають координати  $A(2; -6)$ ,  $B(4; 2)$ ,  $C(0; -4)$ . Складіть рівняння прямої, яка містить середню лінію трикутника, паралельну стороні  $AC$ .
- 280.** Доведіть, що прямі  $ax + 2y - 6 = 0$  і  $bx - y + 5 = 0$  перетинаються за умови  $a + 2b \neq 0$ .
- 281.** Складіть рівняння прямої, яка перетинає коло  $x^2 + y^2 = 25$  у точках з абсцисами  $-4$  і  $3$  та вісь  $Oy$  у точці з найбільшою із можливих ординатою.

### Задачі підвищеної складності

**282.** Складіть рівняння кола, яке проходить через точки  $(3; 0)$  і  $(-1; 2)$ , якщо центр кола лежить на прямій  $x - y + 2 = 0$ .

**283.** Знайдіть відстань від початку координат до прямої  $3x + 2y - 13 = 0$ .

**284.** Складіть рівняння кола, описаного навколо трикутника з вершинами  $(3; -7)$ ,  $(8; -2)$  і  $(6; 2)$ .

**285 (опорна).** Відстань від точки  $M(x_0; y_0)$  до прямої  $ax + by + c = 0$

визначається за формулою  $d = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ . Доведіть.

**286.** Знайдіть усі значення  $k$ , за яких пряма  $y = kx + 5$  віддалена від початку координат на 3 одиниці.

**287.** Точка  $M$  — точка перетину медіан трикутника  $ABC$ , причому  $A(-1; 2)$ ,  $B(2; 3)$ ,  $M(1; 2)$ . Знайдіть координати вершини  $C$ .

**288.** Навколо рівностороннього трикутника зі стороною  $a$  описано коло. Доведіть, що сума квадратів відстаней від довільної точки кола до вершин трикутника дорівнює  $2a^2$ .



**289.** На площині позначено точки  $A$  і  $B$ . Доведіть, що геометричним місцем точок  $M$ , для яких  $\frac{MA}{MB} = k$  ( $k > 0$ ,  $k \neq 1$ ), є коло з центром на прямій  $AB$  (коло Аполлонія).



## Історична довідка

Розвиток торгівлі й мореплавання, зростання промисловості й техніки, що відбувались у XVII ст., сприяли виникненню нових математичних ідей і методів, які відповідали вимогам часу. Одним із провідників цих ідей був Рене Декарт (1596–1650) — видатний французький учений і філософ. Широта інтересів цієї людини вражає: окрім математики, він збагатив своїми відкриттями астрономію, фізику, біологію, медицину. Але універсальною наукою, здатною пояснити всі явища реального світу, Декарт вважав філософію. Він став засновником власного філософського вчення — картезіанства (Картезій — латинізоване прізвище Декарта), у якому викладено погляд на розвиток природничих наукових теорій.

Біографія Декарта є взірцем самовідданого служіння науці й боротьби за свободу думки. Зазнавши утисків на батьківщині, у 1629 р. Декарт змушений був переїхати до Голландії. Саме там у 1637 р. вперше побачив світ його головний твір — «Міркування про метод, що дозволяє спрямовувати розум і відшукувати істину в науках». У цій роботі Декарт виклав чотири основні принципи наукового пізнання:

1) ніколи не сприймати за істину те, що є недостатньо обґрунтованим; 2) ділити кожну проблему на частини, щоб розв'язувати її послідовно; 3) рухатися в процесі пізнання від найпростішого до більш складного; 4) супроводжувати дослідження переліками й оглядами, щоб нічого не пропустити.

«Міркування про метод...» мало три додатки: «Діоптрика», «Метеори» та «Геометрія». Саме в останньому викладено метод координат, який пізніше склав основу аналітичної геометрії. Цікаво, що в цій роботі Декарт уперше запропонував сучасні позначення змінних і степенів, а також першим став подавати рівняння у вигляді, коли в правій частині стоїть нуль. «Геометрія» ще за життя автора мала чотири перевидання і стала настільною книгою математиків того часу.



Рене Декарт



Пам'ятник Рене Декарту в Гаазі



## Математичні олімпіади

### Михайло Йосипович Ядренко (1932–2004)



Як виявляється математичний талант учня? Чи можливе це в умовах масової школи? Чи дійсно серед переможців математичних олімпіад трапляються майбутні видатні вчені та педагоги? Відповіді на ці запитання можна знайти в біографії знаного математика та організатора математичного олімпіадного руху в Україні М. Й. Ядренка.

Михайло Йосипович Ядренко народився в Чернігівській області, в селі Дрімлівка неподалік Ніжина. За власними спогадами, підручниками юного Михайла були буквар та «Кобзар» Т. Г. Шевченка. Уже в 9 класі Михайло вирішує стати математиком.

У 1950 році він пише листа до Київського державного університету з проханням допустити його до участі в міській олімпіаді. Юнак отримує запрошення, приїжджає до Києва, розв'язує чотири задачі з п'яти та отримує друге місце! Але сам Михайло їде незадоволений тим, що не все розв'язав...

Згодом він закінчує школу із золотою медаллю і вступає на механіко-математичний факультет Київського університету ім. Т. Г. Шевченка. Тут повною мірою розкрився талант ученого.





Блискучий захист кандидатської та докторської дисертацій, завідування кафедрою теорії ймовірностей та математичної статистики, створення нових математичних теорій та підручників — ось далеко не всі надбання цієї надзвичайної людини.

Михайло Йосипович Ядренко відомий як чудовий педагог. Його лекції вирізнялися математичною чіткістю, логічною послідовністю, високим науковим рівнем та разом із тим доступністю викладання матеріалу. Можна без перебільшення сказати, що значна частина відомих українських спеціалістів з теорії ймовірностей та математичного аналізу познайомились із цими розділами математики на лекціях Ядренка.

Але Михайло Йосипович не забув, як саме математичні олімпіади підштовхнули його до серйозної науки. Він віддає багато сил та енергії розвитку шкільної математичної освіти в Україні, організації математичних олімпіад, виданню сучасних посібників з елементарної математики, а також збірників задач із математичних олімпіад. У 1968 році Ядренко заснував періодичний науково-популярний збірник «У світі математики», який з 1995 року перетворився на унікальний науково-популярний журнал.

Понад 40 років Михайло Йосипович був постійним організатором шкільних математичних олімпіад різного рівня та математичних гуртків для школярів і студентів, з 1970 року очолював журі Всеукраїнських олімпіад для школярів. Для роботи у складі журі він залучав спочатку своїх друзів-математиків, пізніше — колишніх «олімпіадників», провідних науковців — палких ентузіастів олімпіадного руху.

Багато років Ядренко виступав з лекціями для школярів на українському телебаченні, був керівником Всеукраїнської заочної фізико-математичної олімпіади. Наказом Міністерства освіти і науки України у 2010 році Всеукраїнським турнірам юних математиків присвоєно ім'я видатного вченого і педагога, фундатора вітчизняної системи роботи з обдарованими юними математиками, члена-кореспондента Академії наук України М. Й. Ядренка.





## Готуємось до ДПА

### Тест 2

Виберіть одну правильну, на вашу думку, відповідь.

- Закінчіть речення так, щоб утворилося правильне твердження.  
Точка  $(-2; 1)$  належить...  
**А** осі абсцис.                      **В** першій координатній чверті.  
**Б** осі ординат.                    **Г** другій координатній чверті.
- Знайдіть координати середини відрізка  $AB$ , якщо  $A(0; -3)$ ,  $B(8; -5)$ .  
**А**  $(8; -8)$               **Б**  $(4; -4)$               **В**  $(8; -1)$               **Г**  $(4; -1)$
- Знайдіть відстань між точками  $A(2; -3)$  і  $B(-1; 1)$ .  
**А** 4                      **Б** 5                      **В** 6                      **Г** 10
- Серед наведених рівнянь укажіть рівняння кола з центром  $(-2; 1)$  і радіусом 4.  
**А**  $(x+2)^2 + (y-1)^2 = 16$                       **В**  $(x-2)^2 + (y+1)^2 = 16$   
**Б**  $(x+2)^2 + (y-1)^2 = 4$                       **Г**  $(x-2)^2 + (y+1)^2 = 4$
- Пряма, задана рівнянням  $ax+by+c=0$ , паралельна осі ординат. Серед наведених рівностей укажіть правильну.  
**А**  $a=0$               **Б**  $b=0$               **В**  $c=0$               **Г**  $a=b$
- Середина відрізка з кінцями  $A(3; -3)$  і  $B(1; m)$  лежить на осі абсцис. Знайдіть  $m$ .  
**А** 2                      **Б** 3                      **В** 1                      **Г** 0
- Серед наведених рівнянь укажіть рівняння прямої, яка проходить через центр кола  $x^2+y^2=16$ .  
**А**  $2x-3y=0$               **Б**  $3x-8=0$               **В**  $x+2y+3=0$               **Г**  $3y+12=0$
- Скільки спільних точок з осями координат має коло, задане рівнянням  $(x-1)^2 + (y+1)^2 = 2$ ?  
**А** Жодної              **Б** Чотири              **В** Дві                      **Г** Три
- Серед наведених рівнянь укажіть рівняння прямої, яка є дотичною до кола  $x^2 + (y-1)^2 = 9$ .  
**А**  $y+3=0$               **Б**  $y+4=0$               **В**  $x-4=0$                       **Г**  $x+3=0$

# Розділ III

## Геометричні перетворення

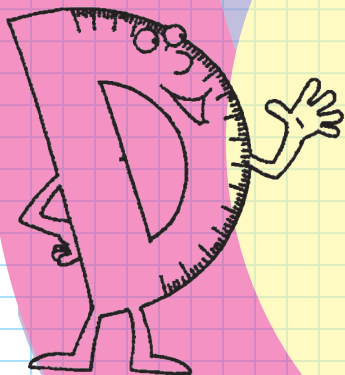
§ 9. Переміщення

§ 10. Центральна та осьова симетрії

§ 11. Поворот і паралельне перенесення

§ 12. Подібність фігур

§ 13. Метод геометричних перетворень



Геометрія є прообразом краси світу.  
*Йоганн Кеплер, німецький астроном  
і математик*

Уявіть собі, що ви кидаєте камінець у плесо тихого ставка і по воді колами розбігаються хвилі, причому центр кожного кола розміщений саме там, де камінець торкнувся води. А тепер підніміть переднє колесо велосипеда і покрутіть його — колесо не зрушить із місця, але його спиці закружляють у шаленому танці. Станьте перед дзеркалом, тримаючи в правій руці олівець — і дзеркало «перетворить» вас на лівшу, адже ваш двійник триматиме олівець у лівій руці. У шухляді вашого столу лежить косинець: ви трохи висунули шухляду — і косинець перемістився разом із нею. Так чи інакше, в кожному з цих випадків фігури, про які йдеться, зазнають певних змін, перетворень.

Ідея перетворень є однією з провідних ідей сучасної математики. За її допомогою з успіхом доводять складні твердження з різних розділів геометрії, які виходять далеко за межі шкільного курсу. За допомогою геометричних перетворень і комп'ютерної графіки кінематографісти захоплюють уяву глядача дивовижними образами і незвичайними перетвореннями на екрані. Перетворення допомагають художникам правильно будувати композиції картин, а хімікам і фізикам — досліджувати структуру кристалів.

У цьому розділі ми розглянемо основні види геометричних перетворень на площині.



# § 9

## Переміщення

### 9.1. Поняття про геометричне перетворення

Будь-яку геометричну фігуру можна розглядати як множину точок: наприклад, на площині коло є множиною всіх точок, рівновіддальених від даної точки. Крім того, між точками двох геометричних фігур можна встановлювати відповідності.

Розглянемо півколо з центром  $O$  і діаметром  $AB$  (рис. 42). З довільної точки півкола проведемо перпендикуляр до прямої  $AB$  і вважаємо, що кожній точці півкола  $X$  відповідає точка  $X'$  — основа перпендикуляра, проведеного з точки  $X$  до прямої  $AB$ . За теоремою про існування і єдиність перпендикуляра до прямої кожній точці півкола в такому разі відповідатиме єдина точка діаметра  $AB$ , і навпаки: кожній точці діаметра поставлена у відповідність єдина точка півкола. Крім того, різним точкам півкола відповідають різні точки діаметра  $AB$  (точки  $A$  і  $B$ , які відповідають самі собі, належать як півколу, так і діаметру). У такому випадку кажуть, що встановлена відповідність є **перетворенням** півкола у діаметр.

#### Означення

**Перетворенням** фігури  $F$  у фігуру  $F'$  називається така відповідність, за якої:

- 1) кожній точці фігури  $F$  відповідає єдина точка фігури  $F'$ ;
- 2) кожній точці фігури  $F'$  відповідає певна точка фігури  $F$ ;
- 3) різним точкам фігури  $F$  відповідають різні точки фігури  $F'$ .

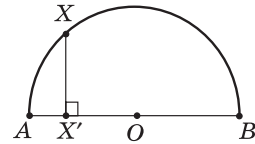


Рис. 42. Відповідність між точками півкола і діаметра



Фігура  $F'$  називається **образом** фігури  $F$  при даному перетворенні.

У шкільному курсі геометрії розглядатимуться геометричні перетворення, які не змінюють форми даної фігури. В окремий вид виділяються перетворення, які залишають незмінними і розміри фігури.



## 9.2. Переміщення та його властивості

### Означення

**Переміщенням** (або **рухом**) називається перетворення фігури, внаслідок якого зберігаються відстані між точками цієї фігури.

Це означає: якщо фігура  $F'$  є образом фігури  $F$ , отриманим унаслідок переміщення, то будь-які дві точки  $X$  і  $Y$  фігури  $F$  переходять у точки  $X'$  і  $Y'$  фігури  $F'$  так, що  $XY = X'Y'$  (рис. 43).

Зауважимо, що поняття переміщення (руху) зустрічається й у фізиці, але там воно має інший зміст. Фізичний рух характеризується траєкторією, швидкістю тощо. Натомість у геометрії мають значення лише початкове й кінцеве положення фігури.

Сформулюємо деякі **властивості переміщення**.

Очевидно, що коли фігуру  $F'$  отримано деяким переміщенням фігури  $F$ , а фігуру  $F''$  — іншим переміщенням фігури  $F'$ , то відстані між відповідними точками фігур  $F$ ,  $F'$  і  $F''$  рівні, тобто **два послідовні переміщення знову дають переміщення**.

Якщо певне перетворення переводить фігуру  $F$  у фігуру  $F'$ , то існує перетворення, яке переводить фігуру  $F'$  у фігуру  $F$ . Таке перетворення називають **оберненим** до даного. Якщо дане перетворення зберігає відстань між точками, то обернене також має цю властивість. Це означає, що **перетворення, обернене до переміщення, також є переміщенням**.

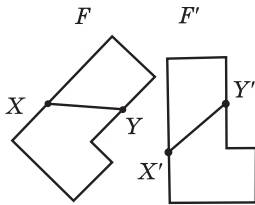


Рис. 43. До означення переміщення

Доведемо основну властивість переміщення.

### Теорема (основна властивість переміщення)

Унаслідок переміщення точки, що лежать на прямій, переходять у точки, що лежать на прямій, і порядок їх взаємного розміщення зберігається.

#### Доведення

□ Нехай на прямій  $AC$  точка  $B$  лежить між точками  $A$  і  $C$ , а точки  $A'$ ,  $B'$  і  $C'$  — образи точок  $A$ ,  $B$  і  $C$ , отримані в результаті переміщення (рис. 44). Доведемо, що точка  $B'$  лежить на прямій  $A'C'$  між точками  $A'$  і  $C'$ .

Якщо точка  $B$  лежить між точками  $A$  і  $C$ , то за аксіомою вимірювання відрізків  $AC = AB + BC$ . За означенням переміщення  $AC = A'C'$ ,  $AB = A'B'$ ,  $BC = B'C'$ , отже,  $A'C' = A'B' + B'C'$ . За наслідком з нерівності трикутника це означає, що точка  $B'$  лежить на прямій  $A'C'$  між точками  $A'$  і  $C'$ , тобто точки  $A'$ ,  $B'$  і  $C'$  лежать на одній прямій. Теорему доведено. ■

#### Наслідок 1

Унаслідок переміщення прямі переходять у прямі, промені — у промені, відрізки — у відрізки.

#### Наслідок 2

Унаслідок переміщення зберігаються кути між променями.

Справді, нехай промені  $AB$  і  $AC$ , що не лежать на одній прямій, унаслідок переміщення переходять у промені  $A'B'$  і  $A'C'$  відповідно (рис. 45). Оскільки відстані між точками внаслідок переміщення зберігаються, то  $\triangle ABC = \triangle A'B'C'$  за трьома сторонами. Отже,  $\angle BAC = \angle B'A'C'$ , тобто градусні міри кутів унаслідок переміщення зберігаються.

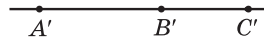
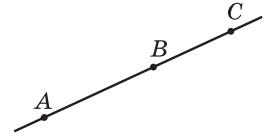


Рис. 44. До доведення основної властивості переміщення

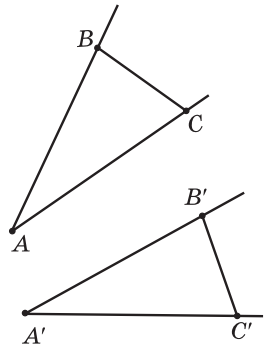


Рис. 45

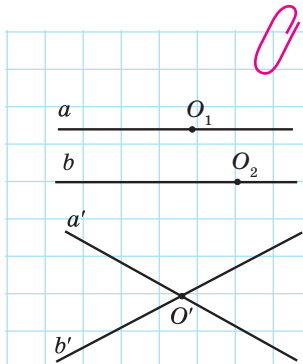


Рис. 46

### Задача

Доведіть, що внаслідок переміщення паралельні прямі переходять у паралельні прямі.

### Розв'язання

Нехай унаслідок переміщення паралельні прямі  $a$  і  $b$  переходять у прямі  $a'$  і  $b'$  відповідно. Доведемо від супротивного, що  $a' \parallel b'$ .

Нехай прямі  $a'$  і  $b'$  перетинаються в деякій точці  $O'$  (рис. 46). На прямій  $a$  існує точка  $O_1$ , а на прямій  $b$  — точка  $O_2$ , такі, що внаслідок переміщення обидві ці точки переходять у точку  $O'$ . Оскільки точки  $O_1$  і  $O_2$  лежать на паралельних прямих, то відстань між ними не дорівнює нулю. Але відстань між їхніми образами дорівнює нулю, що суперечить означенню переміщення. Отже, наше припущення хибне, тобто  $a' \parallel b'$ .

Нагадаємо, що дві фігури називаються рівними, якщо вони суміщаються накладанням, причому поняття накладання вводилося наочних прикладах.

Введення геометричних перетворень, зокрема переміщення, дозволяє ототожнити накладання фігури  $F$  на фігуру  $F'$  із переміщенням, під час якого фігура  $F$  переходить у фігуру  $F'$ .

### Теорема (про зв'язок переміщення і накладання)

Будь-яке накладання є переміщенням, і навпаки: будь-яке переміщення є накладанням.

Обґрунтування цих тверджень надано в Додатку 2.

### Наслідок

Рівні фігури переводяться одна в одну переміщенням, і навпаки: внаслідок переміщення будь-яка фігура переходить у рівну їй фігуру.





Таким чином, можна дати таке означення рівних фігур.

### Означення

Дві фігури називаються **рівними**, якщо вони суміщаються переміщенням.

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 290.** Чи може переміщення переводити:
- сторону паралелограма в протилежну його сторону;
  - одну з основ трапеції в іншу;
  - один із кутів при основі рівнобедреного трикутника в інший;
  - один із кутів різностороннього трикутника в інший?
- 291.** Відрізок  $AC$  і його середина  $B$  внаслідок переміщення переходять у відрізок  $A'C'$  і точку  $B'$  відповідно. Знайдіть довжину відрізка  $A'C'$ , якщо  $AB = 20$  см.
- 292.** Під час переміщення чотирикутника  $ABCD$  отримали квадрат  $A'B'C'D'$ . Визначте довжину діагоналі  $BD$ , якщо  $A'C' = 4$  см.
- 293.** Трикутник  $A'B'C'$  є образом рівностороннього трикутника  $ABC$ , отриманим у результаті переміщення. Визначте кути трикутника  $A'B'C'$ .





### Графічні вправи

- 294.** Накресліть два кола зі спільним центром  $O$ . Опишіть геометричне перетворення, яке переводить менше коло в більше. Чи є таке перетворення переміщенням?
- 295.** Накресліть прямокутник  $ABCD$  і позначте точку  $O$  перетину його діагоналей. Опишіть геометричне перетворення, яке переводить трикутник  $AOB$  у трикутник  $DOC$ . Чи є це перетворення переміщенням?





## Письмові вправи

### Рівень А




- 296.** Точки  $A$ ,  $B$  і  $C$  не лежать на одній прямій і під час переміщення переходять у точки  $A'$ ,  $B'$  і  $C'$  відповідно. Доведіть рівність трикутників  $ABC$  і  $A'B'C'$ .
- 297.** Доведіть, що внаслідок переміщення суміжні кути переходять у суміжні кути.
-  **298.** Доведіть, що внаслідок переміщення вертикальні кути переходять у вертикальні кути.
- 299.** Унаслідок переміщення різносторонній трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $MNK$ , причому  $\angle A = \angle N$ ,  $\angle B = 70^\circ$ ,  $\angle M = 20^\circ$ . Знайдіть кути  $N$  і  $K$ .
-  **300.** Трикутник  $MNK$  — образ трикутника  $ABC$ , отриманий у результаті переміщення. Знайдіть кути трикутника  $ABC$ , якщо  $AB = BC$ , а найбільший кут трикутника  $MNK$  дорівнює  $100^\circ$ .

### Рівень Б

- 301.** Доведіть, що внаслідок переміщення подібні трикутники переходять у подібні трикутники.
- 302.** Доведіть, що коли образом даного чотирикутника, отриманим унаслідок переміщення, є трапеція, то даний чотирикутник також є трапецією.
-  **303.** Доведіть, що внаслідок переміщення паралелограм переходить у паралелограм.
- 304.** Унаслідок переміщення ромб  $ABCD$  переходить у чотирикутник  $A'B'C'D'$ . Знайдіть кути отриманого чотирикутника, якщо  $AB = AC$ .
-  **305.** Унаслідок переміщення чотирикутник  $ABCD$  переходить у чотирикутник  $A'B'C'D'$ . Знайдіть кути чотирикутника  $ABCD$ , якщо  $A'D' \parallel B'C'$ ,  $A'B' = C'D'$ ,  $\angle B' = 140^\circ$  (розгляньте два випадки).

### Рівень В

- 306.** Унаслідок переміщення фігури  $F_1$  і  $F_2$  та їхня спільна точка  $O$  переходять у фігури  $F_1'$  і  $F_2'$  та точку  $O'$  відповідно. Доведіть, що точка  $O'$  — спільна точка фігур  $F_1'$  і  $F_2'$ .

-  **307.** Доведіть ознаку рівності паралелограмів за двома діагоналями і кутом між ними.
-  **308.** Доведіть, що внаслідок переміщення коло переходить у коло з тим самим радіусом.
-  **309.** Сформулюйте і доведіть будь-яку ознаку рівності ромбів.



## Повторення перед вивченням § 10

### Теоретичний матеріал

- паралелограм та його властивості;
- види трикутників;
- види чотирикутників.

 8 клас, § 2

 7 клас, § 16

 8 клас, § 4, 5

### Задачі

- 310.** Доведіть, що відрізок, який має кінці на сторонах паралелограма і проходить через точку перетину діагоналей, ділиться цією точкою навпіл.
- 311.** Відрізок із кінцями на бічних сторонах рівнобедреного трикутника, перпендикулярний до висоти, проведеної до основи, ділиться цією висотою навпіл. Доведіть.

## § 10

# Центральна та осьова симетрії

**Симетрія** — від грецького «симетрія» — узгодженість розмірів, однаковість у розміщенні частин.

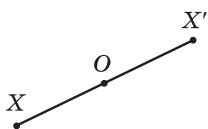


Рис. 47. Точки  $X$  і  $X'$  симетричні відносно точки  $O$

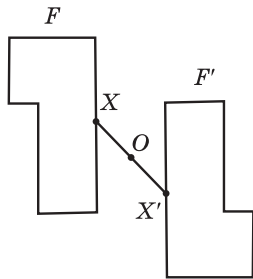


Рис. 48. Фігури  $F$  і  $F'$  симетричні відносно точки  $O$

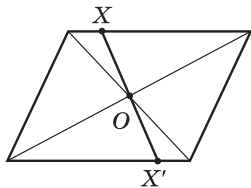


Рис. 49. Точка перетину діагоналей — центр симетрії паралелограма

### 10.1. Симетрія відносно точки

Нехай  $O$  — фіксована точка,  $X$  — довільна точка площини (рис. 47). Відкладемо на промені  $XO$  відрізок  $OX'$ , який дорівнює  $XO$ . Ми отримали точку  $X'$ , симетричну точці  $X$  відносно точки  $O$ .

#### Означення

Точки  $X$  і  $X'$  називаються **симетричними відносно точки  $O$** , якщо точка  $O$  — середина відрізка  $XX'$ .

Очевидно, що точкою, симетричною точці  $X'$  відносно точки  $O$ , є точка  $X$ . Точка  $O$  вважається симетричною самій собі і називається **центром симетрії**.

Перетворенням симетрії (симетрією) відносно точки  $O$  називають таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$ , симетричну точці  $X$  відносно точки  $O$  (рис. 48). При цьому фігури  $F$  і  $F'$  називають **симетричними відносно точки  $O$** .

Симетрію відносно точки називають також **центральною симетрією**.

Якщо перетворення симетрії відносно точки  $O$  переводить фігуру  $F$  у себе, то така фігура називається **центрально-симетричною**, а точка  $O$  — **центром симетрії фігури  $F$** .

Наприклад, точка перетину діагоналей паралелограма є центром симетрії паралелограма (рис. 49), оскільки центральна симетрія відносно цієї точки переводить паралелограм у себе (відповідна опорна задача розглядалася у 8 класі).

#### Теорема (основна властивість центральної симетрії)

Центральна симетрія є переміщенням.



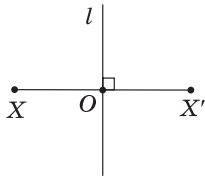


Рис. 52. Точки  $X$  і  $X'$  симетричні відносно прямої  $l$

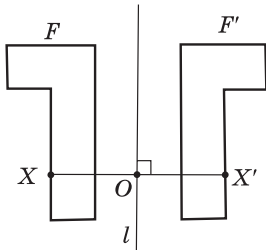


Рис. 53. Фігури  $F$  і  $F'$  симетричні відносно прямої  $l$



Цікаво, що пряма є центрально-симетричною фігурою, причому центром симетрії прямої є будь-яка її точка (доведіть це самостійно). Як правило, геометричні фігури мають не більш ніж один центр симетрії.

## 10.2. Симетрія відносно прямої

Нехай на площині зафіксовано пряму  $l$  і позначено довільну точку  $X$  (рис. 52). Проведемо з точки  $X$  перпендикуляр  $XO$  до прямої  $l$  і відкладемо на промені  $XO$  відрізок  $OX'$ , який дорівнює  $XO$ . Ми отримали точку  $X'$ , симетричну точці  $X$  відносно прямої  $l$ .

### Означення

Точки  $X$  і  $X'$  називаються **симетричними відносно прямої  $l$** , якщо ця пряма перпендикулярна до відрізка  $XX'$  і проходить через його середину.

Очевидно, що точкою, симетричною точці  $X'$  відносно прямої  $l$ , є точка  $X$ . Точки прямої  $l$  вважаються симетричними самі собі. Пряма  $l$  є серединним перпендикуляром до відрізка  $XX'$  і називається **віссю симетрії**.

**Перетворенням симетрії (симетрією) відносно прямої  $l$**  називають таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$ , симетричну  $X$  відносно прямої  $l$  (рис. 53). При цьому фігури  $F$  і  $F'$  називають **симетричними відносно прямої  $l$** .

Симетрію відносно прямої називають також **осьовою симетрією**.

Якщо перетворення симетрії відносно прямої  $l$  переводить фігуру  $F$  у себе, то така фігура називається **симетричною відносно прямої  $l$** , а сама пряма  $l$  — **віссю симетрії фігури  $F$** .

Наприклад, віссю симетрії рівнобедреного трикутника  $ABC$  є пряма, що проходить через

вершину  $B$  перпендикулярно до основи  $AC$  (рис. 54), оскільки симетрія відносно цієї прямої переводить даний трикутник у себе (доведіть це самостійно).

### Теорема (основна властивість осьової симетрії)

Осьова симетрія є переміщенням.

#### Доведення

□ Нехай унаслідок осьової симетрії відносно прямої  $l$  точки  $X$  і  $Y$  переходять у точки  $X'$  і  $Y'$  відповідно. Введемо систему координат так, щоб пряма  $l$  збіглася з віссю  $Oy$  (рис. 55). Тоді внаслідок симетрії відносно цієї прямої точки  $X(x_1; y_1)$  і  $Y(x_2; y_2)$  перейдуть у точки  $X'(-x_1; y_1)$  і  $Y'(-x_2; y_2)$  відповідно. За формулою відстані між точками маємо:

$$XY = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

$$X'Y' = \sqrt{(-x_2 - (-x_1))^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

отже,  $XY = X'Y'$ .

Таким чином, осьова симетрія зберігає відстань між точками, тобто є переміщенням. Теорему доведено. ■

Із доведеної теореми випливає, що осьова симетрія має всі властивості переміщення.

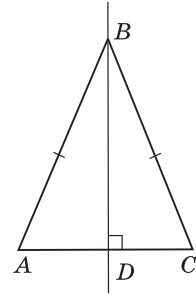


Рис. 54. Пряма  $BD$  — вісь симетрії рівнобедреного трикутника  $ABC$

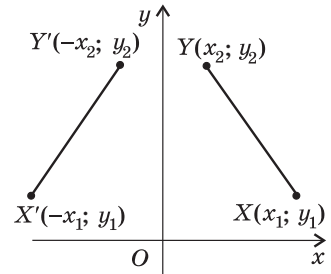


Рис. 55. До доведення основної властивості осьової симетрії

#### Задача

Доведіть, що пряма, яка містить бісектрису кута, є віссю його симетрії.

#### Розв'язання

Нехай пряма  $l$  містить бісектрису даного кута  $BAC$  (рис. 56). Позначимо на стороні  $AB$  цього кута довільну точку  $X$ . Оскільки осьова симетрія є переміщенням, вона переводить промінь  $AB$  у деякий промінь  $AB'$ , а точку  $X$  — у точку  $X'$  променя  $AB'$ . Нехай  $O$  — точка перетину відрізка  $XX'$  з прямою  $l$ . Прямокутні трикутники  $AOX$  і  $AOX'$  рівні за двома катетами, звідки

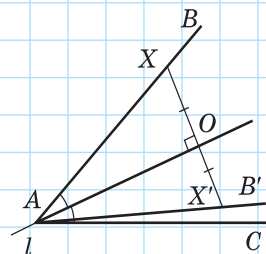


Рис. 56



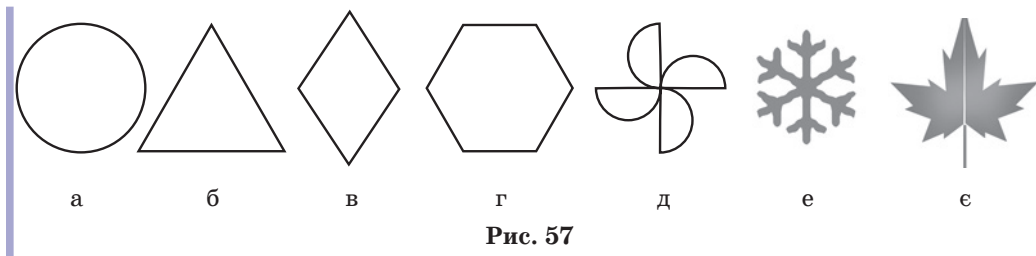
$\angle OAX = \angle OAX'$ . Але за аксіомою відкладання кутів кут  $OAX'$  має збігатися з кутом  $OAC$ , отже, промінь  $AB'$  збігатиметься з променем  $AC$ . Оскільки  $X$  — довільна точка променя  $AB$ , то під час симетрії відносно прямої  $l$  промінь  $AB$  переходить у промінь  $AC$ . Таким чином, пряма  $l$  — вісь симетрії кута  $BAC$ .

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 312.** Симетрія відносно точки  $O$  переводить точку  $A$  в точку  $B$ . Де розміщена точка  $O$ ?
- 313.** Унаслідок симетрії відносно точки  $O$  точки  $A$  і  $B$  переходять у точки  $A'$  і  $B'$  відповідно. Серед рівностей  $a$ – $г$  виберіть рівність, яка не обов'язково справджується:  
а)  $AB = A'B'$ ;      б)  $AO = A'O$ ;      в)  $AO = BO$ ;      г)  $BO = B'O$ .
- 314.** Які прямі під час центральної симетрії переходять самі в себе?
- 315.** Які з фігур на рис. 57 мають центр симетрії? Де він розміщений?



- 316.** Симетрія відносно прямої  $l$  переводить точку  $A$  в точку  $B$ . Як розміщені прямі  $l$  і  $AB$ ?
- 317.** Унаслідок симетрії відносно прямої  $l$  відрізок  $AB$ , кінці якого не лежать на прямій  $l$ , переходить у відрізок  $A'B'$ . Серед тверджень  $a$ – $г$  оберіть твердження, яке не обов'язково справджується:  
а)  $AB = A'B'$ ;      б)  $AA' \perp l$ ;      в)  $AA' \parallel BB'$ ;      г)  $AB \parallel A'B'$ .
- 318.** Скільки осей симетрії має відрізок; пряма? Для кожної з цих фігур опишіть взаємне розміщення осей симетрії.
- 319.** Які із фігур на рис. 57 мають осі симетрії? Скільки осей симетрії має кожна фігура? Як вони розміщені?
- 320.** Наведіть приклад фігури, яка:  
а) не має ні центра, ні осей симетрії;  
б) має центр симетрії, але не має осей симетрії;



- в) не має центра симетрії, але має вісь симетрії;
- г) має центр симетрії і декілька (безліч) осей симетрії.



## Графічні вправи

- 321.** Накресліть трикутник  $ABC$ . Побудуйте трикутник  $AB'C'$ , симетричний трикутнику  $ABC$  відносно точки  $A$ . Визначте вид чотирикутника  $CBC'B'$ .
- 322.** Накресліть квадрат  $ABCD$ . Побудуйте квадрат, симетричний даному квадрату відносно середини сторони  $CD$ . Скільки вершин даного квадрата є також вершинами його образу?
- 323.** На мапі України побудуйте відрізок, кінцями якого є міста Львів і Харків. Знайдіть центр симетрії цього відрізка. У якій області розташована знайдена точка? Поблизу якого великого населеного пункту?
- 324.** На мапі України побудуйте пряму, відносно якої Львів та Івано-Франківськ є симетричними. Які області перетинає ця пряма?
- 325.** Накресліть рівнобедрений трикутник  $ABC$  з основою  $AC$ . Побудуйте трикутник  $AB'C$ , симетричний трикутнику  $ABC$  відносно прямої  $AC$ . Знайдіть точку  $O$ , внаслідок симетрії відносно якої трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $AB'C$ .
- 326.** Накресліть гострий кут  $ABC$ . Побудуйте кут  $ABC'$ , симетричний куту  $ABC$  відносно прямої  $AB$ . У якому відношенні промінь  $AB$  ділить кут  $CAC'$ ?
- 327.** Накресліть прямокутник  $ABCD$  і проведіть осі його симетрії. Сполучіть послідовно точки перетину цих осей зі сторонами прямокутника. Яку фігуру ви отримали? Чи є осі симетрії прямокутника осями симетрії отриманої фігури?
- 328.** Накресліть рівносторонній трикутник і проведіть осі його симетрії. Чи буде точка їхнього перетину центром симетрії цього трикутника?



## Письмові вправи

### Рівень А

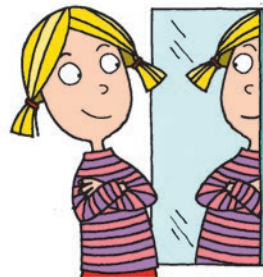
- 329.** Знайдіть точку, симетричну:
- а) точці  $(2; 9)$  відносно початку координат;
  - б) точці  $(2; -7)$  відносно точки  $(1; 1)$ ;
  - в) початку координат відносно точки перетину прямих  $x = -2$  і  $y = 3$ .

330. Знайдіть точку, симетричну:  
а) точці  $(2; 9)$  відносно точки  $(-1; 3)$ ;  
б) точці  $(a; b)$  відносно початку координат.
331. Доведіть, що центр рівностороннього трикутника не є центром його симетрії. Чи може промінь мати центр симетрії? Відповідь обґрунтуйте.
332. Доведіть, що центр кола є центром його симетрії.
333. Знайдіть точку, симетричну:  
а) точці  $(-3; 9)$  відносно осі ординат;  
б) точці  $(-2; -5)$  відносно осі абсцис;  
в) початку координат відносно прямої  $x = 4$ .
334. Знайдіть точку, симетричну точці  $(a; b)$  відносно:  
а) осі абсцис;  
б) осі ординат.
335. Складіть рівняння прямої, симетричної прямій  $y = x$  відносно:  
а) осі абсцис;  
б) осі ординат;  
в) початку координат.
336. Знайдіть у підручниках із різних навчальних дисциплін (або в мережі Інтернет) зображення предметів, що мають центр симетрії, вісь симетрії, декілька осей симетрії.

### Рівень Б

337. Коло задане рівнянням  $(x - 4)^2 + (y - 3)^2 = 25$ . Складіть рівняння кола, симетричного даному колу відносно:  
а) початку координат; б) точки  $(-1; 4)$ .
338. Складіть рівняння прямої, симетричної:  
а) прямій  $y = 8$  відносно точки  $(1; 3)$ ;  
б) прямій  $y = -x + 1$  відносно початку координат.
339. Доведіть, що:  
а) жоден трикутник не має центра симетрії;  
б) трикутник, який має вісь симетрії, є рівнобедреним.
340. Доведіть, що чотирикутник, який має центр симетрії, є паралелограмом.
341. Складіть рівняння:  
а) кола, симетричного колу  $(x - 4)^2 + (y - 3)^2 = 25$  відносно прямої  $x = -6$ ;  
б) прямої, симетричної прямій  $y = -2$  відносно прямої  $y = x$ .

342. Складіть рівняння:
- кола, симетричного колу  $x^2 + y^2 = 4$  відносно прямої  $y = 3$ ;
  - прямої, симетричної осі абсцис відносно прямої  $y = x$ .



343. Доведіть, що прямі, які містять діагоналі ромба, є осями його симетрії.
344. Доведіть, що прямі, які проходять через середини протилежних сторін прямокутника, є осями його симетрії.

### Рівень В

345. Доведіть, що жодна фігура не може мати рівно два центри симетрії.
346. Доведіть, що точка, симетрична точці  $(a; b)$  відносно прямої  $y = x$ , має координати  $(b; a)$ .
347. Доведіть, що трапеція, яка має вісь симетрії, є рівнобічною. Сформулюйте і доведіть обернене твердження.
348. Доведіть, що точки, симетричні ортоцентру гострокутного трикутника відносно його сторін, лежать на колі, описаному навколо трикутника.
349. Доведіть, що фігура, яка має дві взаємно перпендикулярні осі симетрії, має центр симетрії.



## Повторення перед вивченням § 11

### Теоретичний матеріал

- аксіоми відкладання відрізків і кутів;
- ознаки паралелограма.

7 клас, § 2, 3

8 клас, § 3

### Задачі

350. Точка  $O$  — центр рівностороннього трикутника  $ABC$ . Доведіть рівність кутів  $AOB$ ,  $BOC$  і  $AOC$ .
351. Дві вершини прямокутника лежать на осі абсцис, третя вершина має координати  $(-4; -4)$ , а точка  $(0; -2)$  — точка перетину діагоналей прямокутника. Знайдіть координати решти вершин.

## § 11

# Поворот і паралельне перенесення

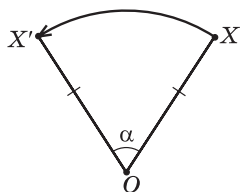


Рис. 58. Поворот точки  $X$  навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$  проти годинникової стрілки

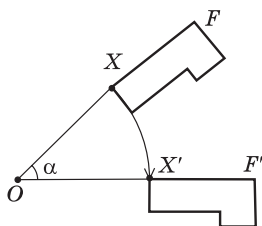


Рис. 59. Поворот фігури  $F$  навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$  за годинниковою стрілкою



### 11.1. Поворот

Зафіксуємо на площині точку  $O$  та оберемо довільну точку  $X$  (рис. 58). Відкладемо від променя  $OX$  у заданому напрямі кут із заданою градусною мірою  $\alpha$  і позначимо на другій стороні кута точку  $X'$  так, що  $OX' = OX$ . Такий перехід точки  $X$  у точку  $X'$  є **поворотом** навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$ .

#### Означення

**Поворотом** фігури  $F$  навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$  називається перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$  так, що  $OX' = OX$  і  $\angle XOX' = \alpha$ .

Точку  $O$  називають **центром повороту**, а кут  $\alpha$  — **кутом повороту**\*. Окрім центра й кута, поворот задається також **напрямом** — за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки.

Унаслідок повороту фігури  $F$  навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$  кожна точка  $X$  даної фігури зміщується по дузі кола з центром  $O$  і радіусом  $OX$  (рис. 59). Очевидно, що внаслідок будь-якого повороту положення центра повороту не змінюється.

#### Теорема (основна властивість повороту)

Поворот є переміщенням.

#### Доведення

□ Розглянемо випадок, коли кут повороту менший від  $180^\circ$ . Нехай унаслідок повороту навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$  точки  $X$  і  $Y$  переходять у точки  $X'$  і  $Y'$  відповідно. Розглянемо загальний випадок (рис. 60), коли точки  $O$ ,  $X$  і  $Y$  не лежать

\* У шкільному курсі геометрії розглядатимуться кути повороту в межах від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

на одній прямій (інший випадок розгляньте самостійно).

Трикутники  $XOY$  і  $X'OY'$  рівні за першою ознакою:  $OX = OX'$  і  $OY = OY'$  за означенням повороту,  $\angle XOY = \angle X'OY'$  (у випадку, поданому на рис. 60, кожен із цих кутів дорівнює сумі (рис. 60, а) або різниці (рис. 60, б) кута повороту  $\alpha$  і кута  $X'OY$ ). Із рівності трикутників випливає, що  $XO = X'O$ . Отже, поворот зберігає відстань між точками, тобто є переміщенням. Випадки, коли  $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ , розгляньте самостійно. ■

З перетворенням повороту також пов'язаний певний вид симетрії. Якщо внаслідок повороту навколо деякої точки  $O$  на кут  $\alpha$  ( $0^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ ) фігура  $F$  переходить у себе, то кажуть, що ця фігура має **поворотну симетрію** (або **симетрію обертання**). Наприклад, поворотну симетрію має рівносторонній трикутник: справді, він переходить у себе внаслідок повороту на кут  $120^\circ$  навколо точки  $O$  — центра даного трикутника (рис. 61).

## 11.2. Співнапрямлені промені. Паралельне перенесення

Про потяги або автомобілі, які рухаються один за одним або паралельними шляхами, наприклад, з Харкова до Києва, кажуть, що вони йдуть в одному напрямі. Геометричний відповідник цієї побутової ситуації дає поняття співнапрямленості.

### Означення

Два промені називаються **співнапрямленими** (або **однаково напрямленими**), якщо виконуються одна з двох умов:

- дані промені паралельні й лежать по один бік від прямої, що проходить через їхні початкові точки;
- дані промені лежать на одній прямій, причому один із них є частиною іншого.

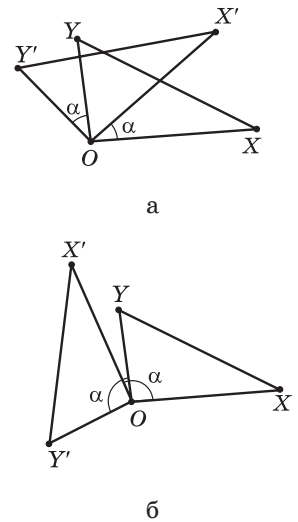


Рис. 60. До доведення основної властивості повороту

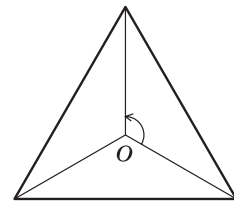
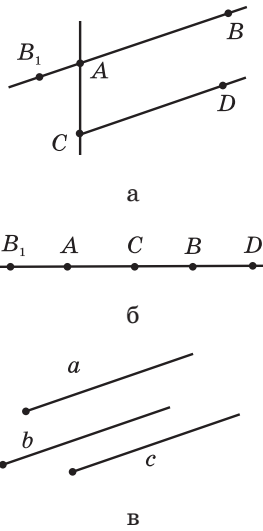
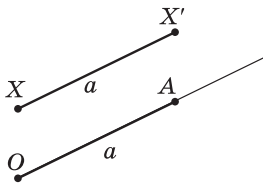


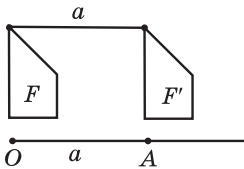
Рис. 61. Поворотна симетрія рівностороннього трикутника



**Рис. 62.** Співнапрямлені і протилежно напрямлені промені



**Рис. 63.** Паралельне перенесення точки  $X$  у напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$



**Рис. 64.** Паралельне перенесення фігури  $F$  у напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$

На рис. 62, *a* промені  $AB$  і  $CD$  паралельні і лежать по один бік від прямої  $AC$ ; на рис. 62, *б* промінь  $CD$  є частиною променя  $AB$ . В обох цих випадках промені  $AB$  і  $CD$  співнапрямлені. Зауважимо, що два промені  $a$  і  $b$ , співнапрямлені з тим самим променем  $c$ , також співнапрямлені (рис. 62, *в*).

### Означення

Два промені називаються **протилежно напрямленими**, якщо один із них співнапрямлений з променем, доповняльним до іншого.

На рис. 62, *a, б* промені  $AB_1$  і  $CD$  є протилежно напрямленими.

Нехай на площині задано промінь  $OA$ , причому довжина відрізка  $OA$  дорівнює  $a$  (рис. 63). Виберемо довільну точку  $X$  і побудуємо точку  $X'$  так, щоб промені  $XX'$  і  $OA$  були співнапрямленими і відрізок  $XX'$  дорівнював  $a$ . Таке перетворення точки  $X$  у точку  $X'$  є паралельним перенесенням у напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$ .

### Означення

**Паралельним перенесенням** фігури  $F$  у напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$  називається перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$  так, що промені  $XX'$  і  $OA$  співнапрямлені і  $XX' = a$ .

На рис. 64 фігура  $F'$  отримана з фігури  $F$  унаслідок паралельного перенесення в напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$ .

Для будь-яких двох точок  $A$  і  $B$  існує паралельне перенесення, яке переводить точку  $A$  в точку  $B$ , і тільки одне. Справді, за аксіомою відкладання відрізків на промені  $AB$  від точки  $A$  можна відкласти єдиний відрізок завдовжки  $AB$ ,

тобто шукане паралельне перенесення задається променем  $AB$  і довжиною відрізка  $AB$ .

### Теорема (основна властивість паралельного перенесення)

Паралельне перенесення є переміщенням.

#### Доведення

□ Нехай унаслідок паралельного перенесення в напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$  точки  $X$  і  $Y$  переходять у точки  $X'$  і  $Y'$  відповідно. Розглянемо загальний випадок (рис. 65), коли відрізок  $X'Y'$  не паралельний променю  $OA$  і не лежить на ньому (інші випадки розгляньте самостійно).

За означенням паралельного перенесення  $XX' \parallel YY'$ ,  $XX' = YY' = a$ . Таким чином, чотирикутник  $XX'Y'Y$ , дві сторони якого паралельні й рівні, — паралелограм, звідки  $X'Y = XY$ . Отже, паралельне перенесення зберігає відстань між точками, тобто є переміщенням. Теорему доведено. ■

Якщо внаслідок деякого паралельного перенесення фігура  $F$  переходить у себе, то кажуть, що ця фігура має **переносну симетрію**. Серед фігур, які вивчаються в шкільному курсі планіметрії, таку властивість має лише пряма. Але приклади переносної симетрії можна знайти в інших науках, мистецтві й повсякденному житті. На рис. 66 подано ескіз графіка функції  $y = \sin x$ , яку ви будете вивчати в курсі алгебри; цей графік має переносну симетрію в напрямі осі абсцис.

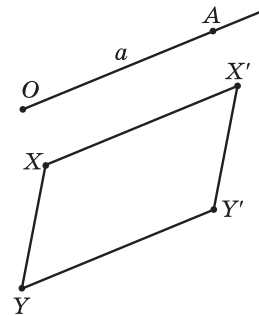


Рис. 65. До доведення основної властивості паралельного перенесення

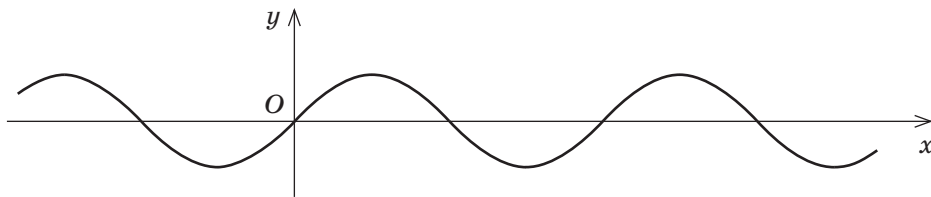
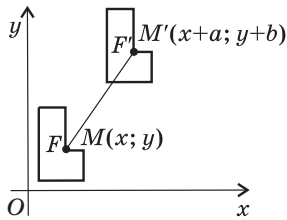


Рис. 66. Ескіз графіка функції  $y = \sin x$



**Рис. 67.** Паралельне перенесення в прямокутній системі координат

У прямокутній системі координат паралельне перенесення, яке переводить точку  $(x; y)$  у точку  $(x'; y')$ , задається формулами

$$x' = x + a, y' = y + b,$$

де  $a$  і  $b$  — деякі числа, однакові для всіх точок площини (рис. 67). Обґрунтування цього факту подано в Додатку 1.

#### Задача

Унаслідок паралельного перенесення точка  $(-2; 1)$  переходить у точку  $(3; -6)$ . У яку точку внаслідок такого перенесення переходить початок координат?

#### Розв'язання

Нехай паралельне перенесення задано формулами  $x' = x + a$ ,  $y' = y + b$ .

Оскільки точка  $(-2; 1)$  переходить у точку  $(3; -6)$ , то  $3 = -2 + a$ ,  $-6 = 1 + b$ . Звідси  $a = 5$ ,  $b = -7$ , тобто дане паралельне перенесення має формули  $x' = x + 5$ ,  $y' = y - 7$ . Підставивши в ці формули координати початку координат  $x = 0$ ,  $y = 0$ , маємо:  $x' = 0 + 5 = 5$ ,  $y' = 0 - 7 = -7$ . Отже, початок координат переходить у точку  $(5; -7)$ .

**Відповідь:**  $(5; -7)$ .

### 11.3. Симетрія в природі, науці й мистецтві

У процесі вивчення багатокутників ми щоразу виділяли з певного класу фігур ті, що мають елементи симетрії: серед трикутників — рівнобедрені й рівносторонні, серед паралелограмів — прямокутники, ромби й квадрати. І це не випадково, адже світ, який нас оточує, сповнений симетрії: симетричними є квіти і листя, тіла тварин і комах, сніжинки й кристали природних мінералів. Те, що створене людиною, також здебільшого симетричне — архітектурні споруди (рис. 68, 69), меблі, посуд, автомобілі, літаки тощо. Ми знаходимо симетрію в музичних і літературних творах, спортивних іграх. Німецький математик Г. Вейль (1885–1955) стверджував, що «краса нерозривно пов'язана з симетрією».





Рис. 68. Маріїнський палац у Києві

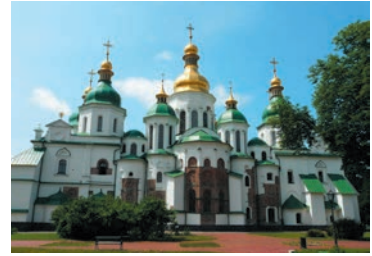


Рис. 69. Софійський собор у Києві

Симетрія присутня в різних розділах математики, зокрема в алгебрі. Наприклад, многочлени виду  $ax^2 + bxy + ay^2$ , які не змінюються від перестановки змінних  $x$  і  $y$ , називають симетричними — для таких многочленів існують спеціальні способи розкладання на множники. Наочним прикладом симетрії в алгебрі є графіки елементарних функцій: так, парабола  $y = x^2$  симетрична відносно осі ординат (рис. 70, а), а гіпербола  $y = \frac{1}{x}$  — відносно початку координат (рис. 70, б).

Біологи дійшли висновку, що переважна більшість організмів «спроектована» за чіткою геометричною схемою, і виділяють окремі види просторової симетрії, характерні для рослин і тварин.

З курсу хімії вам відомо, що чимало природних речовин складається з кристалів, які являють собою многогранники (з ними ви докладніше познайомитеся на уроках геометрії в старших класах). Науковці встановили, що існує 32 види симетрії кристалів.

У царині мистецтв найбільш наочно симетрія проявляється в архітектурі. За переконанням давньогрецьких архітекторів, симетрія уособлює закономірність, доцільність і гармонію. Фасади багатьох історичних і сучасних будівель мають елементи симетрії. Мотиви симетрії переважали в образотворчому мистецтві Давнього Єгипту,

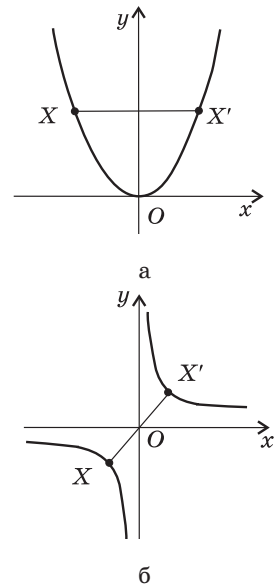


Рис. 70. Симетрія графіків елементарних функцій

Греції і Риму. На особливу увагу заслуговує використання симетрії в декоративно-прикладному мистецтві: структура і розміщення орнаментів на українських рушниках і вишиванках — яскраве свідчення проникнення симетрії в народну творчість (рис. 71).



Меандр



Вишиванка



Рушник

Рис. 71. Орнаменти



Поетичні рими та розміри — типові прояви симетрії в літературі. Увагу мовознавців здавна привертають паліндроми («перевертні») — «симетричні» слова, фрази або вірші, що однаково читаються й зліва направо й справа наліво: «око», «зараз», «радар»; найвідоміший з українських паліндромів «І що сало? Ласощі!» придумав поет О. Ірванець. Невичерпні можливості симетрії й сьогодні приваблюють учених і митців, надихаючи їх на нові злети творчої думки.

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 352.** Чи існує поворот, унаслідок якого:
- а) сторона прямокутника, що не є квадратом, переходить у сусідню сторону;
  - б) одна діагональ прямокутника переходить в іншу;
  - в) один із внутрішніх різносторонніх кутів при паралельних прямих і січній переходить в інший;
  - г) один із відповідних кутів при паралельних прямих і січній переходить в інший?
- 353.** Точка  $O$  лежить на прямій  $l$ . На який кут треба повернути пряму  $l$  навколо точки  $O$ , щоб отримати пряму, яка збігається з  $l$ ?
- 354.** Точка  $O$  не лежить на прямій  $l$ . На який кут треба повернути пряму  $l$  навколо точки  $O$ , щоб отримати пряму, паралельну  $l$ ?

**355.** Які з фігур на рис. 72 мають симетрію обертання?

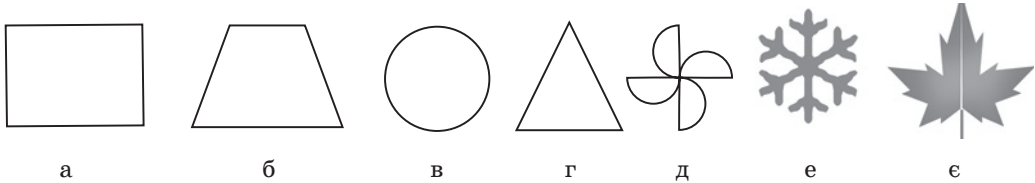


Рис. 72

**356.** Діагоналі паралелограма  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$  (рис. 73). Назвіть промінь:

- співнаправлений з променем  $AB$ ;
- протилежно напрямлений з променем  $CB$ ;
- співнаправлений з променем  $AO$ ;
- протилежно напрямлений з променем  $OD$ .

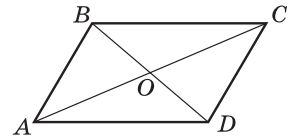


Рис. 73

**357.** Промені  $AB$  і  $CD$  співнаправлені. Чи співнаправлені промені  $AB$  і  $EF$ , якщо:

- промені  $CD$  і  $EF$  співнаправлені;
- промені  $CD$  і  $EF$  протилежно напрямлені?

**358.** Чи існує паралельне перенесення, внаслідок якого:

- одна сторона прямокутника переходить в іншу;
- одна діагональ прямокутника переходить в іншу;
- один із внутрішніх різносторонніх кутів при паралельних прямих і січній переходить в інший;
- один із відповідних кутів при паралельних прямих і січній переходить в інший?

**359.** Діагоналі паралелограма  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$  (рис. 73). Визначте образ точки  $A$  при паралельному перенесенні, внаслідок якого:



- точка  $D$  переходить у точку  $C$ ;
- точка  $O$  переходить у точку  $C$ .



## Графічні вправи

**360.** Накресліть відрізок  $AB$ . Позначте на прямій  $AB$  точку  $O$ , що не лежить на відрізку  $AB$ , і точку  $C$  — середину відрізка  $AB$ . Побудуйте фігуру, в яку переходить відрізок  $AB$  внаслідок повороту:


- на  $60^\circ$  проти годинникової стрілки навколо точки  $O$ ;
- на  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою навколо точки  $C$ .



- 361.** Побудуйте фігуру, в яку переходить рівносторонній трикутник  $ABC$  внаслідок повороту:
- на  $60^\circ$  проти годинникової стрілки навколо точки  $C$ ;
  - на  $180^\circ$  навколо точки  $B$ .
-  **362.** Побудуйте фігуру, в яку переходить квадрат  $ABCD$  внаслідок повороту:
- на  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою навколо точки  $D$ ;
  - на  $90^\circ$  проти годинникової стрілки навколо точки перетину діагоналей.
- 363.** На мапі України побудуйте коло, яке має центром місто Запоріжжя і проходить через місто Миколаїв. На який кут потрібно повернути відрізок «Запоріжжя — Миколаїв» навколо центра кола проти годинникової стрілки, щоб точка, що відповідає місту Миколаїв, перейшла у точку, що відповідає місту Харків?
- 364.** Побудуйте паралелограм  $ABCD$ , у якому  $AB = 2$  см,  $BC = 4$  см. Побудуйте фігуру, в яку переходить цей паралелограм унаслідок паралельного перенесення:
- в напрямі променя  $DC$  на 2 см;
  - в напрямі променя  $AD$  на 2 см.
-  **365.** Побудуйте фігуру, в яку переходить рівносторонній трикутник  $ABC$  внаслідок паралельного перенесення в напрямі променя  $CB$  на відстань, що дорівнює третині периметра трикутника.





## Письмові вправи

### Рівень А

- 366.** Унаслідок певного повороту даний прямий кут переходить у кут, суміжний із даним. Визначте центр і кут повороту.
- 367.** Визначте, чи мають поворотну симетрію відрізок, квадрат. У разі ствердної відповіді визначте центр і найменший кут обертання, внаслідок якого дана фігура переходить у себе.
-  **368.** Точка  $O$  лежить на прямій  $l$ . Унаслідок повороту навколо точки  $O$  ця пряма переходить у себе. Визначте кут повороту.
- 369.** Паралельне перенесення задано формулами  $x' = x - 1$ ,  $y' = y + 2$ . Знайдіть координати:
- точки, в яку переходить точка  $(-3; -1)$ ;
  - точки, образом якої є точка  $(4; -2)$ .
- 370.** Паралельне перенесення задано формулами  $x' = x + 4$ ,  $y' = y$ . Визначте напрям і відстань, якими задається це перенесення.

-  **371.** Паралельне перенесення задано формулами  $x' = x - 2$ ,  $y' = y + 7$ . Знайдіть координати:
- точки, в яку переходить центр кола  $(x + 1)^2 + y^2 = 9$ ;
  - точки, образом якої є точка перетину прямих  $y = 2x$  і  $x = 3$ .
- 372.** Чи існує паралельне перенесення, внаслідок якого:
- точка  $(-2; 3)$  переходить у точку  $(1; -1)$ , а точка  $(0; -1)$  — у точку  $(3; 3)$ ;
  - точка  $(1; -4)$  переходить у початок координат, а початок координат — у точку  $(-1; 4)$ ?
-  **373.** Задайте формулами паралельне перенесення, внаслідок якого точка  $(8; 3)$  переходить у середину відрізка з кінцями  $(-2; 0)$  і  $(0; 16)$ .

### Рівень Б

- 374.** Доведіть, що поворот навколо точки  $O$  на  $180^\circ$  є центральною симетрією відносно точки  $O$ .
-  **375.** Унаслідок повороту навколо точки  $O$  на кут  $\alpha$  ( $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ) точка  $A$  переходить у точку  $A'$ . Доведіть, що точки  $A$  і  $A'$  симетричні відносно прямої, що містить бісектрису кута  $AOA'$ .
- 376.** Доведіть, що внаслідок повороту навколо центра описаного кола на кут  $90^\circ$  квадрат переходить у себе.
- 377.** Кінцями діаметра кола є точки  $(2; 1)$  і  $(-4; 9)$ . Складіть формули паралельного перенесення, внаслідок якого дане коло переходить у коло  $(x - 3)^2 + y^2 = 25$ .
-  **378.** Унаслідок паралельного перенесення точка кола  $x^2 + y^2 = 36$ , яка має найменшу ординату, переходить у центр цього кола. Складіть рівняння образу даного кола.
- 379.** Вершини трикутника  $ABC$  мають координати  $A(-3; -3)$ ,  $B(-2; -1)$ ,  $C(0; -2)$ . Унаслідок паралельного перенесення точка  $B$  переходить у точку  $B'$ , симетричну точці  $A$  відносно початку координат. У які точки внаслідок такого перенесення переходять вершини  $A$  і  $C$ ?

### Рівень В

- 380.** Фігура  $F$  має симетрію обертання порядку  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 2$ ), якщо вона переходить у себе внаслідок повороту на кут  $\frac{360^\circ}{n}$ .
- Доведіть, що рівносторонній трикутник має симетрію обертання порядку 3.
  - Визначте порядок симетрії обертання довільного паралелограма навколо точки перетину діагоналей.

**381.** Дано рівні відрізки  $AB$  і  $A'B'$  (рис. 74). Побудуйте центр повороту, внаслідок якого один із цих відрізків переходить в інший.

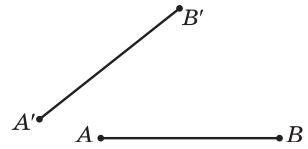


Рис. 74

**382.** Два гравці по черзі кладуть на круглий стіл монети у п'ять копійок так, щоб вони не накладались одна на одну. Виграє той гравець, який покладе монету останнім. Як має діяти перший гравець, щоб гарантовано виграти?

**383.** Є дві коробки цукерок, причому кількість цукерок у коробках однакова. Кожен із двох гравців за один хід має право взяти довільну кількість цукерок, але лише з однієї коробки. Виграє той, хто візьме останню цукерку. Як має діяти другий гравець, щоб гарантовано виграти?



**384.** Прямі  $a$  і  $b$  перетинаються в точці  $O$  під кутом  $\alpha$ . Доведіть, що послідовні симетрії відносно цих прямих дають поворот навколо точки  $O$  на кут  $2\alpha$ .



## Повторення перед вивченням § 12

### Теоретичний матеріал

- подібні трикутники;
- площі подібних трикутників.

8 клас, § 10–12

8 клас, п. 18.1

### Задачі

**385.** Точка  $E$  — середина сторони  $BC$  паралелограма  $ABCD$ . Доведіть, що пряма  $AE$  ділить діагональ  $BD$  у відношенні  $1 : 2$ .

**386.** Сторони трикутника дорівнюють 13 см, 14 см і 15 см. Знайдіть площу трикутника, подібного даному, якщо його найменша сторона дорівнює 39 см.

# § 12

## Подібність фігур

### 12.1. Перетворення подібності. Гомотетія

Чотири види геометричних перетворень, розглянуті в попередніх параграфах, були різновидами переміщення, тобто зберігали відстані між точками. Розглянемо тепер геометричне перетворення, яке може змінювати відстані між точками, — перетворення подібності. Поняття подібності для трикутників вже знайоме вам з курсу 8 класу. Введемо означення подібності для довільних фігур.

#### Означення

**Перетворенням подібності (подібністю)** називається таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого відстань між точками змінюється в тому самому відношенні  $k$  ( $k > 0$ ).

Це означає, що коли довільні точки  $X$  і  $Y$  фігури  $F$  унаслідок перетворення подібності переходять у точки  $X'$  і  $Y'$  фігури  $F'$ , то  $X'Y' = kXY$  (рис. 75).

Число  $k$  називають **коефіцієнтом подібності**. Очевидно, що якщо  $k = 1$ , маємо  $X'Y' = XY$ , тобто відстані між точками фігури зберігаються. Це означає, що **переміщення є окремим випадком подібності, якщо  $k = 1$** .

Наочне уявлення про перетворення подібності дає зображення ділянки місцевості на плані, виконане в масштабі (рис. 76). Масштаб у цьому випадку є коефіцієнтом подібності і вказує, у скільки разів реальні відстані між об'єктами відрізняються від відстаней на плані.

Як і у випадку переміщення, неважко довести, що внаслідок перетворення подібності точки, які лежать на прямій, переходять у точки, що

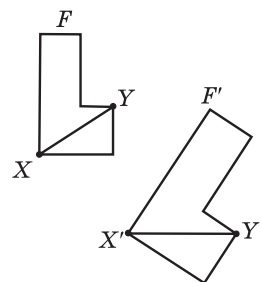


Рис. 75. Перетворення подібності переводить фігуру  $F$  у фігуру  $F'$



Рис. 76. План місцевості

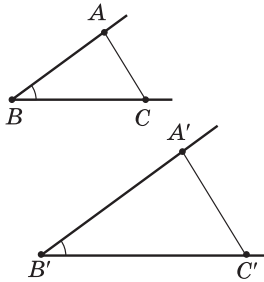


Рис. 77. Перетворення подібності зберігає кути між променями

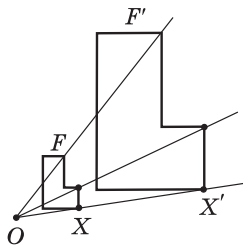


Рис. 78. Гомотетія з центром  $O$



лежать на прямій, і порядок їхнього взаємного розміщення зберігається. Із цього випливає, що **перетворення подібності переводить прямі в прямі, промені — в промені, відрізки — у відрізки**.

Так само, як і переміщення, **перетворення подібності зберігає кути між променями**. Справді, якщо внаслідок перетворення подібності кут  $ABC$  переходить у кут  $A'B'C'$  (рис. 77), то  $A'B' = kAB$ ,  $B'C' = kBC$ ,  $A'C' = kAC$ . Отже, трикутники  $ABC$  і  $A'B'C'$  подібні за трьома пропорційними сторонами, звідки  $\angle ABC = \angle A'B'C'$ .

Нехай на площині зафіксовано точку  $O$ , точка  $X$  — довільна точка фігури  $F$  (рис. 78). Відкладемо на промені  $OX$  відрізок  $OX'$ , що дорівнює  $kOX$  ( $k$  — фіксоване додатне число). Провівши такі побудови для кожної точки фігури  $F$ , одержимо фігуру  $F'$ , яка є образом фігури  $F$ , отриманим унаслідок перетворення, що називається **гомотетією**.

### Означення

**Гомотетією** з центром  $O$  називається таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$  так, що точка  $X'$  лежить на промені  $OX$  і  $OX' = kOX$  ( $k$  — фіксоване додатне число).

Число  $k$  називають **коефіцієнтом гомотетії**, а самі фігури  $F$  і  $F'$  — **гомотетичними**.

### Теорема (основна властивість гомотетії)

Гомотетія є перетворенням подібності.

### Доведення

□ Розглянемо випадок, коли точки  $O$ ,  $X$  і  $Y$  не лежать на одній прямій (інший випадок розгляньте самостійно).

Нехай унаслідок гомотетії з центром  $O$  точки  $X$  і  $Y$  переходять у точки  $X'$  і  $Y'$  відповідно (рис. 79). За означенням гомотетії  $OX' = kOX$ ,



$OY' = kOY$ . Отже, трикутники  $OXY$  і  $OXY'$  подібні за двома пропорційними сторонами й кутом між ними. Звідси випливає, що  $X'Y' = kXY$ , тобто гомотетія є перетворенням подібності. ■

## 12.2. Властивості подібних фігур

### Означення

Дві фігури називаються **подібними**, якщо вони переводяться одна в одну перетворенням подібності.

З огляду на властивості перетворення подібності це означення узгоджується з означенням подібних трикутників, поданим у 8 класі. Подібність довільних фігур  $F$  і  $F'$  позначається так само, як і подібність трикутників:  $F \sim F'$ .

Сформулюємо декілька властивостей подібних фігур, які безпосередньо впливають з означення і властивостей перетворення подібності.

1) Будь-яка фігура подібна самій собі:  $F \sim F$ .

Справді, в цьому випадку коефіцієнт подібності можна вважати таким, що дорівнює 1.

2) Якщо  $F_1 \sim F_2$ , то  $F_2 \sim F_1$ .

Справді, якщо  $F_1 \sim F_2$  з коефіцієнтом  $k$ , то  $X_2Y_2 = kX_1Y_1$ , де  $X_1, Y_1$  — точки фігури  $F_1$ ,  $X_2, Y_2$  — відповідні точки фігури  $F_2$ . Тоді  $X_1Y_1 = \frac{1}{k}X_2Y_2$ , тобто  $F_2 \sim F_1$  з коефіцієнтом  $\frac{1}{k}$ .

3) Якщо  $F_1 \sim F_2$ , а  $F_2 \sim F_3$ , то  $F_1 \sim F_3$ .

Справді, нехай  $X_1, Y_1$  — точки фігури  $F_1$ . Перетворення подібності з коефіцієнтом  $k$ , яке переводить фігуру  $F_1$  у фігуру  $F_2$ , переводить ці точки в точки  $X_2, Y_2$  фігури  $F_2$ , причому  $X_2Y_2 = kX_1Y_1$ . Аналогічно, якщо  $m$  — коефіцієнт подібності, яка переводить фігуру  $F_2$  у фігуру  $F_3$ , то  $X_3Y_3 = mX_2Y_2$ , де  $X_3, Y_3$  — відповідні точки фігури  $F_3$ . Таким чином,  $X_3Y_3 = mX_2Y_2 = mkX_1Y_1$ , тобто  $F_1 \sim F_3$  з коефіцієнтом  $mk$ .

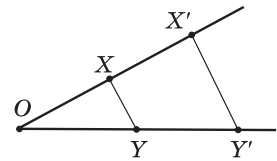


Рис. 79. До доведення основної властивості гомотетії



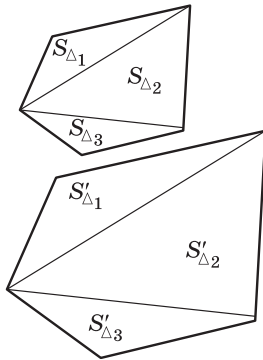


Рис. 80

4) Відношення площ подібних фігур дорівнює квадрату коефіцієнта подібності: якщо  $F \sim F'$  з коефіцієнтом  $k$ , то  $\frac{S_{F'}}{S_F} = k^2$ .

Для трикутників таке твердження було доведено у 8 класі. Якщо  $F$  і  $F'$  — опуклі  $n$ -кутники\*, то, провівши в кожному з них діагоналі з відповідних вершин (рис. 80), одержимо  $(n - 2)$  пари подібних трикутників (обґрунтуйте це самостійно). Тоді

$$S'_F = S'_{\Delta_1} + S'_{\Delta_2} + \dots + S'_{\Delta_{n-2}} = k^2 S_{\Delta_1} + k^2 S_{\Delta_2} + \dots + k^2 S_{\Delta_{n-2}} = k^2 (S_{\Delta_1} + S_{\Delta_2} + \dots + S_{\Delta_{n-2}}) = k^2 S_F,$$

тобто  $\frac{S_{F'}}{S_F} = k^2$ .

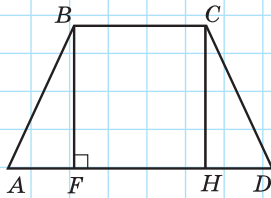


Рис. 81

#### Задача

Основи рівнобічної трапеції дорівнюють 8 см і 20 см, а бічна сторона 10 см. Знайдіть площу трапеції, яка подібна до даної і має висоту 12 см.

#### Розв'язання

Нехай у трапеції  $ABCD$   $AD \parallel BC$ ,  $AB = CD = 10$  см,  $AD = 20$  см,  $BC = 8$  см (рис. 81). Проведемо висоти  $BF$  і  $CH$ . Оскільки  $\triangle ABF = \triangle DCH$  за гіпотенузою та гострим кутом, то  $AF = DH = (20 - 8) : 2 = 6$  (см). Із прямокутного трикутника  $ABF$  за теоремою Піфагора  $BF = \sqrt{10^2 - 6^2} = 8$  (см). Нехай  $A'B'C'D'$  — трапеція, подібна даній. Відрізок  $B'F'$  — образ висоти  $BF$  — є висотою трапеції  $A'B'C'D'$ , отже,  $B'F' = 12$  см.

Оскільки  $B'F' = kBF$ , то  $k = \frac{B'F'}{BF}$ , тобто  $k = \frac{12}{8} = 1,5$ .

Знайдемо площу трапеції  $ABCD$ :  $S_{ABCD} = \frac{AD + BC}{2} \cdot BF$ ,  $S_{ABCD} = \frac{20 + 8}{2} \cdot 8 = 112$  (см<sup>2</sup>). За властивістю площ подібних фігур  $S_{A'B'C'D'} = k^2 S_{ABCD}$ ,  $S_{A'B'C'D'} = (1,5)^2 \cdot 112 = 252$  (см<sup>2</sup>).

**Відповідь:** 252 см<sup>2</sup>.

\* У випадку довільних фігур доведення виходить за межі шкільного курсу.

### 12.3. Властивості відношень

Поняття подібності, паралельності, співнапряменості тощо дозволяють установити відповідності між певними об'єктами (геометричними фігурами). Такі відповідності називають **відношеннями** (точніше, бінарними відношеннями).

Відношення зустрічаються не тільки в геометрії, але і в багатьох інших науках та повсякденному житті. Наприклад, між числами можна встановити відношення «більше», «менше», «дорівнює», між іменниками української мови — «мати однакові закінчення», між людьми — «бути родичем» тощо.

Відношення, як і геометричні фігури, мають певні властивості. Розглянемо деякі з цих властивостей на прикладах.

1) **Рефлексивність**. Така властивість означає, що об'єкт перебуває в даному відношенні з самим собою:  $F \sim F$ , тобто будь-яка фігура подібна самій собі.

Рефлексивними також є відношення рівності геометричних фігур (будь-яка фігура дорівнює самій собі), подільності натуральних чисел (будь-яке натуральне число ділиться на себе). Не є рефлексивним відношення паралельності прямих (пряма не паралельна самій собі).

2) **Симетричність**. Ця властивість означає, що коли певний об'єкт перебуває в даному відношенні з другим об'єктом, то другий об'єкт перебуває в тому самому відношенні з першим: якщо  $F_1 \sim F_2$ , то  $F_2 \sim F_1$ .

Симетричними є рівність чисел (якщо  $a = b$ , то  $b = a$ ) і родинні відносини між людьми (якщо А — родич В, то В — родич А). Не симетричне відношення «більше» для чисел (твердження «якщо  $a > b$ , то  $b > a$ » хибне для будь-яких  $a$  і  $b$ ).

3) **Транзитивність**. Цю властивість можна описати так: якщо у даному відношенні перебувають об'єкти 1 і 2, а також об'єкти 2 і 3, то об'єкти 1 і 3 також перебувають у цьому відношенні; наприклад, якщо  $F_1 \sim F_2$ , а  $F_2 \sim F_3$ , то  $F_1 \sim F_3$ .

**Рефлексивність** —  
від латинського  
«рефлексіо» —  
відображення.



**Транзитивність** —  
від латинського  
«транзитус» —  
перехід.

Транзитивною є паралельність прямих (відому теорему «якщо  $a \parallel b$  і  $b \parallel c$ , то  $a \parallel c$ » часто називають властивістю транзитивності паралельних прямих\*). А ось відношення перпендикулярності прямих не транзитивне: твердження «якщо  $a \perp b$  і  $b \perp c$ , то  $a \perp c$ » хибне.

Приклади рефлексивних, симетричних і транзитивних відношень з інших наук спробуйте знайти самостійно.

Отже, відношення та їхні властивості, що вивчаються в геометрії, мають досить широке узагальнення, а вміння знаходити спільні риси між поняттями і міркуваннями в різних галузях людської діяльності допомагає краще розумітися на кожній із них.



## Запитання і задачі

### Усні вправи



**387.** Чи є правильним, що:

- будь-які дві гомотетичні фігури подібні;
- будь-які дві подібні фігури гомотетичні?



**388.** Чи можна вважати рівні фігури подібними? А навпаки?

**389.** На рис. 82 відрізок  $DE$  — середня лінія трикутника  $ABC$ . Назвіть гомотетичні відрізки на цьому рисунку. Укажіть центр і коефіцієнт гомотетії.

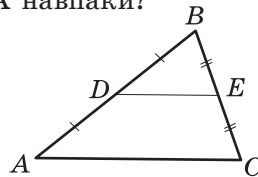


Рис. 82

**390.** Чи є подібними:

- паралелограм із кутом  $40^\circ$  і паралелограм із кутом  $135^\circ$ ;
- ромб із кутом  $120^\circ$  і ромб з діагоналлю, що дорівнює стороні;
- будь-які два квадрати?

**391.** Діаметр Місяця приблизно дорівнює 3470 км, а відстань між поверхнями Землі та Місяця — 377 200 км. На якій відстані (у см) від спостерігача має бути розташована монета діаметром 1 см, щоб розміри монети і Місяця здавалися б цьому спостерігачу однаковими? Відповідь округліть до цілих.



### Графічні вправи

**392.** Накресліть рівносторонній трикутник  $ABC$  з центром  $O$ . Побудуйте трикутник, у який переходить трикутник  $ABC$  внаслідок гомотетії:

- з центром  $A$  і коефіцієнтом 3;
- з центром  $O$  і коефіцієнтом 2.

\* Нагадаємо, що у цій теоремі мова йде про три різні прями  $a$ ,  $b$  і  $c$ .

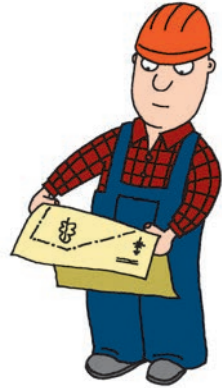
393. Накресліть квадрат і здійсніть його гомотетію:  
 а) з центром в одній із вершин і коефіцієнтом 0,5;  
 б) з центром у точці перетину діагоналей і коефіцієнтом 3.



## Письмові вправи




### Рівень А

394. Унаслідок гомотетії з центром  $O$  і коефіцієнтом 4 точка  $A$  переходить в точку  $A_1$ . Знайдіть довжину відрізка:  
 а)  $OA_1$ , якщо  $OA = 3$  см;      б)  $AA_1$ , якщо  $OA_1 = 24$  см.
395. Унаслідок гомотетії з центром  $A$  трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $AB_1C_1$ . Знайдіть коефіцієнт гомотетії, якщо  $AB = 8$  см,  $AB_1 = 2$  см.
396. Опуклі багатокутники з площами  $S_1$  і  $S_2$  подібні, причому сторона першого багатокутника в  $k$  разів більша, ніж сторона другого. Знайдіть:  
 а)  $k$ , якщо  $S_1 = 75$  см<sup>2</sup>,  $S_2 = 3$  см<sup>2</sup>;  
 б)  $S_1$ , якщо  $S_2 = 4$  см<sup>2</sup>,  $k = 2$ .
397. Сторони двох квадратів відносяться як 3 : 2. Знайдіть площу більшого квадрата, якщо площа меншого дорівнює 8 см<sup>2</sup>.
398. На мапі, зробленій у масштабі 1 : 400, площа земельної ділянки становить 20 см<sup>2</sup>. Яку площу має ділянка на місцевості?
399. Під будівництво відведено ділянку площею 40 а. Знайдіть площу цієї ділянки на плані, масштаб якого 1 : 1000.






### Рівень Б

400. Дано точки  $A$  і  $B$ . Побудуйте центр гомотетії, внаслідок якої точка  $A$  переходить у точку  $B$ , якщо коефіцієнт гомотетії дорівнює 3.
401. Побудуйте центр гомотетії, внаслідок якої одна з основ трапеції переходить в іншу.
402. Доведіть, що фігура, подібна квадрату, є квадратом.
403. Доведіть, що фігура, подібна колу, є колом.
404. Унаслідок гомотетії з центром  $(2; -1)$  точка  $A(8; 7)$  переходить у точку  $A'$ . Знайдіть коефіцієнт гомотетії, якщо:  
 а)  $A'(5; 3)$ ;  
 б)  $A'(14; 15)$ .

-  **405.** Унаслідок гомотетії з центром у початку координат і коефіцієнтом  $k$  точка  $A$  переходить у точку  $A'$ . Знайдіть координати:  
а) точки  $A$ , якщо  $A'(-3; 15)$ ,  $k=3$ ;  
б) точки  $A'$ , якщо  $A(2; 8)$ ,  $k=0,5$ .
- 406.** Сторона і діагональ прямокутника дорівнюють відповідно 5 см і 13 см. Знайдіть площу подібного йому прямокутника, периметр якого дорівнює 170 см.
-  **407.** Знайдіть площу ромба з периметром 20 см, якщо він подібний ромбу з діагоналями 30 см і 40 см.
- 408.** Площа квадрата, вписаного в коло, дорівнює  $36 \text{ см}^2$ . Знайдіть площу квадрата, описаного навколо цього кола.
-  **409.** Доведіть, що площа рівностороннього трикутника, описаного навколо кола, вчетверо більша, ніж площа рівностороннього трикутника, вписаного в те саме коло.

## Рівень В


-  **410.** Дано два подібні багатокутники. Доведіть, що один із них може бути перетворений в інший за допомогою гомотетії і переміщення.
-  **411.** Пряма ділить паралелограм на дві рівні частини, подібні даному паралелограму. Знайдіть відношення його сторін.
-  **412.** Установіть і доведіть ознаки подібності паралелограмів, прямокутників, ромбів, рівнобедрених трапецій. Результати узагальніть у вигляді дослідження.



## Повторення перед вивченням § 13

### Теоретичний матеріал

- види переміщень;
- метод подібності.

 9 клас, § 10, 11

 8 клас, п. 14.3

### Задачі

- 413.** Два рівні кола мають спільну хорду  $AB$ . Доведіть, що дані кола симетричні відносно прямої  $AB$ .
- 414.** Побудуйте трикутник за двома кутами і найбільшою висотою.



Для тих, хто хоче знати більше

## §13

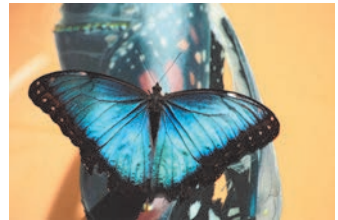
# Метод геометричних перетворень

### 13.1. Розв'язування задач методом геометричних перетворень. Метод симетрії

Суть *методу геометричних перетворень* полягає в розгляді поряд з даними фігурами їхніх образів, отриманих за допомогою певного перетворення.

Залежно від того, яке перетворення застосовується, розрізняють методи симетрії, повороту, паралельного перенесення і подібності (для трикутників метод подібності було розглянуто у 8 класі).

*Метод симетрії* передбачає заміну даної в умові фігури або її елементів симетричними їм відносно певної точки або прямої.



#### Задача

У прямокутному трикутнику медіана, проведена до меншого катета, дорівнює  $m$  і утворює з більшим катетом кут  $15^\circ$ . Знайдіть площу трикутника.

#### Розв'язання

Нехай у трикутнику  $ABC \angle B = 90^\circ$ ,  $BC < AB$ ,  $AM = m$  — медіана (рис. 83). Побудуємо точку  $M_1$ , симетричну точці  $M$  відносно прямої  $AB$ . Тоді трикутники  $MAC$  і  $M_1AB$  рівновеликі, оскільки мають спільну висоту  $AB$ , а  $M_1B = BM = MC$  за побудовою. Отже,

$$S_{ABC} = S_{ABM} + S_{MAC} = S_{ABM} + S_{M_1AB} = S_{M_1AM}.$$

За побудовою трикутник  $M_1AM$  рівнобедрений з бічною стороною  $m$  і кутом між бічними сторонами  $30^\circ$ . Таким чином,

$$S_{M_1AM} = \frac{1}{2} m^2 \cdot \sin 30^\circ = \frac{m^2}{4}.$$

Відповідь:  $\frac{m^2}{4}$ .

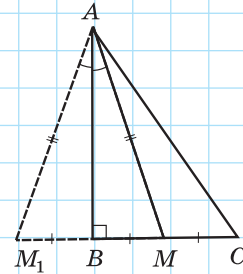


Рис. 83

Метод симетрії часто використовується в задачах на знаходження найменших значень певних величин.



### Задача

Точка  $O$  лежить усередині гострого кута  $ABC$ . Знайдіть на сторонах кута точки  $X$  і  $Y$  такі, щоб периметр трикутника  $OXY$  був найменшим.

### Розв'язання

#### Аналіз

Припустимо, що трикутник  $OX'Y'$  шуканий (рис. 84). Вершини  $X'$  і  $Y'$ , які необхідно побудувати, мають лежати на сторонах  $BA$  і  $BC$  кута  $ABC$ . Побудуємо точки  $O_1$  і  $O_2$ , симетричні точці  $O$  відносно цих сторін. Тоді за побудовою  $OX' = O_1X'$ ,  $OY' = O_2Y'$ . Знайдемо периметр шуканого трикутника:

$$P_{OXY} = OX' + X'Y' + Y'O = O_1X' + X'Y' + Y'O_2,$$

тобто периметр дорівнює  $O_1X' + X'Y' + Y'O_2$ .

Ця сума буде найменшою, якщо точки  $O_1$ ,  $X'$ ,  $Y'$  і  $O_2$  лежатимуть на одній прямій. Отже, шукані точки  $X'$  і  $Y'$  мають лежати на прямій  $O_1O_2$ , тобто на перетині цієї прямої зі сторонами кута  $ABC$ .

#### Побудова

1. Побудуємо точки  $O_1$  і  $O_2$ , симетричні точці  $O$  відносно прямих  $BA$  і  $BC$  відповідно.
2. Побудуємо пряму  $O_1O_2$  і позначимо точки  $X$  і  $Y$  — точки перетину цієї прямої зі сторонами кута  $ABC$ .
3. Сполучимо точки  $X$  і  $Y$  з точкою  $O$ . Трикутник  $OXY$  — шуканий.

Спираючись на властивості геометричних перетворень, використаних у процесі побудови, легко довести, що побудовані точки шукані й визначаються однозначно.

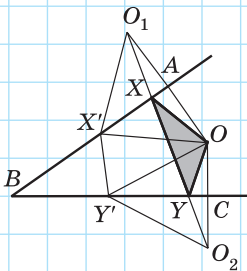


Рис. 84



## 13.2. Методи повороту і паралельного перенесення

**Метод повороту** доцільно використовувати в задачах, у яких задано фігури з рівними сторонами й відомими кутами — рівносторонні й прямокутні рівнобедрені трикутники, квадрати тощо. На практиці для повороту прямої  $a$  навколо точки  $O$  на даній прямій обирають дві точки і здійснюють їх поворот навколо точки  $O$  (рис. 85).

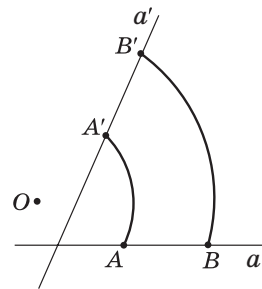


Рис. 85

### Задача

Побудуйте рівносторонній трикутник, вершини якого лежать на трьох даних паралельних прямих.

### Розв'язання

#### Аналіз

Нехай рівносторонній трикутник  $ABC$ , вершини якого лежать на даних паралельних прямих  $a$ ,  $b$  і  $c$ , побудовано (рис. 86). Розглянемо поворот прямої  $a$  навколо вершини  $B$  на  $60^\circ$  проти годинникової стрілки. Унаслідок такого повороту точка  $A$  переходить у точку  $C$ , а пряма  $a$  — в деяку пряму  $a'$ . Оскільки точка  $A$  лежить на прямій  $a$ , то її образ — точка  $C$  — має лежати на прямій  $a'$ . Таким чином, точка  $C$  може бути знайдена як точка перетину прямих  $c$  і  $a'$ . Аналогічно завдяки повороту прямої  $c$  навколо точки  $B$  на  $60^\circ$  за годинниковою стрілкою можна визначити положення точки  $A$  — образу точки  $C$  при такому повороті.

#### Побудова

1. Позначимо на прямій  $b$  довільну точку  $B$ .
2. Виконаємо поворот прямої  $a$  навколо точки  $B$  на  $60^\circ$  проти годинникової стрілки. Нехай  $C$  — точка перетину прямих  $c$  і  $a'$ .

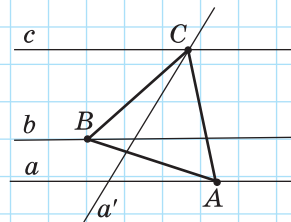


Рис. 86

3. Виконаємо поворот прямої  $s$  навколо точки  $B$  на  $60^\circ$  за годинниковою стрілкою. Нехай  $A$  — точка перетину прямої  $a$  і прямої  $s'$ , отриманої внаслідок цього повороту.

4. Сполучимо точки  $A$ ,  $B$  і  $C$ . Трикутник  $ABC$  шуканий (це легко обґрунтувати, спираючись на властивості геометричних перетворень).

**Метод паралельного перенесення** особливо ефективний у випадках, коли елементи даної фігури (фігур) віддалені один від одного, внаслідок чого важко відобразити на рисунку дані умови. Зближення елементів зручно проводити шляхом паралельного перенесення.

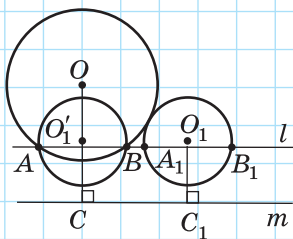


Рис. 87

### Задача

Дано два кола, які мають зовнішній дотик, і пряму  $m$ . Побудуйте паралельну  $m$  пряму, на якій дані кола відтинають рівні хорди.

### Розв'язання (скорочений план)

Нехай дано кола з центрами  $O$  і  $O_1$ , які дотикаються зовні, і пряму  $m$  (рис. 87). Опустимо з центрів даних кіл перпендикуляри  $OC$  і  $O_1C_1$  на пряму  $m$  і виконаємо паралельне перенесення кола з центром  $O_1$  в напрямі променя  $C_1C$  на відстань  $C_1C$ . Отримане коло з центром  $O'_1$  перетинає дане коло з центром  $O$  в точках  $A$  і  $B$ . Тоді пряма  $l$ , яка проходить через ці точки, паралельна прямій  $m$  і перетинає друге дане коло в точках  $A_1$  і  $B_1$ , причому  $A_1B_1 = AB$  (доведіть це самостійно).

## 13.3. Гіпотеза в геометричних задачах

У деяких геометричних задачах знайти шлях до розв'язання допомагає припущення про існування деякої фігури або деякого співвідношення, яке на момент початку розв'язування

не є доведеним і не впливає безпосередньо з даних задачі. Так, у попередніх задачах ми припускали існування шуканої фігури і на підставі подальшого аналізу визначали спосіб її побудови.

Подібні припущення в науці називаються **гіпотезами**.

Зазвичай гіпотези в геометрії використовуються саме на етапі аналізу умов задачі й визначення плану її розв'язування. Вони можуть стосуватися як однієї, так і декількох розглянутих фігур — це насамперед припущення про рівність фігур або їх окремих елементів, про подібність фігур, паралельність або перетин прямих, належність точок одній прямій тощо. Найпоширенішими гіпотезами в задачах на побудову є припущення про існування шуканої фігури. Досить часто знайти необхідну гіпотезу допомагає аналогія з раніше розв'язаними задачами. Дуже важливо, щоб у процесі подальших міркувань висунуту гіпотезу було доведено (або спростовано).

Гіпотези відіграють важливу роль у науці. Всесвітньо відомий учений М. В. Ломоносов вважав гіпотезу «єдиним шляхом, яким визначні люди дійшли до відкриття найважливіших істин». Дійсно, деякі гіпотези докорінно змінювали цілі науки. Класичним прикладом таких революційних змін є Періодична таблиця хімічних елементів Д. І. Менделєєва. У ній видатний учений висловив гіпотезу про існування багатьох не відкритих на той час хімічних елементів. Однак не всі гіпотези завжди знаходили підтвердження. Так, вивчаючи процеси харчування коней, мавп, вовків, учені Середньовіччя висловили гіпотезу, що в усіх тварин під час жування рухається лише нижня щелепа. Але подальші дослідження виявили, що, наприклад, крокодил жує верхньою щелепою.

**Гіпотеза** — від грецького «гіпотеза» — підстава, припущення.





Знайдіть самостійно приклади гіпотез (не лише підтверджених, але й спростованих) з історії розвитку біології, фізики, хімії. Їх різноманітність і наукове значення стануть найпереконливішим аргументом на користь важливості гіпотез у процесі пізнання та навчання.

## Запитання і задачі



### Усні вправи

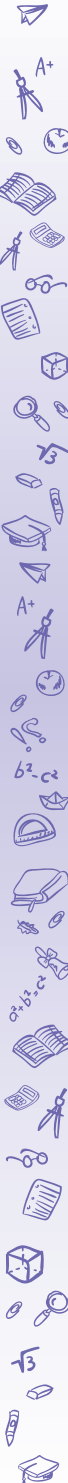
- 415.** За допомогою геометричних перетворень необхідно перевести один із кутів паралелограма у протилежний кут. Які перетворення можна для цього використати?
- 416.** За допомогою геометричних перетворень необхідно отримати коло, яке дорівнює даному колу і дотикається до нього. Які перетворення можна для цього використати?



### Письмові вправи


#### Рівень А

- 417.** Відрізки  $AC$  і  $BD$  перетинаються в точці  $O$ , яка є серединою кожного з них. Точки  $M$  і  $N$  — середини відрізків  $AB$  і  $CD$ . За допомогою центральної симетрії доведіть, що точка  $O$  — середина відрізка  $MN$ .
- 418.** За допомогою осової симетрії доведіть, що медіани рівнобедреного трикутника, проведені до бічних сторін, рівні.
- 419.** За допомогою паралельного перенесення доведіть, що коли одна з двох паралельних прямих перпендикулярна до третьої прямої, то друга також перпендикулярна до цієї прямої.
- 420.** За допомогою повороту доведіть, що рівні хорди кола стягують відповідно рівні дуги.




## Рівень Б

**421.** Побудуйте відрізок із серединою в даній точці й кінцями на двох даних непаралельних прямих.


 **422.** Точки  $A$  і  $B$  лежать по різні боки від прямої  $l$ . Побудуйте кут  $AOB$  так, щоб його бісектриса лежала на прямій  $l$ .

**423.** Точка  $D$  лежить усередині гострого кута  $ABC$ . Побудуйте рівнобедрений прямокутний трикутник  $DEF$  так, щоб вершини його гострих кутів  $E$  і  $F$  лежали на сторонах кута  $ABC$ .


 **424.** Дано два рівні кола з центрами  $O$  і  $O_1$ , які не мають спільних точок,  $OO_1 = 10$  см. Пряма  $l$  паралельна  $OO_1$  і перетинає ці кола послідовно в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$ . Знайдіть довжину відрізка  $AC$ .

## Рівень В

**425.** Побудуйте трикутник за двома сторонами й різницею кутів, протилежних цим сторонам.

 **426.** Дано два кола зі спільним центром. Побудуйте пряму, на якій ці кола відтинають три рівні відрізки.

**427.** На стороні  $CD$  квадрата  $ABCD$  позначено точку  $E$ . Бісектриса кута  $BAE$  перетинає сторону  $BC$  в точці  $F$ . Доведіть, що  $AE = ED + BF$ .

 **428.** Побудуйте трапецію за діагоналями, середньою лінією і кутом при основі.



## Повторення перед вивченням § 14

## Теоретичний матеріал

- паралельне перенесення;
- формула відстані між точками.

 9 клас, п. 11.2

 9 клас, п. 6.3

## Задачі

**429.** Чи лежить точка  $A(3; -5)$  на відрізку  $BC$ , якщо  $B(1; -2)$ ,  $C(5; -8)$ ?

**430.** Три вершини паралелограма  $ABCD$  мають координати  $A(-1; 1)$ ,  $B(2; 4)$ ,  $C(5; 4)$ . Складіть формули паралельного перенесення, яке переводить сторону  $BC$  в сторону  $AD$ , і знайдіть координати точки  $D$ .



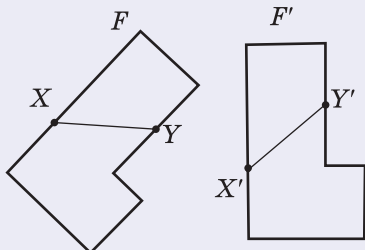
## Онлайн-тестування для підготовки до контрольної роботи № 3

### Задачі для підготовки до контрольної роботи № 3

1. Дано прямокутний трикутник  $ABC$  з гіпотенузою  $AC$ . Побудуйте:
  - а) відрізок, симетричний катету  $AB$  відносно точки  $C$ ;
  - б) кут, симетричний куту  $ABC$  відносно прямої  $AC$ .
2. Знайдіть координати точки, симетричної точці  $A(-3; 1)$  відносно:
  - а) початку координат;
  - б) осі абсцис.
3. Виконайте поворот рівнобедреного прямокутного трикутника  $ABC$  з гіпотенузою  $AC$  навколо вершини  $B$  на  $90^\circ$  проти годинникової стрілки. Назвіть сторони трикутника, які переходять одна в одну.
4. Складіть формули паралельного перенесення, яке переводить центр кола  $(x + 1)^2 + (y - 7)^2 = 4$  в початок координат.
5. Відповідні сторони двох подібних прямокутників відносяться як  $3 : 5$ . Знайдіть площу більшого прямокутника, якщо площа меншого дорівнює  $36 \text{ см}^2$ .
6. Два кола мають внутрішній дотик у точці  $A$ , причому менше коло проходить через центр більшого. Доведіть, що будь-яка хорда більшого кола, яка виходить із точки  $A$ , ділиться меншим колом навпіл.

## Підсумки розділу III

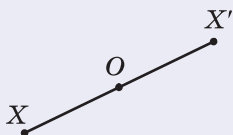
### ПЕРЕМІЩЕННЯ



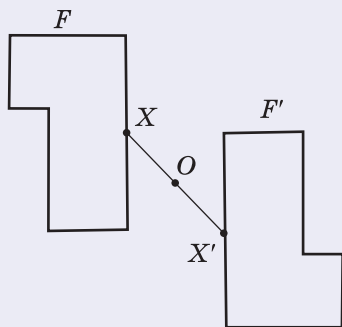
**Переміщенням** (або **рухом**) називається перетворення фігури, внаслідок якого зберігаються відстані між точками цієї фігури.

Дві фігури називаються **рівними**, якщо вони суміщаються переміщенням

### СИМЕТРИЯ ВІДНОСНО ТОЧКИ



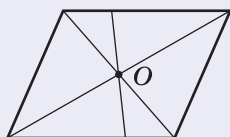
Точки  $X$  і  $X'$  називаються **симетричними відносно точки  $O$** , якщо точка  $O$  — середина відрізка  $XX'$



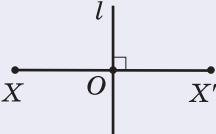
Перетворенням **симетрії** (центральною симетрією) відносно точки  $O$  називається таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$ , симетричну  $X$  відносно точки  $O$ .

**Основна властивість симетрії відносно точки:**

центральна симетрія є переміщенням

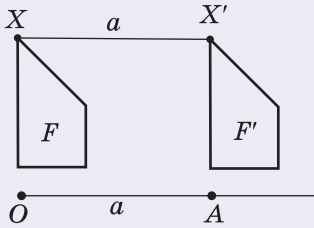


Якщо перетворення симетрії відносно точки  $O$  переводить фігуру  $F$  у себе, то така фігура називається **центрально-симетричною**, а точка  $O$  — **центром симетрії фігури  $F$**

СИМЕТРИЯ ВІДНОСНО ПРЯМОЇ	
	<p>Точки <math>X</math> і <math>X'</math> називаються <b>симетричними відносно прямої <math>l</math></b>, якщо ця пряма перпендикулярна до відрізка <math>XX'</math> і проходить через його середину</p>
	<p><b>Перетворенням симетрії (осьовою симетрією) відносно прямої <math>l</math></b> називається таке перетворення фігури <math>F</math> у фігуру <math>F'</math>, унаслідок якого кожна точка <math>X</math> фігури <math>F</math> переходить у точку <math>X'</math> фігури <math>F'</math>, симетричну <math>X</math> відносно прямої <math>l</math>.</p> <p><b>Основна властивість осьової симетрії:</b> осьова симетрія є переміщенням</p>
	<p>Якщо перетворення симетрії відносно прямої <math>l</math> переводить фігуру <math>F</math> у себе, то така фігура називається <b>симетричною відносно прямої <math>l</math></b>, а сама пряма <math>l</math> — <b>вісю симетрії фігури <math>F</math></b></p>
ПОВОРОТ	
	<p><b>Поворотом</b> фігури <math>F</math> навколо точки <math>O</math> на кут <math>\alpha</math> називається перетворення фігури <math>F</math> у фігуру <math>F'</math>, унаслідок якого кожна точка <math>X</math> фігури <math>F</math> переходить у точку <math>X'</math> фігури <math>F'</math> так, що <math>OX' = OX</math> і <math>\angle XOX' = \alpha</math>.</p> <p>Точку <math>O</math> називають <b>центром повороту</b>, а кут <math>\alpha</math> — <b>кутом повороту</b>.</p> <p><b>Основна властивість повороту:</b> поворот є переміщенням</p>
	<p>Якщо внаслідок повороту навколо деякої точки <math>O</math> фігура <math>F</math> переходить у себе, то кажуть, що ця фігура має <b>поворотну симетрію (або симетрію обертання)</b></p>

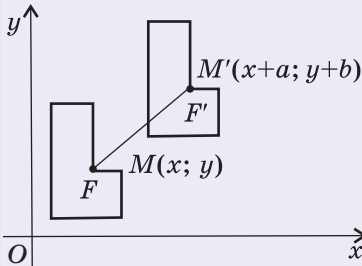


### ПАРАЛЕЛЬНЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ



**Паралельним перенесенням** фігури  $F$  у напрямі променя  $OA$  на відстань  $a$  називається перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$  так, що промені  $XX'$  і  $OA$  співнапрямлені і  $XX' = a$ .

**Основна властивість паралельного перенесення:** паралельне перенесення є переміщенням

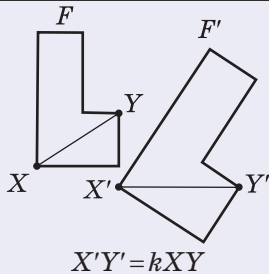


У прямокутній системі координат паралельне перенесення, яке переводить точку  $(x; y)$  у точку  $(x'; y')$ , задається формулами

$$x' = x + a, \quad y' = y + b,$$

де  $a$  і  $b$  — деякі числа, однакові для всіх точок площини

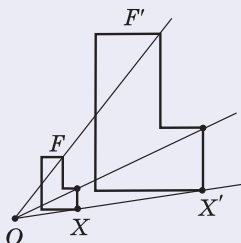
### ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОДІБНОСТІ. ГОМОТЕТІЯ



**Перетворенням подібності (подібністю)** називається таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого відстань між точками змінюється в тому самому відношенні  $k$  ( $k > 0$ ).

Число  $k$  називають **коефіцієнтом подібності**.

Дві фігури називаються **подібними**, якщо вони переводяться одна в одну перетворенням подібності



**Гомотетією** з центром  $O$  називається таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , унаслідок якого кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$  так, що точка  $X'$  лежить на промені  $OX$  і  $OX' = kOX$  ( $k$  — фіксоване додатне число).

Число  $k$  називають **коефіцієнтом гомотетії**, а самі фігури  $F$  і  $F'$  — **гомотетичними**.

**Основна властивість гомотетії:**

гомотетія є перетворенням подібності

**Відношення площ подібних фігур**

Якщо  $F \sim F'$  з коефіцієнтом  $k$ , то  $\frac{S_{F'}}{S_F} = k^2$



### Контрольні запитання до розділу III

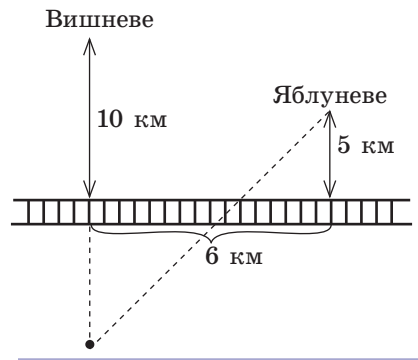
1. Дайте означення переміщення. Назвіть основні властивості переміщення. Який зв'язок переміщення має з рівністю фігур?
2. Дайте означення симетрії відносно точки. Які фігури називаються центрально-симетричними? Наведіть приклади.
3. Дайте означення симетрії відносно прямої. Що таке вісь симетрії фігури? Наведіть приклади фігур, які мають вісь симетрії.
4. Дайте означення повороту.
5. Дайте означення паралельного перенесення. Якими формулами паралельне перенесення задається в прямокутній системі координат?
6. Дайте означення перетворення подібності. Назвіть основні властивості подібних фігур.
7. Опишіть перетворення гомотетії.




### Додаткові задачі до розділу III


431. Доведіть, що внаслідок переміщення медіана трикутника переходить у відповідну медіану трикутника-образу.
432. Визначте переміщення, за допомогою яких можна перевести:
  - а) одну з бічних сторін рівнобічної трапеції в іншу;
  - б) одну з протилежних сторін паралелограма в іншу.
433. Рівні кола з центрами  $O$  і  $O_1$  перетинаються в точках  $A$  і  $B$ . Назвіть:
  - а) центр симетрії, яка переводить одне з даних кіл в інше;
  - б) вісь симетрії, яка переводить одне з даних кіл в інше;
  - в) центр і кут повороту, який переводить одне з даних кіл в інше;
  - г) промінь і відстань, що задають паралельне перенесення, яке переводить одне з даних кіл в інше.

434. Неподалік від селищ Вишневе та Яблунове проходить залізниця (див. рисунок). Станція «Садочок» сполучена із селищами прямими дорогами. Де розташована станція, якщо відомо, що листоноша проходить шлях від Вишневого до станції й далі до Яблунового за найменший можливий час? Скористайтесь методом осевої симетрії.



-  **435.** *Дельтоїдом* називається опуклий чотирикутник, що має єдину вісь симетрії, яка містить його діагональ. Побудуйте дельтоїд і опишіть його властивості.
- 436.** Дано коло і точку  $A$  на ньому. Точка  $B$  рухається по даному колу. Яку лінію описує під час такого руху середина відрізка  $AB$ ?
- 437.** У даний трикутник впишіть ромб так, щоб він мав із даним трикутником спільний кут.
- 438.** Доведіть подібність двох ромбів із відповідно пропорційними діагоналями.
- 439.** Два кола розміщені по різні боки від прямої  $l$ . Побудуйте відрізок із кінцями на даних колах, для якого пряма  $l$  є віссю симетрії.

### Задачі підвищеної складності

- 440.** Два рівні кола мають зовнішній дотик. В одне з кіл вписано трикутник. Доведіть, що трикутник, симетричний даному відносно точки дотику, є вписаним у друге коло.
- 441.** Кола, симетричні описаному навколо трикутника колу відносно сторін трикутника, проходять через ортоцентр цього трикутника. Доведіть.
- 442.** Побудуйте квадрат, три вершини якого лежать на трьох даних паралельних прямих.
- 443.** Впишіть у даний трикутник  $ABC$  квадрат, дві вершини якого лежать на стороні  $AC$ , а дві інші — на сторонах  $AB$  і  $BC$  відповідно.
-  **444.** Побудуйте коло, яке вписане в даний кут і проходить через дану точку всередині цього кута.



## Історична довідка

Теорія геометричних перетворень виникла у зв'язку з пізнанням законів зображення предметів на площині. Спроби правильно відобразити на плоскому рисунку природні форми предметів здійснювалися задовго до виникнення писемності — люди малювали на стінах печер, скелях, посуді різноманітні рослини, тварин тощо. Тривала практика підказувала митцям, як передати на рисунку зображуваний предмет,— так зароджувалося вчення про відповідності й перетворення. Раніше за інші було встановлено й вивчено закони перспективи. Стародавні греки дотримувалися їх уже в V–IV ст. до н. е.

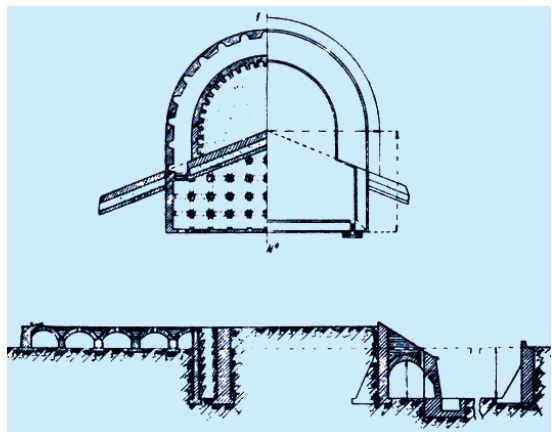


Зразок наскельного живопису

В епоху Відродження з'явилися перші фундаментальні дослідження з теорії перспективи, зокрема роботи видатних художників Леонардо да Вінчі (1452–1519) й Альбрехта Дюрера (1471–1528). Розробником матема-



Нарис Леонардо да Вінчі



Бастей Дюрера



*Леонардо да Вінчі*



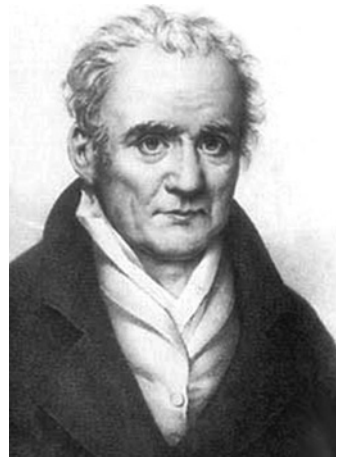
*Альбрехт Дюрер*



*Мішель Шаль*

тичних основ теорії проєктивних перетворень (теорії перспективи) став французький інженер і архітектор Жерар Дезарг (1593–1662).

Завдяки теорії перспективи вдалося досягнути достатньої наочності зображень, однак технічний прогрес вимагав точного відтворення об'єктів із дотриманням розмірів. Багато талановитих учених доклали зусиль до створення теорії взаємно однозначних відповідностей на площині й у просторі. Серед них був, зокрема, французький математик Мішель Шаль (1793–1880), який довів фундаментальну теорему про геометричні перетворення (нині відому як теорема Шаля). Підсумував наукові пошуки в галузі геометричних перетворень французький геометр Гаспар Монж (1746–1818), створивши новий розділ геометрії — нарисну геометрію.



*Гаспар Монж*

Пізніше на основі розподілу геометричних перетворень на групи було виділено ще декілька розділів геометрії — афінна, проєктивна та інші. Здобутки вчених у вивченні перетворень склали математичну основу для розвитку багатьох галузей сучасної техніки.



## Математичні олімпіади

### Валентин Миколайович Лейфура (1947–2011)



В. М. Лейфура народився в 1947 році у селищі міського типу Березанці Миколаївської області. Його неабияку схильність до точних наук помітили ще в шкільні роки, і подальше навчання в Республіканській фізико-математичній школі-інтернаті при Київському державному університеті імені Т. Г. Шевченка остаточно визначило долю талановитого юнака. Блискавично промайнули роки навчання на фізико-математичному факультеті Миколаївського педагогічного інституту, відбулося становлення науковця в аспірантурі на кафедрі вищої математики Київського педагогічного інституту. Молодого кандидата фізико-математичних наук запрошують до рідного Прибужжя — працювати в Миколаївському педагогічному інституті. Тут В. М. Лейфура згодом очолив кафедру математичного аналізу, вів плідну наукову та педагогічну діяльність.

Незабутні юнацькі роки, спогади про вибір майбутньої професії надихнули Валентина Миколайовича на роботу з математично обдарованими школярами, яка стала для нього дуже важливою частиною життєвого шляху. Тридцять років роботи у складі журі Всеукраїнської математичної олімпіади, до якого його запросив видатний математик і педагог Михайло Йосипович Ядренко, виявилися для професора Лейфури знаковими. В. М. Лейфура також активно працював у складі журі Всеукраїнських турнірів юних математиків, які проводяться з 1998 року. Він створив чимало чудових оригінальних задач для учнівських математичних змагань.

Ось одна з них — на застосування знань з теми «Осьова симетрія». **Точка  $M$  є серединою гіпотенузи  $AB$  рівнобедреного прямокутного трикутника  $ABC$ , а точка  $K$  — така точка катета  $BC$ , що  $BK = 2KC$ . Точку  $N$  обрано на катеті  $AC$  так, що для точки  $L$  перетину відрізків  $AK$  і  $MN$  промінь  $LC$  є бісектрисою кута  $KLN$ . Доведіть, що  $KN \parallel AB$ .**

#### *Доведення*

На промені  $AC$  виберемо таку точку  $F$ , що  $AC = CF$ . Тоді точка  $K$  є точкою перетину медіан трикутника  $ABF$  (рис. 88). Зазначимо, що точка  $C$  рівновіддалена від прямих  $AK$  і  $MN$ , оскільки лежить на бісектрисі  $LC$  кута  $KLN$ . До того ж точка  $C$  рівновіддалена від прямих  $AK$  і  $MK$ . Дійсно,  $KC$  — висота та медіана трикутника  $AKF$ . Тому цей трикутник є рівнобедреним, а  $KC$  — його бісектриса. Таким чином, точка  $C$  рівновіддалена від прямих  $MK$  і  $MN$ , а тому промінь  $MC$  є бісектрисою кута  $KMN$ .

Розглянемо симетрію відносно прямої  $MC$ . Промені  $CA$  і  $CB$  перейдуть один в інший так само, як і промені  $MK$  і  $MN$ . Тому точки перетину вказаних променів  $N$  і  $K$  перейдуть одна в іншу. Отже, точки  $K$  і  $N$  симетричні відносно прямої  $CM$ , а тому  $CK = CN$ . Звідси вочевидь випливає, що  $KN \parallel AB$ .

Спробуйте самостійно розв'язати цю задачу в інший спосіб.

Під час напруженої праці на олімпіадах Валентин Миколайович завжди був справжнім взірцем виваженого, доброзичливого, але принципового й вимогливого ставлення до учнів і вчителів. Завдяки спілкуванню з ним майбутні математики набували незабутнього досвіду, а тому на олімпіадах і турнірах поруч із ним дуже часто можна було побачити школярів та їхніх наставників, які звертались до Валентина Миколайовича із запитаннями, чекали порад.

Протягом багатьох років В. М. Лейфура керував створеним ним у Миколаєві семінаром для математично обдарованих учнів, що не мав аналогів в Україні. Цей семінар дав можливість зробити перші кроки в «олімпіадній творчості» та в математиці багатьом талановитим дітям. Зокрема, учень В. М. Лейфури двічі виборював срібні медалі на Міжнародних математичних олімпіадах. Значну увагу Валентин Миколайович завжди приділяв не тільки «математичному спорту», але й залученню юнацтва до основ суто наукової роботи в Малій академії наук. Багато років В. М. Лейфура був членом редакційної ради журналу «У світі математики», заснованого М. Й. Ядренком, підготував багато статей та посібників для юних талановитих математиків.

Вагомий внесок Валентина Миколайовича Лейфури в розвиток національної освіти був відзначений почесним званням «Заслужений вчитель України» у 2002 році. Також у 2002 році мешканці міста Миколаєва визнали професора державного університету ім. Петра Могили В. М. Лейфуру «Городянином року» у номінації «Середня школа».

Багаторічне спілкування з Валентином Миколайовичем його численних учнів і соратників зумовлювалось не тільки його професійними якостями. Валентин Миколайович Лейфура був людиною щедрої душі, на його мудрість, життєвий досвід, допомогу в складних ситуаціях завжди могли розраховувати друзі та колеги.

Професор Лейфура є взірцем справжньої Людини, яка дуже любила життя і цінувала в ньому все — і українські народні пісні, і математичні олімпіади, і високу науку.

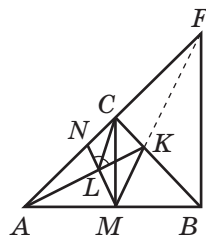


Рис. 88

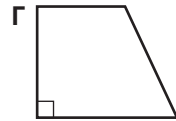
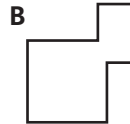
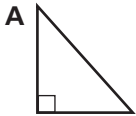


## Готуємось до ДПА

### Тест 3

Виберіть одну правильну, на вашу думку, відповідь.

1. Серед наведених фігур виберіть ту, яка має вісь симетрії.



2. Укажіть геометричну фігуру, в яку переходить гострий кут унаслідок переміщення.

**A** Тупий кут

**В** Розгорнутий кут

**Б** Промінь

**Г** Кут, що дорівнює даному

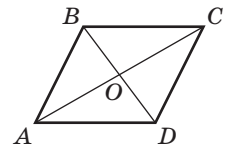
3. На рисунку зображено паралелограм  $ABCD$ . Укажіть відрізок, у який переходить відрізок  $BO$  внаслідок симетрії відносно точки  $O$ .

**A**  $BD$

**Б**  $DO$

**В**  $AD$

**Г**  $BC$



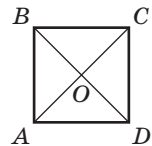
4. На рисунку зображено квадрат  $ABCD$ . Укажіть відрізок, у який переходить відрізок  $AO$  внаслідок повороту навколо точки  $O$  на  $90^\circ$  проти годинникової стрілки.

**A**  $BO$

**Б**  $CO$

**В**  $DO$

**Г**  $AB$



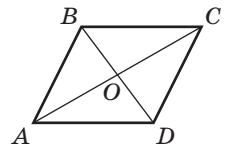
5. На рисунку зображено паралелограм  $ABCD$ . Унаслідок паралельного перенесення точка  $B$  переходить у точку  $O$ . Укажіть точку, в яку внаслідок такого перенесення переходить точка  $O$ .

**A**  $A$

**Б**  $B$

**В**  $C$

**Г**  $D$



6. Серед наведених перетворень укажіть те, за допомогою якого неможливо перевести одну з двох протилежних сторін паралелограма з кутом  $30^\circ$  в іншу.

**A** Центральна симетрія

**В** Паралельне перенесення

**Б** Осьова симетрія

**Г** Поворот



# Розділ IV

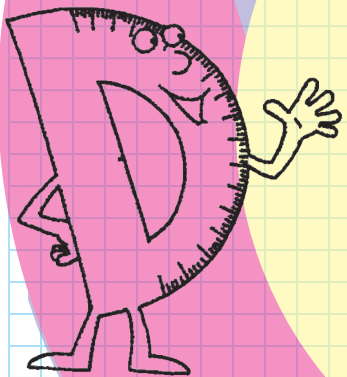
## Вектори на площині

§ 14. Початкові відомості про вектори

§ 15. Додавання і віднімання векторів

§ 16. Множення вектора на число.  
Скалярний добуток векторів

§ 17. Векторний метод



Доступ до глибших принципових проблем у фізиці вимагає найвитонченіших математичних методів.

*Альберт Ейнштейн, засновник сучасної фізики*

Як відомо з курсу фізики, деякі величини, наприклад сила, швидкість, прискорення тощо, характеризуються не тільки числовим значенням, але й напрямом. Необхідність математичного моделювання таких величин зумовила створення теорії векторів.

У сучасній математиці один із розділів, у якому вивчають дії з векторами, не випадково називають векторною алгеброю, адже операції над векторами мають багато спільного з алгебраїчними діями. Вектори, як і координати, значно розширюють арсенал способів геометричних доведень та обчислень і спрощують деякі з них.

Векторні співвідношення широко застосовуються в природничих науках і багатьох галузях техніки. Завдяки вивченню векторів ви зможете краще опанувати методи розв'язування не лише геометричних, але й фізичних задач.



# § 14

## Початкові відомості про вектори

### 14.1. Означення вектора.

#### Модуль і напрям вектора

У природничих науках зустрічаються величини, які повністю характеризуються числовим значенням, — довжина, площа, температура, маса тощо (такі величини називають скалярними). Але чимало величин задаються не тільки числовим значенням, але й напрямом. Наприклад, для розв'язування задачі про рух автомобіля недостатньо знати його швидкість — треба уточнити, в якому напрямі він рухається. У такому випадку швидкість автомобіля розглядається як векторна величина. Отже, векторна величина характеризується числовим значенням і напрямом.

У геометрії векторні величини зображують за допомогою напрямлених відрізків.

#### Означення

**Вектором** називається напрямлений відрізок, тобто відрізок, для якого вказано, яка точка є його початком, а яка — кінцем.

Зазвичай вектор зображують відрізком зі стрілкою, яка вказує напрям вектора. Для позначення векторів використовують малі латинські літери ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ...) або дві великі латинські літери, перша з яких позначає початок вектора, а друга — кінець вектора. Замість слова «вектор» над позначенням вектора ставлять стрілку. Так, вектор з початком  $A$  і кінцем  $B$  (рис. 89) позначають  $\vec{a}$  або  $\overrightarrow{AB}$ .

#### Означення

**Довжиною (або модулем) вектора  $\overrightarrow{AB}$**  називається довжина відрізка  $AB$ , що зображує вектор.

**Вектор** — від латинського «вектор» — той, що несе.

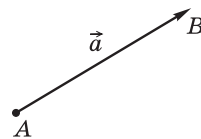


Рис. 89. Вектор

Довжину вектора  $\overline{AB}$  позначають так:  $|\overline{AB}|$ .

### Означення

**Нульовим вектором** називається вектор, початок і кінець якого збігаються.

Таким чином, будь-яку точку  $A$  площини можна вважати нульовим вектором  $\overline{AA}$ . Нульовий вектор позначають так:  $\vec{0}$ . Напряму він не має, а його довжина дорівнює нулю:  $|\vec{0}| = 0$ .

### Означення

Ненульові вектори називаються **колінеарними**, якщо вони лежать на одній прямій або на паралельних прямих.

На рис. 90 вектори  $\overline{AB}$ ,  $\overline{CD}$  і  $\overline{EF}$  колінеарні. Нульовий вектор вважають колінеарним будь-якому вектору.

### Означення

Вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  називаються **співнаправленими** (або **однаково напрямленими**), якщо промені  $AB$  і  $CD$  співнаправлені.

Вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  називаються **протилежно напрямленими**, якщо промені  $AB$  і  $CD$  протилежно напрямлені.

На рис. 90 вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  співнаправлені (коротко це позначають так:  $\overline{AB} \uparrow \overline{CD}$ ), а вектори  $\overline{EF}$  і  $\overline{CD}$  протилежно напрямлені (коротко це позначають так:  $\overline{EF} \downarrow \overline{CD}$ ).

Зазначимо, що завдяки щойно введеним поняттям можна спростити означення паралельного перенесення. Тепер замість паралельного перенесення в напрямі променя  $AB$  на відстань  $AB$  можна розглядати **паралельне перенесення на вектор  $\overline{AB}$** .

**Колінеарний** — від латинського «ко-» — з, разом і «лінеаріс» — лінійний.

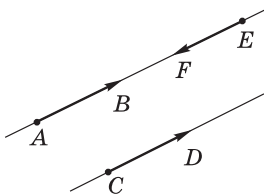


Рис. 90. Колінеарні вектори

## 14.2. Рівні вектори

### Означення

Два вектори називаються **рівними**, якщо вони суміщаються паралельним перенесенням.

Це означає, що існує паралельне перенесення, внаслідок якого початок і кінець одного вектора переходять відповідно в початок і кінець іншого. На рис. 91 зображено рівні вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$ . Їх рівність позначають так:  $\overline{AB} = \overline{CD}$ .

Обґрунтуємо **основні властивості й ознаки рівних векторів**.

1) Рівні вектори співнапрямлені та мають рівні довжини.

Ця властивість впливає безпосередньо з означення рівних векторів і властивостей паралельного перенесення.

2) Якщо вектори співнапрямлені і мають рівні довжини, то вони рівні.

Справді, нехай вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  співнапрямлені та мають рівні довжини (рис. 92). Паралельне перенесення на вектор  $\overline{AC}$  переводить промінь  $AB$  у співнапрямлений промінь  $CD$ . Оскільки відрізки  $AB$  і  $CD$  рівні, то внаслідок такого паралельного перенесення точка  $A$  переходить у точку  $C$ , а точка  $B$  — в точку  $D$ . Отже, вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  суміщаються паралельним перенесенням, тобто рівні за означенням.

3) Від будь-якої точки можна відкласти вектор, що дорівнює даному, і притому тільки один.

Справді, нехай дано вектор  $\overline{AB}$  і точку  $M$  (рис. 93). Існує єдине паралельне перенесення, внаслідок якого точка  $A$  переходить у точку  $M$  — паралельне перенесення на вектор  $\overline{AM}$ . Під час такого перенесення вектор  $\overline{AB}$  переходить у вектор  $\overline{MN}$ , який за означенням дорівнює  $\overline{AB}$ .

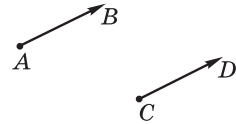


Рис. 91. Рівні вектори

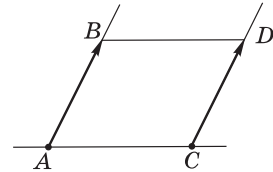


Рис. 92. До обґрунтування ознаки рівних векторів

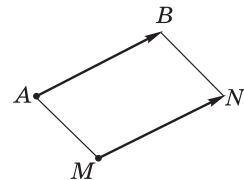


Рис. 93. Відкладання вектора, що дорівнює даному



Для практичного відкладання від заданої точки вектора, що дорівнює даному, варто зазначити, що у випадку, коли точка  $M$  не лежить на прямій  $AB$ , чотирикутник  $ABNM$  — паралелограм.

Зауважимо також, що рівні вектори, відкладені від різних точок, часто позначають тією самою літерою. Про такі вектори кажуть, що це той самий вектор, відкладений від різних точок. Такий підхід є цілком природним: справді, розглядаючи декілька зображень Вінні-Пуха, ми кажемо: «Це — Вінні-Пух», а не «Це — різні зображення Вінні-Пуха».

### 14.3. Координати вектора

Досі кажучи про координати, ми мали на увазі координати точки, які однозначно задають її розміщення в системі координат. Виявляється, за допомогою координат можна описувати і вектори.

#### Означення

**Координатами вектора** з початком  $A(x_1; y_1)$  і кінцем  $B(x_2; y_2)$  називають числа  $a_1 = x_2 - x_1$  і  $a_2 = y_2 - y_1$ .

Інакше кажучи, *кожна координата вектора дорівнює різниці відповідних координат його кінця і початку*.

Координати вектора записують у дужках поряд із його буквеним позначенням:  $\overline{AB}(a_1; a_2)$ . Іноді для позначення вектора з координатами  $a_1$  і  $a_2$  використовують запис  $\overline{(a_1; a_2)}$ . Очевидно, що нульовий вектор має нульові координати:  $\vec{0}(0; 0)$ .

Із формули відстані між точками маємо:

довжина вектора  $\overline{a}(a_1; a_2)$  обчислюється за формулою  $|\overline{a}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ .

#### Теорема

**(властивість і ознака координат рівних векторів)**

Рівні вектори мають рівні координати, і навпаки: якщо у векторів відповідні координати рівні, то ці вектори рівні.

**Доведення**□ 1) *Властивість.*Нехай  $A(x_1; y_1)$  і  $B(x_2; y_2)$  — початок і кінець даного вектора  $\vec{a}$ .

Вектор  $\vec{a}'$ , що дорівнює  $\vec{a}$ , можна отримати з вектора  $\vec{a}$  паралельним перенесенням. Нехай це перенесення задається формулами  $x' = x + c$ ,  $y' = y + d$ . Тоді  $\vec{a}' = \vec{A'B'}$ , де  $A'(x_1 + c; y_1 + d)$ ,  $B'(x_2 + c; y_2 + d)$ . Очевидно, що обидва вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{a}'$  мають координати  $x_2 - x_1$  і  $y_2 - y_1$ , що й треба було довести.

2) *Ознака.*

Нехай тепер вектори  $\vec{AB}$  і  $\vec{A'B'}$  мають рівні координати. Якщо початком і кінцем другого вектора є точки  $A'(x'_1; y'_1)$  і  $B'(x'_2; y'_2)$ , то за умовою  $x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1$ ,  $y_2 - y_1 = y'_2 - y'_1$ . Звідси  $x'_2 = x_2 - x_1 + x'_1$ ,  $y'_2 = y_2 - y_1 + y'_1$ . Паралельне перенесення, задане формулами  $x' = x - x_1 + x'_1$ ,  $y' = y - y_1 + y'_1$ , переводить точку  $A$  в точку  $A'$ , а точку  $B$  — в точку  $B'$ , тобто суміщає вектори  $\vec{AB}$  і  $\vec{A'B'}$ , що й треба було довести.

Теорему доведено повністю. ■

Зазначимо, що координати вектора не фіксують напрямлений відрізок, а лише задають його довжину і напрям.

Як приклад застосування рівності координат векторів наведемо ще один спосіб розв'язування відомої задачі про пошук четвертої вершини паралелограма.

**Задача**

Знайдіть координати четвертої вершини паралелограма  $ABCD$ , якщо  $A(-2; 1)$ ,  $B(0; 4)$ ,  $C(4; 1)$ .

**Розв'язання**

Якщо чотирикутник  $ABCD$  — паралелограм (рис. 94), то  $\vec{AB} = \vec{DC}$ . Нехай шукана вершина —  $D(x; y)$ . Знайдемо координати векторів  $\vec{AB}$  і  $\vec{DC}$ :

$$\vec{AB} = (0 - (-2); 4 - 1) = (2; 3), \quad \vec{DC} = (4 - x; 1 - y).$$

Отже,  $4 - x = 2$ ,  $1 - y = 3$ , звідки  $x = 2$ ,  $y = -2$ .

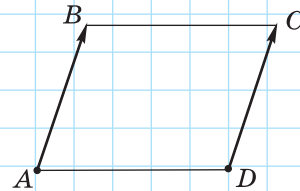
**Відповідь:**  $(2; -2)$ .

Рис. 94

## Запитання і задачі



### Усні вправи

**445.** На площині позначено точки  $A$  і  $B$ . Чи є правильним, що вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{BA}$ :

- а) мають однакові довжини;                      в) рівні?  
б) співнаправлені;

**446.** Вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{BC}$  колінеарні. Чи лежить точка  $B$  на прямій  $AC$ ; на відрізку  $AC$ ?

**447.** Точка  $C$  — середина відрізка  $AB$ . Чи є рівними вектори  $\overline{AC}$  і  $\overline{BC}$ ? Чи є рівними вектори  $\overline{AC}$  і  $\overline{CB}$ ?



**448.** У паралелограмі  $ABCD$  (рис. 95) назвіть вектори:

- а) співнаправлені з вектором  $\overline{DC}$ ;  
б) співнаправлені з вектором  $\overline{AO}$ ;  
в) протилежно напрямлені з вектором  $\overline{AD}$ ;  
г) протилежно напрямлені з вектором  $\overline{BD}$ ;  
д) що дорівнюють вектору  $\overline{AB}$ ;  
е) що дорівнюють вектору  $\overline{OC}$ ;  
е) що дорівнюють вектору  $\overline{BB}$ .

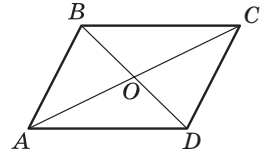


Рис. 95

**449.** Визначте вид чотирикутника  $ABCD$ , якщо  $\overline{AB} = \overline{DC}$ .

**450.** Дано рівнобедрений трикутник  $ABC$  з основою  $AC$ . Чи є правильним, що  $\overline{AB} = \overline{BC}$ ? Чи є правильним, що  $|\overline{AB}| = |\overline{BC}|$ ?



**451.** Відомо, що  $\vec{a} = \vec{b}$ . Чи правильно, що:

- а) дані вектори мають відповідно рівні координати;  
б) відрізки, що зображають дані вектори, обов'язково збігаються;  
в) у разі відкладання від однієї точки відрізки, що зображають відкладені вектори, обов'язково збігаються?



### Графічні вправи

**452.** Накресліть паралельні прямі  $a$  і  $b$ . Позначте на прямій  $a$  точки  $A$  і  $B$ , а на прямій  $b$  — точку  $C$ .

- а) Відкладіть від точки  $C$  вектор  $\overline{CD}$ , співнаправлений з  $\overline{AB}$ .  
б) Відкладіть від точки  $C$  вектор  $\overline{CE}$ , протилежно напрямлений з  $\overline{AB}$ .  
в) Відкладіть від точки  $B$  вектор  $\overline{BF}$ , що дорівнює вектору  $\overline{AB}$ . Чи є співнаправленими вектори  $\overline{BF}$  і  $\overline{DE}$ ,  $\overline{BF}$  і  $\overline{ED}$ ?



453. Накресліть ромб  $ABCD$ .
- Відкладіть від точки  $B$  вектор, що дорівнює вектору  $\overline{CD}$ .
  - Відкладіть від точки  $B$  вектор, що дорівнює вектору  $\overline{AC}$ .
  - Виконайте паралельне перенесення даного ромба на вектор  $\overline{BD}$ .



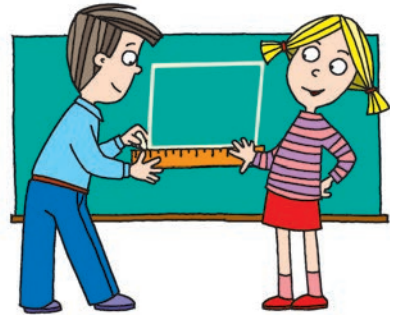
## Письмові вправи

### Рівень А

454. У прямокутнику  $ABCD$   $AB = 5$ ,  $BC = 12$ , точка  $E$  — середина сторони  $BC$ . Знайдіть довжини векторів  $\overline{AD}$ ,  $\overline{CE}$ ,  $\overline{AC}$ ,  $\overline{AE}$ .
455. У ромбі  $ABCD$   $AC = 8$ ,  $BD = 6$ ,  $O$  — точка перетину діагоналей. Знайдіть довжини векторів  $\overline{OC}$ ,  $\overline{BO}$ ,  $\overline{AB}$ .
456. Доведіть, що в паралелограмі  $ABCD$   $\overline{AD} = \overline{BC}$ .
457. Точка  $O$  — середина відрізка  $AB$ . Назвіть пари рівних векторів із кінцями в даних точках і доведіть їх рівність.
458. Знайдіть координати вектора  $\overline{AB}$ , якщо:
- $A(-1; 4)$ ,  $B(3; 9)$ ;
  - $A(2; -5)$ ,  $B(-1; -1)$ ;
  - $A(3; 2)$ ,  $B(3; -2)$ .
459. Відомо, що  $\overline{OA} = \vec{a}$ ,  $\vec{a}(2; -1)$ ,  $O$  — початок координат. Знайдіть координати точки  $A$ .
460. Знайдіть довжину вектора  $\overline{AB}$ , якщо:
- $\overline{AB}(7; 24)$ ;
  - $A(0; -1)$ ,  $B(3; -5)$ ;
  - $A(2; -4)$ ,  $B(2; -1)$ .
461. Знайдіть координати і довжину вектора  $\overline{AB}$ , якщо:
- $A(-3; 1)$ ,  $B(5; -5)$ ;
  - $A(12; 0)$ ,  $B(0; -5)$ .
462. Відкладіть від точки  $D(1; 3)$  вектори  $\vec{a}(2; -1)$  і  $\vec{b}(-3; 4)$ . Знайдіть координати кінців цих векторів.
463. Кінцем вектора  $\vec{a}(-3; 7)$  є точка  $(0; -2)$ . Знайдіть координати початку вектора і відкладіть його в прямокутній системі координат.

**464.** За допомогою векторів доведіть, що чотирикутник  $ABCD$  — паралелограм, якщо  $A(-2; -1)$ ,  $B(1; 2)$ ,  $C(2; 2)$ ,  $D(-1; -1)$ .

👉 **465.** Знайдіть координати четвертої вершини паралелограма  $ABCD$ , якщо  $B(3; 1)$ ,  $C(5; 0)$ ,  $D(2; -3)$ .



### Рівень Б

**466.** У прямокутній трапеції  $ABCD$   $AD \parallel BC$ ,  $AB = 4$ ,  $AD = 7$ ,  $\angle D = 45^\circ$ . Знайдіть довжини векторів  $\overline{BC}$ ,  $\overline{CD}$  і  $\overline{BD}$ .

👉 **467.** У паралелограмі  $ABCD$   $AB = 4$ ,  $BC = 7$ , діагональ  $AC$  більша за діагональ  $BD$  на 2. Знайдіть довжини векторів  $\overline{AC}$  і  $\overline{DB}$ .

**468.** Визначте вид чотирикутника  $ABCD$ , якщо:

а)  $\overline{AB} = \overline{DC}$  і  $|\overline{AB}| = |\overline{AD}|$ ;

б)  $\overline{BC} = \overline{AD}$  і  $|\overline{AC}| = |\overline{BD}|$ ;

в)  $\overline{BC} \uparrow \uparrow \overline{AD}$ , а вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  не колінеарні.

**469.** Якщо  $\overline{AB} = \overline{CD}$ , то середини відрізків  $AD$  і  $BC$  збігаються. Доведіть.

👉 **470.** Сформулюйте і доведіть твердження, обернене до твердження попередньої задачі.

**471.** Довжина вектора  $\vec{a}(m-3; m-1)$  дорівнює 10. Знайдіть  $m$ .

**472.** Довжина вектора  $\overline{AB}$  дорівнює 5. Знайдіть координати точки  $B$ , якщо  $A(4; -2)$ , а точка  $B$  лежить на прямій  $y = 2x$ .

👉 **473.** Довжина вектора  $\vec{a}(m; 15)$  дорівнює 17. Знайдіть  $m$ .

**474.** Відкладіть від початку координат вектори  $\vec{a}(-2; 1)$  і  $\vec{b}(1; 2)$ . Знайдіть координати і довжину вектора, початком якого є кінець вектора  $\vec{a}$ , а кінцем — кінець вектора  $\vec{b}$ .

👉 **475.** Відкладіть від точки  $(1; 3)$  вектори  $\vec{a}(2; -1)$  і  $\vec{b}(-4; 2)$ . Чи колінеарні ці вектори?

### Рівень В

**476.** Вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  колінеарні. Чи означає це, що  $ABCD$  — трапеція? Відповідь обґрунтуйте.

477. Дано паралелограми  $ABCD$  і  $A_1BC_1D$ . Доведіть, що  $\overline{AA_1} = \overline{C_1C}$ .
478. Від точки  $M$ , яка лежить поза рівностороннім трикутником  $ABC$ , відкладено вектори  $\overline{MF}$ ,  $\overline{ME}$  і  $\overline{MD}$ , що дорівнюють відповідно векторам  $\overline{AB}$ ,  $\overline{AC}$  і  $\overline{BC}$ . Доведіть, що  $MFED$  — ромб.
479. У колі проведено діаметр  $AC$  і хорду  $AB$ . Від точки  $M$ , що лежить усередині кола, відкладено вектори  $\overline{MD}$  і  $\overline{ME}$ , які дорівнюють відповідно векторам  $\overline{AB}$  і  $\overline{AC}$ . Знайдіть кут  $MDE$ .



## Повторення перед вивченням § 15

### Теоретичний матеріал

- нерівність трикутника; ↻ 7 клас, п. 18.2
- найпростіші задачі в координатах. ↻ 9 клас, § 6

### Задачі

480. Доведіть, що точки  $A$ ,  $B$  і  $C$  лежать на одній прямій, якщо  $AB = 8,3$  см,  $BC = 10,1$  см,  $AC = 1,8$  см. Яка з цих точок лежить між двома іншими?
481. Чи лежать на одній прямій точки  $A(-2; -2)$ ,  $B(-3; -4)$ ,  $C(0; 2)$ ? Розв'яжіть задачу двома способами.

## § 15

# Додавання і віднімання векторів

## 15.1. Додавання векторів

Для векторів, як і для чисел, визначають операції додавання і віднімання, причому результатами цих дій також є вектори.

### Означення

**Сумою векторів**  $\vec{a}(a_1; a_2)$  і  $\vec{b}(b_1; b_2)$  називається вектор  $\vec{c}(c_1; c_2)$  з координатами  $c_1 = a_1 + b_1$ ,  $c_2 = a_2 + b_2$ .

Таким чином,  $\overline{(a_1; a_2)} + \overline{(b_1; b_2)} = \overline{(a_1 + b_1; a_2 + b_2)}$ .

Сформулюємо *властивості додавання векторів*.

Для будь-яких векторів  $\vec{a}(a_1; a_2)$ ,  $\vec{b}(b_1; b_2)$ ,  $\vec{c}(c_1; c_2)$ :

$$1) \vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a};$$

$$2) (\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c});$$

$$3) \vec{a} + \vec{0} = \vec{a}.$$

Для доведення цих властивостей достатньо порівняти координати векторів у правій і лівій частинах кожної рівності. Очевидно, що ці координати рівні, отже, рівні й самі вектори.

У який спосіб можна побудувати зображення вектора-суми за зображеннями векторів-доданків? Для відповіді на це запитання доведемо таку теорему.

### Теорема (про додавання векторів)

Для будь-яких точок  $A$ ,  $B$  і  $C$  справджується векторна рівність

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{AC}.$$

### Доведення

□ Нехай дано точки  $A(x_1; y_1)$ ,  $B(x_2; y_2)$  і  $C(x_3; y_3)$  (рис. 96). Виразивши координати векторів-доданків, маємо:  $\overline{AB}(x_2 - x_1; y_2 - y_1)$ ,  $\overline{BC}(x_3 - x_2; y_3 - y_2)$ .

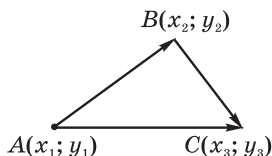


Рис. 96. До доведення теореми про додавання векторів

За означенням суми векторів для визначення координат вектора-суми додамо відповідні координати векторів  $\overline{AB}$  і  $\overline{BC}$ :

$$x_2 - x_1 + x_3 - x_2 = x_3 - x_1,$$

$$y_2 - y_1 + y_3 - y_2 = y_3 - y_1.$$

Отже, координати вектора-суми збігаються з координатами вектора  $\overline{AC}$ , тобто вектори  $\overline{AB} + \overline{BC}$  і  $\overline{AC}$  рівні. Теорему доведено. ■

Наслідками з цієї теореми є такі способи побудови суми векторів.

**1) Правило трикутника.** Нехай дано ненульові неколінеарні вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  (рис. 97, а). Відкладемо від кінця вектора  $\overline{AB} = \vec{a}$  вектор  $\overline{BC}$ , що дорівнює вектору  $\vec{b}$ . Тоді за доведеною теоремою вектор  $\overline{AC}$ , початок якого збігається з початком вектора  $\overline{AB}$ , а кінець — з кінцем вектора  $\overline{BC}$ , є вектором-сумою  $\overline{AB} + \overline{BC}$ . Побудову вектора  $\vec{a} + \vec{b}$  у випадку, коли вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  колінеарні, показано на рис. 97, б, в.

**2) Правило паралелограма.** Для ненульових векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  зі спільним початком вектор-сума  $\vec{a} + \vec{b}$  зображається діагоналлю паралелограма, побудованого на даних векторах, причому початок вектора  $\vec{a} + \vec{b}$  збігається зі спільним початком векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  (рис. 98). Справді, якщо відкласти від кінця вектора  $\vec{a}$  вектор, що дорівнює вектору  $\vec{b}$ , ця побудова зводиться до попередньої.

**3) Правило багатокутника.** Якщо декілька векторів-доданків відкладено так, що початок другого вектора збігається з кінцем першого, початок третього — з кінцем другого і т. д., то початок вектора-суми є початком першого вектора, а кінець — кінцем останнього:

$$\overline{A_1A_2} + \overline{A_2A_3} + \dots + \overline{A_{n-1}A_n} = \overline{A_1A_n}.$$

На рис. 99 показано застосування правила багатокутника для додавання векторів  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  і  $\vec{d}$ .

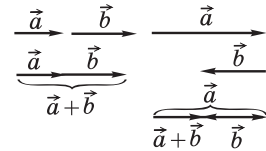
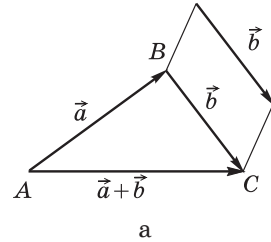


Рис. 97. Побудова суми векторів за правилом трикутника

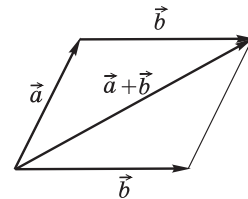


Рис. 98. Побудова суми векторів за правилом паралелограма

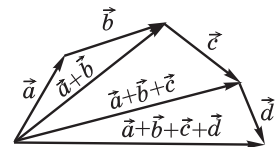


Рис. 99. Побудова суми векторів за правилом багатокутника



### Задача

Дано вектори  $\vec{a}(2; 3)$  і  $\vec{b}(-4; 5)$ . Знайдіть координати вектора  $\vec{c}$  такого, що  $\vec{b} + \vec{c} = \vec{a}$ .

### Розв'язання

Якщо  $\vec{c}(c_1; c_2)$  — шуканий вектор, то  $-4 + c_1 = 2$ ;  $5 + c_2 = 3$ . Отже,  $c_1 = 6$ ,  $c_2 = -2$ .

**Відповідь:**  $\vec{c}(6; -2)$ .

## 15.2. Віднімання векторів

Вектор  $\vec{c}$ , знайдений у попередній задачі, можна визначити як різницю векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ .

### Означення

**Різницею векторів**  $\vec{a}(a_1; a_2)$  і  $\vec{b}(b_1; b_2)$  називається такий вектор  $\vec{c}(c_1; c_2)$ , який у сумі з вектором  $\vec{b}$  дає вектор  $\vec{a}$ :

$$\vec{b} + \vec{c} = \vec{a}.$$

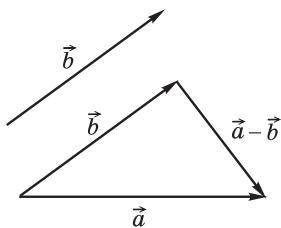
Із цього означення знаходимо координати вектора  $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ :

$$c_1 = a_1 - b_1, c_2 = a_2 - b_2.$$

Для побудови вектора-різниці скористаємося правилом трикутника і рівністю  $\vec{b} + (\vec{a} - \vec{b}) = \vec{a}$ . Відкладемо вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  від однієї точки (рис. 100). Тоді початок вектора-різниці є кінцем вектора  $\vec{b}$ , а кінець — кінцем вектора  $\vec{a}$ , тобто **вектор-різниця сполучає кінці векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  та напрямлений у бік зменшуваного**.

### Означення

**Протилежними векторами** називаються два протилежно напрямлені вектори однакової довжини.



**Рис. 100.** Побудова різниці векторів

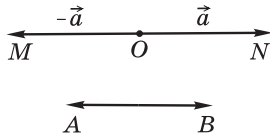


Рис. 101. Протилежні вектори

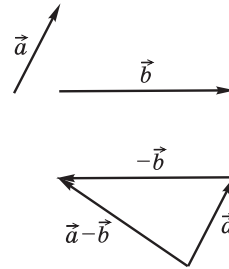


Рис. 102

На рис. 101 вектори  $\overline{OM}$  і  $\overline{ON}$ , а також вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{BA}$  протилежні. Вектор, протилежний вектору  $\vec{a}$ , позначають  $-\vec{a}$ . Очевидно, що  $\vec{a} + (-\vec{a}) = \vec{0}$ .

Покажемо, що  $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$ . Справді, за означенням різниці векторів  $(\vec{a} - \vec{b}) + \vec{b} = \vec{a}$ . Додавши до обох частин цієї рівності вектор  $-\vec{b}$ , маємо:

$$(\vec{a} - \vec{b}) + \vec{b} + (-\vec{b}) = \vec{a} + (-\vec{b}), \quad (\vec{a} - \vec{b}) + \vec{0} = \vec{a} + (-\vec{b}),$$

тобто  $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$ .

Щойно обґрунтована формула вказує, що для отримання різниці  $\vec{a} - \vec{b}$  можна додати до вектора  $\vec{a}$  вектор, протилежний вектору  $\vec{b}$  (рис. 102).

Операції додавання і віднімання векторів широко застосовують у фізиці для додавання сил. На рис. 103 проілюстровано фізичний зміст відомої байки Л. Глібова «Лебідь, Щука і Рак»: для визначення напрямку руху хури необхідно знайти рівнодійну сил Лебедя, Щуки й Рака, тобто суму векторів  $\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$ . Як відомо з байки, «хура й досі там», тобто  $\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} = \vec{0}$ .

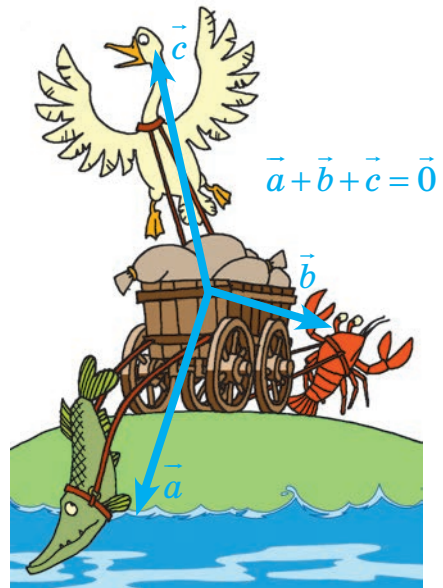


Рис. 103

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 482.** Чи може сума двох векторів дорівнювати:
- нулю;
  - нульовому вектору;
  - одному з векторів-доданків?
- 483.** Чи може довжина вектора-суми дорівнювати сумі довжин векторів-доданків? У якому випадку?
- 484.** У паралелограмі  $ABCD$  (рис. 104) назвіть вектор-суму:
- $\overline{AB} + \overline{BD}$ ;
  - $\overline{BA} + \overline{BC}$ ;
  - $\overline{AO} + \overline{OC}$ ;
  - $\overline{BO} + \overline{DO}$ .
- 485.** Чи може різниця двох векторів дорівнювати їх сумі? У якому випадку?
- 486.** У паралелограмі  $ABCD$  (рис. 104) назвіть вектор, протилежний:
- вектору  $\overline{BC}$ ;
  - вектору  $\overline{OA}$ .
- 487.** У паралелограмі  $ABCD$  (рис. 104) назвіть вектор-різницю:
- $\overline{AB} - \overline{AC}$ ;
  - $\overline{AB} - \overline{DA}$ ;
  - $\overline{AD} - \overline{BC}$ .

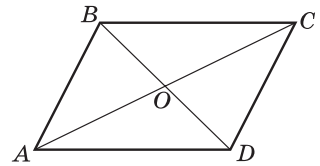


Рис. 104



### Графічні вправи

- 488.** Перекресліть вектори  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  і  $\vec{d}$  (рис. 105) у зошит. Побудуйте вектори  $\vec{a} + \vec{b}$ ,  $\vec{c} - \vec{d}$ ,  $\vec{b} + \vec{d}$ ,  $\vec{d} - \vec{b}$ ,  $\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \vec{d}$ ,  $\vec{b} - \vec{d}$ . Чи є серед побудованих векторів протилежні?

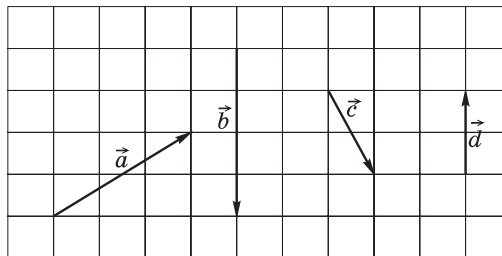


Рис. 105



**489.** Перекресліть вектори  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  і  $\vec{d}$  (рис. 106) у зошит. Побудуйте вектори:

- а)  $\vec{b} + \vec{d}$ ,  $\vec{a} + \vec{c}$ ,  $\vec{a} + \vec{d}$  за правилами трикутника й паралелограма та за допомогою координат;  
 б)  $\vec{b} - \vec{d}$ ,  $\vec{a} - \vec{c}$ ,  $\vec{c} - \vec{a}$  трьома способами.

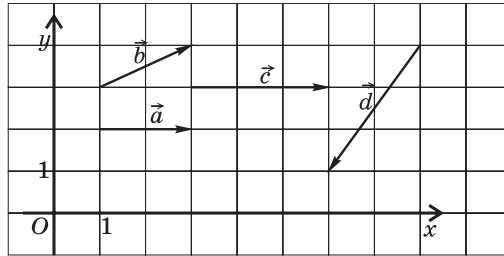


Рис. 106

**490.** Накресліть довільний трикутник  $ABC$ .

- а) Побудуйте вектор  $\vec{AD}$ , що дорівнює сумі  $\vec{AB} + \vec{AC}$ . Знайдіть суму векторів  $\vec{DB}$  і  $\vec{AC}$ .  
 б) Побудуйте вектор  $\vec{AE}$ , що дорівнює різниці  $\vec{AB} - \vec{AC}$ . Чи рівні вектори  $\vec{AE}$  і  $\vec{BC}$ ?

## А а Письмові вправи Рівень А

**491.** Знайдіть координати і довжину вектора  $\vec{c}$ , який дорівнює  $\vec{a} + \vec{b}$ , якщо:

- а)  $\vec{a}(2; -9)$ ,  $\vec{b}(6; 3)$ ;                      в)  $\vec{a}(-1; 5)$ ,  $\vec{b}(1; -5)$ .  
 б)  $\vec{a}(0; 4)$ ,  $\vec{b}(-3; 0)$ ;

**492.** Знайдіть координати і довжину вектора  $\vec{c}$ , який дорівнює  $\vec{a} - \vec{b}$ , якщо:

- а)  $\vec{a}(-4; 7)$ ,  $\vec{b}(8; 2)$ ;                      в)  $\vec{a}(0; 1)$ ,  $\vec{b}(0; -2)$ .  
 б)  $\vec{a}(2; -2)$ ,  $\vec{b}(-3; 3)$ ;

**493.** Знайдіть вектор-суму  $\vec{a} + \vec{b}$  і вектор-різницю  $\vec{a} - \vec{b}$ , якщо:

- а)  $\vec{a}(-3; -1)$ ,  $\vec{b}(-1; 2)$ ;                      б)  $\vec{a}(2; -7)$ ,  $\vec{b}(2; 3)$ .

**494.** Сторона рівностороннього трикутника  $ABC$  дорівнює  $a$ . Знайдіть:

- а)  $|\vec{AB} + \vec{BC}|$ ;                                      в)  $|\vec{CA} - \vec{CB}|$ ;  
 б)  $|\vec{AB} + \vec{AC}|$ ;                                      г)  $|\vec{AB} - \vec{BC}|$ .

495. У трикутнику  $ABC$   $\angle A = 30^\circ$ ,  $\angle B = 90^\circ$ ,  $AC = a$ . Знайдіть:
- а)  $|\overline{BA} + \overline{AC}|$ ;    б)  $|\overline{BA} + \overline{BC}|$ ;    в)  $|\overline{CB} - \overline{CA}|$ ;    г)  $|\overline{BC} - \overline{BA}|$ .
496. Доведіть, що в чотирикутнику  $ABCD$   $\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{AD} + \overline{DC}$ .
497. Доведіть, що в трикутнику  $ABC$   $\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CA} = \vec{0}$ .
498. Точки  $M$  і  $N$  — середини сторін  $AB$  і  $AC$  трикутника  $ABC$ . Виразіть через вектори  $\vec{a} = \overline{AM}$  і  $\vec{b} = \overline{AN}$  вектори:
- а)  $\overline{MB}$ ;    б)  $\overline{CN}$ ;    в)  $\overline{MN}$ .
499. Дано трикутник  $ABC$ . Виразіть через вектори  $\vec{a} = \overline{AB}$  і  $\vec{b} = \overline{AC}$  вектори:
- а)  $\overline{BA}$ ;    б)  $\overline{BC}$ ;    в)  $\overline{CB}$ .

### Рівень Б

500. Дано точки  $A(-1; 4)$ ,  $B(0; -2)$ ,  $C(3; 5)$ . Знайдіть координати вектора:
- а)  $\overline{AB} + \vec{a}$ , де  $\vec{a}(0; -2)$ ;    б)  $\overline{CB} + \overline{AB}$ .
501. Дано точки  $A(0; -1)$  і  $C(3; 5)$  та вектор  $\overline{AB}(1; 2)$ . Знайдіть координати вектора:
- а)  $\overline{CB} - \overline{CA}$ ;    б)  $\overline{AB} - \overline{CB}$ ;    в)  $\overline{AC} - \overline{AB}$ .
502. Дано точки  $O(0; 0)$ ,  $A(1; -4)$ ,  $B(8; 3)$ . Знайдіть координати векторів:
- а)  $\overline{OA} + \overline{OB}$ ;    б)  $\overline{AO} - \overline{AB}$ ;    в)  $\overline{OA} - \overline{BA}$ .
503. У прямокутнику  $ABCD$   $AB = 3$ ,  $BC = 4$ ,  $O$  — точка перетину діагоналей. Знайдіть:
- а)  $|\overline{AB} + \overline{AD}|$ ;    б)  $|\overline{AO} + \overline{OD} + \overline{DC}|$ ;    в)  $|\overline{AO} - \overline{BC}|$ .
504. У ромбі  $ABCD$   $AC = 10$ ,  $BD = 24$ ,  $O$  — точка перетину діагоналей. Знайдіть:
- а)  $|\overline{AD} + \overline{DB}|$ ;    б)  $|\overline{AB} + \overline{BO} + \overline{OC}|$ ;    в)  $|\overline{CO} - \overline{BA}|$ .
505. Точка  $O$  — центр рівностороннього трикутника  $ABC$ . Доведіть, що  $\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC} = \vec{0}$ .
506. Доведіть, що в чотирикутнику  $ABCD$   $\overline{AC} + \overline{DB} = \overline{AB} - \overline{CD}$ .
507. У паралелограмі  $ABCD$  виразіть вектор  $\overline{AC}$  через вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , якщо:
- а)  $\vec{a} = \overline{AB}$ ,  $\vec{b} = \overline{BC}$ ;    в)  $\vec{a} = \overline{AB}$ ,  $\vec{b} = \overline{DA}$ .
- б)  $\vec{a} = \overline{CB}$ ,  $\vec{b} = \overline{CD}$ ;

🏠 **508.** Відрізок  $BD$  — медіана трикутника  $ABC$ . Виразіть вектор  $\overline{BD}$  через вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , якщо:

а)  $\vec{a} = \overline{AD}$ ,  $\vec{b} = \overline{AB}$ ;      б)  $\vec{a} = \overline{CB}$ ,  $\vec{b} = \overline{AD}$ .

### Рівень В

**509 (опорна).** Доведіть нерівність трикутника для векторів: для будь-яких векторів  $\vec{x}$  і  $\vec{y}$  справджується нерівність  $|\vec{x} + \vec{y}| \leq |\vec{x}| + |\vec{y}|$ .

**510.** Чи може дорівнювати нульовому вектору сума трьох векторів, довжини яких становлять:

а) 1, 2 і 9;      б) 3, 5 і 8;      в) 3, 4 і 5?

🏠 **511.** Доведіть, що для будь-яких неколінеарних векторів  $\vec{x}$  і  $\vec{y}$  справджується нерівність  $|\vec{x} - \vec{y}| < |\vec{x}| + |\vec{y}|$ . У якому випадку  $|\vec{x} - \vec{y}| = |\vec{x}| + |\vec{y}|$ ? У якому випадку  $|\vec{x} - \vec{y}| = |\vec{x}| - |\vec{y}|$ ?

🌀 **512.** Якщо точка  $O$  — точка перетину медіан трикутника  $ABC$ , то  $\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC} = \vec{0}$ . Доведіть.

🏠 **513.** Дано паралелограм  $ABCD$  і довільну точку  $M$ . Доведіть, що  $\overline{MA} + \overline{MC} = \overline{MB} + \overline{MD}$ .



## Повторення перед вивченням § 16

### Теоретичний матеріал

- теорема косинусів;
- рівняння прямої.

🌀 9 клас, § 2

🌀 9 клас, § 7

### Задачі

**514.** Складіть рівняння прямої, яка проходить через початок координат і точку  $A(-4; 2)$ .

**515.** Дано точки  $A(1; 5)$ ,  $B(3; 1)$ ,  $C(5; 2)$ . Знайдіть кут  $ABC$ .

## § 16

# Множення вектора на число. Скалярний добуток векторів

### 16.1. Множення вектора на число

Як відомо з курсу алгебри, суму  $n$  доданків, кожний із яких дорівнює  $a$ , можна подати у вигляді добутку  $na$ . Аналогічне подання для векторів можливе завдяки операції множення вектора на число.

#### Означення

**Добутком вектора  $\vec{a}(a_1; a_2)$  на число  $k$  (або добутком числа  $k$  на вектор  $\vec{a}$ ) називається вектор  $k\vec{a} = (ka_1; ka_2)$ .**

Це означає, що  $k\vec{a}(a_1; a_2) = \vec{a}(ka_1; ka_2)$ .

Сформулюємо **властивості множення вектора на число**.

Для будь-яких векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  та чисел  $k, m$ :

- |                                  |                                                   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1) $k\vec{a} = \vec{a}k$ ;       | 4) $0\vec{a} = \vec{0}$ ;                         |
| 2) $(km)\vec{a} = k(m\vec{a})$ ; | 5) $(k+m)\vec{a} = k\vec{a} + m\vec{a}$ ;         |
| 3) $k\vec{0} = \vec{0}$ ;        | 6) $k(\vec{a} + \vec{b}) = k\vec{a} + k\vec{b}$ . |

Ці властивості легко довести, порівнявши координати векторів у правій і лівій частинах кожної рівності (зробіть це самостійно).

Спосіб побудови вектора  $k\vec{a}$  за даними числом  $k$  і вектором  $\vec{a}$  впливає з такої теореми.

#### Теорема (про довжину і напрям вектора $k\vec{a}$ )

Довжина вектора  $k\vec{a}$  дорівнює  $|k||\vec{a}|$ . Якщо  $\vec{a} \neq \vec{0}$ , то вектор  $k\vec{a}$  співнаправлений з вектором  $\vec{a}$  за умови  $k > 0$  і протилежно направлений з вектором  $\vec{a}$  за умови  $k < 0$ .

#### Доведення

□ Відкладемо вектори  $\vec{a} = \vec{OA}$  і  $k\vec{a} = \vec{OB}$  від початку координат  $O$ . Якщо  $\vec{a}(a_1; a_2)$ , то  $k\vec{a}(ka_1; ka_2)$ , тобто  $A(a_1; a_2)$ ,  $B(ka_1; ka_2)$ .

Рівняння прямої  $OA$  має вигляд  $ax + by = 0$ . Оскільки це рівняння задовольняють координати  $x = a_1$  та  $y = a_2$ , то його задовольняють

і координати  $x = ka_1$  та  $y = ka_2$ , тобто точка  $B$  лежить на прямій  $OA$ . Зауважимо, що координати будь-якої точки променя  $OA$  мають ті самі знаки, що й координати точки  $A$ , а координати будь-якої точки променя, доповняльного до  $OA$ , — знаки, протилежні знакам координат точки  $A$ . Тому за умови  $k > 0$  точка  $B$  лежить на промені  $OA$  (рис. 107, а), тобто  $\vec{a} \uparrow \vec{ka}$ , а за умови  $k < 0$  точка  $B$  лежить на промені, доповняльному до  $OA$  (рис. 107, б), тобто  $\vec{a} \downarrow \vec{ka}$ .

І нарешті, обчислимо довжину вектора  $\vec{ka}$ :

$$\begin{aligned} |\vec{ka}| &= \sqrt{(ka_1)^2 + (ka_2)^2} = \sqrt{k^2(a_1^2 + a_2^2)} = \\ &= |k| \sqrt{a_1^2 + a_2^2} = |k| |\vec{a}|. \end{aligned}$$

Теорему доведено. ■

### Наслідок (властивість і ознака колінеарних векторів)

Якщо  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  — ненульові колінеарні вектори, то існує число  $k$  таке, що  $\vec{b} = k\vec{a}$ , і навпаки: якщо для ненульових векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  справджується рівність  $\vec{b} = k\vec{a}$ , то вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  колінеарні.

Ознаку колінеарних векторів обґрунтовано в щойно доведеній теоремі. Обґрунтуємо властивість колінеарних векторів. Якщо  $\vec{a} \uparrow \vec{b}$ , виберемо

$$k = \frac{|\vec{b}|}{|\vec{a}|}.$$

Очевидно, що  $k > 0$ , тому вектори  $\vec{b}$  і  $k\vec{a}$

співнапрямлені і мають одну й ту саму довжину:

$$|k\vec{a}| = \frac{|\vec{b}|}{|\vec{a}|} \cdot |\vec{a}| = |\vec{b}|.$$

Це означає, що  $\vec{b} = k\vec{a}$ . Аналогічно у випадку

$$\vec{a} \downarrow \vec{b} \text{ слід вибрати } k = -\frac{|\vec{b}|}{|\vec{a}|}.$$

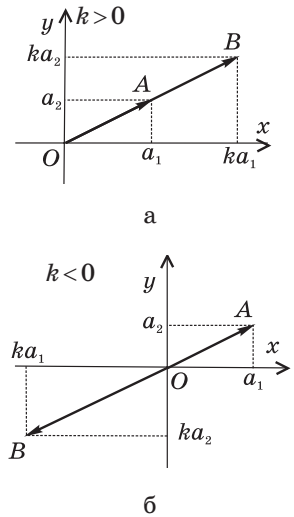


Рис. 107. Побудова вектора  $\vec{ka}$

Щойно обґрунтований наслідок можна сформулювати інакше.

У колінеарних векторів відповідні координати пропорційні, і навпаки: якщо у двох векторів відповідні координати пропорційні, то ці вектори колінеарні.



Узагалі, повертаючись до тлумачення поняття «векторна величина», слід зазначити, що, крім наявності числового значення й напрямку, векторні величини характеризуються обов'язковою визначеністю для них операцій додавання і множення на число. Тому, наприклад, швидкість руху автомобіля є векторною величиною, а потік машин на вулиці міста (який також можна охарактеризувати числовим значенням і напрямком) — не векторна величина.



#### Задача

Доведіть, що точки  $A(1; 2)$ ,  $B(2; 4)$  і  $C(-3; -6)$  лежать на одній прямій.

#### Розв'язання

Визначимо координати векторів  $\overline{AB}$  і  $\overline{AC}$ :  $\overline{AB}(1; 2)$ ,  $\overline{AC}(-4; -8)$ .

Зауважимо, що  $(-4; -8) = -4 \cdot (1; 2)$ , тобто  $\overline{AC} = -4\overline{AB}$ . Це означає, що вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{AC}$  колінеарні, тобто мають лежати на одній прямій або на паралельних прямих. Але прямі  $AB$  і  $AC$  мають спільну точку  $A$ , тобто точки  $A$ ,  $B$  і  $C$  лежать на одній прямій.

## 18.2. Скалярний добуток векторів

### Означення

Скалярним добутком векторів  $\vec{a}(a_1; a_2)$  і  $\vec{b}(b_1; b_2)$  називається число  $a_1b_1 + a_2b_2$ .

Скалярний добуток векторів  $\vec{a}(a_1; a_2)$  і  $\vec{b}(b_1; b_2)$  позначають  $\vec{a} \cdot \vec{b}$  або  $\vec{a}\vec{b}$ .

Отже,  $\vec{a} \cdot \vec{b} = a_1b_1 + a_2b_2$ .

**Скалярний** — від латинського «скаляр» — число.

Сформулюємо *властивості скалярного добутку векторів*.

Для будь-яких векторів  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  і  $\vec{c}$  та числа  $k$ :

1)  $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}$ ;

2)  $(k\vec{a}) \cdot \vec{b} = k(\vec{a} \cdot \vec{b})$ ;

3)  $(\vec{a} + \vec{b}) \cdot \vec{c} = \vec{a} \cdot \vec{c} + \vec{b} \cdot \vec{c}$ .

Доведіть ці рівності самостійно на основі означення скалярного добутку.

Скалярний добуток  $\vec{a} \cdot \vec{a}$  називають **скалярним квадратом** вектора  $\vec{a}$  і позначають  $\vec{a}^2$ . Очевидно, що  $\vec{a}^2 = a_1^2 + a_2^2 = |\vec{a}|^2$ .

### Означення

**Кутом між ненульовими векторами  $\vec{AB}$  і  $\vec{AC}$  називається кут  $\angle BAC$ .**

**Кутом між довільними ненульовими векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  називається кут між векторами, що дорівнюють даним векторам і мають спільний початок.**

Побудову кута між векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  показано на рис. 108. Цей кут позначають  $\angle(\vec{a}, \vec{b})$ . Очевидно, що коли  $\vec{a} \uparrow \vec{b}$ , то  $\angle(\vec{a}, \vec{b}) = 0^\circ$ , а коли  $\vec{a} \downarrow \vec{b}$ , то  $\angle(\vec{a}, \vec{b}) = 180^\circ$ . Якщо  $\angle(\vec{a}, \vec{b}) = 90^\circ$ , то вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  називають **перпендикулярними** (пишуть так:  $\vec{a} \perp \vec{b}$ ).

Якщо кут між двома векторами відомий, то їх скалярний добуток можна виразити через довжини цих векторів.

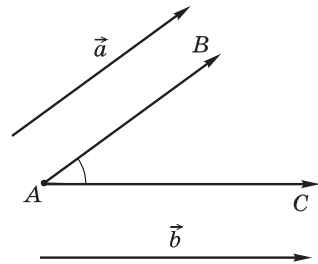


Рис. 108. Кут між векторами

### Теорема (про скалярний добуток векторів)

Скалярний добуток векторів дорівнює добутку їхніх довжин на косинус кута між ними:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \angle(\vec{a}, \vec{b}).$$

### Доведення

□ Покажемо, що скалярний добуток векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  не залежить від вибору системи координат. Справді,

$$(\vec{a} + \vec{b})^2 = (\vec{a} + \vec{b})(\vec{a} + \vec{b}) = (\vec{a} + \vec{b}) \cdot \vec{a} + (\vec{a} + \vec{b}) \cdot \vec{b} = \vec{a}^2 + 2\vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{b}^2,$$

тобто  $|\vec{a} + \vec{b}|^2 = |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2\vec{a} \cdot \vec{b}$ .

$$\text{Звідси } \vec{a} \cdot \vec{b} = \frac{1}{2} (|\vec{a} + \vec{b}|^2 - |\vec{a}|^2 - |\vec{b}|^2).$$

Таким чином, скалярний добуток векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  виражається через довжини векторів  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  і  $\vec{a} + \vec{b}$ , отже, не залежить від вибору системи координат.

Виберемо систему координат так, як показано на рис. 109. У такому випадку вектор  $\vec{a}$  матиме координати  $|\vec{a}|$  і 0, а вектор  $\vec{b}$  — координати  $|\vec{b}| \cos \angle(\vec{a}, \vec{b})$  і  $|\vec{b}| \sin \angle(\vec{a}, \vec{b})$ .

Виразимо скалярний добуток векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ :  
 $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos \angle(\vec{a}, \vec{b}) + 0 \cdot |\vec{b}| \sin \angle(\vec{a}, \vec{b}) = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos \angle(\vec{a}, \vec{b})$ .

Теорему доведено. ■

### Наслідок 1

Якщо  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  — ненульові вектори, то

$$\cos \angle(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}.$$

### Наслідок 2 (властивість і ознака перпендикулярних векторів)

Якщо  $\vec{a} \perp \vec{b}$ , то  $\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$ , і навпаки: якщо для ненульових векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  справджується рівність  $\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$ , то  $\vec{a} \perp \vec{b}$ .

Для обґрунтування цього наслідку достатньо зауважити, що  $\cos 90^\circ = 0$ .

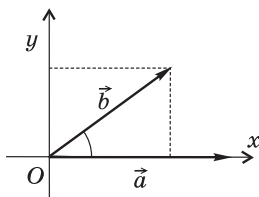


Рис. 109. До доведення теореми про скалярний добуток векторів





**Задача**

За якого значення  $x$  вектори  $\vec{a}(2; -1)$  і  $\vec{b}(3; x)$  перпендикулярні?

**Розв'язання**

Вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  перпендикулярні за умови  $\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$ . Записавши цю умову в координатах, маємо:  $2 \cdot 3 + (-1) \cdot x = 0$ ,  $6 - x = 0$ ,  $x = 6$ .

**Відповідь:** 6.

## Запитання і задачі



### Усні вправи

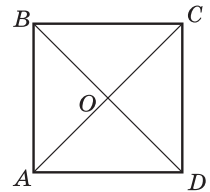
**516.** У скільки разів довжина вектора  $-3\vec{a}$  більша, ніж довжина вектора  $\vec{a}$ ? Чи є правильним, що довжина вектора  $k\vec{a}$  у  $k$  разів більша, ніж довжина вектора  $\vec{a}$ ?

**517.** Дано ненульовий вектор  $\vec{a}$ . Визначте знак числа  $k$ , якщо:

- а) вектори  $\vec{a}$  і  $k\vec{a}$  співнапрямлені;
- б) вектори  $-2\vec{a}$  і  $k\vec{a}$  співнапрямлені;
- в) вектори  $k\vec{a}$  і  $k^2\vec{a}$  протилежно напрямлені.

**518.** Діагоналі квадрата  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$  (рис. 110). Знайдіть кут між векторами:

- а)  $\vec{AC}$  і  $\vec{AD}$ ;                      г)  $\vec{AC}$  і  $\vec{DA}$ ;
- б)  $\vec{OB}$  і  $\vec{OC}$ ;                      д)  $\vec{AO}$  і  $\vec{AC}$ ;
- в)  $\vec{BC}$  і  $\vec{CD}$ ;                      е)  $\vec{AB}$  і  $\vec{CD}$ .



**Рис. 110**

**519.** Чи може скалярний добуток двох векторів дорівнювати нульовому вектору? Чи може скалярний квадрат ненульового вектора дорівнювати нулю?

**520.** Визначте, чи є кут між неколінеарними векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  гострим, прямим або тупим, якщо:

- а)  $\vec{a} \cdot \vec{b} < 0$ ;                      б)  $\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$ ;                      в)  $\vec{a} \cdot \vec{b} > 0$ .

**521.** Чи може скалярний добуток векторів дорівнювати добутку їхніх довжин? У якому випадку?



## Графічні вправи

522. Накресліть вектори  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  і  $\vec{d}$  (рис. 111) у зошиті.

- Побудуйте вектори  $-2\vec{a}$ ,  $3\vec{c}$ ,  $0,25\vec{d}$ .
- Побудуйте вектори  $0,5\vec{a} + \vec{b}$ ,  $2\vec{c} + \vec{d}$ ,  $2\vec{d} + 3\vec{b}$ .
- Побудуйте вектори  $2\vec{c} - \vec{a}$ ,  $2\vec{a} - 0,5\vec{d}$ ,  $\frac{1}{3}\vec{b} - \vec{d}$ .

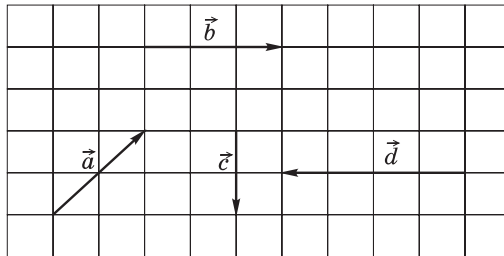


Рис. 111



523. Накресліть рівносторонній трикутник  $ABC$ .

- Побудуйте кут між векторами  $\vec{CA}$  і  $\vec{AB}$ . Якою є його градусна міра?
- Побудуйте вектор  $\vec{AB} - \frac{1}{2}\vec{AC}$ . Який кут він утворює з вектором  $\vec{BC}$ ?
- Побудуйте вектор  $\vec{CO} = \frac{1}{2}(\vec{CA} + \vec{CB})$ .



## Письмові вправи

### Рівень А

524. Знайдіть координати і довжину вектора  $k\vec{a}$ , якщо:
- $\vec{a}(6; -8)$ ,  $k = 0,5$ ;
  - $\vec{a}(5; 12)$ ,  $k = 3$ ;
  - $\vec{a}(-1; -2)$ ,  $k = -1$ .
525. Довжина вектора  $k\vec{a}$  дорівнює 10. Знайдіть  $k$ , якщо:
- $\vec{a}(3; -4)$ ;
  - $\vec{a}(18; 24)$ .

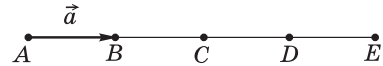
526. Знайдіть координати вектора  $\vec{b}$ , якщо:

а)  $\vec{b} = k\vec{a}$ ,  $k = -2$ ,  $\vec{a}(-0,5; 3)$ ;

б)  $\vec{a} = k\vec{b}$ ,  $k = \frac{1}{3}$ ,  $\vec{a}(-6; -9)$ .

527. Доведіть, що для будь-якого вектора  $\vec{a}$  справджується рівність  $(-1) \cdot \vec{a} = -\vec{a}$ .

528. На рис. 112  $AB = BC = CD = DE$ .



Виразіть через вектор  $\vec{a} = \overline{AB}$  вектори  $\overline{AE}$ ,  $\overline{BE}$ ,  $\overline{ED}$ ,  $\overline{CA}$ .

Рис. 112

529. Точка  $M$  — середина відрізка  $AB$ . Знайдіть координати векторів  $\overline{AB}$  і  $\overline{BM}$ , якщо  $\overline{AM}(2; -3)$ .

530. Серед векторів  $\vec{a}(-2; 3)$ ,  $\vec{b}(8; 18)$ ,  $\vec{c}(-4; -9)$  і  $\vec{d}(-4; 6)$  назвіть пари колінеарних векторів. Які з даних векторів співнаправлені, а які — протилежно напрямлені?

531. Вектори  $\vec{a}(14; -8)$  і  $\vec{b}(-7; x)$  колінеарні. Знайдіть  $x$ . Чи співнаправлені ці вектори?

532. Знайдіть скалярний добуток векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , якщо:

а)  $\vec{a}(7; -4)$ ,  $\vec{b}(2; 3)$ ;

б)  $|\vec{a}| = 4$ ,  $|\vec{b}| = 5\sqrt{3}$ ,  $\angle(\vec{a}, \vec{b}) = 30^\circ$ .

533. Сторона квадрата  $ABCD$  дорівнює 1. Знайдіть скалярний добуток векторів:

а)  $\overline{AB}$  і  $\overline{AD}$ ;

б)  $\overline{AC}$  і  $\overline{AD}$ .

534. Знайдіть скалярний добуток векторів:

а)  $\vec{a}(0; 4)$  і  $\vec{b}(6; -2)$ ;

б)  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , якщо  $|\vec{a}| = |\vec{b}| = 2$ ,  $\angle(\vec{a}, \vec{b}) = 120^\circ$ ;

в)  $\overline{AB}$  і  $\overline{AC}$ , якщо трикутник  $ABC$  рівносторонній зі стороною 6.

535. Знайдіть кут між векторами:

а)  $\vec{a}(2; -1)$  і  $\vec{b}(-4; -8)$ ;

б)  $\vec{a}(2; 1)$  і  $\vec{b}(1; 3)$ .

536. Доведіть, що ненульові вектори  $\vec{a}(x; y)$  і  $\vec{b}(y; -x)$  перпендикулярні.

537. За якого значення  $x$  вектори  $\vec{a}(x; 4)$  і  $\vec{b}(-2; 3)$  перпендикулярні?

## Рівень Б

**538.** Дано вектори  $\vec{a}(3; -1)$  і  $\vec{b}(-4; 10)$ . Знайдіть координати і довжину вектора  $\vec{c}$ , якщо:

а)  $\vec{c} = 2\vec{a} + 0,5\vec{b}$ ;

б)  $\vec{c} = 3\vec{a} - \vec{b}$ .

📌 **539.** Дано вектори  $\vec{a}(0; -3)$ ,  $\vec{b}(-2; 1)$ ,  $\vec{c} = k\vec{a} + 2\vec{b}$ . Знайдіть  $k$ , якщо  $\vec{c}(-4; 11)$ .

**540 (опорна).** Якщо відрізок  $BM$  — медіана трикутника  $ABC$ , то  $\overline{BM} = \frac{1}{2}(\overline{BA} + \overline{BC})$ . Доведіть.

📌 **541 (опорна).** Якщо точки  $M$  і  $N$  — середини відрізків  $AB$  і  $CD$ , то  $\overline{MN} = \frac{1}{2}(\overline{AD} + \overline{BC})$ . Доведіть.

**542.** Відрізок  $BM$  — медіана трикутника  $ABC$ . Виразіть через вектори  $\vec{a} = \overline{AC}$  і  $\vec{b} = \overline{BM}$  вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CB}$ .

📌 **543.** У ромбі  $ABCD$  виразіть через вектори  $\vec{a} = \overline{AC}$  і  $\vec{b} = \overline{BD}$  вектори  $\overline{AD}$  і  $\overline{DC}$ .

**544.** Доведіть, що точки  $A(-3; 1)$ ,  $B(3; 4)$ ,  $C(1; 3)$  лежать на одній прямій. Яка з цих точок лежить між двома іншими?

**545.** Дано точки  $A(2; 3)$ ,  $B(4; 6)$ ,  $C(7; 8)$ ,  $D(11; x)$ . Знайдіть значення  $x$ , за якого вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  колінеарні. Чи співнапрямлені ці вектори?


📌 **546.** За яких значень  $x$  вектори  $\vec{a}(4; x)$  і  $\vec{b}(x; 9)$  колінеарні? У кожному з випадків визначте, чи співнапрямлені дані вектори.

**547.** Знайдіть кути трикутника з вершинами  $A(-1; \sqrt{3})$ ,  $B(1; -\sqrt{3})$ ,  $C(0,5; \sqrt{3})$ .

📌 **548.** Знайдіть кути трикутника  $ABC$ , якщо  $A(-5; 2)$ ,  $B(-2; 1)$ ,  $C(-1; 4)$ .

**549.** Якщо неколінеарні вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  мають рівні довжини, то вектори  $\vec{a} + \vec{b}$  і  $\vec{a} - \vec{b}$  перпендикулярні. Доведіть.

**550.** Дано вектори  $\vec{a}(1; 0)$  і  $\vec{b}(1; 1)$ . Знайдіть значення  $k$ , за якого вектори  $\vec{a} + k\vec{b}$  і  $\vec{a}$  перпендикулярні.

 **551.** Дано вектори  $\vec{a}(1; 8)$  і  $\vec{b}(-3; 2)$ . Знайдіть значення  $k$ , за якого вектори  $\vec{a} + k\vec{b}$  і  $\vec{b}$  перпендикулярні.

## Рівень В

**552 (опорна).**

а) Якщо точка  $C$  ділить відрізок  $AB$  у відношенні  $AC : CB = m : n$ , то  $\vec{OC} = \frac{n}{m+n}\vec{OA} + \frac{m}{m+n}\vec{OB}$ , де  $O$  — деяка точка площини.

б) Якщо точка  $C$  лежить на прямій  $AB$ , то  $\vec{OC} = p\vec{OA} + (1-p)\vec{OB}$ , де  $O$  — деяка точка площини,  $p$  — число.


Доведіть ці твердження. Сформулюйте і доведіть обернені твердження.

**553 (опорна).** Відрізки  $AA_1$ ,  $BB_1$  і  $CC_1$  — медіани трикутника  $ABC$ , які перетинаються в точці  $M$ . Доведіть, що:


а)  $\vec{AA}_1 + \vec{BB}_1 + \vec{CC}_1 = \vec{0}$ ;

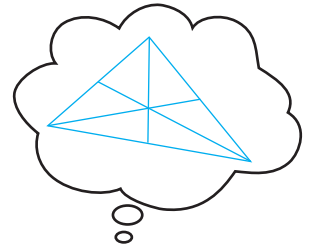
б)  $\vec{MA} + \vec{MB} + \vec{MC} = \vec{0}$ ;



в) з відрізків  $AA_1$ ,  $BB_1$  і  $CC_1$  можна скласти трикутник.

 **554 (опорна).** Якщо точка  $M$  — точка перетину медіан трикутника  $ABC$ , а точка  $O$  — деяка точка площини, то  $\vec{OM} = \frac{1}{3}(\vec{OA} + \vec{OB} + \vec{OC})$ . Доведіть.

**555.** Точка  $M$  — точка перетину медіан трикутника  $ABC$ . Виразіть через вектори  $\vec{a} = \vec{AB}$  і  $\vec{b} = \vec{AC}$  вектори  $\vec{BM}$  і  $\vec{MA}$ .

 **556.** Точка  $M$  ділить сторону  $BC$  паралелограма  $ABCD$  у відношенні  $BM : MC = 1 : 3$ . Виразіть через вектори  $\vec{a} = \vec{AB}$  і  $\vec{b} = \vec{AD}$  вектори  $\vec{AM}$  і  $\vec{MD}$ .



- 557.** Знайдіть кут між векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , якщо  $|\vec{a}|=|\vec{b}|=1$ , а вектори  $\vec{a}+2\vec{b}$  і  $5\vec{a}-4\vec{b}$  перпендикулярні.
-  **558.** Дано вектори  $\vec{a}(2; -1)$  і  $\vec{b}(4; 3)$ . Знайдіть значення  $k$ , за якого вектори  $\vec{a}+k\vec{b}$  і  $\vec{b}-\vec{a}$  перпендикулярні.
- 559.** Знайдіть:
- $|\vec{a}+2\vec{b}|$ , якщо  $|\vec{a}|=2\sqrt{2}$ ,  $|\vec{b}|=4$ ,  $\angle(\vec{a},\vec{b})=135^\circ$ ;
  - $\vec{a}\vec{b}$ , якщо  $|\vec{a}+2\vec{b}|=4$ ,  $|\vec{a}-2\vec{b}|=2$ ;
  - $|\vec{a}+\vec{b}+\vec{c}|$ , якщо  $|\vec{a}|=|\vec{b}|=|\vec{c}|=1$ ,  $\angle(\vec{a},\vec{b})=\angle(\vec{b},\vec{c})=\angle(\vec{a},\vec{c})=120^\circ$ .
-  **560.** Знайдіть кут між векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ , якщо  $|\vec{a}|=3$ ,  $|\vec{b}|=2$ ,  $(\vec{a}-\vec{b})^2+(\vec{a}-2\vec{b})^2=56$ .



## Повторення перед вивченням § 17

### Теоретичний матеріал

- середні лінії трикутника і трапеції;
- властивості паралелограмів.

 8 клас, § 6

 8 клас, § 2, 4

### Задачі

- 561.** Середня лінія трапеції дорівнює 33 см. Знайдіть основи трапеції, якщо їхні довжини відносяться як 3 : 8.
- 562.** Діагоналі ромба дорівнюють 10 см і 24 см. Знайдіть периметр чотирикутника, вершини якого є серединами сторін ромба, і визначте вид цього чотирикутника.



Для тих, хто хоче знати більше

## §17

# Векторний метод

### 17.1. Розв'язування геометричних задач векторним методом

Використання векторів і векторних співвідношень під час розв'язування задач у деяких випадках дозволяє значно спростити міркування і розрахунки.

Застосування *векторного методу* передбачає *три основні етапи*.

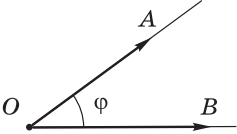
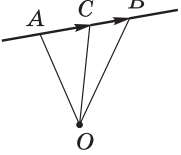
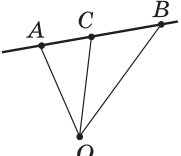
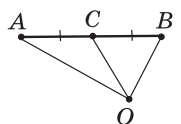
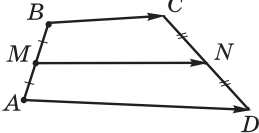
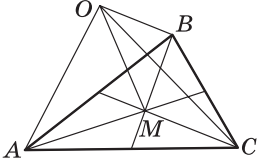
1) Сформулювати задачу мовою векторів. Для цього необхідно розглянути деякі з даних відрізків як вектори і скласти відповідні до умови задачі векторні рівності.

2) Перетворити складені рівності на основі відомих векторних співвідношень.

3) Перекласти отримані результати мовою геометрії.

Для подання геометричних співвідношень мовою векторів і навпаки зручно користуватися такою таблицею.

№ з/п	Рисунок	Твердження мовою геометрії	Твердження мовою векторів
1		Точки $A$ і $B$ збігаються	$\overline{AB} = \vec{0}$ або $\overline{OA} = \overline{OB}$ , де $O$ — деяка точка площини
2		$AB \parallel CD$	$\overline{AB} = k\overline{CD}$ , $k \neq 0$ (прямі $AB$ і $CD$ не збігаються)
3		$AB \perp CD$	$\overline{AB} \cdot \overline{CD} = 0$
4		$AB = CD = a$	$\overline{AB}^2 = \overline{CD}^2 = a^2$

№ з/п	Рисунок	Твердження мовою геометрії	Твердження мовою векторів
5		$\angle AOB = \varphi$	$\cos \varphi = \frac{\overline{OA} \cdot \overline{OB}}{ \overline{OA}  \cdot  \overline{OB} }$
6		Точка $C$ лежить на прямій $AB$	$\overline{AB} = k \overline{AC} \text{ або}$ $\overline{OC} = p \overline{OA} + (1 - p) \overline{OB},$ де $O$ — деяка точка площини
7		$C \in AB,$ $AC : CB = m : n$	$\overline{AC} = \frac{m}{n} \overline{CB} \text{ або}$ $\overline{OC} = \frac{n}{m+n} \overline{OA} + \frac{m}{m+n} \overline{OB},$ де $O$ — деяка точка площини
8		$C$ — середина $AB$	$\overline{AC} = \overline{CB} \text{ або}$ $\overline{OC} = \frac{1}{2} (\overline{OA} + \overline{OB}),$ де $O$ — деяка точка площини
9		$M$ — середина $AB,$ $N$ — середина $CD$	$\overline{MN} = \frac{1}{2} (\overline{AD} + \overline{BC})$
10		$M$ — точка перетину медіан (центроїд) трикутника $ABC$	$\overline{OM} = \frac{1}{3} (\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC}),$ де $O$ — деяка точка площини



Іноді векторний метод використовують у поєднанні з методом координат. У цих випадках подані векторні співвідношення доцільно записувати в координатній формі.

## 17.2. Розкладення вектора за двома неколінеарними векторами

У деяких задачах доцільно вибрати на площині неколінеарні вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  та виразити через них інші вектори, що розглядаються. Доведемо існування і єдиність такого подання.

### Теорема (про розкладення вектора за двома неколінеарними векторами)

Якщо  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  — неколінеарні вектори, то для будь-якого вектора  $\vec{c}$  існує розкладення  $\vec{c} = t\vec{a} + n\vec{b}$ , де  $t, n$  — деякі числа, причому таке розкладення єдине.

### Доведення

□ Нехай  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  — дані вектори,  $\vec{c} = \overline{AB}$  (рис. 113, а). Проведемо через точки  $A$  і  $B$  прямі, паралельні векторам  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  відповідно. Оскільки дані вектори неколінеарні, то ці прямі перетинаються в певній точці  $C$ , причому  $\overline{AC} + \overline{CB} = \overline{AB}$ .

Оскільки за побудовою вектори  $\overline{AC}$  і  $\overline{CB}$  колінеарні векторам  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  відповідно, то існують числа  $t$  і  $n$  такі, що  $\overline{AC} = t\vec{a}$  і  $\overline{CB} = n\vec{b}$ . Отже,  $\vec{c} = t\vec{a} + n\vec{b}$ .

Доведемо від супротивного єдиність такого розкладення. Нехай існує розкладення  $\vec{c} = t_1\vec{a} + n_1\vec{b}$ , причому справджується хоча б одна

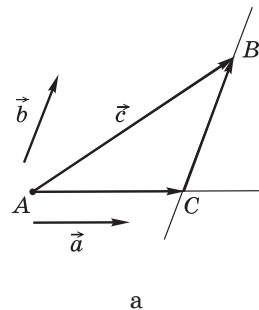


Рис. 113. Розкладення вектора  $\vec{c}$  за векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  [Див. також с. 176]

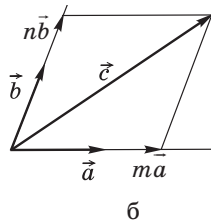


Рис. 113. [Закінчення]

з умов  $m_1 \neq m$  або  $n_1 \neq n$ . Припустимо, наприклад, що  $m_1 \neq m$ . Прирівнюючи два розкладення вектора  $\vec{c}$ , маємо:

$$m\vec{a} + n\vec{b} = m_1\vec{a} + n_1\vec{b}, \quad (m - m_1)\vec{a} = (n_1 - n)\vec{b}.$$

Оскільки  $m_1 \neq m$ , то  $\vec{a} = \frac{n_1 - n}{m - m_1}\vec{b}$ , тобто вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  колінеарні, що суперечить умові теореми. Отже, розкладення  $\vec{c} = m\vec{a} + n\vec{b}$  єдине. ■

На практиці для розкладення вектора за двома неколінеарними векторами можна використовувати також правило паралелограма. Для цього дані вектори  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  і  $\vec{c}$  відкладають від однієї точки (рис. 113, б) і проводять через кінець вектора  $\vec{c}$  прямі, паралельні векторам  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ .



**Задача**

Точка перетину відрізків, що сполучають середини протилежних сторін чотирикутника, збігається з точкою перетину його діагоналей. Доведіть, що даний чотирикутник — паралелограм.

**Розв'язання**

Нехай діагоналі чотирикутника  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$ , точки  $M$  і  $N$  — середини сторін  $AD$  і  $BC$  відповідно (рис. 114). Позначимо  $\vec{a} = \overrightarrow{OB}$ ,  $\vec{b} = \overrightarrow{OC}$ . Тоді  $\overrightarrow{ON} = \frac{1}{2}(\vec{a} + \vec{b})$ . Оскільки  $\overrightarrow{OD} \uparrow \downarrow \vec{a}$ ,  $\overrightarrow{OA} \uparrow \downarrow \vec{b}$ , то  $\overrightarrow{OD} = m\vec{a}$ ,  $\overrightarrow{OA} = n\vec{b}$ , отже,  $\overrightarrow{OM} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{OD} + \overrightarrow{OA}) = \frac{1}{2}(m\vec{a} + n\vec{b})$ , де  $m$  і  $n$  — деякі числа.

За умовою задачі вектори  $\overrightarrow{OM}$  і  $\overrightarrow{ON}$  колінеарні, отже,  $\overrightarrow{OM} = k\overrightarrow{ON}$ , або  $\frac{1}{2}(m\vec{a} + n\vec{b}) = \frac{k}{2}(\vec{a} + \vec{b})$ . Звідси  $(k - m)\vec{a} = (k - n)\vec{b}$ . Але оскільки вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  неколінеарні, рівність можлива лише за умови  $k = m = n$ . Отже,  $\overrightarrow{BC} = \vec{b} - \vec{a}$ ,  $\overrightarrow{AD} = k(\vec{b} - \vec{a})$ , тобто вектори  $\overrightarrow{BC}$  і  $\overrightarrow{AD}$  колінеарні, звідки  $BC \parallel AD$ . Аналогічно можна довести, що  $AB \parallel CD$ . Таким чином,  $ABCD$  — паралелограм.

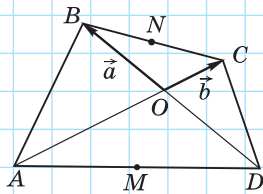


Рис. 114



У прямокутній системі координат особливу роль відіграє розкладення вектора за векторами  $\vec{e}_1(1; 0)$  і  $\vec{e}_2(0; 1)$  — векторами одиничної довжини, співнапрямленими з осями координат (рис. 115). Такі вектори називають **координатними векторами**, або **ортами**. Коефіцієнти розкладання вектора  $\vec{a}(a_1; a_2)$  за векторами  $\vec{e}_1$  і  $\vec{e}_2$  дорівнюють координатам вектора  $\vec{a}$ . Справді,

$$\vec{a} \cdot \vec{e}_1 = a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot 0 = a_1, \quad \vec{a} \cdot \vec{e}_2 = a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 1 = a_2.$$

Отже,  $\vec{a} = a_1 \vec{e}_1 + a_2 \vec{e}_2$ .

Іноді, зокрема у фізичних задачах, розглядають поняття **проекції вектора на вісь**. Для побудови **векторної проекції** вектора  $\overline{AB}$  на вісь  $l$  через кінці даного вектора проводять перпендикуляри  $AA_1 \perp l$ ,  $BB_1 \perp l$  (рис. 116). Тоді вектор  $\overline{A_1B_1}$  є проекцією вектора  $\overline{AB}$  на вісь  $l$ . **Скалярною проекцією** вектора  $\overline{AB}$  на вісь  $l$  є число  $|\overline{A_1B_1}|$ , якщо  $\overline{A_1B_1} \uparrow \uparrow l$  (рис. 116, а), або число  $-|\overline{A_1B_1}|$ , якщо  $\overline{A_1B_1} \uparrow \downarrow l$  (рис. 116, б).

### 17.3. Застосування колінеарності векторів

Властивості й ознаки колінеарних векторів під час розв'язування задач найчастіше використовуються в таких випадках:

1) **для доведення паралельності прямих** (променів, відрізків) — у цьому випадку треба довести, що вектори, які лежать на цих прямих, колінеарні, і ці прямі не мають спільних точок;

2) **для доведення належності трьох точок одній прямій** — у цьому випадку користуються тим, що належність точки  $C$  прямій  $AB$  впливає з колінеарності векторів  $\overline{AB}$  і  $\overline{AC}$ ;

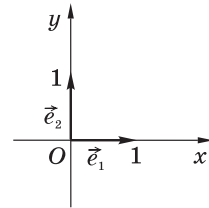
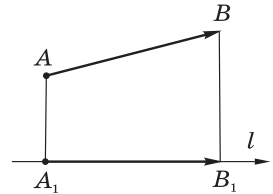
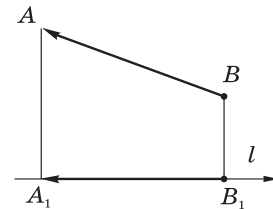


Рис. 115



а



б

Рис. 116. Проекція вектора на вісь

3) для доведення того, що деяка точка ділить даний відрізок у заданому відношенні (зокрема, є його серединою) — у цьому випадку застосовують відповідні векторні рівності.

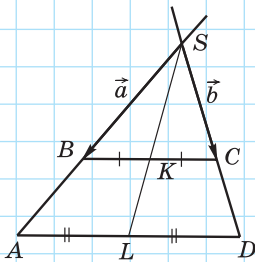


Рис. 117

**Задача**

Доведіть, що точка перетину продовжень бічних сторін трапеції і середини її основ лежать на одній прямій.

**Розв'язання**

Нехай у трапеції  $ABCD$  точки  $K$  і  $L$  — середини основ  $BC$  і  $AD$  відповідно,  $S$  — точка перетину прямих  $AB$  і  $CD$  (рис. 117). Доведемо, що вектори  $\overrightarrow{SK}$  і  $\overrightarrow{SL}$  колінеарні.

Нехай  $\vec{a} = \overrightarrow{SB}$  і  $\vec{b} = \overrightarrow{SC}$ . Тоді  $\overrightarrow{SK} = \frac{1}{2}(\vec{a} + \vec{b})$ . Оскільки  $AD \parallel BC$ , то  $\triangle SAD \sim \triangle SBC$  за двома кутами, отже,

$$\frac{SA}{SB} = \frac{SD}{SC} = k, \text{ звідки } \overrightarrow{SA} = k\vec{a}, \overrightarrow{SD} = k\vec{b}. \text{ Маємо:}$$

$$\overrightarrow{SL} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{SA} + \overrightarrow{SD}) = \frac{1}{2}(k\vec{a} + k\vec{b}) = k \cdot \frac{1}{2}(\vec{a} + \vec{b}) = k\overrightarrow{SK},$$

тобто вектори  $\overrightarrow{SK}$  і  $\overrightarrow{SL}$  колінеарні. Це означає, що точки  $S$ ,  $K$  і  $L$  лежать на одній прямій.

## 17.4. Застосування скалярного добутку векторів

Скалярний добуток векторів доцільно використовувати в таких випадках:

1) для доведення перпендикулярності прямих (променів, відрізків) — у цьому випадку достатньо показати, що скалярний добуток відповідних векторів дорівнює нулю;

2) для знаходження довжини відрізка — для цього вектор  $\vec{c}$ , який зображується шуканим відрізком, розкладають за двома неколінеарними векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  (при цьому  $|\vec{a}|$ ,  $|\vec{b}|$  і  $\angle(\vec{a}, \vec{b})$  мають бути відомі) і знаходять  $\vec{c}^2 = |\vec{c}|^2$ ;

3) для знаходження величини кута — у цьому випадку вектори, якими задано шуканий або даний кут, розкладають за двома неколінеарними векторами, довжини або відношення довжин яких відомі, і обчислюють косинус шуканого кута.

### Задача

Знайдіть кут між бічними сторонами рівнобедреного трикутника, якщо медіани, проведені до його бічних сторін, взаємно перпендикулярні.

### Розв'язання

Нехай дано рівнобедрений трикутник  $ABC$  з основою  $AC$ ;  $AE$  і  $CD$  — медіани,  $AE \perp CD$  (рис. 118). Нехай  $\vec{a} = \vec{BD}$  і  $\vec{b} = \vec{BE}$ . Тоді  $\vec{CD} = \vec{a} - 2\vec{b}$ ,  $\vec{AE} = \vec{b} - 2\vec{a}$ . Оскільки за умовою  $AE \perp CD$ , то  $\vec{AE} \cdot \vec{CD} = 0$ , тобто  $(\vec{a} - 2\vec{b})(\vec{b} - 2\vec{a}) = 0$ .

Ураховуючи, що  $|\vec{a}| = |\vec{b}|$  і  $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos B$  маємо:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} - 2\vec{a}^2 - 2\vec{b}^2 + 4\vec{a} \cdot \vec{b} = 0, \quad 5\vec{a} \cdot \vec{b} - 2\vec{a}^2 - 2\vec{b}^2 = 0,$$

$$5|\vec{a}|^2 \cos B - 4|\vec{a}|^2 = 0, \quad \cos B = \frac{4}{5}.$$

Отже,  $\angle B \approx 37^\circ$ .

Відповідь:  $\approx 37^\circ$ .

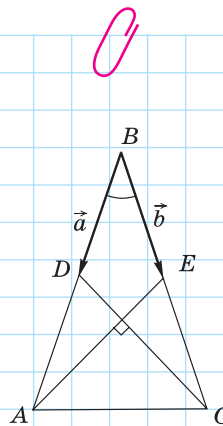


Рис. 118

## Запитання і задачі



### Усні вправи

**563.** Дано неколінеарні вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ . Чи є рівними вектори  $3\vec{a} + 7\vec{b}$  і  $7\vec{b} + 3\vec{a}$ ;  $\vec{a} - 2\vec{b}$  і  $2\vec{b} - \vec{a}$ ? Чи є серед цих векторів колінеарні?

**564.** Назвіть:

- координати вектора  $\vec{a}$ , якщо  $\vec{a} = -3\vec{e}_1 + 8\vec{e}_2$ ;
- коефіцієнти  $m$  і  $n$  розкладення  $\vec{a} = m\vec{e}_1 + n\vec{e}_2$ , якщо  $\vec{a}(1; -2)$ .



## Письмові вправи

### Рівень А

- 565.** Доведіть векторним методом властивості середньої лінії трапеції.
- 566.** Доведіть векторним методом властивості середньої лінії трикутника.
- 567.** Доведіть векторним методом, що діагоналі ромба перпендикулярні.
- 568.** Доведіть векторним методом, що діагоналі прямокутника рівні.

### Рівень Б

- 569.** Доведіть векторним методом, що сума квадратів діагоналей паралелограма дорівнює сумі квадратів усіх його сторін.
- 570.** Доведіть векторним методом, що коли дві медіани трикутника рівні, то цей трикутник рівнобедрений.
- 571.** На стороні  $AD$  і діагоналі  $AC$  паралелограма  $ABCD$  позначено відповідно точки  $M$  і  $N$  так, що  $AM = \frac{1}{6}AD$ ,  $AN = \frac{1}{7}AC$ . Доведіть, що точки  $M$ ,  $N$  і  $B$  лежать на одній прямій.
- 572.** У прямокутному трикутнику  $ABC$  ( $\angle B = 90^\circ$ ) на катеті  $BC$  позначено точку  $K$  так, що  $CK : KB = 2 : 1$ . Доведіть, що середина медіани  $BM$  лежить на відрізку  $AK$ .

### Рівень В

- 573.** У трикутнику  $ABC$  (рис. 119)  $AB = BC$ ,  $BD$  — висота,  $DK \perp BC$ ,  $DM = MK$ . Доведіть, що  $BM \perp AK$ .
- 574.** Доведіть, що середини основ трапеції і точка перетину її діагоналей лежать на одній прямій.
- 575.** Відрізок  $BD$  — медіана трикутника  $ABC$ ,  $\angle DBC = 90^\circ$ ,  $BD = \frac{\sqrt{3}}{4}AB$ . Знайдіть кут  $ABD$ .
- 576.** Знайдіть довжину медіани  $AM$  трикутника  $ABC$ , якщо  $AB = 10$ ,  $AC = 6$ ,  $\angle BAC = 60^\circ$ .

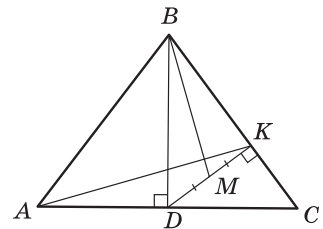


Рис. 119



## Повторення перед вивченням § 18

### Теоретичний матеріал

- вписане й описане кола трикутника;
- вписані й описані багатокутники;
- вписані кути.

7 клас, § 23

8 клас, п. 15.1

8 клас, § 7

### Задачі

**577.** Точка  $O$  — центр кола, описаного навколо рівностороннього трикутника  $ABC$ . Знайдіть:

- кути  $AOB$ ,  $BOC$  і  $AOC$ ;
- радіус кола, якщо сторона трикутника дорівнює  $4\sqrt{3}$  см.

**578.** Точка  $O$  — центр кола, вписаного в рівносторонній трикутник  $ABC$ . Знайдіть:

- кути між радіусами, проведеними в точки дотику;
- радіус кола, якщо сторона трикутника дорівнює  $4\sqrt{3}$  см.



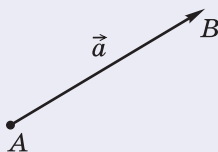
## Онлайн-тестування для підготовки до контрольної роботи № 4

### Задачі для підготовки до контрольної роботи № 4

- Дано точки  $A(2; -5)$  і  $B(8; 3)$ . Знайдіть координати і довжину вектора  $\overline{AB}$ .
- Дано вектори  $\vec{a}(0; 4)$  і  $\vec{b}(-3; -2)$ . Знайдіть вектор  $\vec{c} = 2\vec{a} - \vec{b}$ .
- У прямокутнику  $ABCD$  виразіть вектори  $\overline{AC}$  і  $\overline{BD}$  через вектори  $\vec{a} = \overline{AB}$  і  $\vec{b} = \overline{BC}$ .
- Знайдіть значення  $x$ , за якого вектори  $\vec{a}(x; 2)$  і  $\vec{b}(-3; 6)$ :
  - колінеарні;
  - перпендикулярні.
- У рівносторонньому трикутнику  $ABC$  проведено медіани  $AM$  і  $BN$ . Побудуйте вектори  $\overline{AB} + \overline{AC}$ ,  $\overline{AM} - \overline{AN}$ ,  $\frac{2}{3}\overline{AM} - \frac{1}{2}\overline{AC}$ .
- Визначте вид чотирикутника  $ABCD$ , якщо  $A(0; -2)$ ,  $B(0; 1)$ ,  $C(2; 2)$ ,  $D(4; 0)$ .

## Підсумки розділу IV

### ВЕКТОРИ



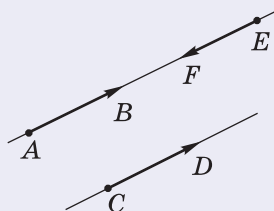
$$\vec{a} = \overline{AB}$$

**Вектором** називається напрямлений відрізок, тобто відрізок, для якого вказано, яка точка є його початком, а яка — кінцем.

**Координатами вектора**  $\vec{a}$  з початком  $A(x_1; y_1)$  і кінцем  $B(x_2; y_2)$  називають числа  $a_1 = x_2 - x_1$  і  $a_2 = y_2 - y_1$ :  $\vec{a}(a_1; a_2)$ .

**Довжина вектора**  $\vec{a}(a_1; a_2)$  обчислюється за формулою

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$

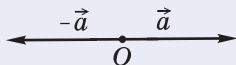


$$\overline{AB} \uparrow \uparrow \overline{CD}, \overline{AB} \uparrow \downarrow \overline{EF}$$

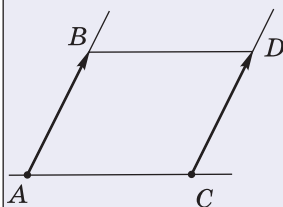
Ненульові вектори називаються **колінеарними**, якщо вони лежать на одній прямій або на паралельних прямих.

Вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{CD}$  називаються **співнапрямленими** (або **однаково напрямленими**), якщо промені  $AB$  і  $CD$  співнапрямлені.

Вектори  $\overline{AB}$  і  $\overline{EF}$  називаються **протилежно напрямленими**, якщо промені  $AB$  і  $EF$  протилежно напрямлені



**Протилежними векторами** називаються два протилежно напрямлені вектори однакової довжини



Два вектори називаються **рівними**, якщо вони суміщаються паралельним перенесенням.

**Властивості й ознаки рівних векторів:**

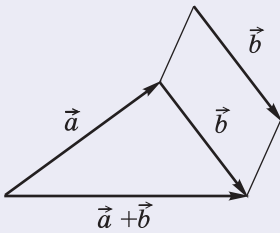
- Рівні вектори співнапрямлені та мають рівні довжини.
- Якщо вектори співнапрямлені і мають рівні довжини, то вони рівні.
- Від будь-якої точки можна відкласти вектор, що дорівнює даному, і притому тільки один.
- Рівні вектори мають рівні координати, і навпаки: якщо у векторів відповідні координати рівні, то ці вектори рівні



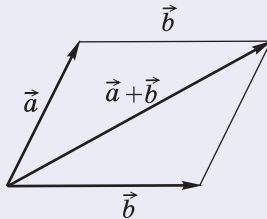
**ДІЇ З ВЕКТОРАМИ****Додавання векторів**

Сумою векторів  $\vec{a}(a_1; a_2)$  і  $\vec{b}(b_1; b_2)$  називається вектор  $\vec{c}(c_1; c_2)$  з координатами  $c_1 = a_1 + b_1$ ,  $c_2 = a_2 + b_2$ , тобто

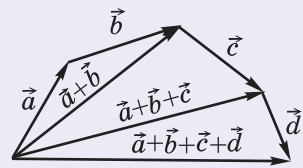
$$\overline{(a_1; a_2)} + \overline{(b_1; b_2)} = \overline{(a_1 + b_1; a_2 + b_2)}$$

**Побудова суми векторів**

Правило трикутника



Правило паралелограма

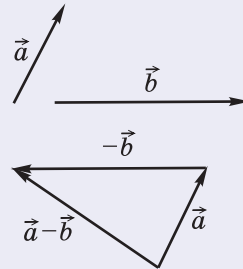
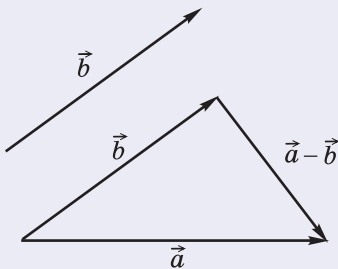


Правило многокутника

**Віднімання векторів**

Різницею векторів  $\vec{a}(a_1; a_2)$  і  $\vec{b}(b_1; b_2)$  називається такий вектор  $\vec{c}(c_1; c_2)$ , який у сумі з вектором  $\vec{b}$  дає вектор  $\vec{a}$ , тобто  $\vec{b} + \vec{c} = \vec{a}$ :

$$\overline{(c_1; c_2)} = \overline{(a_1; a_2)} - \overline{(b_1; b_2)} = \overline{(a_1 - b_1; a_2 - b_2)}$$

**Побудова різниці векторів**

<b>Множення вектора на число</b>	
<p>якщо <math>k &gt; 0</math>, то вектор <math>k\vec{a}</math> співнапрямлений з вектором <math>\vec{a}</math></p> <p>якщо <math>k &lt; 0</math>, то вектор <math>k\vec{a}</math> протилежно напрямлений з вектором <math>\vec{a}</math></p>	<p>Добутком вектора <math>\vec{a}(a_1; a_2)</math> на число <math>k</math> (або добутком числа <math>k</math> на вектор <math>\vec{a}</math>) називається вектор <math>k\vec{a} = (ka_1; ka_2)</math>:</p> $k(\vec{a}_1; \vec{a}_2) = (ka_1; ka_2), \quad  k\vec{a}  =  k   \vec{a} $ <p>Якщо <math>\vec{a}</math> і <math>\vec{b}</math> — колінеарні вектори, то існує число <math>k</math> таке, що <math>\vec{b} = k\vec{a}</math>, і навпаки: якщо для ненульових векторів <math>\vec{a}</math> і <math>\vec{b}</math> справджується рівність <math>\vec{b} = k\vec{a}</math>, то вектори <math>\vec{a}</math> і <math>\vec{b}</math> колінеарні</p> <p>У колінеарних векторів відповідні координати пропорційні, і навпаки: якщо у двох векторів відповідні координати пропорційні, то ці вектори колінеарні</p>
<b>Скалярний добуток векторів</b>	
<p><math>\angle(\vec{a}, \vec{b}) = \angle BAC</math></p>	<p>Скалярним добутком <math>\vec{a} \cdot \vec{b}</math> векторів <math>\vec{a}(a_1; a_2)</math> і <math>\vec{b}(b_1; b_2)</math> називається число <math>\vec{a} \cdot \vec{b} = a_1b_1 + a_2b_2</math>.</p> <p>Скалярний добуток <math>\vec{a} \cdot \vec{a}</math> називають <b>скалярним квадратом</b>: <math>\vec{a} \cdot \vec{a} = a_1^2 + a_2^2 =  \vec{a} ^2</math>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Скалярний добуток векторів дорівнює добутку їх довжин на косинус кута між ними:             <math display="block">\vec{a} \cdot \vec{b} =  \vec{a}  \cdot  \vec{b}  \cdot \cos \angle(\vec{a}, \vec{b}).</math> </li> <li>Якщо <math>\vec{a}</math> і <math>\vec{b}</math> — ненульові вектори, то             <math display="block">\cos \angle(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{ \vec{a}  \cdot  \vec{b} }.</math> </li> <li><b>Властивість і ознака перпендикулярних векторів:</b> якщо <math>\vec{a} \perp \vec{b}</math>, то <math>\vec{a} \cdot \vec{b} = 0</math>, і навпаки: якщо для ненульових векторів <math>\vec{a}</math> і <math>\vec{b}</math> справджується рівність <math>\vec{a} \cdot \vec{b} = 0</math>, то <math>\vec{a} \perp \vec{b}</math></li> </ul>



## Контрольні запитання до розділу IV

1. Дайте означення вектора. Як зображають вектори?
2. Що таке довжина вектора? Який вектор називають нульовим?
3. Які вектори називають співнапрямленими; протилежно напрямленими; колінеарними?
4. Дайте означення рівних векторів.
5. Як визначити координати вектора? Як пов'язані координати рівних векторів?
6. Дайте означення суми двох векторів. Опишіть способи побудови вектора-суми.
7. Дайте означення різниці двох векторів. Опишіть способи побудови вектора-різниці.
8. Дайте означення добутку вектора на число. Сформулюйте теорему про довжину і напрям вектора  $k\vec{a}$ .
9. Дайте означення скалярного добутку векторів. Як визначається кут між векторами?
10. Сформулюйте теорему про скалярний добуток векторів. Сформулюйте властивість і ознаку перпендикулярних векторів.



## Додаткові задачі до розділу IV

- 579.** Діагоналі чотирикутника  $ABCD$  перетинаються в точці  $O$ , причому  $\vec{OA} + \vec{OC} = \vec{OB} + \vec{OD}$ . Доведіть, що  $ABCD$  — паралелограм.
- 580.** У прямокутнику  $ABCD$   $AB = 8$  см,  $BC = 15$  см,  $O$  — точка перетину діагоналей. Знайдіть  $|\vec{AB} + \vec{AD} - \vec{DC} - \vec{OD}|$ .
- 581 (опорна).** Гомотетією з центром  $O$  та коефіцієнтом  $k \neq 0$  називається таке перетворення фігури  $F$  у фігуру  $F'$ , при якому кожна точка  $X$  фігури  $F$  переходить у точку  $X'$  фігури  $F'$  так, що  $\vec{OX'} = k \cdot \vec{OX}$ .
- а) Доведіть, що подане означення гомотетії, якщо  $k > 0$ , збігається із означенням, наведеним у п. 12.1 (с. 118);
  - б) Доведіть, що при  $k < 0$  гомотетія є перетворенням подібності.
- 582.** Доведіть, що точки  $A(8; 0)$ ,  $B(4; 1)$ ,  $C(0; 2)$  лежать на одній прямій. Яка з цих точок лежить між двома іншими?
- 583.** Дано вектор  $\vec{a}(1; -2)$ . Знайдіть координати вектора  $\vec{b}$ , якщо  $\vec{a} \cdot \vec{b} = 10$ , а вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  колінеарні.
- 584.** Дано вектори  $\vec{a}(-1; -2)$  і  $\vec{b}(-2; 1)$ . Які кути утворюють ці вектори з вектором  $\vec{a} + \vec{b}$ ?

**585.** У ромбі  $ABCD$   $AB = 6$  см,  $\angle A = 120^\circ$ . Знайдіть скалярні добутки  $\overline{CB} \cdot \overline{CD}$ ,  $\overline{AC} \cdot \overline{AB}$  і  $\overline{AC} \cdot \overline{BD}$ .

**586.** Плавець перетинає Сіверський Донець у місці, де річка має ширину 50 м, за 1 хв 40 с. Швидкість течії дорівнює 1 м/с. Знайдіть:


- а) тангенс кута між вектором швидкості течії річки і вектором руху плавця (з урахуванням його знесення течією);  
б) швидкість руху плавця (модуль вектора швидкості руху плавця).


**587.** Доведіть векторну нерівність  $|\vec{a} - \vec{b}| \geq ||\vec{a}| - |\vec{b}||$ . У якому випадку має місце рівність?

### Задачі підвищеної складності

**588.** Дано довільний трикутник  $ABC$ . Доведіть, що вектор  $\frac{1}{|\overline{AB}|} \cdot \overline{AB} + \frac{1}{|\overline{AC}|} \cdot \overline{AC}$  напрямлений уздовж бісектриси кута  $A$ .

**589.** Дано  $n$ -кутник з рівними сторонами і рівними кутами. Доведіть, що сума  $n$  рівних за модулем векторів із початками у серединах сторін цього  $n$ -кутника, перпендикулярних до відповідних сторін і побудованих зовні многокутника, дорівнює нульовому вектору.


 **590.** Точка  $O$  — центр кола, описаного навколо трикутника  $ABC$ , а точка  $H$  задовольняє векторну рівність  $\overline{OH} = \overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC}$ . Доведіть, що  $H$  — ортоцентр трикутника  $ABC$ . Сформулюйте і доведіть обернене твердження (формулу Гамільтона).

 **591.** Доведіть, що в трикутнику  $ABC$  ортоцентр  $H$ , центроїд  $M$  і центр описаного кола  $O$  лежать на одній прямій (пряма Ейлера), причому  $MH = 2OM$ .

**592.** Точки  $A$ ,  $B$  і  $C$  задовольняють рівність  $AC^2 + BC^2 = \frac{1}{2} AB^2$ . Доведіть, що  $\overline{AC} + \overline{BC} = \vec{0}$ .

**593.** Знайдіть кути між радіусами кола  $OA$ ,  $OB$  і  $OC$ , якщо  $\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC} = \vec{0}$ .

**594.** Доведіть векторним методом, що сума квадратів діагоналей трапеції дорівнює сумі квадратів бічних сторін, доданих до подвоєного добутку основ.

 **595.** Точки  $M$ ,  $N$  і  $K$  лежать на сторонах  $AB$ ,  $BC$  і  $AC$  трикутника  $ABC$  відповідно. Доведіть, що прямі  $AN$ ,  $BK$  і  $CM$  перетинаються в одній точці тоді й тільки тоді, коли  $AM \cdot BN \cdot CK = BM \cdot CN \cdot AK$  (теорема Чеви).

**596.** Доведіть, що кут між прямими  $l_1$  і  $l_2$ , заданими рівняннями  $a_1x + b_1y + c_1 = 0$  і  $a_2x + b_2y + c_2 = 0$  відповідно, визначається за форму-

$$\text{лою } \cos \angle(l_1, l_2) = \frac{|a_1 a_2 + b_1 b_2|}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cdot \sqrt{a_2^2 + b_2^2}}.$$



## Історична довідка

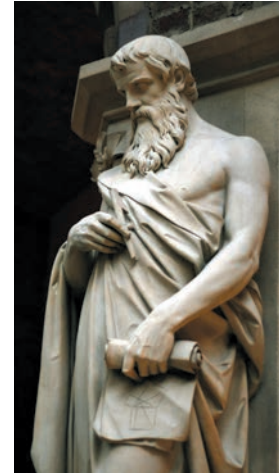
Інтерес до векторів і векторного методу виник у математиків у XIX ст. у зв'язку з потребами фізики й механіки. Але витоки числення з напрямленими відрізками знаходимо ще в далекій давнині, в роботах піфагорійців і геометричній теорії відношень Евдокса (408–355 рр. до н. е.). У геометричному численні, що його виклав Евклід, додавання і віднімання чисел зводилося до відповідних операцій з відрізками, а множення — до побудови прямокутника зі сторонами, довжини яких дорівнюють множникам.

У XIV–XVI ст. геометрична алгебра через обмеженість засобів дослідження майже не розвивалася. Однак у 1587 р. фламандський учений Симон Стевін (1548–1620), розглядаючи додавання двох сил у роботі «Початки статички», дійшов висновку, що для визначення рівнодійної слід скористатися так званим «паралелограмом сил». Для позначення сил Стевін першим увів відрізки зі стрілками. Значно пізніше, у 1803 р., французький математик Луї Пуансо (1777–1859) розробив загальну теорію векторів, узагальнивши дослідження попередників.

Подальший розвиток векторного методу пов'язаний зі становленням аналітичної геометрії і теорії геометричних перетворень. Вектор  $\overline{AB}$  стали розглядати як паралельне перенесення, яке задано початковою точкою  $A$  та її образом  $B$ . Згодом відповідний розділ математики отримав назву «векторна алгебра».



«Сухопутна»  
яхта Стевіна



Статуя на честь  
Евкліда у Музеї  
природничої істо-  
рії Оксфордського  
університету



Пам'ятник  
Симону Стевіну  
в Брюгге (Бельгія)



## Математичні олімпіади

### В'ячеслав Андрійович Ясінський (1957–2015)



В'ячеслав Андрійович Ясінський народився у 1957 році в селі Чернівці Могилів-Подільського району Вінницької області. Після школи та закінчення професійно-технічного училища він отримав спеціальність тракторист-комбайнер. Але душа юнака прагнула до занять математикою. У 1975 році В'ячеслав вступив на фізико-математичний факультет Вінницького державного педагогічного інституту імені Миколи Островського, який закінчив із відзнакою в 1979 році.

Після цього В. А. Ясінський працював у різних школах Вінниччини та у Вінницькому педагогічному інституті. З 1991 року В. А. Ясінський був членом журі, пізніше — експертом-консультантом, заступником голови журі Всеукраїнської олімпіади юних математиків, а з 1998 року — членом журі й експертом-консультантом Всеукраїнського турніру юних математиків імені професора М. Й. Ядренка. Також він працював і в складі журі Всеукраїнських олімпіад для студентів математичних спеціальностей педагогічних університетів, очолював математичні олімпіади рідної Вінниччини. Авторитет В'ячеслава Андрійовича був безмежним, його неперевершені професійні якості приваблювали математично обдаровану молодь. Варто відзначити, що науково-методичне забезпечення українських математичних змагань для обдарованих учнів значною мірою визначається творчістю В. А. Ясінського як автора яскравих задач. Серед вітчизняних авторів олімпіадних задач В'ячеслав Андрійович був безсумнівним лідером, визнаним далеко за межами України — усім математичним олімпіадним світом. Його задачі двічі були представлені на Міжнародних математичних олімпіадах (у 1998 і 2002 роках). Задачі Ясінського неодноразово пропонувалися на «Турнірі чемпіонів», що традиційно кожного року проходить у місті Вінниця для школярів з усіх куточків України, забезпечуючи високий рівень його завдань.

Наведемо одну з олімпіадних задач В'ячеслава Андрійовича, в ході розв'язування якої варто застосувати методи осьової симетрії та повороту.

Дано трапецію  $ABCD$ , у якій  $AB = BC = CD = \frac{1}{2} AD$ . Доведіть, що для довільної точки  $X$  площини виконується нерівність  $XD - XA - XB \leq CD$ .

### Розв'язання

Нехай точка  $O$  — середина основи  $AD$  даної трапеції (рис. 120). Побудуємо трапецію  $AFED$ , симетричну трапеції  $ABCD$  відносно прямої  $AD$ , і виконаємо поворот навколо точки  $D$  на кут  $60^\circ$  проти годинникової стрілки. Тоді точка  $B$  перейде в точку  $F$ , а точка  $X$  — у деяку точку  $X'$ . Трикутник  $DXX'$  рівносторонній,  $XB = X'F$ ,  $CD = AF$ .

Маємо:  $XA + XB + CD = XA + FX' + AF \geq X'X = DX$ .

Лаконічне і яскраве доведення нерівності демонструє красу методу геометричних перетворень і може надихнути вас на пошук свого оригінального способу розв'язання цієї задачі.

В. А. Ясінський не лише вмів створювати оригінальні задачі всіх рівнів складності, але й сам блискуче розв'язував олімпіадні задачі. Ще в шкільні роки він з успіхом брав участь у математичних змаганнях різних рівнів, а пізніше був неодноразовим переможцем авторитетних конкурсів для вчителів із розв'язування задач. В'ячеслав Андрійович безпосередньо підготував чимало переможців олімпіад. Зокрема, його вихованець є чотириразовим переможцем Міжнародних математичних олімпіад.

Доцент Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського В. А. Ясінський є автором багатьох книг та статей, присвячених підготовці учнів і студентів до математичних змагань. Зокрема, багато математичних посібників В'ячеслава Андрійовича стосуються геометрії, тих розділів, які вивчаються в 9 класі. Так, однією з останніх праць майстра стала книжка «Геометричні перетворення в задачах математичних олімпіад».

В. А. Ясінський був членом редколегії журналу «У світі математики» з моменту його заснування в 1995 році, одним із ведучих розділу розв'язування задач журналу «Математика в школі».

За вагомий внесок у розвиток обдарованої молоді В. А. Ясінський у 2001 році отримав звання «Заслужений вчитель України». Мешканці Вінниці вшанували його званням «Людина року-2000» в номінації «Працівник освіти». Життєвий шлях В'ячеслава Андрійовича — це справжній взірець гідності, творчого горіння, вміння знаходити таланти та сприяти їхньому розквіту. В. А. Ясінський — інтелігентна, щира та чуйна людина, яка була талановитою у всьому — від блискучої розповіді анекдоту до найкропіткіших математичних досліджень. Видатний композитор математичних задач, незрівнянний викладач В'ячеслав Ясінський є справжньою гордістю України.

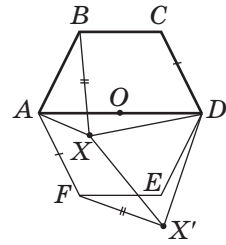


Рис. 120

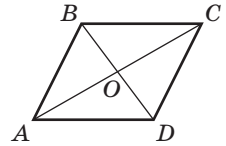


## Готуємось до ДПА

### Тест 4

Виберіть одну правильну, на вашу думку, відповідь.

- Знайдіть довжину вектора  $-\frac{1}{3}\vec{a}$ , якщо  $|\vec{a}|=6$ .  
**А** -2                      **Б** 2                      **В** -18                      **Г** 18
- Знайдіть скалярний добуток векторів  $\vec{a}(2;-3)$  і  $\vec{b}(-3;-4)$ .  
**А** -3                      **Б** -18                      **В** -72                      **Г** 6
- Закінчіть речення так, щоб утворилося правильне твердження.  
 Ненульові колінеарні вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  можуть зображатися двома сторонами...  
**А** рівностороннього трикутника.                      **В** квадрата.  
**Б** гострого кута.                      **Г** прямокутного трикутника.
- На рисунку зображено паралелограм  $ABCD$ . Знайдіть вектор-суму  $\overline{AB} + \overline{BC}$ .  
**А**  $\overline{AC}$                       **Б**  $\overline{BD}$                       **В**  $\overline{DB}$                       **Г**  $\overline{CA}$
- Знайдіть довжину вектора  $\overline{AB}$ , якщо  $A(0;2)$ ,  $B(-4;5)$   
**А** 3                      **Б** 10                      **В** 2                      **Г** 5
- Знайдіть вектор  $\frac{1}{2}\vec{a} - \vec{b}$ , якщо  $\vec{a}(-6;4)$ ,  $\vec{b}(-2;-3)$ .  
**А**  $\overline{(-1;5)}$                       **Б**  $\overline{(-4;-1)}$                       **В**  $\overline{(-1;7)}$                       **Г**  $\overline{(-5;5)}$
- Дано одиничні взаємно перпендикулярні вектори  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$ . Знайдіть  $(\vec{a} - 3\vec{b})(\vec{a} + \vec{b})$ .  
**А** -2                      **Б** -1                      **В** 0                      **Г** 1
- Серед наведених тверджень укажіть те, яке справджується для будь-яких векторів  $\vec{a}$  і  $\vec{b}$  та будь-якого числа  $k$ .  
**А**  $|\vec{a} - \vec{b}| < |\vec{a}| + |\vec{b}|$                       **В**  $|k\vec{a}| = |k| \cdot |\vec{a}|$   
**Б**  $\vec{a} \cdot \vec{b} < |\vec{a}| \cdot |\vec{b}|$                       **Г**  $\vec{a}^2 < |\vec{a}|^2$



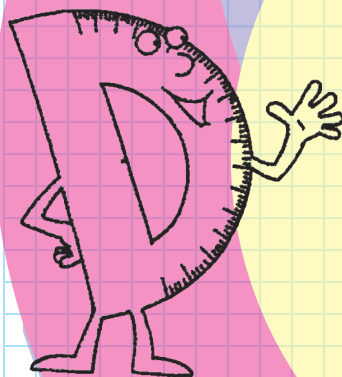


## Розділ V

# Правильні многокутники. Довжина кола. Площа круга

§ 18. Вписане й описане кола правильного многокутника

§ 19. Довжина кола і площа круга



Геометрія — наше велике творіння, яке нас самих захоплює.

*Ле Корбюзьє, французький архітектор*

Фігури, що мають рівні сторони та кути, здавна зачаровували людину досконалістю форми і таємничістю, яка завжди супроводжує досконалість. Такі фігури обожнювали, приписуючи їм магічні та навіть цілющі властивості. Многокутники з рівними сторонами й кутами прикрашали фамільні герби середньовічних можновладців, їх обирали символами таємних товариств, а дослідженню властивостей цих многокутників присвячували свої роботи найвидатніші математики минулого.

Вивчення правильних многокутників нерозривно пов'язане зі знаходженням довжини кола й площі круга. Недарма однією з класичних задач геометрії вважається задача про квадратуру круга — побудова квадрата, площа якого дорівнює площі даного круга. І хоча неможливість такої побудови за допомогою циркуля й лінійки вже давно доведено, вираз «квадратура круга» і сьогодні вживається для характеристики вкрай складних задач, що не мають розв'язку.

Згодом, розглядаючи фігури в просторі, ви познайомитеся з тривимірним аналогом правильних многокутників — правильними многогранниками.



## § 18

# Вписане й описане кола правильного многокутника

### 18.1. Означення правильного многокутника. Існування вписаного й описаного кіл

Ви вже неодноразово зустрічалися з многокутниками, в яких усі сторони рівні, і з многокутниками, в яких усі кути рівні. Якщо обидві ці властивості многокутник має одночасно, такий многокутник є правильним.

#### Означення

**Правильним многокутником** називається опуклий многокутник, у якому всі сторони рівні й усі кути рівні.

Уже відомими вам видами правильних многокутників є рівносторонній трикутник (рис. 121, а) і квадрат (рис. 121, б). На рис. 121 зображено також правильний п'ятикутник (рис. 121, в) і правильний шестикутник (рис. 121, г).

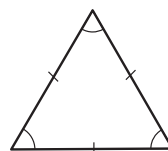
Оскільки сума кутів опуклого  $n$ -кутника дорівнює  $180^\circ(n-2)$ , величина кута  $\alpha_n$  правильного  $n$ -кутника обчислюється за формулою:

$$\alpha_n = \frac{n-2}{n} \cdot 180^\circ.$$

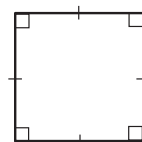
Нагадаємо, що многокутник є **вписаним у коло**, якщо всі його вершини лежать на цьому колі; многокутник є **описаним навколо кола**, якщо всі його сторони дотикаються до цього кола.

#### Теорема (про вписане й описане кола правильного многокутника)

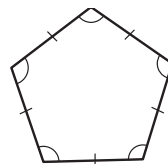
Навколо будь-якого правильного многокутника можна описати коло, і в будь-який правильний многокутник можна вписати коло, причому центри описаного і вписаного кіл збігаються.



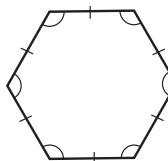
а



б

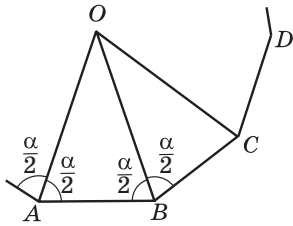


в



г

Рис. 121. Правильні многокутники



**Рис. 122.** До доведення теореми про вписане й описане кола правильного многокутника

### Доведення

□ Нехай  $A, B, C$  і  $D$  — послідовні вершини правильного многокутника (рис. 122). Проведемо бісектриси кутів  $A$  і  $B$ . Вони перетинаються в певній точці  $O$  (поясніть чому). Трикутник  $AOB$  є рівнобедреним з основою  $AB$ , оскільки  $\angle OAB = \angle OBA = \frac{\alpha}{2}$ , де  $\alpha$  — кут даного многокутника. Сполучимо точки  $O$  і  $C$ . Трикутники  $AOB$  і  $COB$  рівні за першою ознакою: у них сторона  $OB$  спільна,  $AB = CB$  як сторони правильного многокутника,  $\angle OBC = \angle OBA = \frac{\alpha}{2}$ , оскільки  $BO$  — бісектриса кута  $ABC$ . Отже, трикутник  $COB$  рівнобедрений з основою  $CB$ ,  $\angle OCB = \angle OBC = \frac{\alpha}{2}$ , тобто  $CO$  — бісектриса кута  $BCD$ .

Продовжуючи цей процес далі, легко переконатися, що всі трикутники з вершиною  $O$ , основами яких є сторони даного правильного многокутника, рівнобедрені й рівні. Звідси випливає, що всі вершини даного многокутника лежать на колі з центром  $O$ , радіус якого дорівнює бічним сторонам цих трикутників. Крім того, всі сторони даного многокутника дотикаються до іншого кола з центром  $O$ , радіус якого дорівнює висотам цих трикутників, проведеним із вершини  $O$ . Теорему доведено. ■

Неважко переконатися, що будь-який правильний многокутник має єдине вписане і єдине описане кола (доведіть це самостійно). Точку, яка є спільним центром цих кіл, називають **центром правильного многокутника**.

### Означення

**Центральним кутом правильного многокутника** називається кут, під яким сторону многокутника видно з центра цього многокутника.



Так, на рис. 122 кути  $AOB$ ,  $BOC$ ,  $COD$ , ... — центральні кути правильного многокутника. Очевидно, що **центральний кут правильного  $n$ -кутника дорівнює  $\frac{360^\circ}{n}$ .**

## 18.2. Формули радіусів вписаного й описаного кіл правильного многокутника

Радіуси вписаного й описаного кіл правильного  $n$ -кутника можна знайти, знаючи довжину його сторони і число  $n$ .

### Теорема (формули радіусів вписаного й описаного кіл правильного $n$ -кутника)

Для правильного  $n$ -кутника радіуси вписаного й описаного кіл обчислюються за формулами

$$r = \frac{a_n}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{n}}, \quad R = \frac{a_n}{2 \sin \frac{180^\circ}{n}},$$

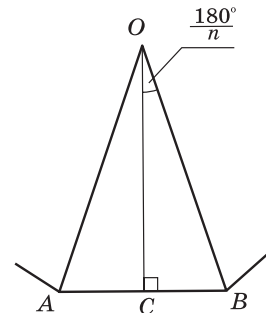
де  $r$  — радіус вписаного кола;  $R$  — радіус описаного кола;  $a_n$  — сторона  $n$ -кутника.

### Доведення

□ Нехай  $O$  — центр правильного  $n$ -кутника зі стороною  $a_n$ ,  $A$  і  $B$  — сусідні вершини цього  $n$ -кутника (рис. 123). Тоді в рівнобедреному трикутнику  $AOB$  бічні сторони  $OA$  і  $OB$  — радіуси описаного кола, а висота  $OC$  — радіус вписаного кола даного  $n$ -кутника.

Оскільки висота є також бісектрисою і медіаною трикутника  $AOB$  і центральний кут  $AOB$  дорівнює  $\frac{360^\circ}{n}$ , то в трикутнику  $OCB$   $\angle C = 90^\circ$ ,

$$CB = \frac{1}{2} AB = \frac{a_n}{2}, \quad \angle COB = \frac{1}{2} \angle AOB = \frac{180^\circ}{n}.$$



**Рис. 123.** До доведення формул радіусів вписаного й описаного кіл правильного  $n$ -кутника



Звідси

$$r = OC = \frac{CB}{\operatorname{tg} \angle COB} = \frac{a_n}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{n}},$$

$$R = OB = \frac{CB}{\sin \angle COB} = \frac{a_n}{2 \sin \frac{180^\circ}{n}}.$$

Теорему доведено. ■

### Наслідок

Для правильного  $n$ -кутника зі стороною  $a_n$ , якщо  $n = 3, 4, 6$  радіуси вписаного й описаного кіл обчислюються за такими формулами.

$n$	$r$	$R$
3	$\frac{a_3}{2\sqrt{3}}$	$\frac{a_3}{\sqrt{3}}$
4	$\frac{a_4}{2}$	$\frac{a_4}{\sqrt{2}}$
6	$\frac{a_6\sqrt{3}}{2}$	$a_6$

Справді, для правильного (рівностороннього) трикутника ( $n = 3$ ):

$$r = \frac{a_3}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{3}} = \frac{a_3}{2\sqrt{3}}, \quad R = \frac{a_3}{2 \sin \frac{180^\circ}{3}} = \frac{a_3}{\sqrt{3}};$$

для правильного чотирикутника (квадрата) ( $n = 4$ ):

$$r = \frac{a_4}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{4}} = \frac{a_4}{2}, \quad R = \frac{a_4}{2 \sin \frac{180^\circ}{4}} = \frac{a_4}{\sqrt{2}};$$

для правильного шестикутника ( $n = 6$ ):

$$r = \frac{a_6}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{6}} = \frac{a_6\sqrt{3}}{2}, \quad R = \frac{a_6}{2 \sin \frac{180^\circ}{6}} = a_6.$$



### Задача

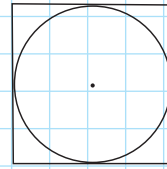
Площа квадрата, описаного навколо кола, дорівнює  $48 \text{ см}^2$ . Знайдіть площу рівностороннього трикутника, вписаного в те саме коло.

### Розв'язання

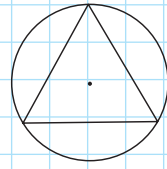
Нехай навколо кола описано квадрат з площею  $S = 48 \text{ см}^2$  (рис. 124, а). Тоді сторона квадрата  $a_4 = \sqrt{48} = 4\sqrt{3}$  (см). Із формули  $r = \frac{a_4}{2}$  маємо  $r = 2\sqrt{3}$  (см). Знайдений радіус  $r$  є радіусом  $R$  описаного кола для рівностороннього трикутника (рис. 124, б), площу якого необхідно знайти. Оскільки  $R = \frac{a_3}{\sqrt{3}}$ , то  $a_3 = R\sqrt{3}$ , отже,  $a_3 = 2\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 6$  (см).

За формулою площі рівностороннього трикутника  $S = \frac{a^2\sqrt{3}}{4}$  маємо:  $S = \frac{6^2 \cdot \sqrt{3}}{4} = 9\sqrt{3}$  (см<sup>2</sup>).

**Відповідь:**  $9\sqrt{3} \text{ см}^2$ .



а



б

Рис. 124

Зауважимо, що у випадку, коли в задачі йдеться про вписаний і описаний правильні  $n$ -кутники, з метою уникнення непорозумінь із застосуванням формул сторони цих  $n$ -кутників можна позначати  $a_n$  і  $b_n$  відповідно.

## 18.3. Побудова правильних многокутників

Розглянемо способи побудови деяких правильних многокутників за допомогою циркуля і лінійки. Ви вже вмієте будувати правильний (рівносторонній) трикутник і квадрат. Для побудови інших видів правильних многокутників часто використовують описане коло.

Побудуємо правильний шестикутник зі стороною  $a$ . Оскільки сторона такого шестикутника дорівнює радіусу описаного кола, побудуємо спочатку коло радіуса  $a$  і позначимо на ньому довільну точку  $A_1$  (рис. 125). Далі з неї як із центра тим

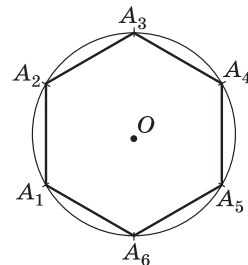
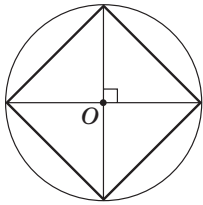
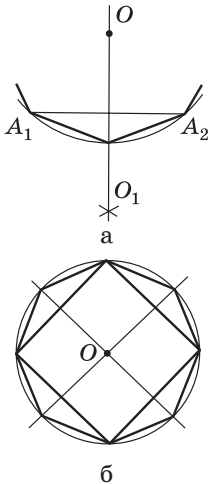


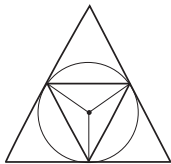
Рис. 125. Побудова правильного шестикутника



**Рис. 126.** Побудова вписаного квадрата



**Рис. 127.** Побудова правильного вписаного  $2n$ -кутника



**Рис. 128.** Побудова правильного описаного трикутника

самим радіусом  $a$  проведемо дугу і на її перетині з побудованим колом позначимо точку  $A_2$ . Послідовно відкладаючи такі дуги, отримаємо точки  $A_3, A_4, A_5$  та  $A_6$  і послідовно сполучимо їх відрізками.

Узагалі, для побудови правильного вписаного многокутника достатньо побудувати його центральний кут. Наприклад, для квадрата він дорівнює  $90^\circ$ , отже, якщо провести через центр кола дві взаємно перпендикулярні прямі, то вони перетнуть дане коло у вершинах вписаного квадрата (рис. 126).

Якщо в коло вписано правильний  $n$ -кутник  $A_1A_2\dots A_n$ , то неважко побудувати правильний вписаний  $2n$ -кутник. Для цього достатньо розділити хорди  $A_1A_2, A_2A_3, \dots, A_nA_1$  (а отже, і відповідні дуги) навпіл (рис. 127, а). На рис. 127, б показано, як, маючи вписаний квадрат, побудувати правильний вписаний восьмикутник. Застосовуючи цей спосіб, можна далі побудувати правильний 16-кутник, 32-кутник і взагалі правильний  $2^k$ -кутник, де  $k$  — будь-яке натуральне число, більше за 2.

Для побудови правильного описаного  $n$ -кутника достатньо провести дотичні до кола у вершинах правильного вписаного  $n$ -кутника. На рис. 128 показано, як у такий спосіб побудувати правильний описаний трикутник.

Наведені приклади показують, що багато видів правильних многокутників можна побудувати за допомогою циркуля і лінійки. Однак не всі правильні многокутники допускають таку побудову. Наприклад, доведено, що за допомогою циркуля і лінійки можна побудувати правильний сімнадцятикутник, але не можна побудувати правильний семикутник.



## Запитання і задачі



### Усні вправи

**597.** Чи є правильним многокутником рівнобедрений прямокутний трикутник; ромб із кутом  $60^\circ$ ; прямокутник із нерівними сторонами? Чому?

**598.** Чи є правильним, що:

- а) коли в трикутнику всі кути рівні, то він є правильним;
- б) коли в чотирикутнику всі кути рівні, то він є правильним?

**599.** Сума кутів правильного многокутника дорівнює  $180^\circ$ . Яка градусна міра кута цього многокутника?



**600.** Чи можуть бісектриси кутів правильного многокутника і серединні перпендикуляри до його сторін перетинатися у двох різних точках? Чому?

**601.** Скільки кутів має правильний многокутник, у якому:

- а) радіус описаного кола вдвічі більший за радіус вписаного кола;
- б) радіус описаного кола дорівнює стороні?

**602.** Опишіть, як, маючи зображення правильного 18-кутника, побудувати правильний 9-кутник; правильний 36-кутник.



### Графічні вправи

**603.** Побудуйте правильний шестикутник  $ABCDEF$ .

- а) Проведіть діагональ  $AD$ . Визначте вид чотирикутників, на які вона ділить даний шестикутник.
- б) Проведіть діагоналі  $AC$  і  $AE$ . Визначте вид утворених трикутників.



**604.** Побудуйте правильний трикутник і виріжте його з паперу. Зріжте кути трикутника так, щоб отримати правильний шестикутник. У якому відношенні точки зрізу ділять сторони трикутника?



### Письмові вправи

#### Рівень А

**605.** Визначте кількість сторін правильного многокутника, центральний кут якого дорівнює:

- а)  $90^\circ$ ;
- б)  $72^\circ$ ;
- в)  $20^\circ$ .

- 606.** Знайдіть кути правильного  $n$ -кутника, якщо:  
 а)  $n = 5$ ;                      б)  $n = 6$ ;                      в)  $n = 10$ .
- 👉 **607.** Визначте кількість сторін правильного многокутника, в якому:  
 а) центральний кут дорівнює  $30^\circ$ ;  
 б) сума кутів дорівнює  $1800^\circ$ .
- 608.** Доведіть, що діагональ правильного п'ятикутника паралельна одній із його сторін.
- 👉 **609.** Доведіть, що найбільша діагональ правильного шестикутника ділить його на дві трапеції.
- 610.** Знайдіть радіус кола:  
 а) вписаного в правильний трикутник зі стороною  $8\sqrt{3}$  см;  
 б) описаного навколо квадрата з площею  $16$  см<sup>2</sup>;  
 в) вписаного в правильний шестикутник з периметром  $36\sqrt{3}$  см.
- 👉 **611.** Знайдіть:  
 а) площу рівностороннього трикутника, навколо якого описано коло радіуса  $2$  см;  
 б) діагональ квадрата, в який вписано коло радіуса  $\sqrt{2}$  см;  
 в) периметр правильного шестикутника, навколо якого описано коло діаметром  $8$  см.
- 612.** Заповніть таблицю формул для обчислення сторони  $a_n$ , радіуса  $R$  описаного кола і радіуса  $r$  вписаного кола для правильного  $n$ -кутника.

$n$	$R$ через $a_n$	$r$ через $a_n$	$a_n$ через $R$	$a_n$ через $r$	$R$ через $r$	$r$ через $R$
3						
4						
6						

- 613.** Переріз терпуга має форму правильного трикутника зі стороною  $3$  см. Яким має бути мінімальний діаметр круглого металевого стрижня, з якого виготовляють терпуг?
- 👉 **614.** Поперечний переріз дерев'яного бруска є квадратом з діагоналлю  $4\sqrt{2}$  см. Знайдіть найбільший діаметр круглого стрижня, який можна виточити з такого бруска.



## Рівень Б

**615.** Доведіть, що зовнішній кут правильного многокутника дорівнює його центральному куту.


**616.** Визначте кількість сторін правильного многокутника, кути якого дорівнюють:

- а)  $120^\circ$ ;                      б)  $108^\circ$ ;                      в)  $150^\circ$ .

 **617.** Знайдіть:


- а) периметр правильного многокутника зі стороною 5 см і внутрішнім кутом  $144^\circ$ ;  
б) сторону правильного многокутника, периметр якого дорівнює 48 см, а внутрішній кут утричі більший, ніж зовнішній.

**618.** Доведіть, що середини сторін правильного  $n$ -кутника є вершинами іншого правильного  $n$ -кутника.

 **619.** Доведіть, що вершини правильного  $2n$ -кутника, взяті через одну, є вершинами правильного  $n$ -кутника.

**620.** Знайдіть:

- а) площу правильного шестикутника, вписаного в коло, якщо площа квадрата, описаного навколо цього кола, дорівнює  $64 \text{ см}^2$ ;  
б) площу квадрата, описаного навколо кола, якщо площа правильного трикутника, вписаного в це коло, дорівнює  $9\sqrt{3} \text{ см}^2$ ;  
в) радіус кола, описаного навколо правильного шестикутника, якщо радіус кола, вписаного в цей шестикутник, дорівнює  $8\sqrt{3} \text{ см}$ .


 **621.** Знайдіть:

- а) площу квадрата, вписаного в коло, якщо площа правильного шестикутника, вписаного в це коло, дорівнює  $6\sqrt{3} \text{ см}^2$ ;  
б) площу правильного трикутника, описаного навколо кола, якщо площа квадрата, описаного навколо цього кола, дорівнює  $36 \text{ см}^2$ ;  
в) радіуси описаного і вписаного кіл рівностороннього трикутника, якщо різниця цих радіусів складає 3 см.

**622.** Заповніть таблицю формул для обчислення площі  $S$  правильного  $n$ -кутника зі стороною  $a_n$ , радіусом  $R$  описаного кола і радіусом  $r$  вписаного кола.


$n$	$S$ через $a_n$	$S$ через $R$	$S$ через $r$
3			
4			
6			

**623.** Доведіть, що серединні перпендикуляри до будь-яких двох сторін правильного многокутника перетинаються або збігаються.


 **624.** Доведіть, що прями, на яких лежать бісектриси будь-яких двох кутів правильного многокутника, перетинаються або збігаються.

### Рівень В


**625.** Різниця зовнішніх кутів двох правильних многокутників становить  $24^\circ$ , а різниця сум усіх внутрішніх кутів цих многокутників становить  $720^\circ$ . Визначте кількість сторін кожного многокутника.

 **626.** Визначте кількість сторін правильного многокутника, якщо:  
а) сума чотирьох його внутрішніх кутів на  $240^\circ$  більша за суму решти кутів;  
б) сума чотирьох внутрішніх і двох зовнішніх його кутів дорівнює  $576^\circ$ .


**627.** Правильний трикутник, квадрат і правильний шестикутник мають однакові периметри. Знайдіть відношення їх площ.


 **628.** Правильний трикутник, квадрат і правильний шестикутник вписані в одне коло. Знайдіть відношення їх площ.

**629.** Побудуйте правильний шестикутник із периметром 12 см. Обчисліть площу побудованого шестикутника.

 **630.** Впишіть квадрат у коло радіуса 3 см. За допомогою вписаного квадрата побудуйте правильний восьмикутник, вписаний у дане коло.


**631.** Побудуйте коло радіуса 3 см. Для цього кола побудуйте правильні вписаний і описаний шестикутники та обчисліть відношення їхніх площ. Чи залежить воно від довжини радіуса кола?

 **632.** Впишіть у коло правильний восьмикутник. Обчисліть його площу, якщо радіус кола дорівнює  $R$ .

 **633.** Доведіть формулу залежності сторони  $a_{2n}$  правильного вписаного  $2n$ -кутника від радіуса  $R$  описаного кола і сторони  $a_n$  правильного вписаного  $n$ -кутника (формулу подвоєння числа сторін правильного вписаного многокутника):

$$a_{2n} = \sqrt{2R^2 - 2R\sqrt{R^2 - \frac{a_n^2}{4}}}$$

Користуючись цією формулою, виразіть через  $R$  сторони правильного вписаного восьмикутника та дванадцятикутника.

-  **634.** Впишіть у коло даного радіуса  $R$  правильний десятикутник.
- а) Доведіть, що сторона  $a_{10}$  побудованого десятикутника і радіус  $R$  кола відносяться в «золотому перерізі».
- б) Впишіть у це коло правильний п'ятикутник.




## Повторення перед вивченням § 19

### Теоретичний матеріал

- коло і круг;
- вписані кути;
- поняття площ.

 7 клас, § 19

 8 клас, § 7, 16

### Задачі

- 635.** Два кути трикутника дорівнюють  $15^\circ$  і  $85^\circ$ . Знайдіть центральні кути, під якими сторони даного трикутника видно з центра описаного кола.
- 636.** Дві сторони трикутника дорівнюють 6 см і 8 см, а його площа  $24 \text{ см}^2$ . Знайдіть радіуси описаного і вписаного кіл трикутника.

## § 19

# Довжина кола і площа круга

### 19.1. Довжина кола і дуги кола

Отримати наочне уявлення про довжину кола досить просто — для цього достатньо, наприклад, уявити, що коло є металевим обручем, який можна розрізати в довільній точці  $A$  і розпрямити (рис. 129). Отримаємо відрізок  $AA_1$ , довжина якого і є довжиною кола.



Рис. 129. Наочне уявлення про довжину кола

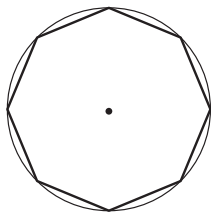


Рис. 130. До означення довжини кола

Сформулювати строге означення довжини кола значно складніше. Розглянемо послідовність вписаних у коло правильних  $n$ -кутників. Периметр будь-якого з них може вважатися наближеним значенням довжини кола (рис. 130). У ході необмеженого зростання числа  $n$  такі  $n$ -кутники все ближче «прилягають» до кола, а їхні периметри все менше відрізняються від довжини кола.

Отже, визначимо **довжину кола** як величину, до якої прямують периметри правильних  $n$ -кутників, вписаних у це коло, в ході необмеженого зростання числа  $n$ .

Перш ніж подати формулу довжини кола, сформулюємо важливу допоміжну теорему.

#### Теорема (про відношення довжини кола до його діаметра)

Відношення довжини кола до його діаметра не залежить від кола, тобто є однаковим для будь-яких двох кіл.

Доведення цієї теореми виходить за межі шкільного курсу геометрії. Тому наведемо лише загальну схему міркувань, на яких воно ґрунтується (повне доведення подане в Додатку 3).

Розглянемо два кола з радіусами  $R'$  і  $R''$  та вписані в них правильні  $n$ -кутники з периметрами  $P'_n$  і  $P''_n$ . Оскільки  $P_n = na_n = n \cdot 2R \sin \frac{180^\circ}{n}$ , то

$$\frac{P'_n}{P''_n} = \frac{n \cdot 2R' \sin \frac{180^\circ}{n}}{n \cdot 2R'' \sin \frac{180^\circ}{n}} = \frac{R'}{R''}, \text{ звідки } \frac{P'_n}{R'} = \frac{P''_n}{R''}.$$

У ході необмеженого зростання  $n$  периметри  $n$ -кутників за означенням прямують до довжин відповідних кіл  $C'$  і  $C''$ , отже, помноживши обидві частини останньої рівності на  $\frac{1}{2}$ , маємо  $\frac{C'}{2R'} = \frac{C''}{2R''}$ , що й стверджує теорема.

Таким чином, для всіх кіл відношення довжини кола до діаметра є сталим числом. Це число прийнято позначати грецькою буквою  $\pi$  (читається «пі»):

$$\frac{C}{2R} = \pi.$$

Доведено, що  $\pi$  — ірраціональне число, значення якого дорівнює 3,1415... Великий грецький учений Архімед у III ст. до н. е. встановив, що раціональне число  $\frac{22}{7}$  є наближеним значенням числа  $\pi$ . Для практичних обчислень зазвичай використовують значення  $\pi \approx 3,14$ .

Отже, довжина кола радіуса  $R$  обчислюється за формулою  $C = 2\pi R$ .

Визначимо довжину  $l$  дуги кола з градусною мірою  $\alpha$  (рис. 131). Оскільки довжина кола дорівнює  $2\pi R$ , то довжина дуги з градусною мірою  $1^\circ$  становить  $\frac{2\pi R}{360}$ , тобто  $\frac{\pi R}{180}$ .

Тому довжина дуги кола з градусною мірою  $\alpha$  обчислюється за формулою

$$l_\alpha = \frac{\pi R}{180} \cdot \alpha.$$

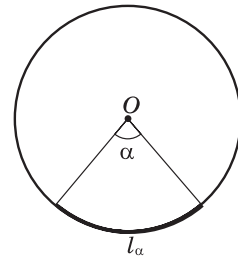


Рис. 131. Дуга кола з градусною мірою  $\alpha$

## 19.2. Площа круга та його частин

Нагадаємо, що поняття площі було визначено у 8 класі лише для многокутників. Для визначення площі круга скористаємось міркуваннями, аналогічними до тих, за якими визначалася довжина кола.

Отже, **площею круга**, обмеженого даним колом, будемо вважати величину, до якої прямує площа правильного  $n$ -кутника, вписаного в це коло, у ході необмеженого зростання числа  $n$ .

### Теорема (формула площі круга)

Площа круга радіуса  $R$  обчислюється за формулою  $S = \pi R^2$ .

Як і у випадку довжини кола, доведення цієї теореми виходить за межі шкільного курсу геометрії, тому знову наведемо лише загальну схему міркувань (доведення подане в Додатку 3).

Впишемо в дане коло радіуса  $R$  правильний  $n$ -кутник  $A_1A_2\dots A_n$  зі стороною  $a_n$ , і в цей  $n$ -кутник впишемо ще одне коло радіуса  $r_n$  (рис. 132).

Тоді:

$$S_{\triangle A_1OA_2} = \frac{1}{2} a_n r_n, \quad S_{A_1A_2\dots A_n} = n S_{\triangle A_1OA_2} = n \cdot \frac{1}{2} a_n r_n = \frac{1}{2} P_n r_n,$$

де  $P_n$  — периметр  $n$ -кутника.

Із прямокутного трикутника  $A_1OB$  маємо:

$$r_n = R \cos \frac{180^\circ}{n}. \quad \text{З необмеженим зростанням } n \text{ дріб } \frac{180}{n}$$

прямує до нуля, отже, значення  $\cos \frac{180^\circ}{n}$  прямує

до  $\cos 0^\circ$ , який дорівнює одиниці. З іншого боку, при зростанні  $n$  вписане коло «наближується» до описаного,  $r_n$  — до  $R$ , а периметр вписаного  $n$ -кутника — до довжини даного кола  $C$ . Отже, у ході необмеженого зростання  $n$  маємо:

$$S = \frac{1}{2} CR = \frac{1}{2} 2\pi R \cdot R = \pi R^2.$$

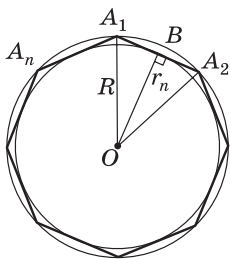


Рис. 132. До обґрунтування формули площі круга



**Задача**

Довжина кола дорівнює  $12\pi$  см. Знайдіть площу круга, обмеженого цим колом.

**Розв'язання**

Оскільки довжина кола дорівнює  $2\pi R$ , то за умовою  $2\pi R = 12\pi$ , звідки  $R = 6$  см — радіус даного кола. Отже, за формулою  $S = \pi R^2$  маємо:

$$S = \pi \cdot 6^2 = 36\pi \text{ (см}^2\text{)}.$$

**Відповідь:**  $36\pi$  см<sup>2</sup>.

**Задача**

Якою має бути довжина дроту, щоб зробити з нього коло, яке обмежує круг площею  $154$  см<sup>2</sup>?

**Розв'язання**

Оскільки площа круга дорівнює  $\pi R^2$ , то за умовою  $\pi R^2 = 154$ . Ураховуючи,

що  $\pi \approx \frac{22}{7}$ , маємо:  $R = \sqrt{\frac{154}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{154 \cdot 7}{22}} = 7$  (см) — радіус даного кола. Знайдемо довжину дроту за формулою  $C = 2\pi R$ :  $C \approx \frac{2 \cdot 22 \cdot 7}{7} = 44$  (см).

**Відповідь:**  $\approx 44$  см.

Зауважимо, що в суто геометричних задачах відповідь можна подавати у вигляді буквеного виразу, який містить  $\pi$ , а в прикладних задачах бажано число  $\pi$  замінювати його наближеним значенням.

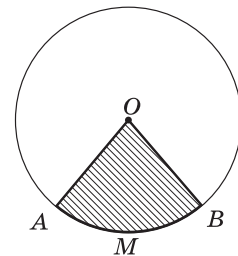
**Означення**

**Круговим сектором** називається частина круга, яка лежить усередині відповідного центрального кута.

На рис. 133 заштриховано круговий сектор, який відповідає меншому центральному куту  $AOB$  (або спирається на дугу  $AMB$ ).

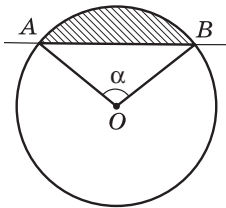
Оскільки площа круга дорівнює  $\pi R^2$ , то площа кругового сектора, що спирається на дугу  $1^\circ$ , дорівнює  $\frac{\pi R^2}{360}$ .

**Сектор** — від латинського «сектор» — різець.

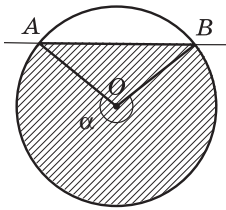


**Рис. 133.** Круговий сектор

**Сегмент** — від латинського «сегментум» — відрізок.



а



б

**Рис. 134.** Круговий сегмент

Отже, площа кругового сектора, що спирається на дугу з градусною мірою  $\alpha$ , обчислюється за формулою

$$S_{\text{сект}} = \frac{\pi R^2}{360} \cdot \alpha.$$

### Означення

**Круговим сегментом** називається частина круга, яка лежить по один бік від прямої, що перетинає цей круг.

Унаслідок перетину круга з прямою  $AB$  утворюються два кругові сегменти: на рис. 134, а заштриховано менший круговий сегмент, а на рис. 134, б — більший круговий сегмент.

Площа сегмента, який не дорівнює півкругу, обчислюється за формулою

$$S_{\text{сегм}} = \frac{\pi R^2}{360} \cdot \alpha \pm S_{\Delta},$$

де  $\alpha$  — градусна міра дуги, що обмежує цей сегмент,  $S_{\Delta}$  — площа трикутника з вершинами в центрі круга і на кінцях цієї дуги.

При цьому знак «+» треба обирати, коли  $\alpha > 180^\circ$ , а знак «-» — коли  $\alpha < 180^\circ$ . У випадку  $\alpha = 180^\circ$  сегмент є півкругом, площа якого дорівнює  $\frac{\pi R^2}{2}$ .

## Запитання і задачі



### Усні вправи

- 637.** Визначте, як зміняться довжина кола і площа обмеженого ним круга, якщо:
- радіус кола збільшити втричі;
  - діаметр кола зменшити в 5 разів.
- 638.** Чи є правильним, що довжина кола більша за його потрійний діаметр?

**639.** Чи може площа правильного многокутника, вписаного в коло, бути більшою, ніж площа круга, обмеженого цим колом?

**640.** Круговий сектор спирається на дугу  $\alpha$ . Визначте, чи є кут  $\alpha$  гострим, прямим або тупим, якщо:

- а) довжина дуги, яка обмежує сектор, становить чверть довжини кола;
- б) площа сектора становить третину площі круга.

**641.** Із круга радіуса 4 вирізано сегмент. Визначте, чи є даний сегмент більшим або меншим за півкруг, якщо:

- а) площа сегмента дорівнює  $9\pi$ ;
- б) площа сегмента становить половину площі частини круга, що лишилася.



## Графічні вправи

**642.** Впишіть у круг рівносторонній трикутник. Виділіть кольором сегменти, що утворилися. Яка градусна міра їхніх дуг?

**643.** Накресліть два круги зі спільним центром і радіусами 2 см і 3 см. Порівняйте на око площу меншого круга з площею утвореного кільця. Перевірте правильність порівняння обчисленням.



## Письмові вправи

### Рівень А

**644.** Знайдіть:

- а) довжину кола, радіус якого дорівнює 6 см;
- б) радіус кола, довжина якого дорівнює 12,56 см.

**645.** Знайдіть довжину кола:

- а) вписаного у квадрат з площею  $144 \text{ см}^2$ ;
- б) описаного навколо рівностороннього трикутника зі стороною  $4\sqrt{3}$  см;
- в) описаного навколо правильного шестикутника з периметром 30 см.

**646.** Петрик, допомагаючи бабусі, набрав воду з колодязя. Хлопчик підрахував, що підняти відро можна за 20 обертів валу. Яка глибина колодязя (у м), якщо діаметр валу дорівнює 0,2 м? Вважайте, що  $\pi=3$ .



**647.** На шляху 219,8 м колесо електровоза робить 50 обертів. Знайдіть діаметр колеса.

📌 **648.** Обчисліть довжину колової орбіти штучного супутника Землі, якщо він обертається на відстані 330 км від земної поверхні, а радіус Землі дорівнює 6370 км.

**649.** Знайдіть довжину дуги кола радіуса  $R$ , якщо її градусна міра дорівнює:  
а)  $90^\circ$ ; б)  $135^\circ$ ; в)  $340^\circ$ .

**650.** Довжина маятника стінного годинника дорівнює 60 см, а кут його коливань —  $30^\circ$ . Знайдіть довжину дуги, яку описує кінець маятника.

📌 **651.** Знайдіть діаметр кола, якщо довжина його дуги дорівнює 12,56 см, а градусна міра —  $240^\circ$ .

**652.** Довжина кола циркової арени дорівнює 75,36 м. Знайдіть площу арени.

**653.** Знайдіть площу круга, обмеженого колом:  
а) вписаним в правильний шестикутник зі стороною  $8\sqrt{3}$  см;  
б) описаним навколо квадрата з периметром  $12\sqrt{2}$  см.

📌 **654.** Знайдіть площу круга, обмеженого колом:  
а) описаним навколо рівностороннього трикутника з висотою 6 см;  
б) вписаним у квадрат з діагоналлю  $14\sqrt{2}$  см.

**655.** Радіуси кіл стрілецької мішені дорівнюють 1, 2, 3 і 4 (рис. 135). Знайдіть площу кожного з трьох кілець мішені.

📌 **656.** Дві труби водогону, внутрішні діаметри яких дорівнюють 10 см і 24 см, необхідно замінити однією, не змінюючи пропускної спроможності. Яким має бути внутрішній діаметр нової труби?

**657.** Знайдіть площу кругового сектора з радіусом  $R$  і дугою  $\alpha$ , якщо:  
а)  $R = 9$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ; б)  $R = 8$ ,  $\alpha = 225^\circ$ ; в)  $R = 12$ ,  $\alpha = 15^\circ$ .

📌 **658.** Знайдіть площу більшого і меншого кругових сегментів, на які круг радіуса 1 ділиться хордою, що дорівнює радіусу.

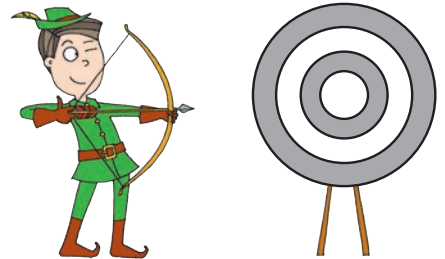
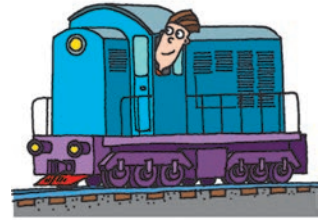


Рис. 135

## Рівень Б

**659.** Знайдіть довжину кола:

- вписаного в трикутник зі сторонами 8 см, 26 см і 30 см;
- описаного навколо прямокутника зі сторонами 6 см і 8 см;
- вписаного в правильний шестикутник із площею  $6\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>.

**660.** Довжина кола, вписаного в рівнобічну трапецію, дорівнює  $12\pi$  см. Знайдіть площу трапеції, якщо її бічна сторона дорівнює 13 см.

**661.** Знайдіть довжину кола:

- вписаного в ромб із діагоналями 30 см і 40 см;
- описаного навколо прямокутного трикутника з катетами 14 см і 48 см.

**662.** На рис. 136 на сітці з одиничних квадратів зображено фігури, що складаються з дуг кіл із заданими центрами. Знайдіть:

- периметр зображеної фігури (рис. 136, а);
- площу зафарбованої частини круга (рис. 136, б).

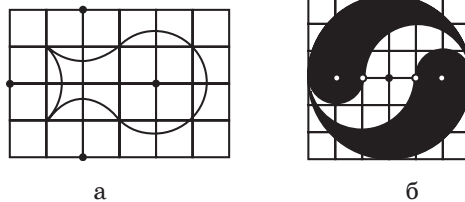


Рис. 136

**663.** На рис. 137 на сітці з одиничних квадратів зображено фігури, що складаються з дуг кіл із заданими центрами. Знайдіть:

- периметр зображеної фігури (рис. 137, а);
- площу зафарбованої частини круга (рис. 137, б).

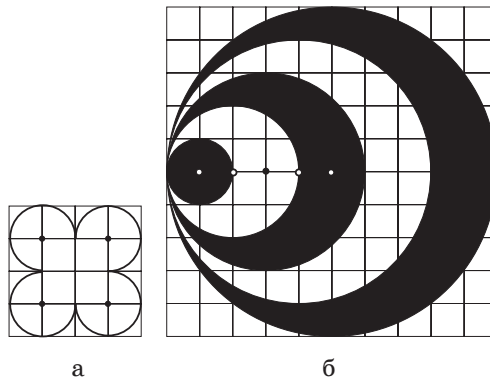


Рис. 137

**664.** Визначте довжини дуг, які описують протягом 2 годин кінці стрілок годинника на будівлі Харківського університету, якщо годинна стрілка має довжину 2,4 м, а хвилинна — 3,2 м.

📌 **665.** Зі шматка металевого дроту, який має форму дуги кола радіуса 3 м, необхідно зварити кільце. Знайдіть радіус цього кільця, якщо градусна міра дуги складає  $120^\circ$ .

**666.** Знайдіть площу круга, обмеженого колом:

а) описаним навколо рівнобідреного трикутника з основою 48 см і проведеною до неї медіаною 32 см;

б) вписаним у ромб з периметром 48 см і кутом  $120^\circ$ .

📌 **667.** Знайдіть площу круга, обмеженого колом:

а) описаним навколо прямокутника з меншою стороною 4 см і кутом між діагоналями  $60^\circ$ ;

б) вписаним у трикутник зі сторонами 11 см, 13 см і 20 см.

**668.** Два кола мають спільний центр  $O$  (рис. 138). Доведіть, що площа утвореного кільця дорівнює добутку ширини кільця  $AB$  на довжину кола з тим самим центром і радіусом  $OC$  ( $C$  — середина  $AB$ ).

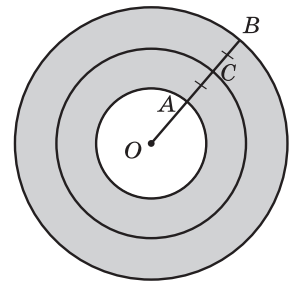


Рис. 138

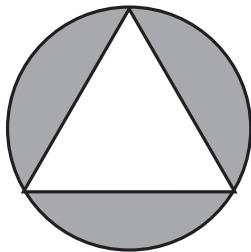
**669.** Площа сектора з дугою  $108^\circ$  дорівнює  $S$ . Знайдіть радіус сектора.

**670.** Знайдіть площу кожного із сегментів, що лежать поза вписаним у коло радіуса  $R$  правильним  $n$ -кутником, якщо:

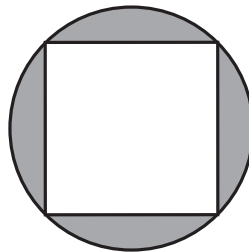
а)  $n = 3$  (рис. 139, а);

б)  $n = 4$  (рис. 139, б);

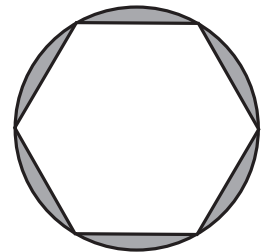
в)  $n = 6$  (рис. 139, в).



а



б



в

Рис. 139

671. Радіус круга дорівнює  $R$ . Знайдіть площу кругового сегмента, дуга якого дорівнює:  
 а)  $60^\circ$ ;                      б)  $240^\circ$ .

**Рівень В**

672. За даними рис. 140:  
 а) доведіть, що площа зафарбованого трикутника дорівнює сумі площ зафарбованих серпиків (рис. 140, а);  
 б) знайдіть периметр фігури, яка зображена на сітці з правильних трикутників зі стороною 1 і складається з дуг кіл із заданими центрами (рис. 140, б).

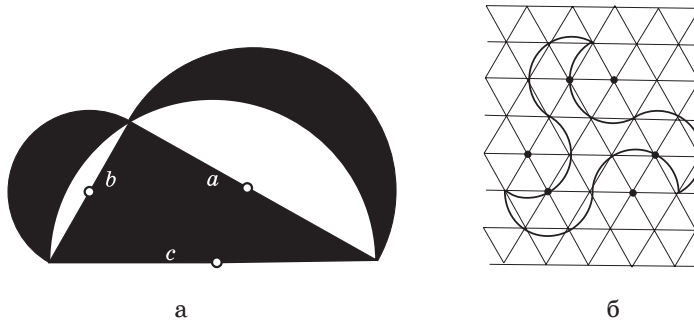


Рис. 140

673. За даними рис. 141:  
 а) доведіть, що площа зафарбованої фігури дорівнює сумі площ шести зафарбованих серпиків (рис. 141, а);  
 б) знайдіть периметр фігури, яка нарисована на сітці з одиничних квадратів і складається з дуг кіл із заданими центрами (рис. 141, б).

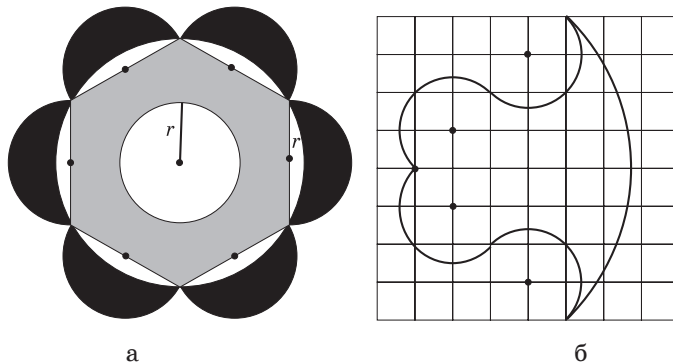


Рис. 141

**674.** Площа кругового сектора дорівнює  $6\pi$  см<sup>2</sup>, а довжина його дуги —  $2\pi$  см. Знайдіть площу круга, вписаного в цей сектор (рис. 142).

**675.** Сторони трикутника дорівнюють 17 см, 25 см і 28 см. Коло з центром на найбільшій стороні трикутника дотикається до двох інших сторін. Знайдіть площу круга, обмеженого цим колом.

**676.** Коло ділить кожну сторону рівностороннього трикутника на три рівні частини завдовжки 2 см. Знайдіть площу частини трикутника, що лежить усередині кола.

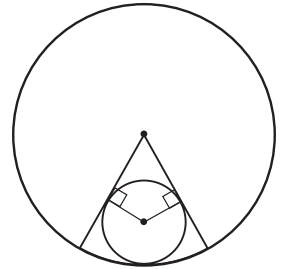


Рис. 142



## Онлайн-тестування для підготовки до контрольної роботи № 5

### Задачі для підготовки до контрольної роботи № 5

1. Знайдіть внутрішній і центральний кути правильного дванадцятикутника.
2. Площа круга, вписаного у квадрат, дорівнює  $16\pi$  см<sup>2</sup>. Знайдіть площу квадрата.
3. Знайдіть довжину кола, описаного навколо правильного шестикутника, найбільша діагональ якого дорівнює 14 см.
4. Правильний трикутник  $ABC$  вписано в коло. Знайдіть площу трикутника, якщо довжина дуги  $CAB$  складає  $8\pi$  см.
5. Визначте кількість сторін правильного вписаного многокутника, якщо кожна сторона стягує дугу  $3\pi$  см, а радіус описаного кола дорівнює 12 см.
6. Прямокутний трикутник з гіпотенузою 12 і гострим кутом  $30^\circ$  вписано в круг. Знайдіть площу кожного з сегментів, які відтинають сторони трикутника.

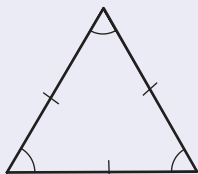


## Підсумки розділу V

### ПРАВИЛЬНІ МНОГОКУТНИКИ

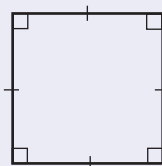
**Правильним** многокутником називається опуклий многокутник, у якому всі сторони рівні й усі кути рівні

*Правильний  
трикутник*



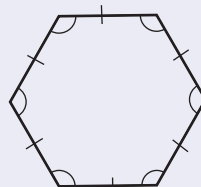
$$\alpha_3 = 60^\circ$$

*Правильний  
чотирикутник  
(квадрат)*



$$\alpha_4 = 90^\circ$$

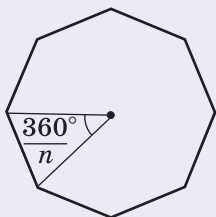
*Правильний  
шестикутник*



$$\alpha_6 = 120^\circ$$

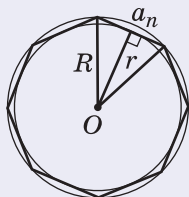
Формула для обчислення кута  $\alpha_n$  правильного  $n$ -кутника:

$$\alpha_n = \frac{n-2}{n} \cdot 180^\circ$$



**Центральним кутом** правильного многокутника називається кут, під яким сторону многокутника видно з центра цього многокутника. Центральний кут правильного  $n$ -кутника дорівнює  $\frac{360^\circ}{n}$

### ВПИСАНЕ Й ОПИСАНЕ КОЛА ПРАВИЛЬНОГО МНОГОКУТНИКА



#### *Теорема про вписане й описане кола правильного многокутника*

Навколо будь-якого правильного многокутника можна описати коло, і в будь-який правильний многокутник можна вписати коло, причому центри описаного і вписаного кіл збігаються.

Правильний многокутник має єдине вписане і єдине описане кола

### ФОРМУЛИ РАДІУСІВ ВПИСАНОГО Й ОПИСАНОГО КІЛ

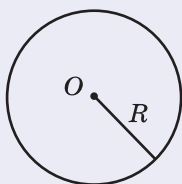
Для правильного $n$ -кутника	Для правильного трикутника	Для квадрата	Для правильного шестикутника
$r = \frac{a_n}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{n}}$	$r = \frac{a_3}{2\sqrt{3}}$	$r = \frac{a_4}{2}$	$r = \frac{a_6 \sqrt{3}}{2}$
$R = \frac{a_n}{2 \sin \frac{180^\circ}{n}}$	$R = \frac{a_3}{\sqrt{3}}$	$R = \frac{a_4}{\sqrt{2}}$	$R = a_6$

### ФОРМУЛИ ДЛЯ КОЛА І КРУГА ТА ЇХ ЧАСТИН

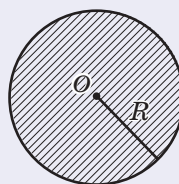
#### *Теорема про відношення довжини кола до його діаметра*

Відношення довжини кола до його діаметра не залежить від кола,

тобто є однаковим для будь-яких двох кіл:  $\frac{C}{2R} = \pi \approx 3,14$



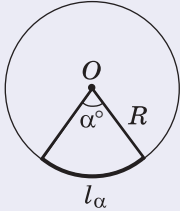
Довжина кола  
 $C = 2\pi R$



Площа круга  
 $S = \pi R^2$

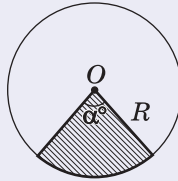
### ФОРМУЛИ ДЛЯ КОЛА І КРУГА ТА ЇХ ЧАСТИН

**Круговим сектором** називається частина круга, яка лежить усередині відповідного центрального кута



Довжина дуги

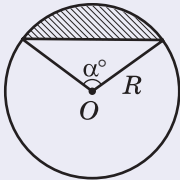
$$l_{\alpha} = \frac{\pi R}{180} \cdot \alpha$$



Площа кругового сектора

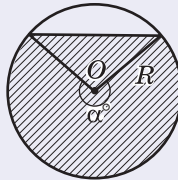
$$S_{\text{сект}} = \frac{\pi R^2}{360} \cdot \alpha$$

**Круговим сегментом** називається частина круга, яка лежить по один бік від прямої, що перетинає цей круг



Площа сегмента, меншого за півкруг

$$S_{\text{сегм}} = \frac{\pi R^2}{360} \cdot \alpha - S_{\Delta}$$



Площа сегмента, більшого за півкруг

$$S_{\text{сегм}} = \frac{\pi R^2}{360} \cdot \alpha + S_{\Delta}$$



## Контрольні запитання до розділу V

1. Дайте означення правильного многокутника.
2. Доведіть формули радіусів вписаного і описаного кіл для правильного  $n$ -кутника.
3. Виразіть радіуси вписаного й описаного кіл:
  - а) правильного трикутника зі стороною  $a$ ;
  - б) квадрата зі стороною  $a$ ;
  - в) правильного шестикутника зі стороною  $a$ .
4. Опишіть побудову правильного трикутника, квадрата, правильного шестикутника.
5. Сформулюйте теорему про відношення довжини кола до його діаметра. Назвіть наближене числове значення цього відношення. Як воно позначається?
6. Запишіть формули довжини кола і довжини дуги кола.
7. Запишіть формулу площі круга.
8. Опишіть круговий сектор. Запишіть формулу площі кругового сектора.
9. Опишіть круговий сегмент. Запишіть формулу площі кругового сегмента.



## Додаткові задачі до розділу V

- 677.** Сума внутрішніх кутів правильного многокутника вдвічі більша за суму його зовнішніх кутів. Знайдіть площу цього многокутника, якщо радіус кола, описаного навколо нього, дорівнює  $R$ .
- 678.** У прямий кут вписано коло радіуса 4 см. Знайдіть периметр фігури, обмеженої сторонами кута і меншою дугою кола, що міститься між точками дотику.
- 679.** Визначте, чи буде правильним рівносторонній многокутник, якщо він є:
  - а) описаним навколо кола;
  - б) вписаним у коло.
- 680.** У коло вписані квадрат і правильний трикутник. Знайдіть площу трикутника, якщо площа квадрата дорівнює  $S$ .
- 681.** Центри двох кіл, що перетинаються, лежать по різні боки від їхньої спільної хорди завдовжки  $a$ . Ця хорда в одному з кіл є стороною вписаного квадрата, а в іншому — стороною правильного вписаного шестикутника. Знайдіть відстань між центрами кіл.
- 682.** У сегмент, дуга якого дорівнює  $120^\circ$  і має довжину  $l$ , вписано коло найбільшого радіуса (рис. 143). Знайдіть довжину цього кола.

**683.** Два кола мають спільний центр. Знайдіть площу утвореного кільця, якщо хорда більшого кола, яка дотикається до меншого, має довжину  $2a$ .

**684.** Доведіть, що будь-які два правильні  $n$ -кутники подібні.

### Задачі підвищеної складності

- 685.** Відрізки, що сполучають середини кожної зі сторін квадрата з кінцями протилежної сторони, обмежують опуклий восьмикутник (рис. 144). Чи є він правильним?

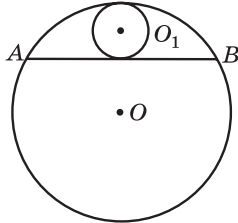


Рис. 143

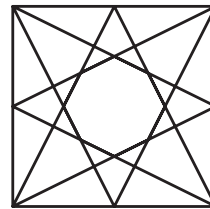


Рис. 144

- 686.** Доведіть, що площа правильного шестикутника дорівнює  $\frac{3}{4}$  добутку двох його нерівних діагоналей.

**687.** Сторона квадрата дорівнює  $a$ . Знайдіть довжину кола, яке проходить через кінці однієї сторони і дотикається до протилежної.

**688.** Сторона квадрата дорівнює  $a$ . Кожна вершина квадрата є центром кола радіуса  $a$  (рис. 145). Знайдіть периметр криволінійного чотирикутника  $ABCD$ .

**689.** Два кола з радіусами 3 см і 9 см дотикаються зовні в точці  $A$ . Певна пряма дотикається до цих кіл у точках  $B$  і  $C$  (рис. 146). Знайдіть площу криволінійного трикутника  $ABC$  і радіус кола, вписаного в нього.

**690.** Дано правильний  $n$ -кутник. Доведіть, що сума  $n$  векторів із початком у центрі цього  $n$ -кутника і кінцями в його вершинах дорівнює нульовому вектору.

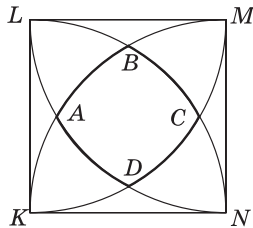


Рис. 145

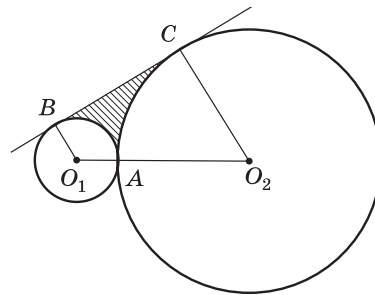


Рис. 146



## Історична довідка

Інтерес людини до правильних многокутників виявлявся з прадавніх часів. Правильні чотирикутники, шестикутники і восьмикутники зустрічаються в культурах Давнього Єгипту і Вавилону у вигляді настінних зображень і прикрас із каменю. Давніх греків цікавила проблема поділу дуги кола на певну кількість рівних частин для побудови правильних вписаних многокутників. Дослідження піфагорійців із цього питання систематизував Евклід, який у четвертій книзі «Начал» описав побудову правильного 15-кутника циркулем і лінійкою. Однак, побудувавши правильні  $n$ -кутники при  $n = 3, 4, 5, 6, 8$ , учені довго не могли дослідити можливість побудови правильного семикутника і дев'ятикутника.



Евклід



Карл Гаусс

Теоретичну можливість побудови правильного 17-кутника ще у 19-річному віці довів знаменитий німецький математик Карл Гаусс (1777–1855). Пізніше він встановив можливість побудови циркулем та лінійкою  $n$ -кутників, для яких  $n = 2^m \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_s$ , де всі  $p_i$  — різні прості числа вигляду  $2^{2^k} + 1$ . З праць Гауса та його послідовників випливає, що для інших значень  $n$  відповідні побудови за допомогою циркуля та лінійки є неможливими. Зокрема, неможливою виявилась побудова правильного семикутника та дев'ятикутника.

Сам Гаусс вважав таке дослідження надзвичайно важливим та висловив побажання щодо зображення на його могилі правильного сімнадцятикутника.

*Математичний папірус Рінда — давньоєгипетський навчальний посібник з арифметики і геометрії періоду Середнього царства, переписаний прибіл. 1650 до н. е. переписувачем Ахмесом на сувій папірису довжиною 5,25 метрів і шириною 33 см*



За відсутності точних математичних розрахунків у минулі часи широко використовували приблизні обчислення й побудови. Але найширше наближені обчислення застосовували в задачах на знаходження довжини кола й площі круга. Ще в папірусі Рінда (XVII ст. до н. е.) зазначалося, що за площу круга слід брати площу квадрата

зі стороною, що дорівнює  $\frac{8}{9}$  діаметра:  $S = \left(\frac{8}{9} \cdot 2R\right)^2 = \frac{256}{81} R^2$ , тобто для

числа  $\pi$  обиралося наближення  $\frac{256}{81} \approx 3,1605\dots$ . В інших єгипетських

та вавилонських текстах зустрічається наближення  $\pi \approx 3$ , яке цілком влаштовувало тогочасних землемірів. Давні римляни за допомогою прямого вимірювання довжини кола мотузкою отримали наближення  $\pi \approx 3,12$ . Але першу спробу визначити число  $\pi$  на основі теоретичних міркувань здійснив у III ст. до н. е. славетний давньогрецький учений Архімед. У своїй роботі «Про вимірювання круга» на основі вимірювання периметрів описаних і вписаних многокутників він до-

вів, що  $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$ . Наближене значення  $\pi = \frac{22}{7} \approx 3,14$ ,

запропоноване Архімедом, використовується, як вам відомо, і в наш час.

З появою нових методів обчислень дослідження числа  $\pi$  продовжувалися. У 1736 р. всесвітньо відомий учений Леонард Ейлер обчислив  $\pi$  з точністю до 153-го десяткового знака. Саме він ввів в обіг позначення  $\pi$  (від першої букви грецького слова «периферія» — коло). У наші часи значення  $\pi$  обчислене з точністю до кількох сотень тисяч знаків, і в пресі час від часу з'являються повідомлення про нові «рекорди» точності цих обчислень.

Але ці досягнення цікавлять хіба що книгу рекордів Гіннеса, адже ніякого практичного значення така точність не має — вона лише демонструє переваги сучасних засобів і методів обчислень.

Дослідження Архімеда і його послідовників започаткували напрям геометрії, який сьогодні часто виділяють в окремий розділ, — геометрію кіл.



Леонард Ейлер



Базельський університет,  
де навчався Леонард Ейлер



## Математичні олімпіади

### Міжнародні математичні олімпіади для школярів



Історію математичних олімпіад для школярів прийнято вести з 1894 року, коли в Угорщині відбулася перша олімпіада з математики для випускників гімназій. Відтоді в багатьох країнах склалася своя система традиційних національних олімпіад з математики. Так, з 1961 року регулярно відбувається Всеукраїнська олімпіада з математики для школярів.

У 1959 році за ініціативою Румунського математичного та фізичного товариства в Румунії відбулася I Міжнародна математична олімпіада (ММО). У ній узяли участь команди з 7 країн. Відтоді це найпрестижніше міжнародне інтелектуальне змагання серед школярів старших класів проводиться кожного року (за винятком 1980 р.). В останні роки в ММО беруть участь понад 100 країн із 5 континентів. Чимало талановитих учнів з України ставали переможцями міжнародних математичних олімпіад. Доречно пригадати Володимира Дрінфельда — харківського школяра, який у 15 років став абсолютним переможцем ММО. Згодом В. Дрінфельд став (єдиним в Україні!) вченим, який одержав найпрестижнішу міжнародну нагороду для молодих математиків — Філдсівську премію (у 1990 році). Уперше офіційно окремою командою українські школярі взяли участь у ММО у 1993 році. З цього моменту, завдячуючи власному таланту, зусиллям учителів і видатних учених-математиків, що готують збірну України до участі в ММО, учні кожного року гідно представляють нашу країну на цьому міжнародному змаганні. Понад 130 українських школярів стали переможцями міжнародних математичних олімпіад, з них більше 30 отримали золоті медалі. Гордість викликають ці вражаючі досягнення наших хлопців і дівчат!

Не менш значущим є всесвітнє визнання української методичної математичної школи. Ще у 1987 році до комплекту завдань міжнародної математичної олімпіади потрапила така геометрична задача кийського вчителя І. А. Кушніра. **У гострокутному трикутнику  $ABC$  бісектриса кута  $A$  перетинає сторону  $BC$  в точці  $L$ , а коло, описане навколо трикутника  $ABC$ , — в точці  $N$ . З точ-**



ки  $L$  проведено перпендикуляри до  $AB$  та  $AC$  з основами  $K$  та  $M$  відповідно. Доведіть, що чотирикутник  $AKNM$  та трикутник  $ABC$  є рівновеликими.

Під час розв'язання цієї задачі варто застосувати геометричні формули та методи, які ви опанували у 9 класі. Розглянемо доведення.

З рівності прямокутних трикутників  $AKL$  та  $AML$  випливає, що трикутник  $KAM$  є рівнобедреним (рис. 147). Отже, бісектриса кута  $A$  перпендикулярна до його основи, тобто  $AN \perp KM$ . Звідси

маємо:  $S_{AKNM} = \frac{1}{2} AN \cdot KM$ . З подібності трикутників  $ABN$  та  $ALC$  за двома кутами випливає, що

$$\frac{AN}{AB} = \frac{AL}{AC}, \text{ тобто } AN = \frac{AB \cdot AC}{AL}.$$

Отже, формула для обчислення площі чотирикутника  $AKNM$  на-

$$\text{буває вигляду } S_{AKNM} = \frac{1}{2} \frac{AB \cdot AC}{AL} \cdot KM.$$

$$\text{З іншого боку, з трикутника } AKL \text{ маємо: } AL = \frac{AK}{\sin \angle KLA}.$$

Враховуючи рівність кутів:  $\angle KLA = \angle AKM = \angle AMK$ , отримуємо:

$$AL = \frac{AK}{\sin \angle AMK}.$$

$$\text{Застосувавши теорему синусів, з трикутника } AKM \text{ маємо: } \frac{AK}{\sin \angle AMK} = \frac{KM}{\sin \angle KAM}.$$

$$\text{Таким чином, } S_{AKNM} = \frac{1}{2} \frac{AB \cdot AC}{AL} \cdot KM = \frac{1}{2} \frac{AB \cdot AC}{\frac{AK}{\sin \angle KAM}} \cdot KM =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{AB \cdot AC}{\frac{KM}{\sin \angle KAM}} \cdot KM = \frac{1}{2} AB \cdot AC \cdot \sin \angle BAC = S_{ABC}.$$

Отже, чотирикутник  $AKNM$  і трикутник  $ABC$  є рівновеликими.

Протягом останніх років задачі, запропоновані нашими фахівцями, неодноразово входили до попередніх списків (ShortLists) завдань, з яких журі обирає шість задач для проведення змагання. Оргкомітет XLVI ММО (2005 р.) відзначив В. А. Ясінського спеціальним сертифікатом за значний внесок у формування ShortLists. Двічі геометричні задачі В'ячеслава Андрійовича входили до комплектів завдань Міжнародних математичних олімпіад (у 1998 і 2002 роках).

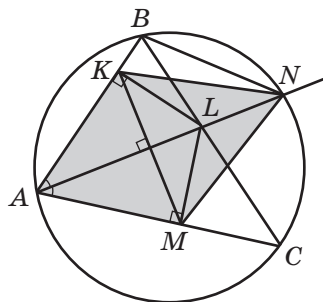


Рис. 147



## Готуємось до ДПА

### Тест 5

*Виберіть одну правильну, на вашу думку, відповідь.*

- Серед наведених формул укажіть формулу площі круга радіуса  $R$ .  
А  $S = 2\pi R$       Б  $S = \frac{1}{2}\pi R^2$       В  $S = \pi R^2$       Г  $S = \pi^2 R$
- Закінчіть речення так, щоб утворилося правильне твердження.  
У правильному многокутнику...  
А кількість сторін більша за кількість кутів.  
Б радіуси описаного і вписаного кіл збігаються.  
В центри описаного і вписаного кіл збігаються.  
Г внутрішній кут завжди більший за зовнішній.
- Знайдіть довжину кола з діаметром 6 см.  
А  $3\pi$  см      Б  $12\pi$  см      В  $9\pi$  см      Г  $6\pi$  см
- Знайдіть радіус кола, описаного навколо квадрата з діагоналлю 10 см.  
А 10 см      Б 5 см      В  $10\sqrt{2}$  см      Г  $5\sqrt{2}$  см
- Знайдіть величину кута правильного шестикутника.  
А  $60^\circ$       Б  $720^\circ$       В  $108^\circ$       Г  $120^\circ$
- Площа кругового сектора становить три чверті площі круга. Знайдіть центральний кут, який відповідає даному сектору.  
А  $90^\circ$       Б  $135^\circ$       В  $240^\circ$       Г  $270^\circ$
- Визначте кількість сторін правильного многокутника, якщо його центральний кут дорівнює  $45^\circ$ .  
А 4      Б 6      В 8      Г 12
- Знайдіть периметр правильного многокутника зі стороною 2 см, якщо його центральний кут удвічі більший за внутрішній.  
А 8 см      Б 6 см      В 12 см      Г 16 см

## Задачі на повторення курсу геометрії 7–9 класів

- 691.** Точки  $B$  і  $C$  лежать на відрізку  $AD$  завдовжки 24 см. Знайдіть довжину відрізка  $BC$ , якщо  $AB = 7$  см,  $AC : CD = 3 : 1$ .
- 692.** Сума трьох кутів, що утворилися в результаті перетину двох прямих, дорівнює  $220^\circ$ . Знайдіть кут між даними прямими.
- 693.** У рівнобедреному трикутнику  $ABC$  з основою  $AC$  проведено медіани  $AN$  і  $CM$ . Доведіть рівність трикутників:
- а)  $ANM$  і  $CMN$ ;                      б)  $ABN$  і  $CBM$ .
- 694.** У трикутнику  $ABC$  бісектриса зовнішнього кута при вершині  $B$  паралельна стороні  $AC$ . Доведіть, що  $AB = BC$ .
- 695.** Доведіть рівність трикутників  $ABC$  і  $A_1B_1C_1$ , якщо  $BC = B_1C_1$ ,  $\angle A = 80^\circ$ ,  $\angle B = \angle B_1 = 55^\circ$ ,  $\angle C_1 = 45^\circ$ .
- 696.** У прямокутному трикутнику  $ABC$  серединний перпендикуляр до гіпотенузи  $BC$  перетинає катет  $AB$  в точці  $M$ . Знайдіть гострі кути трикутника, якщо  $\angle AMC = 50^\circ$ .
- 697.** У прямокутному трикутнику  $ABC$  з гіпотенузою  $BC$  проведено бісектрису  $CM$ . Відрізок  $MK$  — висота трикутника  $CMB$ . Знайдіть гострі кути трикутника  $ABC$ , якщо  $\angle AMK = 140^\circ$ .
- 698.** Дві сторони трикутника дорівнюють 5 см і 12 см. У яких межах може змінюватися довжина третьої сторони, якщо кут між цими сторонами тупий?
- 699.** Побудуйте трикутник за стороною, прилеглим кутом і бісектрисою, проведеною з вершини цього кута.
- 700.** Коло дотикається до сторін кута  $A$  в точках  $B$  і  $C$ . Бісектриса кута  $A$  перетинає це коло в точках  $M$  і  $N$ . Доведіть рівність трикутників  $MBN$  і  $MCN$ .
- 701.** На сторонах  $AD$  і  $BC$  паралелограма  $ABCD$  позначено точки  $M$  і  $N$  відповідно, причому  $AM = CN = AB$ . Доведіть, що чотирикутник  $MBND$  — паралелограм, і знайдіть його кути, якщо  $\angle A = 80^\circ$ .
- 702.** Діагоналі рівнобедреної трапеції взаємно перпендикулярні. Доведіть, що середини сторін трапеції є вершинами квадрата.
- 703.** Основу рівнобедреного трикутника видно з центра описаного кола під кутом  $140^\circ$ . Знайдіть кути трикутника. Скільки розв'язків має задача?
- 704.** Пряма, паралельна основі рівнобедреного трикутника, ділить бічні сторони у відношенні  $3 : 5$ , починаючи від основи. Знайдіть довжину відрізка прямої, який міститься всередині трикутника, якщо середня лінія, що сполучає середини бічних сторін, дорівнює 8 см.

**705.** Бісектриса прямокутного трикутника ділить гіпотенузу на відрізки завдовжки 100 см і 75 см. Знайдіть довжини відрізків, на які ділить гіпотенузу висота трикутника.

**706.** Знайдіть периметр і площу трикутника зі сторонами 8 см і 15 см та кутом між ними  $60^\circ$ .

**707.** У трикутник зі сторонами 11 см, 25 см і 30 см вписано коло. Знайдіть площу правильного трикутника, вписаного в це коло.

**708.** Площа паралелограма дорівнює  $21 \text{ см}^2$ , а одна з його висот 3 см. Знайдіть меншу діагональ паралелограма, якщо його гострий кут дорівнює  $45^\circ$ .

**709.** Радіус кола, вписаного в рівнобедрену трапецію, дорівнює 6 см, а різниця основ 10 см. Знайдіть площу трапеції.

**710.** Знайдіть площу круга, в який вписано прямокутний трикутник із катетами 18 см і 24 см.

**711.** У трикутнику  $ABC$   $AC = b$ ,  $\angle A = \alpha$ ,  $\angle B = \beta$ . Знайдіть висоту  $BD$ .

**712.** Трикутник  $ABC$  задано координатами вершин  $A(-6; 1)$ ,  $B(3; 0)$ ,  $C(4; 5)$ . Знайдіть довжину медіани, проведеної з вершини  $B$ .

**713.** Дано точку  $A(1; 2)$ . Задайте:

а) центральну симетрію, внаслідок якої дана точка переходить у точку  $B(-5; 4)$ ;

б) осьову симетрію, внаслідок якої дана точка переходить у точку  $C(-1; 2)$ ;

в) паралельне перенесення, внаслідок якого дана точка переходить у точку  $D(-4; -1)$ ;

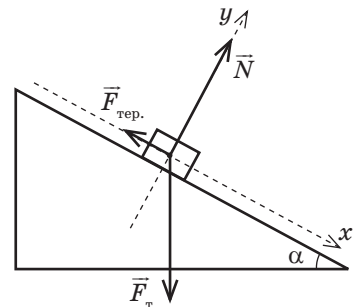
г) поворот навколо початку координат, внаслідок якої дана точка переходить у точку  $E(-2; 1)$ ;

д) гомотетію з центром у початку координат, внаслідок якої дана точка переходить у точку  $F(3; 6)$ .

**714.** Дано паралелограм  $ABCD$ . Знайдіть  $\overline{AC} + \overline{BD} - 2\overline{AD}$ .

**715.** Знайдіть кути трикутника  $ABC$ , якщо  $\overline{AB}(-4; 3)$ ,  $\overline{BC}(7; 1)$ .

**716.** Брусок ковзає вниз уздовж похилої площини. За даними рисунка знайдіть рівнодійну сил, що діють на брусок. Позначте проекції всіх сил на осі  $x$  і  $y$ . Запишіть співвідношення між проекціями. Використовуючи другий закон Ньютона ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ), запишіть формулу для визначення прискорення руху бруска.





Для тих, хто хоче знати більше

## Додатки

### Додаток 1. Паралельне перенесення в декартовій системі координат

Застосування паралельного перенесення в геометрії часто пов'язане з декартовою системою координат. Доведемо відповідні формули паралельного перенесення у два етапи.

Обґрунтуємо спочатку, що *для будь-яких точок  $A$  і  $B$  існує паралельне перенесення, яке переводить точку  $A$  в точку  $B$ , і притому єдине.*

Очевидно, що таке паралельне перенесення  $f$  існує — в напрямі променя  $AB$  на відстань  $AB$ . Доведемо, що будь-яке паралельне перенесення  $g$ , яке переводить точку  $A$  в точку  $B$ , збігається з  $f$ .

Нехай  $C$  — довільна точка площини. Розглянемо випадок, коли  $C$  не лежить на прямій  $AB$  (рис. 148). Нехай точка  $C'$  — образ точки  $C$  при паралельному перенесенні  $f$ , а точка  $C''$  — образ точки  $C$  при паралельному перенесенні  $g$ .

Оскільки  $AB = CC'$ , а промені  $AB$  і  $CC'$  співнаправлені, то  $ABC'C$  — паралелограм за ознакою. Отже, точка  $O$  — середина відрізка  $CB$  — є серединою відрізка  $AC'$ . Аналогічно доводимо, що точка  $O$  є серединою відрізка  $AC''$ . Звідси випливає, що точки  $C'$  та  $C''$  збігаються. Нескладно доводитися їх збіг і у випадку, коли  $C$  лежить на прямій  $AB$  (зробіть це самостійно).

Отже, оскільки точка  $C$  довільна, паралельні перенесення  $f$  і  $g$  збігаються, що й треба було довести.

Доведемо тепер теорему про задання паралельного перенесення формулами в декартовій системі координат.

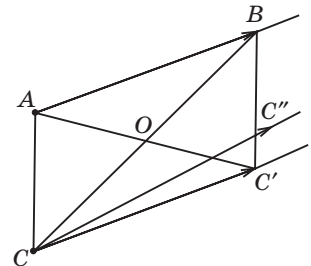


Рис. 148. До обґрунтування єдиності паралельного перенесення



### Теорема (формули паралельного перенесення в прямокутній системі координат)

У прямокутній декартовій системі координат паралельне перенесення, яке переводить точку  $(x; y)$  фігури  $F$  в точку  $(x'; y')$  фігури  $F'$ , задається формулами:  $x' = x + a$ ,  $y' = y + b$ , де  $a$  і  $b$  — числа, однакові для всіх точок фігури  $F$ .

#### Доведення

□ Доведемо спочатку, що перетворення будь-якої точки  $(x; y)$  у точку  $(x'; y')$ , де  $x' = x + a$ ,  $y' = y + b$ ,  $a$  і  $b$  — сталі, є паралельним перенесенням.

Розглянемо довільні точки  $A(x_1; y_1)$  та  $B(x_2; y_2)$ , що переходять у точки  $A'(x_1 + a; y_1 + b)$ ,  $B'(x_2 + a; y_2 + b)$  відповідно. Нехай точка  $B$  належить прямій  $AA'$  (рис. 149). Тоді середини відрізків  $AB'$  та  $BA'$  мають координати  $\left( \frac{x_1 + x_2 + a}{2}, \frac{y_1 + y_2 + b}{2} \right)$ , тобто збігаються.

Отже, чотирикутник  $AA'B'B$  — паралелограм за ознакою. Тому промені  $AA'$  та  $BB'$  співнапрямлені, а довжини відрізків  $AA'$  та  $BB'$  рівні. Такий самий висновок легко обґрунтувати й у випадку, коли точка  $B$  належить прямій  $AA'$ .

Оскільки за доведеним паралельне перенесення, яке переводить точку  $A$  в точку  $A'$ , єдине, а дане перетворення  $x' = x + a$ ,  $y' = y + b$  є саме таким перенесенням, то паралельне перенесення в прямокутній декартовій системі координат задається формулами  $x' = x + a$ ,  $y' = y + b$ . Теорему доведено. ■

Зазначимо, що коли задано точку  $A(x; y)$  і точку  $A'(x'; y')$ , у яку переходить точка  $A$  внаслідок паралельного перенесення, то числа, що визначають це перенесення, легко знайти за формулами  $a = x' - x$ ,  $b = y' - y$ .

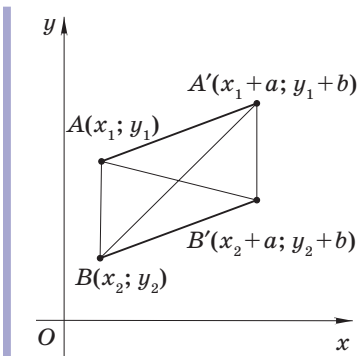


Рис. 149. До доведення формул паралельного перенесення

## Додаток 2. Накладання, переміщення, подібність

На початку вивчення курсу геометрії ми визначили, що рівними фігурами називаються ті, що суміщаються накладанням. Але поняття накладання було введено наочно, тому ми не розглядали докладно його властивості.

Під час вивчення теми «Переміщення» ми визначили рівні фігури як такі, що суміщаються переміщенням, тобто перетворенням, що зберігає відстані між точками. Можна встановити, що будь-яке переміщення на площині є накладанням, і навпаки, накладання на площині є переміщенням. Деталізуємо ці твердження для трикутників.

### Теорема (про тотожність накладання і переміщення трикутників)

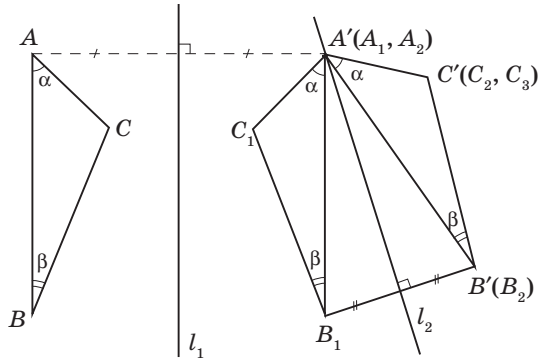
Два трикутники суміщаються накладанням тоді й тільки тоді, коли існує переміщення, що переводить один із них в інший.

### Доведення

□ 1) Нехай існує переміщення  $f$ , що переводить трикутник  $ABC$  у трикутник  $A'B'C'$ , зокрема точку  $A$  в  $A'$ ,  $B$  — в  $B'$ ,  $C$  — в  $C'$ . Тоді, за властивостями переміщення, відрізок  $AB$  накладається на відрізок  $A'B'$ ,  $BC$  — на  $B'C'$ ,  $AC$  — на  $A'C'$ ; отже, трикутник  $ABC$  накладається на трикутник  $A'B'C'$ .

2) Нехай тепер трикутник  $ABC$  накладається на трикутник  $A'B'C'$ , зокрема, відповідні сторони й кути цих трикутників рівні. Доведемо існування переміщення, що переводить трикутник  $ABC$  у трикутник  $A'B'C'$ .

Розглянемо симетрію  $f_1$  відносно прямої  $l_1$  — серединного перпендикуляра до відрізка  $AA'$ . Унаслідок такого переміщення трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $A_1B_1C_1$ , причому точки  $A_1$  і  $A'$  збігаються (рис. 150).



**Рис. 150.** До доведення теореми про тотожність накладання і переміщення трикутників

Розглянемо тепер симетрію  $f_2$  відносно прямої  $l_2$  — серединного перпендикуляра до відрізка  $B_1B'$  (якщо його кінці не збігаються). Тоді трикутник  $A_1B_1C_1$  переходить у трикутник  $A_2B_2C_2$ , причому точки  $A_1$ ,  $A_2$  та  $A'$  збігаються, так само, як і точки  $B_2$  та  $B'$ . За властивістю переміщення  $\angle CAB = \angle C_1A_1B_1 = \angle C_2A_2B_2 = \alpha$ ,  $\angle ABC = \angle A_1B_1C_1 = \angle A_2B_2C_2 = \beta$ . Оскільки в результаті послідовного застосування переміщень  $f_1$  та  $f_2$  точка  $A$  переходить в  $A_2$  ( $A'$ ),  $B$  — в  $B_2$  ( $B'$ ), то відрізок  $AB$  суміщається з  $A'B'$ .

За умовою  $\angle CAB = \angle C'A'B' = \alpha$ ,  $\angle ABC = \angle A'B'C' = \beta$ . Якщо точки  $C_2$  та  $C'$  лежать по один бік від прямої  $A'B'$ , то з наведених рівностей кутів впливає збіг променів  $A'C'$  та  $A_2C_2$ ,  $B'C'$  та  $B_2C_2$ ; отже, точки  $C_2$  та  $C'$  також збігаються. Тому трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $A'B'C'$  в результаті послідовного виконання переміщень  $f_1$  та  $f_2$ . Якщо ж  $C_2$  та  $C'$  лежать по різні боки від прямої  $A'B'$ , то внаслідок симетрії  $f_3$  відносно прямої  $A'B'$  точка  $C_2$  перейде в точку  $C_3$ , що збігається з  $C'$ , і далі доведення є аналогічним до попереднього. Теорему доведено. ■

У процесі доведення другої частини теореми ми задали певне переміщення, що переводить трикутник  $ABC$  у трикутник  $A'B'C'$ , за допомогою осьових симетрій. Насправді, таке переміщення є єдиним.



### Теорема (про однозначність задання переміщення)

Якщо під час деякого переміщення трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $A'B'C'$ , причому точка  $A$  — в точку  $A'$ ,  $B$  — в  $B'$ ,  $C$  — в  $C'$ , то для будь-якої точки площини  $M$  її образ  $M'$  за умови такого переміщення визначається однозначно.

#### Доведення

□ Нехай існують два різних переміщення  $f$  та  $g$ , що переводять точку  $A$  — в  $A'$ ,  $B$  — в  $B'$ ,  $C$  — в  $C'$  (рис. 151). Нехай далі певна точка  $M$  внаслідок переміщення  $f$  переходить у точку  $M_1$ , а внаслідок переміщення  $g$  — в точку  $M_2$ , причому точки  $M_1$  і  $M_2$  не збігаються (рис. 152). Оскільки внаслідок переміщення зберігаються відстані між точками, то  $AM = A'M_1 = A'M_2$ ,  $BM = B'M_1 = B'M_2$ ,  $CM = C'M_1 = C'M_2$ . Отже, точки  $A'$ ,  $B'$  і  $C'$  лежать на серединному перпендикулярі до відрізка  $M_1M_2$ , що суперечить тому, що  $A'B'C'$  — трикутник.

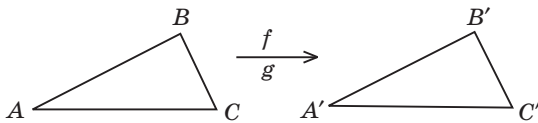


Рис. 151

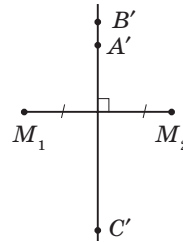


Рис. 152

Отже, переміщення  $f$  і  $g$  збігаються, що й треба було довести. ■

Аналогічного аналізу потребує й ситуація з подібними трикутниками. Спочатку, у восьмому класі, ми визначили подібні трикутники як такі, в яких відповідні кути рівні, а відповідні сторони пропорційні. Але у дев'ятому класі, під час вивчення подібності, ми визначили, що дві фігури є подібними, якщо вони суміщаються перетворенням подібності.

Покажемо, що ці означення подібності для трикутників є рівносильними.

1) Якщо трикутник  $ABC$  переходить у трикутник  $A'B'C'$  внаслідок деякого перетворення подібності  $f$  з коефіцієнтом  $k$ , то  $\angle A = \angle A'$ ,  $\angle B = \angle B'$ ,  $\angle C = \angle C'$ ,  $\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'C'}{BC} = \frac{A'C'}{AC} = k$ , тобто справджуються умови першого означення.

2) Нехай навпаки  $\angle A = \angle A'$ ,  $\angle B = \angle B'$ ,  $\angle C = \angle C'$ ,  $\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'C'}{BC} = \frac{A'C'}{AC} = k$ . Розглянемо гомотетію  $f$  з центром у точці  $A$  і коефіцієнтом  $k$  (рис. 153), яка переводить трикутник  $ABC$  у трикутник  $A_1B_1C_1$  ( $A$  збігається з  $A_1$ ).

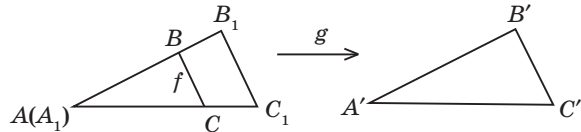


Рис. 153

Тоді  $\triangle A_1B_1C_1 = \triangle ABC$  за трьома сторонами. Отже, за доведеною теоремою існує переміщення  $g$ , що суміщає трикутник  $A_1B_1C_1$  з трикутником  $A'B'C'$ . Але тоді послідовне виконання  $f$  та  $g$  є перетворенням подібності, що суміщає трикутник  $ABC$  з трикутником  $A'B'C'$ , що й треба було довести. ■

Таким чином, ті означення рівних (подібних) трикутників, які зустрічались під час вивчення різних розділів геометрії, рівносильні.

### Додаток 3. Довжина кола і площа круга

Розглянемо криву лінію  $L$ , що сполучає точки  $A$  і  $B$ . Розіб'ємо її точками  $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}$  на  $n$  частин і розглянемо фігуру, що складається з відрізків  $AA_1, A_1A_2, A_2A_3, \dots, A_{n-1}B$  — ламану  $AA_1A_2\dots A_{n-1}B$  (рис. 154). Назвемо таку ламану вписаною в криву  $L$ .

Довжиною кривої  $L$  називається границя, до якої прямує довжина вписаної в неї ламаної,

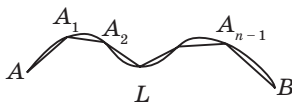


Рис. 154. Довжина кривої

коли число ланок необмежено зростає, а їх довжини наближаються до нуля.

Таке саме означення можна застосувати і для визначення довжини кола. При цьому ламана буде многокутником, вписаним у це коло (рис. 155).

Однак для коректності такого означення потрібно довести, що вказана границя існує. Це доволі складна проблема, яка розв'язується засобами іншої математичної науки — математичного аналізу. Тому визначимо довжину кола таким чином\*.

Розглянемо послідовність  $P_{2^k}$  периметрів вписаних у дане коло правильних  $2^k$ -кутників. Доведемо, що з необмеженим зростанням  $k$  ці периметри наближаються до певної межі  $C$ . Тоді число  $C$  ми називатимемо довжиною даного кола.

Доведемо спочатку допоміжне твердження (лему).

### Лема (про периметри опуклих многокутників)

Якщо один опуклий многокутник міститься всередині іншого опуклого многокутника, то периметр першого менший, ніж периметр другого.

#### Доведення

□ Із вершин внутрішнього многокутника проведемо промені, які перпендикулярні до його відповідних сторін та перетинають сторони зовнішнього многокутника (рис. 156).

Тоді за нерівністю трикутника  $AB \leq CE < CD + DE$ , і т. д.

Отже, периметр внутрішнього многокутника менший за периметр зовнішнього. ■

Із доведеної лему випливають такі наслідки.

- 1) Периметр правильного  $2^k$ -кутника, вписаного у певне коло, менший від периметра правильного  $2^{k+1}$ -кутника, вписаного у те саме коло (рис. 157).

\* Можна довести, що таке означення буде рівносильним попередньому.

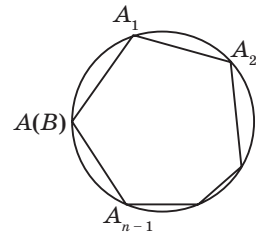


Рис. 155. До означення довжини кола

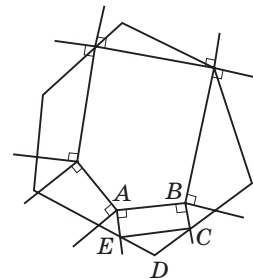


Рис. 156. До доведення лему про периметри опуклих многокутників

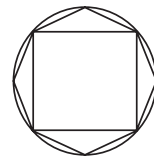


Рис. 157

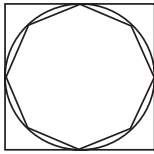


Рис. 158

2) Периметр будь-якого правильного вписаного в коло многокутника менший від периметра будь-якого правильного многокутника, описаного навколо того самого кола (рис. 158).

Отже, послідовність  $P_{2^k}$  зростає зі зростанням  $k$  і обмежена зверху периметром квадрата, описаного навколо даного кола:  $P_{2^k} < P_{2^{k+1}}$ ,  $P_{2^k} < 8R$ . Тоді за теоремою Вейерштрасса з курсу математичного аналізу існує границя  $C$ , до якої наближається  $P_{2^k}$  зі зростанням  $k$ , тобто довжина кола.

Доведемо, що відношення довжини кола до його діаметра є числом сталим для всіх кіл (позначається  $\pi$ ).

Впишемо в кожне з двох довільних кіл радіусів  $R$  та  $R'$  правильні  $2^k$ -кутники (рис. 159).

$$\text{Тоді } P_{2^k} = 2^k \cdot 2 \cdot R \sin \frac{180^\circ}{2^k}, \quad P'_{2^k} = 2^k \cdot 2 \cdot R' \sin \frac{180^\circ}{2^k}.$$

$$\text{Отже, } \frac{P_{2^k}}{P'_{2^k}} = \frac{2R}{2R'}.$$

Звідси за умови необмеженого зростання  $k$

$$\text{маємо } \frac{C}{C'} = \frac{d}{d'}, \text{ що й треба було довести.}$$

$$\text{Отже, } C = \pi d = 2\pi R.$$

Відзначимо, що периметри  $Q_{2^k}$  правильних  $2^k$ -кутників, описаних навколо кола, наближаються до його довжини  $C$  з необмеженим зростанням  $k$ .

Розглянемо правильний  $2^k$ -кутник  $AB\dots M$ , описаний навколо кола радіуса  $R$ . Проведемо дотичні  $G_1F_1$ ,  $K_1L_1$ , ...,  $P_1H_1$  перпендикулярні до відрізків  $AO$ ,  $BO$ , ...,  $MO$ . При цьому утвориться  $2^{k+1}$ -кутник  $G_1F_1K_1L_1\dots H_1$ . Покажемо, що він правильний (рис. 160). Використовуючи властивості правильного описаного многокутника  $AB\dots M$ , маємо:  $AO = BO$ ,  $ON = OT = R$ , звідси  $AN = BT$ . Таким чином, отримали рівність пря-

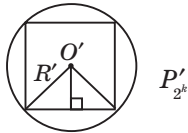
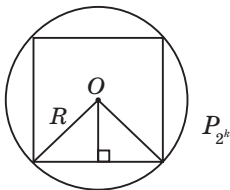


Рис. 159. До обґрунтування формули довжини кола

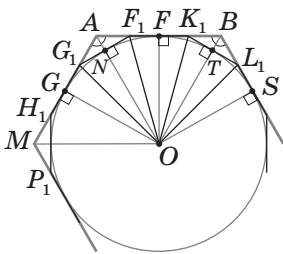
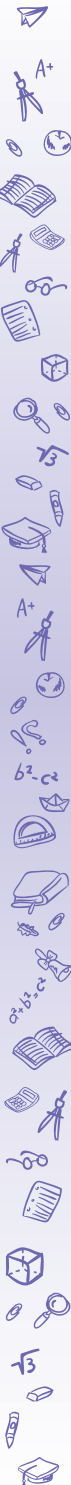


Рис. 160



мокутних трикутників:  $\triangle G_1AN = \triangle F_1AN = \triangle K_1BT = \triangle L_1BT$ . За властивістю відрізків дотичних  $NF_1 = F_1F$ ,  $FK_1 = K_1T$ . Але точка  $F$  — середина відрізка  $AB$ , а  $AF_1 = K_1B$ . Отже,  $G_1N = NF_1 = F_1F = FK_1 = K_1T = TL_1$ . Звідси  $G_1F_1 = F_1K_1 = K_1L_1$ . Аналогічно можна довести, що всі сторони многокутника  $G_1F_1K_1L_1\dots H_1$  рівні. Розглянемо тепер кути  $G_1F_1K_1$  і  $F_1K_1L_1$ . Вони рівні як суміжні з відповідними кутами в рівних трикутниках  $F_1AN$  і  $K_1BT$ . Аналогічно доводимо, що всі кути многокутника  $G_1F_1K_1L_1\dots H_1$  рівні.

Отже,  $2^{k+1}$ -кутник  $G_1F_1K_1L_1\dots H_1$ , описаний навколо кола радіуса  $R$ , є правильним. Із цього згідно з лемою про периметр опуклих многокутників випливає, що  $Q_{2^k} > Q_{2^{k+1}} > P_4$ , де  $P_4$  — периметр квадрата, вписаного в те саме коло. За теоремою Вейерштрасса існує границя  $\bar{C}$ , до якої наближаються периметри  $Q_{2^k}$  правильних описаних  $2^k$ -кутників. Покажемо, що ця границя дорівнює довжині кола  $C$ . Розглянемо правильні  $2^k$ -кутники — описаний і вписаний — для кола радіуса  $R$  (рис. 161) Їхні периметри дорівнюють відповідно  $Q_{2^k} = 2^k \cdot AB$  і  $P_{2^k} = 2^k \cdot KL$ . Отже,

$$\frac{P_{2^k}}{Q_{2^k}} = \frac{KL}{AB} = \frac{KF}{KB} = \cos \angle BKF = \cos \angle KOF = \frac{OF}{OK} = \frac{OF}{R}.$$

Розглянемо величину  $\cos \frac{180^\circ}{2^k} = \cos \angle KOF = \frac{OF}{R}$  за умови необмеженого зростання  $k$ . Оскільки

$KL = \frac{P_{2^k}}{2^k} < \frac{Q_4}{2^k}$ , то зі зростанням  $k$  довжина відрізка  $KL$ , а отже, й відрізка  $KF$ , наближається до нуля. За теоремою Піфагора  $OF = \sqrt{R^2 - KF^2}$ , тому  $OF$  прямує до  $R$  зі зростанням  $k$ .

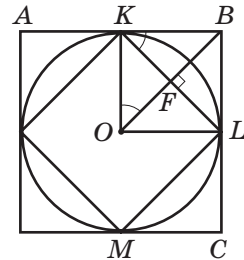
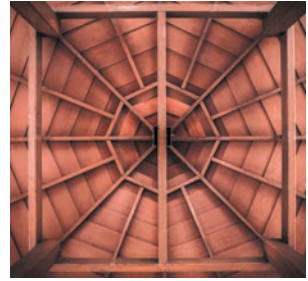


Рис. 161

Отже, величина  $\frac{P_{2^k}}{Q_{2^k}} = \cos \frac{180^\circ}{2^k} = \frac{OF}{R}$  наближається до 1, тобто з необмеженим зростанням  $k$   $\frac{P_{2^k}}{Q_{2^k}} \rightarrow 1$ , інакше кажучи,  $\frac{C}{C} = 1$ , або  $\bar{C} = C$ , що й треба було довести.

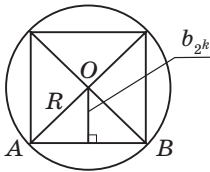


Рис. 162

Перейдемо тепер до розгляду площі круга. Назвемо простою фігурою, яку можна розбити на скінченну кількість трикутників. За означенням дана фігура має площу  $S$ , якщо існують прості фігури, які містяться в даній, і прості фігури, що містять дану, площі яких як завгодно мало відрізняються від  $S$ .

Розглянемо площу круга, ґрунтуючись на цьому означенні.

Очевидно, що площі  $S_{2^k}$  правильних вписаних у дане коло  $2^k$ -кутників (рис. 162) дорівнюють  $S_{2^k} = 2^k \cdot S_{\triangle AOB} = 2^k \cdot \frac{1}{2} \cdot AB \cdot b_{2^k} = \frac{1}{2} P_{2^k} \cdot R \cdot \cos \frac{180^\circ}{2^k}$ .

Отже, за умови необмеженого зростання  $k$  маємо:  $S_{2^k} \rightarrow \frac{1}{2} CR = \frac{1}{2} \cdot 2\pi R \cdot R = \pi R^2$ .

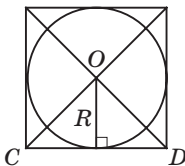


Рис. 163

Аналогічно, площі  $S'_{2^k}$  правильних  $2^k$ -кутників, описаних навколо даного кола (рис. 163), дорівнюють  $S'_{2^k} = 2^k \cdot S_{\triangle COD} = 2^k \cdot \frac{1}{2} \cdot R \cdot CD = \frac{1}{2} Q_{2^k} \cdot R$ .

За умови необмеженого зростання  $k$  маємо:

$$S'_{2^k} \rightarrow \frac{1}{2} CR = \frac{1}{2} \cdot 2\pi R \cdot R = \pi R^2. \text{ Отже, } S_{2^k} \text{ та } S'_{2^k}$$

з необмеженим зростанням  $k$  як завгодно мало будуть відрізнятися від числа  $\pi R^2$ , тобто  $S_{\text{круга}} = \pi R^2$  за означенням.

# Довідкові матеріали

## Таблиця значень тригонометричних функцій

Градуси	$\sin \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	$\operatorname{tg} \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	$\operatorname{ctg} \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	$\cos \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	Градуси
0	0,000	0,000	—	1,000	90
1	0,017	0,017	57,290	1,000	89
2	0,035	0,035	28,636	0,999	88
3	0,052	0,052	19,081	0,999	87
4	0,070	0,070	14,301	0,998	86
5	0,087	0,087	11,430	0,996	85
6	0,105	0,105	9,514	0,995	84
7	0,122	0,123	8,144	0,993	83
8	0,139	0,141	7,115	0,990	82
9	0,156	0,158	6,314	0,988	81
10	0,174	0,176	5,671	0,985	80
11	0,191	0,194	5,145	0,982	79
12	0,208	0,213	4,705	0,978	78
13	0,225	0,231	4,331	0,974	77
14	0,242	0,249	4,011	0,970	76
15	0,259	0,268	3,732	0,966	75
16	0,276	0,287	3,487	0,961	74
17	0,292	0,306	3,271	0,956	73
18	0,309	0,335	3,078	0,951	72
19	0,326	0,344	2,904	0,946	71
20	0,342	0,364	2,747	0,940	70
21	0,358	0,384	2,605	0,934	69
22	0,375	0,404	2,475	0,927	68
23	0,391	0,424	2,356	0,921	67
24	0,407	0,445	2,246	0,914	66
Градуси	$\cos \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	$\operatorname{ctg} \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	$\operatorname{tg} \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	$\sin \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	Градуси

## Закінчення таблиці

Градуси	$\sin \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	$\operatorname{tg} \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	$\operatorname{ctg} \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	$\cos \alpha$ ( $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ )	Градуси
25	0,423	0,466	2,145	0,906	65
26	0,438	0,488	2,050	0,899	64
27	0,454	0,510	1,963	0,891	63
28	0,469	0,532	1,881	0,883	62
29	0,485	0,554	1,804	0,875	61
30	0,500	0,577	1,732	0,866	60
31	0,515	0,601	1,664	0,857	59
32	0,530	0,625	1,600	0,848	58
33	0,545	0,649	1,540	0,839	57
34	0,559	0,675	1,483	0,829	56
35	0,574	0,700	1,428	0,819	55
36	0,588	0,727	1,376	0,809	54
37	0,602	0,754	1,327	0,799	53
38	0,616	0,781	1,280	0,788	52
39	0,629	0,810	1,235	0,777	51
40	0,643	0,839	1,192	0,766	50
41	0,656	0,869	1,150	0,755	49
42	0,669	0,900	1,111	0,743	48
43	0,682	0,933	1,072	0,731	47
44	0,695	0,966	1,036	0,719	46
45	0,707	1,000	1,000	0,707	45
Градуси	$\cos \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	$\operatorname{ctg} \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	$\operatorname{tg} \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	$\sin \alpha$ ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )	Градуси



## Таблиця квадратів натуральних чисел від 1 до 99

Одиниці Десятки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		1	4	9	16	25	36	49	64	81
1	100	121	144	169	196	225	256	289	324	361
2	400	441	484	529	576	625	676	729	784	841
3	900	961	1024	1089	1156	1225	1296	1369	1444	1521
4	1600	1681	1764	1849	1936	2025	2116	2209	2304	2401
5	2500	2601	2704	2809	2916	3025	3136	3249	3364	3481
6	3600	3721	3844	3969	4096	4225	4356	4489	4624	4761
7	4900	5041	5184	5329	5476	5625	5776	5929	6084	6241
8	6400	6561	6724	6889	7056	7225	7396	7569	7744	7921
9	8100	8281	8464	8649	8836	9025	9216	9409	9604	9801



## Теми навчальних проєктів

### До розділу I

1. Застосування тригонометричних співвідношень у будівництві.
2. Застосування властивостей трикутників для розв'язування алгебраїчних задач.
3. Практичні задачі на розв'язування трикутників.
4. Дослідження властивостей чотирикутників та їх застосування.

### До розділу II

1. Застосування геометричного методу координат в алгебрі.
2. Полярні координати на площині та їх застосування.
3. Задачі оптимізації. Застосування методу координат в економіці. Геометричні основи лінійного програмування.
4. Дослідження кривих методом координат. Парабола, гіпербола та еліпс. Застосування кривих в оптиці та техніці.

### До розділу III

1. Застосування геометричних переміщень у мистецтві та архітектурі.
2. Інверсія відносно кола. Застосування інверсії для розв'язування задач.
3. Теорія перспективи у мистецтві та комп'ютерній графіці.
4. Паркети і бордюри на площині. Правильні та архімедові паркети.

## До розділу IV

1. Псевдоскалярний добуток векторів та його застосування.
2. Порівняння алгебраїчного та геометричного підходів до побудови теорії векторів. Застосування векторів для розв'язування алгебраїчних задач.
3. Застосування координатно-векторного методу для дослідження афінних перетворень.
4. Застосування векторів у фізиці.

## До розділу V

1. Ізопериметрична задача. Ізопериметричні властивості правильних багатокутників. Застосування цих властивостей.
2. Геометрія кіл в оптиці: лінзи та серпика.
3. Кола, що дотикаються. Застосування їх властивостей у мистецтві, техніці та архітектурі.
4. Рух по колу. Дослідження його властивостей та застосування в техніці.

## ВІДПОВІДІ ТА ВКАЗІВКИ

### Розділ І. Розв'язування трикутників

- 10.** а)  $60^\circ$  і  $120^\circ$ ; б)  $120^\circ$ ; в)  $135^\circ$ . **11.** а)  $\approx 0,174$  і  $\approx -0,176$ ; б)  $\approx 40^\circ$  і  $\approx 140^\circ$ . **12.** а)  $0,6$ ;  
б)  $-\frac{2}{\sqrt{5}}$ ; в)  $0$ . **13.**  $-0,8$  і  $-0,75$ . **17.** а)  $\operatorname{tg} \alpha = -2,4$ ,  $\operatorname{ctg} \alpha = -\frac{5}{12}$ ; б)  $\operatorname{tg} \alpha = -\frac{8}{15}$ ,  $\operatorname{ctg} \alpha = -\frac{15}{8}$ ;  
в)  $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{ctg} \alpha = -1$ . **18.** а)  $-\frac{24}{7}$ ; б)  $-\frac{5}{12}$ . **20.** а)  $\cos^2 \alpha$ ; б)  $\frac{1}{\cos^2 \alpha}$ . **21.** а)  $\sin^2 \alpha$ ;  
б)  $1$ . **22.**  $0,6$  і  $-0,8$ . **23.**  $\frac{5}{13}$  і  $-\frac{12}{13}$ . **28.**  $\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{5}}$ ,  $\cos \alpha = -\frac{2}{\sqrt{5}}$  або  
 $\sin \alpha = \frac{2}{\sqrt{5}}$ ,  $\cos \alpha = -\frac{1}{\sqrt{5}}$ . **29.**  $\frac{\sqrt{3}}{3}$  або  $-\frac{\sqrt{3}}{3}$ . *Вказівка.* Складіть праві й ліві частини заданої рівності й основної тригонометричної тотожності. **30.** а)  $170^\circ$ ,  
 $120^\circ$ ,  $50^\circ$ ; б)  $170^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $120^\circ$ ; в)  $120^\circ$ ,  $170^\circ$ ,  $50^\circ$ . **31.** а)  $\sin \alpha > \sin \beta$ ; б)  $\operatorname{tg} \alpha < \operatorname{tg} \beta$ ;  
в)  $\operatorname{ctg} \alpha > \operatorname{ctg} \beta$ . **32.**  $3$  см і  $3\sqrt{3}$  см. **33.**  $255$  см<sup>2</sup> або  $68\sqrt{13}$  см<sup>2</sup>. **39.** а)  $7$  см; б)  $13$  см;  
в)  $19$  см. **40.**  $35$  см. **41.**  $135^\circ$ . **43.**  $9$ . **44.**  $5$  см або  $\sqrt{41}$  см. **45.**  $7$  см. **46.** а)  $5$  см  
і  $\sqrt{109}$  см; б)  $14$  см і  $2\sqrt{129}$  см. **47.**  $a\sqrt{2(1+\cos \alpha)}$  і  $a\sqrt{2(1-\cos \alpha)}$  або, за  
умови розв'язування без теореми косинусів,  $2a \cos \frac{\alpha}{2}$  і  $2a \sin \frac{\alpha}{2}$ . **48.**  $2\sqrt{13}$  см  
і  $14$  см. **49.** а) Тупокутний; б) прямокутний; в) гострокутний. **50.**  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{5}{7}$ ,  $\frac{19}{35}$ ;  
гострокутний. **51.** а)  $38$  см; б)  $8$  см і  $14$  см. **52.**  $8$  см і  $9$  см. **53.**  $4\sqrt{7}$  см. **54.**  $\frac{5\sqrt{7}}{14}$ .  
**55.**  $19$  см. **58.**  $4$  см. *Вказівка.* Доведіть, що  $ABCK$  — рівнобічна трапеція,  
і застосуйте теорему косинусів у трикутнику  $ACD$ . **59.**  $\frac{8\sqrt{3}}{3}$  см,  
 $4\sqrt{2}$  см. **60.**  $45^\circ$  і  $135^\circ$ . **67.**  $1$  і  $\sqrt{3}$ . **68.** а)  $4$  см; б)  $30^\circ$ . **69.** а)  $6$  см; б)  $45^\circ$ .

70.  $30^\circ$  або  $150^\circ$ . 71. 9 м. 72.  $\sqrt{2}$ . 74. 8 см. 75.  $AC = 12$  м,  $AB \approx 6,21$  м,  $BC \approx 8,78$  м. 76.  $2\sqrt{2}$ . 77.  $\frac{a \sin \beta}{\sin\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right)}$ ,  $\frac{a \sin \alpha}{\sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right)}$ . 78.  $\frac{a \sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta}$ . 79. 24 см,  $8\sqrt{3}$  см,  $8\sqrt{3}$  см. 80.  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  або  $30^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $30^\circ$ . 81.  $m(3 + \sqrt{6})$ ,  $m(2 + \sqrt{6})$ .
82.  $\frac{P \sin \alpha}{\sin \alpha + \sin \beta + \sin(\alpha + \beta)}$ ,  $\frac{P \sin \beta}{\sin \alpha + \sin \beta + \sin(\alpha + \beta)}$ ,  $\frac{P \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha + \sin \beta + \sin(\alpha + \beta)}$ . 83. Вказівка. Якщо  $H$  — ортоцентр трикутника  $ABC$ , то  $\angle AHB = 180^\circ - \angle C$ . 84. 10,625 см. 85.  $60^\circ$  і  $120^\circ$ . 86.  $AD > DB$ . 92.  $150^\circ$ ,  $\approx 3,11$  см,  $\approx 3,11$  см. 93.  $90^\circ$ , 5 см,  $5\sqrt{3}$  см. 94. а)  $\alpha = 105^\circ$ ,  $b \approx 7,32$ ,  $c \approx 5,18$ ; б)  $\gamma = 30^\circ$ ,  $a \approx 7,71$ ,  $c \approx 3,92$ . 95. а)  $c = 19$ ,  $\alpha \approx 13^\circ$ ,  $\beta \approx 107^\circ$ ; б)  $a = 13$ ,  $\beta \approx 28^\circ$ ,  $\gamma \approx 32^\circ$ . 96. Не встигнуть. 97. а)  $\gamma = 76^\circ$ ,  $b \approx 16,78$ ,  $c \approx 18,11$ ; б)  $c = 13$ ,  $\alpha \approx 23^\circ$ ,  $\beta \approx 22^\circ$ . 98. а)  $\alpha \approx 22^\circ$ ,  $\beta \approx 8^\circ$ ,  $\gamma = 150^\circ$ ; б)  $\alpha \approx 28^\circ$ ,  $\beta \approx 62^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$ . 99. а)  $\beta \approx 21^\circ$ ,  $\gamma \approx 39^\circ$ ,  $c \approx 8,69$ ; б)  $\gamma \approx 32^\circ$ ,  $\alpha \approx 142^\circ$ ,  $a \approx 11,65$  або  $\gamma \approx 148^\circ$ ,  $\alpha \approx 26^\circ$ ,  $a \approx 8,24$ ; в) розв'язків немає. 100. а)  $\alpha \approx 13^\circ$ ,  $\beta \approx 107^\circ$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ; б)  $\beta \approx 30^\circ$ ,  $\gamma \approx 128^\circ$ ,  $c \approx 12,62$  або  $\beta \approx 150^\circ$ ,  $\gamma \approx 8^\circ$ ,  $c \approx 2,22$ . 101. а)  $a = 4$ ,  $\alpha \approx 42^\circ$ ,  $\beta \approx 108^\circ$ ,  $b \approx 5,70$  або  $a = 4$ ,  $\alpha \approx 138^\circ$ ,  $\beta \approx 12^\circ$ ,  $b \approx 1,23$ ; б)  $\gamma = 45^\circ$ ,  $c = 13$ ,  $\alpha \approx 112^\circ$ ,  $\beta \approx 23^\circ$  або  $\gamma = 135^\circ$ ,  $c \approx 22,56$ ,  $\alpha \approx 32^\circ$ ,  $\beta \approx 13^\circ$ . 102.  $\angle BAD = 15^\circ$ ,  $\angle ABD = 60^\circ$ ,  $\angle ADB = 105^\circ$ ,  $AB = 4$  см,  $AD \approx 3,59$  см,  $BD \approx 1,07$  см. 103. а) Гострокутний; б) тупокутний; в) гострокутний або тупокутний. 104.  $\frac{\sin(\beta + \gamma)\sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha}}{\sin \gamma}$ . 105.  $\frac{a \sin \alpha \sin \gamma}{c \sin \beta}$ .
106.  $\frac{l \sin(\beta - \alpha)}{\cos \beta}$ . 107.  $\frac{a \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)}$ . 108. 50 м. 109.  $\approx 28$  см. Вказівка. Доведіть, що діагональ трапеції є бісектрисою кута при більшій основі. 110.  $\approx 8,26$  см. Вказівка. Доведіть, що діагональ трапеції є бісектрисою кута при меншій основі. 111. Якщо  $a \geq b$  — один розв'язок; якщо  $a < b$ , то при  $a > b \sin \alpha$  — два розв'язки, при  $a = b \sin \alpha$  — один розв'язок, при  $a < b \sin \alpha$  — розв'язків немає. 112. а)  $a \approx 10$ ,  $b \approx 14,14$ ,  $c \approx 19,32$ ; б)  $a = 20$ ,  $\alpha \approx 83^\circ$ ,  $\beta \approx 27^\circ$ ,  $\gamma \approx 70^\circ$ . 113. а)  $a \approx 16$ ,  $b \approx 19$ ,  $c \approx 5$ ; б)  $a = 4\sqrt{13}$ ,  $b = 10$ ,  $c = 2\sqrt{73}$ .

$$114. AB = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\alpha + \beta)}, BO = \frac{a \sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma)}, AO = \sqrt{b^2 + \frac{a^2 \sin^2 \gamma}{\sin^2(\alpha + \gamma)} - \frac{2ab \sin \gamma \cos \beta}{\sin(\alpha + \gamma)}}.$$

$$115. \frac{ab}{a+b}. 116. 30 \text{ см}^2. 117. 96 \text{ см}^2. 123. \text{ а) } 30; \text{ б) } 9\sqrt{3}; \text{ в) } 20. 124. \text{ а) } 54\sqrt{3} \text{ см}^2;$$

$$\text{б) } 24 \text{ см}^2; \text{ в) } 36 \text{ см}^2. 125. \text{ а) } 25 \text{ см}^2; \text{ б) } 16\sqrt{2} \text{ см}^2; \text{ в) } 18 \text{ см}^2. 126. 8 \text{ см}.$$

$$127. 30^\circ \text{ і } 150^\circ. 128. 12 \text{ м}. 129. \text{ а) } 84; \text{ б) } 156; \text{ в) } 84; \text{ г) } 204. 130. 720 \text{ см}^2.$$

$$131. 12. 132. \text{ а) } 3 \text{ см і } 6,25 \text{ см}; \text{ б) } 2 \text{ см і } 12,5 \text{ см}. 133. 3 \text{ і } 32,5. 134. \text{ а) } \frac{h_b h_c}{2 \sin \alpha};$$

$$\text{б) } \frac{h_b^2 \sin \beta}{2 \sin \alpha \sin(\alpha + \beta)}. 135. \text{ а) } 16\sqrt{3} \text{ см}^2; \text{ б) } 40 \text{ см}^2; \text{ в) } 25 \text{ см}^2. 136. \text{ а) } 200 \text{ см}^2;$$

$$\text{б) } 6\sqrt{3} \text{ см}^2. \text{ Вказівка. Знайдіть найбільший кут трикутника. } 137. 18 \text{ см}.$$

$$138. 3 \text{ см і } 3\sqrt{3} \text{ см}. 140. \text{ а) } 12 \text{ і } 1,5; \text{ б) } 8 \text{ і } 2; \text{ в) } 15 \text{ і } 3. 141. \text{ а) } 8 \text{ і } 10,625;$$

$$\text{б) } 16 \text{ і } 21,25. 143. 6 \text{ см і } 12,5 \text{ см}. 144. 4 \text{ см і } 8,125 \text{ см}. 145. 84 \text{ см}^2. \text{ Вказівка.}$$

Проведіть через вершину тупого кута пряму, паралельну діагоналі трапеції.

146. 48 см<sup>2</sup>. Вказівка. Проведіть через вершину тупого кута пряму,

паралельну бічній стороні трапеції. 147. 12 см, 600 см<sup>2</sup>. 148. 42,5 см.

$$149. 3,8 \text{ м}. 150. 30 \text{ см}. 151. 6 \text{ см}. 152. \sqrt{37} \text{ м і } \sqrt{93} \text{ м}. 156. \angle C = 180^\circ - (\alpha + \beta),$$

$$AB = 2R \sin(\alpha + \beta), BC = 2R \sin \alpha, AC = 2R \sin \beta. 158. 240\sqrt{3} \text{ см}^2. 159. \sqrt{65} \text{ см}$$

$$\text{або } 17 \text{ см}. 160. \text{ До вершини найбільшого кута. } 161. 24 \text{ см}, 20 \text{ см}, 20 \text{ см}.$$

$$162. 21\frac{2}{3} \text{ см}. 163. 18. \text{ Вказівка. Три медіани трикутника при перетині ділять даний трикутник на шість рівновеликих трикутників. } 164. 2. \text{ Вказівка.}$$

Нехай  $R$  — радіус описаного кола. Виразіть через  $R$  довжини відрізків  $BN$  і  $CN$  та запишіть теорему косинусів у трикутниках  $ABN$  і  $ACN$ .

$$166. 27 \text{ см}. 167. \text{ Вказівка. Розгляньте два випадки: коли сторони } a, b, c, d \text{ йдуть послідовно та коли це не справджується. } 168. \text{ Вказівка.}$$

За допомогою теореми косинусів доведіть, що синус кута між сторо-

нами  $a$  і  $b$  дорівнює  $\frac{2\sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)(p-d)}}{ab+cd}$ .

$$170. 2\frac{9}{13} \text{ см}. \text{ Вказівка.}$$

Якщо  $AC$  — гіпотенуза трикутника,  $O$  — центр вписаного кола, то  $\angle AOC = 135^\circ$ . Скористайтеся методом площ у трикутнику  $AOC$ . **171.**  $\frac{ab}{4}$ .

**172.**  $\frac{ab}{b-a}$ . *Вказівка.* Проведіть через вершину меншої основи пряму, паралельну бічній стороні, і застосуйте до отриманого трикутника теорему косинусів, враховуючи, що сума квадратів бічних сторін трапеції дорівнює  $a^2 + b^2$ .

## Розділ II. Координати на площині

- 182.** а)  $B(-1; 5)$ ; б)  $A(-3; 1)$ . **183.** а)  $E(12; 1)$ ; б)  $D(5; -19)$ . **184.** а)  $D(6; 9)$ ; б)  $A(-3; 2)$ . **186.** а) 10; б)  $\sqrt{82}$ ; в) 13. **187.** а) -2 або 6; б) 2. **188.** 16. **191.** а)  $B(-4; -3)$ ; б)  $B(4; 3)$ . **192.**  $x = 2, y = -1$ . **193.** а)  $D(3; 0)$ ; б)  $D(4; 5)$ . **194.**  $D(-1; -1)$ . **195.**  $M$ . **196.** а)  $(3; 0)$ ; б)  $(0; -3)$ . **197.**  $AC$ . **198.** 5. **199.**  $2\sqrt{2}$ . **202.**  $(2; -6), (6; 4), (-6; 10)$ . *Вказівка.* Дані точки разом із кожною із шуканих вершин утворюють паралелограм. **204.**  $(2; 5)$ . **206.** 10. *Вказівка.* Доведіть, що даний трикутник прямокутний. **207.**  $P = 24, S = 24$ . **209.** Середина гіпотенузи. **217.**  $A, C, D$ . **218.** а)  $(x + 2)^2 + (y - 1)^2 = 9$ ; б)  $x^2 + y^2 = 25$ ; в)  $x^2 + (y - 1)^2 = 4$ . **219.**  $(x - 1)^2 + (y - 1)^2 = 25$ ;  $C, D$ . **220.** а)  $(8; 6), (8; -6)$ ; б)  $(-8; -6), (8; -6)$ . **221.**  $(-4; 0), (0; 0), (0; 2)$ . **222.**  $(0; 3), (0; -1), (\sqrt{3}; 0), (-\sqrt{3}; 0)$ . **223.**  $B, C, E$ . **224.** а)  $x = -6$ ; б)  $y = 2$ ; в)  $x + 3y = 0$ . **225.**  $x + y = 0$ ;  $B$ . **226.** а)  $(7; 3)$ ; б)  $(-2; 0)$  і  $(0; -6)$ ; в)  $(2; 2)$  і  $(-2; -2)$ . **227.**  $(0; -3)$ . **228.**  $(3; -3)$ . **229.** а)  $(3; -1), R = 4$ ; б)  $(0; -5), R = 1$ . **230.** а)  $(x - 2)^2 + (y - 1)^2 = 25$ ; б)  $(x + 4)^2 + (y - 9)^2 = 4$ ; в)  $x^2 + (y + 2)^2 = 1$ . **231.** а)  $x^2 + y^2 = 36$ ; б)  $(x - 1)^2 + (y + 4)^2 = 25$ . **232.**  $(x + 4)^2 + (y - 5)^2 = 25$ ;  $(0; 2)$  і  $(0; 8)$ . **233.**  $(x - 2)^2 + y^2 = 4$ ;  $(x + 2)^2 + y^2 = 4$ . **234.** а)  $4x - y - 2 = 0$ ; б)  $x + 2y = 0$ ; в)  $x + y + 3 = 0$ . **235.**  $x = -1, x - y = 0, x + 3y - 8 = 0$ . **236.** а)  $(-1; -2)$ ; б)  $(0; 1)$ ; в)  $(2; -2)$ . **237.** а)  $(-3; 1)$  і  $(6; 4)$ ; б)  $(2; 1)$  і  $(2; -1)$ . **238.**  $(3; 6); (1; 4); (5; 4)$ . **239.** а)  $x^2 + (y - 1)^2 = 25$ ; б)  $(x - 3)^2 + (y - 2)^2 = 8$  або  $(x - 3)^2 + (y - 6)^2 = 8$ . **240.**  $(x + 3)^2 + y^2 = 25$  або  $(x - 5)^2 + y^2 = 25$ . **243.**  $2\sqrt{2}$ . **244.** 12;  $2x - 3y + 3 = 0$ .

- 246.** 15 см, 20 см, 25 см. **253.** а)  $2x + 3y - 5 = 0$ ; б)  $x + y = 0$ . **254.**  $2x - y - 1 = 0$  і  $x + 2y - 3 = 0$ . **258.** а)  $2x - y + 5 = 0$ ; б)  $x^2 + y^2 = 5$ . **259.**  $4x - 4y + 5 = 0$ . **260.** а)  $y = \sqrt{3}x + 1$ ; б)  $y = -x - 1$ . **261.**  $3x + 4y - 25 = 0$ ,  $3x + 4y + 25 = 0$ . **262.**  $x - 3y + 7 = 0$  або  $x - 3y - 13 = 0$ . **270.** Коло радіуса  $0,5R$ , яке дотикається до даного кола внутрішньо в точці  $A$ , окрім цієї точки. *Вказівка.* Виберіть систему координат так, що  $O(0; 0)$  — центр даного кола,  $A(R; 0)$ . **271.** Пряма, яка проходить через середину  $N$  сторони  $AB$  перпендикулярно до  $CN$ . **273.** а)  $D(1; 2)$ ; б)  $D(0; 1)$ . **274.**  $C(7; 3)$ ,  $D(4; -2)$ . **276.**  $(0; 1)$  або  $(0; 9)$ . **277.** а)  $(x - 2)^2 + (y - 1)^2 = 25$ ,  $x \neq -3$ ,  $x \neq 7$ ; б)  $x = -3$  або  $x = 7$ ,  $y \neq 1$ . **278.**  $(x + 2)^2 + (y - 2)^2 = 4$ . **279.**  $x + y - 1 = 0$ . **281.**  $x - 7y + 25 = 0$ . **282.**  $(x - 3)^2 + (y - 5)^2 = 25$ . **283.**  $\sqrt{13}$ . **284.**  $(x - 3)^2 + (y + 2)^2 = 25$ . **286.**  $k = \pm \frac{4}{3}$ . **287.**  $C(2; 1)$ .

### Розділ III. Геометричні перетворення

- 299.**  $\angle K = 70^\circ$ ,  $\angle N = 90^\circ$ . **300.**  $\angle A = \angle C = 40^\circ$ ,  $\angle B = 100^\circ$ . **304.**  $60^\circ$  і  $120^\circ$ . **305.**  $\angle A = \angle D = 40^\circ$ ,  $\angle B = \angle C = 140^\circ$ . **329.** а)  $(8; -1)$ ; б)  $(0; 9)$ ; в)  $(-4; 6)$ . **330.** а)  $(-4; -3)$ ; б)  $(-a; -b)$ . **333.** а)  $(3; 9)$ ; б)  $(-2; 5)$ ; в)  $(8; 0)$ . **334.** а)  $(a; -b)$ ; б)  $(-a; b)$ . **335.** а)  $y = -x$ ; б)  $y = -x$ ; в)  $y = x$ . **337.** а)  $(x + 4)^2 + (y + 3)^2 = 25$ ; б)  $(x + 6)^2 + (y - 5)^2 = 25$ . **338.** а)  $y = -2$ ; б)  $y = -x - 1$ . **341.** а)  $(x + 16)^2 + (y - 3)^2 = 25$ ; б)  $x = -2$ . **342.** а)  $x^2 + (y - 6)^2 = 4$ ; б)  $x = 0$ . **351.**  $(-4; 0)$ ,  $(4; 0)$ ,  $(4; -4)$ . **369.** а)  $(-4; 1)$ ; б)  $(5; -4)$ . **370.** У напрямі додатної півосі осі  $Ox$  на 4 одиниці. **371.** а)  $(-3; 7)$ ; б)  $(5; -1)$ . **372.** а) Ні; б) так. **373.**  $x' = x - 9$ ,  $y' = y + 5$ . **377.**  $x' = x + 4$ ,  $y' = y - 5$ . **378.**  $x^2 + (y - 6)^2 = 36$ . **379.**  $A'(2; 1)$ ,  $C'(5; 2)$ . **381.** Точка перетину серединних перпендикулярів до відрізків  $AA'$  і  $BB'$ . **382.** Покласти першу монету в центр столу, а решту монет — симетрично відносно центра столу до ходів суперника. **383.** Брати стільки ж цукерок, скільки взяв перший гравець, але з іншої коробки (тобто робити ходи, симетричні ходам першого



гравця). **386.**  $756 \text{ см}^2$ . **394.** а) 12 см; б) 18 см. **395.** 0,25. **396.** а) 5; б)  $16 \text{ см}^2$ . **397.**  $18 \text{ см}^2$ . **398.**  $320 \text{ м}^2$ . **399.**  $40 \text{ см}^2$ . **401.** Точка перетину продовжень бічних сторін. **404.** а) 0,5; б) 2. **405.** а)  $(-1; 5)$ ; б)  $(1; 4)$ . **406.**  $1500 \text{ см}^2$ . **407.**  $24 \text{ см}^2$ . **408.**  $72 \text{ см}^2$ . **411.**  $\sqrt{2} : 2$ . **421.** *Вказівка.* Застосуйте симетрію відносно даної точки. **422.** *Вказівка.* Застосуйте симетрію відносно прямої  $l$ . **423.** *Вказівка.* Застосуйте поворот на  $90^\circ$  навколо точки  $D$ . **424.** 10 см. *Вказівка.* Застосуйте паралельне перенесення в напрямі променя  $OO_1$  на 10 см. **425.** *Вказівка.* Застосуйте симетрію відносно серединного перпендикуляра до третьої сторони. **426.** *Вказівка.* Відобразіть менше коло симетрично відносно будь-якої його точки  $A$ . Шукана пряма проходить через точку  $A$  і точку перетину образу меншого кола з більшим. **427.** *Вказівка.* Застосуйте поворот навколо точки  $A$  на  $90^\circ$ , внаслідок якого точка  $D$  переходить у точку  $B$ . **428.** *Вказівка.* Нехай  $ABCD$  ( $AD \parallel BC$ ) — шукана трапеція. Застосуйте паралельне перенесення діагоналі  $BD$  в напрямі променя  $AD$  на відстань  $BC$ . **429.** Так. **430.**  $x' = x - 3$ ,  $y' = y - 3$ ;  $D(2; 1)$ . **433.** а) Середина відрізка  $OO_1$ ; б) пряма  $AB$ ; в) довільна точка  $X$  прямої  $AB$ ,  $\angle OXO_1$ ; г) промінь  $OO_1$  (або  $O_1O$ ), відстань  $OO_1$ . **436.** Коло, гомотетичне даному відносно його центра з коефіцієнтом 0,5. **439.** *Вказівка.* Застосуйте симетрію одного з даних кіл відносно прямої  $l$ . **443.** *Вказівка.* Застосуйте гомотетію з центром  $A$ . **444.** *Вказівка.* Застосуйте гомотетію з центром у вершині даного кута.

#### Розділ IV. Вектори на площині

**458.** а)  $\overline{(4; 5)}$ ; б)  $\overline{(-3; 4)}$ ; в)  $\overline{(0; -4)}$ . **460.** а) 25; б) 5; в) 3. **461.** а)  $\overline{AB}$   $(8; -6)$ ,  $|\overline{AB}| = 10$ ; б)  $\overline{AB}$   $(-12; -5)$ ,  $|\overline{AB}| = 13$ . **462.**  $(3; 2)$ ,  $(-2; 7)$ . **463.**  $(3; -9)$ . **464.**  $A(0; -2)$ . **466.** 3,  $4\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{65}$ . **467.** 9 і 7. **468.** а) Ромб; б) прямокутник; в) трапеція. **471.** 9 або  $-5$ . **472.**  $(1; 2)$  або  $(-1; -2)$ . **473.** 8 або  $-8$ . **474.**  $(3; 1)$ ,  $\sqrt{10}$ . **475.** Так. **476.** Ні. **479.**  $90^\circ$ . **493.** а)  $\overline{(-4; 1)}$  і  $\overline{(-2; -3)}$ ;

- б)  $(4; -4)$  і  $(0; -10)$ . **494.** а)  $a$ ; б)  $a\sqrt{3}$ ; в)  $a$ ; г)  $a\sqrt{3}$ . **495.** а)  $0,5a$ ; б)  $a$ ; в)  $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ ; г)  $a$ . **498.** а)  $\bar{a}$ ; б)  $\bar{b}$ ; в)  $\bar{b}-\bar{a}$ . **499.** а)  $-\bar{a}$ ; б)  $\bar{b}-\bar{a}$ ; в)  $\bar{a}-\bar{b}$ .
- 500.** а)  $(1; -8)$ ; б)  $(3; 7)$ ; в)  $(-2; -13)$ . **501.** а)  $(1; 2)$ ; б)  $(3; 6)$ ; в)  $(2; 4)$ . **502.** а)  $(9; -1)$ ; б)  $(-8; -3)$ ; в)  $(8; 3)$ . **503.** а) 5; б) 5; в) 2,5. **504.** а) 13; б) 10; в) 12.
- 507.** а)  $\bar{a}+\bar{b}$ ; б)  $-\bar{a}-\bar{b}$ ; в)  $\bar{a}-\bar{b}$ . **508.** а)  $\bar{a}-\bar{b}$ ; б)  $-\bar{a}-\bar{b}$ . **510.** а) Ні; б) так; в) так. **514.**  $x+2y=0$ . **515.**  $90^\circ$ . **525.** а) -2 або 2; б)  $-\frac{1}{3}$  або  $\frac{1}{3}$ . **526.** а)  $\bar{b}(1; -6)$ ; б)  $\bar{b}(-18; -27)$ . **529.**  $\overline{AB}(4; -6)$ ,  $\overline{BM}(-2; 3)$ . **531.** 4; ні. **532.** а) 2; б) 30.
- 533.** а) 0; б) 1. **534.** а) -8; б) -2; в) 18. **535.** а)  $90^\circ$ ; б)  $45^\circ$ . **537.** 6. **538.** а)  $\bar{c}(4; 3)$ ,  $|\bar{c}|=5$ ; б)  $\bar{c}(13; -13)$ ,  $|\bar{c}|=13\sqrt{2}$ . **539.** -3. **542.**  $\overline{AB}=0,5\bar{a}-\bar{b}$ ,  $\overline{CB}=-0,5\bar{a}-\bar{b}$ . **543.**  $\overline{AD}=0,5(\bar{a}+\bar{b})$ ,  $\overline{CD}=-0,5(\bar{a}-\bar{b})$ . **545.** 14; так. **546.** 6, так або -6, ні. **547.**  $\angle A=60^\circ$ ,  $\angle B \approx 22^\circ$ ,  $\angle C \approx 98^\circ$ . **548.**  $\angle A=\angle C=45^\circ$ ,  $\angle B=90^\circ$ .
- 550.** -1. **551.** -1. **555.**  $\overline{BM}=\frac{1}{3}\bar{b}-\frac{2}{3}\bar{a}$ ,  $\overline{MA}=-\frac{1}{3}(\bar{a}+\bar{b})$ . **556.**  $\overline{AM}=\bar{a}+\frac{1}{4}\bar{b}$ ,  $\overline{MD}=\frac{3}{4}\bar{b}-\bar{a}$ . **557.**  $60^\circ$ . **558.** 0. **559.** а)  $2\sqrt{10}$ ; б) 1,5; в) 0. *Вказівка.* Знайдіть скалярний квадрат шуканого вектора. **560.**  $120^\circ$ . **561.** 18 см і 48 см. **562.** 34 см; прямокутник. **573.** *Вказівка.* Знайдіть скалярний добуток векторів  $\overline{BM}=\overline{BD}+\overline{DM}$  і  $\overline{AK}=\overline{AC}+\overline{CK}$ . **575.**  $30^\circ$ . **576.** 7. **577.** а)  $120^\circ$ ; б) 4 см. **578.** а)  $120^\circ$ ; б) 2 см. **580.** 8,5 см. **582.** С. **583.**  $\bar{b}(2; -4)$ . **584.**  $45^\circ$ . **585.** -18; 18; 0. **588.** *Вказівка.* Скористайтесь тим, що вектори-доданки мають рівні довжини і співнапрямлені з векторами  $\overline{AB}$  і  $\overline{AC}$  відповідно.
- 589.** *Вказівка.* Доведіть, що під час повороту на  $90^\circ$  вказаний вектор-сума перейде у нульовий вектор. **590.** *Вказівка.* Спочатку доведіть, що  $AH \perp BC$ . Для цього покажіть, що  $\overline{AH}=\overline{OB}+\overline{OC}$ ,  $\overline{BC}=\overline{OC}-\overline{OB}$  і  $\overline{AH} \cdot \overline{BC}=0$ . **591.** *Вказівка.* Застосуйте формулу Гамільтона з попередньої задачі і формулу  $\overline{OM}=\frac{1}{3}(\overline{OA}+\overline{OB}+\overline{OC})$ .

**593.**  $120^\circ$ . **595.** *Вказівка.* Розкладіть вектори  $\overline{AN}$ ,  $\overline{BK}$  і  $\overline{CM}$  за двома неколінеарними векторами і доведіть, що точки попарного перетину вказаних в умові задачі прямих збігаються.

## Розділ V

### Правильні многокутники. Довжина кола. Площа круга

- 605.** а) 4; б) 5; в) 18. **606.** а)  $108^\circ$ ; б)  $120^\circ$ ; в)  $144^\circ$ . **607.** а) 12; б) 12. **610.** а) 4 см; б)  $2\sqrt{2}$  см; в) 9 см. **611.** а)  $3\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>; б) 4 см; в) 24 см. **613.**  $2\sqrt{3}$  см. **614.** 4 см. **616.** а) 6; б) 5; в) 12. **617.** а) 50 см; б) 6 см. **620.** а)  $24\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>; б) 48 см<sup>2</sup>; в) 16 см. **621.** а) 8 см<sup>2</sup>; б)  $27\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>; в) 6 см і 3 см. **625.** 6 і 10. **626.** а) 6; б) 5. **627.**  $4:3\sqrt{3}:6$ . **628.**  $9:8\sqrt{3}:18$ . **629.**  $6\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>. **631.** 3:4. **632.**  $2\sqrt{2}R^2$ . **633.**  $a_8 = R\sqrt{2-\sqrt{2}}$ ,  $a_{12} = R\sqrt{2-\sqrt{3}}$ . **635.**  $30^\circ$ ,  $170^\circ$  і  $160^\circ$ . **636.** 5 см і 2 см. **644.** а)  $12\pi$  см; б) 2 см. **645.** а)  $12\pi$  см; б) 8π см; в)  $10\pi$  см. **647.**  $\approx 1,4$  м. **648.**  $\approx 42\,097$  км. **649.** а)  $\frac{\pi R}{2}$ ; б)  $\frac{3\pi R}{4}$ ; в)  $\frac{17\pi R}{9}$ . **650.**  $10\pi$  см. **651.**  $\approx 6$  см. **652.**  $\approx 452$  м<sup>2</sup>. **653.** а)  $144\pi$  см<sup>2</sup>; б)  $9\pi$  см<sup>2</sup>. **654.** а)  $16\pi$  см<sup>2</sup>; б)  $49\pi$  см<sup>2</sup>. **655.** 3π, 5π і 7π. **656.** 26 см. **657.** а) 27π; б) 40π; в) 6π. **658.**  $\frac{1}{12}(2\pi-3\sqrt{3})$ ,  $\frac{1}{12}(10\pi+3\sqrt{3})$ . **659.** а) 6π см; б)  $10\pi$  см; в)  $2\sqrt{3}\pi$  см. **660.** 156 см<sup>2</sup>. **661.** а) 24π см; б) 50π см. **662.** а)  $3\sqrt{2}\pi$ ; б) 6π. **663.** а) 6π; б) 15π. **664.**  $\approx 2,5$  м і  $\approx 40$  м. **665.** 1 м. **666.** а)  $625\pi$  см<sup>2</sup>; б)  $27\pi$  см<sup>2</sup>. **667.** а)  $16\pi$  см<sup>2</sup>; б)  $9\pi$  см<sup>2</sup>. **669.**  $\sqrt{\frac{10S}{3\pi}}$ . **670.** а)  $\frac{R^2}{12}(4\pi-3\sqrt{3})$ ; б)  $\frac{R^2}{4}(\pi-2)$ ; в)  $\frac{R^2}{12}(2\pi-3\sqrt{3})$ . **671.** а)  $\frac{R^2}{12}(2\pi-3\sqrt{3})$ ; б)  $\frac{R^2}{12}(8\pi+3\sqrt{3})$ . **672.** б) 6π. **673.** б)  $6\sqrt{2}\pi$ . **674.**  $4\pi$  см<sup>2</sup>. **675.**  $100\pi$  см<sup>2</sup>. **676.**  $(2\pi+3\sqrt{3})$  см<sup>2</sup>. **677.**  $1,5\sqrt{3}R^2$ . **678.**  $(2\pi+8)$  см. **679.** а) Ні (контрприклад — ромб); б) так. **680.**  $\frac{3\sqrt{3}S}{8}$ . **681.**  $\frac{a}{2}(\sqrt{3}+1)$ . **682.**  $0,75l$ . **683.**  $\pi a^2$ . **685.** Ні: його кути рівні через один. **687.**  $1,25\pi a$ . *Вказівка.*

Дане коло є описаним навколо рівнобедреного трикутника з основою  $a$  і бічною стороною  $\frac{a\sqrt{5}}{2}$ . **688.**  $\frac{2\pi a}{3}$ . *Вказівка.* Доведіть, що трикутники  $NAM$ ,  $KBN$ ,  $LCK$  і  $LDM$  рівносторонні. **689.**  $(36\sqrt{3}-16,5\pi)$  см,  $4,5(2-\sqrt{3})$  см. *Вказівка.* Обчисліть площу трапеції  $O_1BCO_2$  і відніміть від неї площі двох секторів. **690.** *Вказівка.* Доведіть, що під час повороту на центральний кут даного  $n$ -кутника вказаний вектор-сума не змінюється, тобто є нульовим вектором.

### Задачі на повторення курсу геометрії 7–9 класів

**691.** 11 см. **692.**  $40^\circ$ . **696.**  $25^\circ$ ,  $65^\circ$ . **697.**  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ . **698.** Більше за 13 см, але менше за 17 см. **701.**  $50^\circ$  і  $130^\circ$ . **703.**  $70^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $55^\circ$  або  $110^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $35^\circ$ . **704.** 10 см. **705.** 112 см і 63 см. **706.** 36 см,  $30\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>. **707.**  $12\sqrt{3}$  см<sup>2</sup>. **708.** 5 см. **709.** 156 см<sup>2</sup>. **710.**  $225\pi$  см<sup>2</sup>. **711.**  $\frac{b\sin(\alpha+\beta)\sin\alpha}{\sin\beta}$ . **712.** 5. **714.**  $\vec{0}$ . **715.**  $45^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ .

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### А

Абсциса точки 57

### В

Вектор 145

— нульовий 146

Вектори колінеарні 146

— координатні 177

— перпендикулярні 165

— протилежні 156

— протилежно напрямлені 146

— рівні 147

— співнаправлені 146

Вісь абсцис 57

— ординат 57

— симетрії 100

— — фігури 100

### Г

Геометричне перетворення 91

Гомотетія 118

### Д

Добуток вектора на число 162

Довжина вектора 145

— кола 204

— дуги кола 205

### К

Коефіцієнт гомотетії 118

— подібності 117

Координати вектора 148

— точки 57

Координатна вісь 57

— площа 57

— чверть 58

Косинус кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  8

Котангенс кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  8

Круговий сегмент 208

— сектор 207

Кутовий коефіцієнт прямої 74

Кут між векторами 165

— повороту 106

— правильного многокутника 193

— — — центральний 194

### М

Метод векторний 173

— геометричних перетворень 125

— координат 73

— паралельного перенесення 128

— повороту 127

— симетрії 125

Множення вектора на число 162

## О

Ордината точки 57  
Орт 177

## П

Паралельне перенесення 108  
Переміщення (рух) 92  
Перетворення 91  
— подібності (подібність) 117  
Площа круга 206  
— кругового сегмента 208  
— — сектора 208  
Поворот 106  
Початок координат 57  
Правильний багатокутник 193  
Правило  
— багатокутника 155  
— паралелограма 155  
— трикутника 155  
Проекція вектора на вісь 177  
Промені протилежно напрямлені 108  
— співнаправлені 107

## Р

Рівняння кола 65  
— прямої 66  
— фігури 64  
Різниця векторів 156  
Рух (переміщення) 92

## С

Симетрія відносно прямої (осьова) 100  
— відносно точки (центральна) 98  
— переносна 109  
— поворотна (обертання) 107  
Синус кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  8  
Скалярний добуток векторів 164  
— квадрат вектора 165  
Сума векторів 154

## Т

Тангенс кута від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  8

## Ф

Фігура центрально-симетрична 98  
— симетрична відносно прямої 100  
Фігури гомотетичні 118  
— подібні 119  
— рівні 95

## Ц

Центр повороту 106  
— правильного багатокутника 194  
— симетрії 98  
— — фігури 98

# Зміст

Передмова .....	3
-----------------	---

## Розділ I. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ТРИКУТНИКІВ

§ 1. Тригонометричні функції кутів від $0^\circ$ до $180^\circ$ .....	7
§ 2. Теорема косинусів та наслідки з неї .....	15
§ 3. Теорема синусів та наслідки з неї .....	21
§ 4. Розв'язування трикутників .....	26
§ 5. Застосування тригонометричних функцій до знаходження площ .....	34
Підсумки розділу I .....	43
Історична довідка .....	50
Математичні олімпіади. Українські математичні олімпіади школярів .....	52
Готуємось до ДПА. Тест 1 .....	54

## Розділ II. КООРДИНАТИ НА ПЛОЩИНІ

§ 6. Найпростіші задачі в координатах .....	57
§ 7. Рівняння кола і прямої .....	64
§ 8. Метод координат .....	73
Підсумки розділу II .....	81
Історична довідка .....	85
Математичні олімпіади. М. Й. Ядренко .....	86
Готуємось до ДПА. Тест 2 .....	88

### **Розділ III. ГЕОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ**

§ 9. Переміщення . . . . .	91
§ 10. Центральна та осьова симетрії. . . . .	98
§ 11. Поворот і паралельне перенесення . . . . .	106
§ 12. Подібність фігур . . . . .	117
Для тих, хто хоче знати більше	
§ 13. ⚡ Метод геометричних перетворень. . . . .	125
Підсумки розділу III . . . . .	133
Історична довідка . . . . .	138
Математичні олімпіади. В. М. Лейфура. . . . .	140
Готуємось до ДПА. Тест 3 . . . . .	142

### **Розділ IV. ВЕКТОРИ НА ПЛОЩИНІ**

§ 14. Початкові відомості про вектори . . . . .	145
§ 15. Додавання і віднімання векторів. . . . .	154
§ 16. Множення вектора на число. Скалярний добуток векторів . . . . .	162
Для тих, хто хоче знати більше	
§ 17. ⚡ Векторний метод . . . . .	173
Підсумки розділу IV . . . . .	182
Історична довідка . . . . .	187
Математичні олімпіади. В. А. Ясінський. . . . .	188
Готуємось до ДПА. Тест 4 . . . . .	190

### **Розділ V. ПРАВИЛЬНІ МНОГОКУТНИКИ.**

#### **ДОВЖИНА КОЛА. ПЛОЩА КРУГА**

§ 18. Вписане й описане кола правильного многокутника . . . . .	193
§ 19. Довжина кола і площа круга. . . . .	204



Підсумки розділу V . . . . .	215
Історична довідка . . . . .	220
Математичні олімпіади. Міжнародні олімпіади для школярів . . . . .	222
Готуємось до ДПА. Тест 5 . . . . .	224
Готуємось до ДПА. Задачі на повторення курсу геометрії 7–9 класів . . . . .	225
Для тих, хто хоче знати більше. Додатки . . . . .	227
Додаток 1. Паралельне перенесення в декартовій системі координат . . . . .	227
Додаток 2. Накладання, переміщення, подібність . . . . .	229
Додаток 3. Довжина кола і площа круга . . . . .	232
Довідкові матеріали . . . . .	237
Таблиця значень тригонометричних функцій . . . . .	237
Таблиця квадратів натуральних чисел від 1 до 99 . . . . .	239
Теми навчальних проєктів . . . . .	240
Відповіді та вказівки . . . . .	242
Предметний покажчик . . . . .	251

## Відомості про користування підручником

№ з/п	Прізвище та ім'я учня / учениці	Навчальний рік	Стан підручника	
			на початку року	в кінці року
1				
2				
3				
4				
5				

Навчальне видання  
*ЄРШОВА Алла Петрівна*  
*ГОЛОБОРОДЬКО Вадим Володимирович*  
*КРИЖАНОВСЬКИЙ Олександр Феліксович*  
*ЄРШОВ Сергій Володимирович*

**«ГЕОМЕТРІЯ»**  
**підручник для 9 класу загальноосвітніх навчальних закладів**

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Редактор *О. В. Костіна*. Технічний редактор *А. В. Плisko*. Художнє оформлення *В. І. Труфен*.  
Комп'ютерна верстка *О. В. Сміян*. Коректор *Н. В. Красна*.

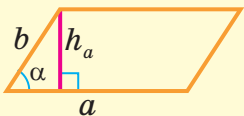
В оформленні підручника використані зображення,  
розміщені в мережі Інтернет для вільного використання

Підписано до друку 27.06.2017. Формат 70×90/16. Папір офсетний. Гарнітура Шкільна.  
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 18,72. Обл.-вид. арк. 24,34.  
Тираж 58 770 прим. Зам. №

ТОВ Видавництво «Ранок»,  
вул. Кібальчича, 27, к. 135, Харків, 61071.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5215 від 22.09.2016.  
Адреса редакції: вул. Космічна, 21а, Харків, 61145.  
E-mail: office@ranok.com.ua. Тел. (057) 701-11-22, тел./факс (057) 719-58-67.

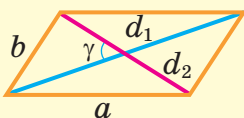
## Чотирикутники

### Довільний паралелограм



Площа

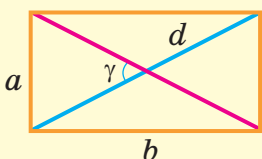
$$S = ah_a, S = absin\alpha, S = \frac{1}{2}d_1d_2sin\gamma$$



Зв'язок між діагоналями і сторонами

$$d_1^2 + d_2^2 = 2(a^2 + b^2)$$

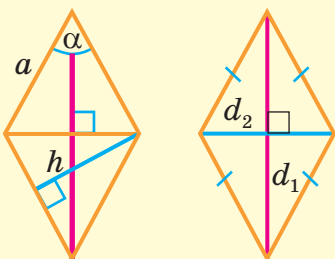
### Прямокутник



Площа  $S = ab, S = \frac{1}{2}d^2sin\gamma$

Радіус описаного кола  $R = \frac{d}{2}$

### Ромб

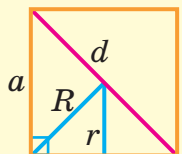


Площа

$$S = ah, S = a^2sin\alpha, S = \frac{1}{2}d_1d_2$$

Радіус вписаного кола  $r = \frac{h}{2}$

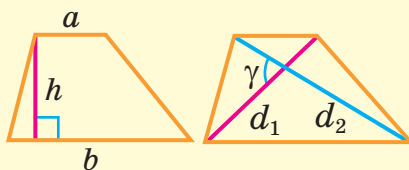
### Квадрат



Площа  $S = a^2, S = \frac{1}{2}d^2$

Формули радіусів  $R = \frac{d}{2} = \frac{a}{\sqrt{2}}, r = \frac{a}{2}$

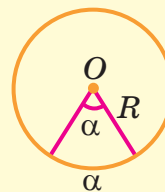
### Трапеція



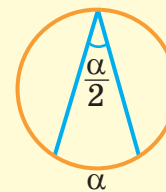
Площа

$$S = \frac{a+b}{2} \cdot h, S = \frac{1}{2}d_1d_2sin\gamma$$

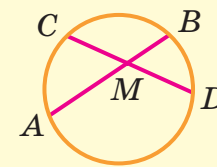
## Коло, круг



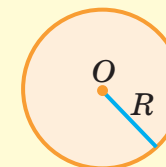
центральный  
кут



вписаний  
кут



$$AM \cdot BM = CM \cdot DM$$



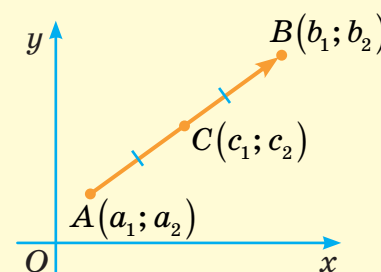
Довжина кола

$$C = 2\pi R$$

Площа круга

$$S = \pi R^2$$

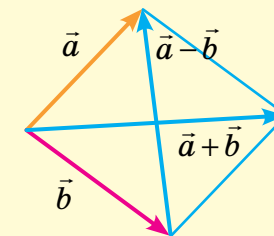
## Координати і вектори



$$c_1 = \frac{a_1 + b_1}{2}; c_2 = \frac{a_2 + b_2}{2}$$

$$AB = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2}$$

$$\overline{AB}(b_1 - a_1; b_2 - a_2)$$



$$\vec{a}(x_1; y_1)$$

$$\vec{b}(x_2; y_2)$$

$$\vec{a} + \vec{b} = (x_1 + x_2; y_1 + y_2)$$

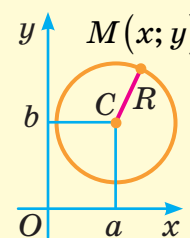
$$\vec{a} - \vec{b} = (x_1 - x_2; y_1 - y_2)$$

$$\lambda \vec{a}(\lambda x_1; \lambda y_1)$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = x_1x_2 + y_1y_2$$

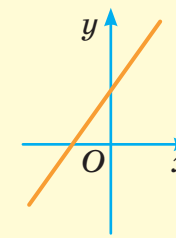
$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \angle(\vec{a}; \vec{b})$$

### Рівняння кола



$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$$

### Рівняння прямої



$$ax + by + c = 0$$

(a і b не дорівнюють нулю одночасно)

## Особливості підручника

- багаторівнева побудова навчального матеріалу
- авторська система усних, графічних та письмових вправ
- тематичне узагальнення і систематизація матеріалу
- доступність викладення, зручність користування
- наявність тем навчальних проектів

## Інтернет-підтримка дозволить:

- здійснити інтерактивне онлайн-тестування за кожною темою
- переглянути відеоуроки за темами курсу
- ознайомитися з темами повідомлень і рефератів та джерелами інформації для їх підготовки

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**



**Інтернет-підтримка**  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

