

АНЫҚТАЛҒАН ИНТЕГРАЛДАРДЫҢ ҚОЛДАНЫЛУЛАРЫ

Анықталған интегралдың көмегімен облыстарының шекаралары әр түрде берілген жазық фигуралардың аудандарын, қисықтардың доғаларының ұзындықтарын, айналу денелерінің бүйір бетінің ауданы мен көлемдерін есептеуге болады.

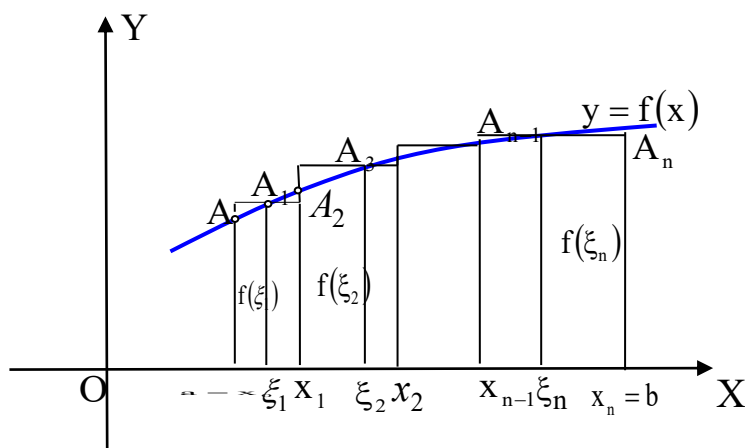
Декарттық координаталар және полярлық координаталар жүйесінде берілген фигураның ауданы

Декарттық координаталар координаталар жүйесінде берілген фигураның ауданы

Егер $[a, b]$ аралығында $y = f(x) \geq 0$ болса, онда $\int_a^b f(x) dx$ интегралы сәйкес қисық

сызықты трапецияның ауданын өрнектейді.

Анықтама 1. Қисық сызықты трапеция деп Ox осімен, $x = a$, $x = b$ түзулерімен, мұндағы $a < b$ және $[a, b]$ аралығында үзіліссіз $y = f(x)$ функциясының графигімен шектелген Oxy жазықтығындағы облысты айтамыз (сурет 26).

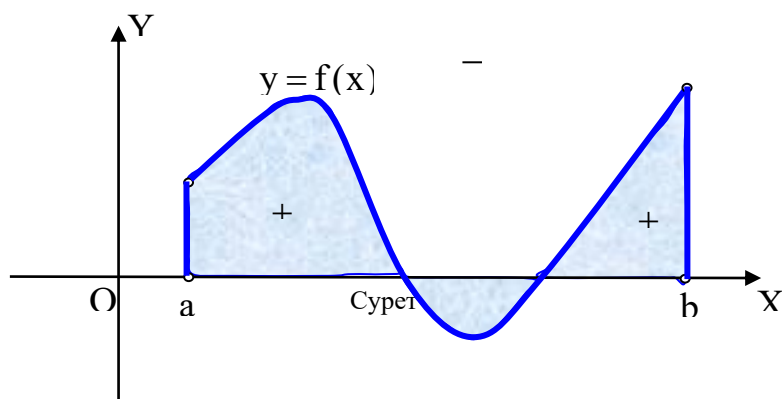


Сурет 26

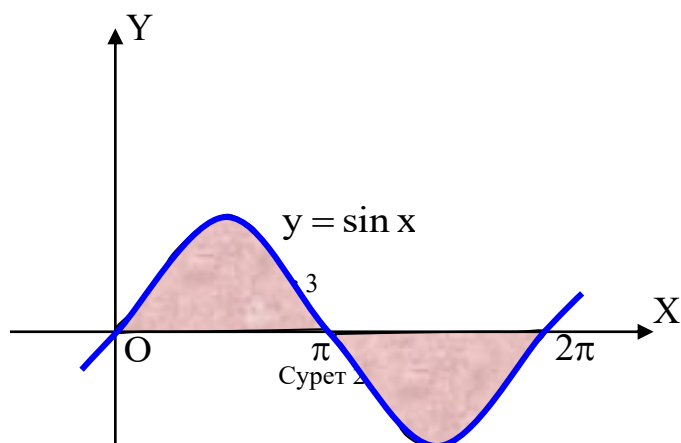
Егер $[a, b]$ аралығында $f(x) \leq 0$ болса, онда қисық сызықты трапеция Ox осінен төмен орналасқан және $\int_a^b f(x) dx \leq 0$. Бұл интеграл берілген трапецияның ауданын теріс санмен есептейтінін

тексеру қиын емес. Жалпы жағдайда, егер $y = f(x)$ функциясы $[a, b]$ аралығында таңбалары әртүрлі мәндер қабылдайтын болса, онда $\int_a^b f(x) dx$ оң таңбамен алынған Ox осінен жоғары жатқан қисық

сызықты трапецияның ауданына теріс таңбамен алынған Ox осінен төмен орналасқан қисық сызықты трапецияның ауданын қосқанға тең. (сурет 27 кара).



Мысал 1. $y = \sin x$ синусоидасымен және Ox осімен, $0 \leq x \leq 2\pi$ шектелген облыстың ауданын есепте (сурет 28).

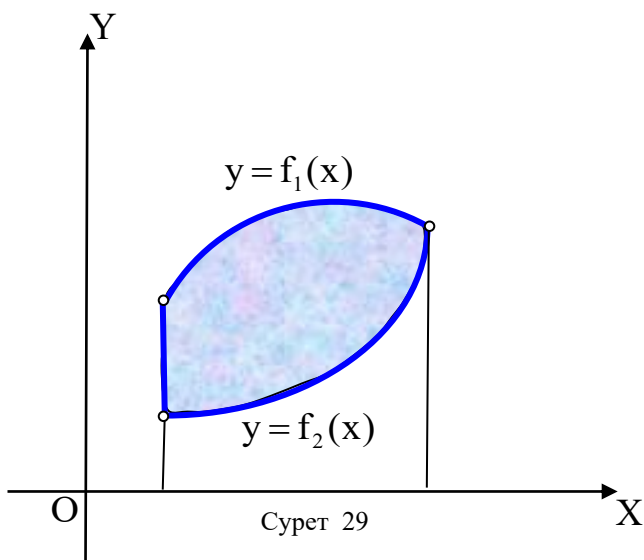


$[0, \pi]$ аралығында $\sin x \geq 0$ және $[\pi, 2\pi]$ аралығында $\sin x \leq 0$ болғандықтан, ізделінді аудан

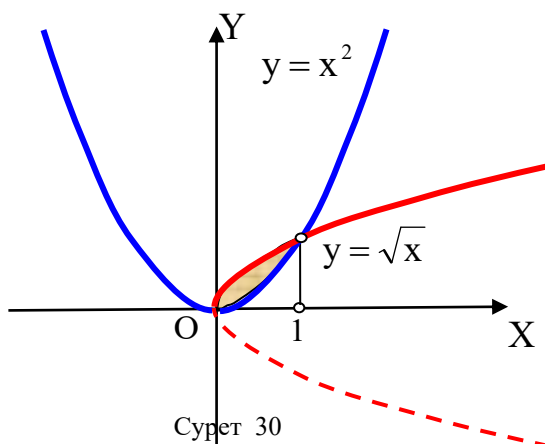
$$S(G) = \int_0^{\pi} \sin x dx - \int_{\pi}^{2\pi} \sin x dx = -\cos x \Big|_0^{\pi} + \cos x \Big|_{\pi}^{2\pi} = \\ = -\cos \pi + \cos 0 + \cos 2\pi - \cos \pi = 4.$$

$x = a$, $x = b$ сызықтарымен және $[a, b]$ аралығында үзіліссіз $y = f_1(x)$, $y = f_2(x)$ функцияларының графиктерімен, мұндағы $[a, b]$ аралығында $f_1(x) \geq f_2(x)$, шектелген G облысының ауданы мына формула бойынша есептелінеді:

$$S(G) = \int_a^b (f_1(x) - f_2(x)) dx.$$



Мысал 2. $y = \sqrt{x}$, $y = x^2$ параболаарымен шектелген G облысының ауданын тап (сурет 30).



Теңдеулер жүйесін шешсек:

$$\begin{cases} y = \sqrt{x} \\ y = x^2, \end{cases}$$

бұл қисықтардың қиылысу нүктелерін табамыз: $(0,0)$ и $(1,1)$. $[0,1]$ кесіндісінде $\sqrt{x} \geq x^2$ теңсіздігі орынды болғандықтан $S(G) = \int_0^1 (\sqrt{x} - x^2) dx = \frac{2}{3} x^{\frac{3}{2}} \Big|_0^1 - \frac{x^3}{3} \Big|_0^1 = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{1}{3}$.

Егер $y = f(x)$ функциясының графигі $[a, b]$ кесіндісінде параметрлік түрде берілсе:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t), \\ \alpha \leq t \leq \beta \end{cases}$$

мұндағы $y(t) \geq 0$ үзіліссіз, ал $x(t)$ - бірсарынды, $[\alpha, \beta]$ -да үзіліссіз дифференциалданатын функция және $\varphi(\alpha) = a$, $\varphi(\beta) = b$, онда бұл қисық сызықты трапецияға сәйкес аудан мынадай формула бойынша есептелінеді:

$$S(G) = \int_{\alpha}^{\beta} y(t) x'(t) dt.$$

Бұған $\int_a^b f(x) dx$ интегралында жаңа белгілеу $x = x(t)$ енгізу арқылы көз жеткізуге болады.

Мысал 3. Жарты осьтері a және b болатын эллипстің ауданын тап. Эллипстің жоғарғы бөлігі мынадай параметрлік теңдеумен берілген қисық:

$$\begin{cases} x = a \cos t \\ y = b \sin t \\ 0 \leq t \leq \pi. \end{cases}$$

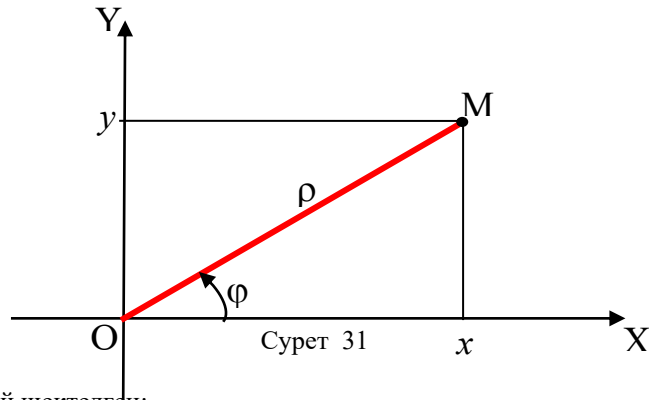
$t = 0$ мәніне $x = a$ мәні, ал $t = \pi$ мәніне $x = -a$ мәні сәйкес келеді, онда бүкіл эллипстің ауданы:

$$\begin{aligned} S(G) &= 2 \int_{\pi}^0 b \sin t (a \cos t)' dt = 2ab \int_0^{\pi} \sin^2 t dt = 2ab \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos 2t}{2} dt = ab \left(t - \frac{\sin 2t}{2} \right) \Big|_0^{\pi} = \\ &= ab \left(\pi - \frac{\sin 2\pi}{2} \right) - ab \cdot 0 = \pi ab. \end{aligned}$$

15.1.2 Полярлық координаталар жүйесінде берілген қисықтармен шектелген фигураның ауданы
Жазықтықтағы кейбір қисық сызықтарды полярлық координаталар жүйесінде берген ыңғайлы.

Жазықтықта декарттық координаталар жүйесі таңдалынып алынсын. Ox -тің оң жарты осін *полярлық ось* деп атап, ал O нүктесін полюс деп атаймыз. M - жазықтықтағы қандай да бір нүкте болсын.

M нүктесінен O нүктесіне дейінгі ара қашықтықты осы нүктенің *полярлық радиусы* ρ деп атаймыз. Полярлық ось пен $\overrightarrow{OM}$ векторының арасындағы бұрышты φ деп белгілейік. ρ мен φ сандары M нүктесінің *полярлық координаталары* деп аталады (сурет 31).



ρ және φ сандары былай шектелген:

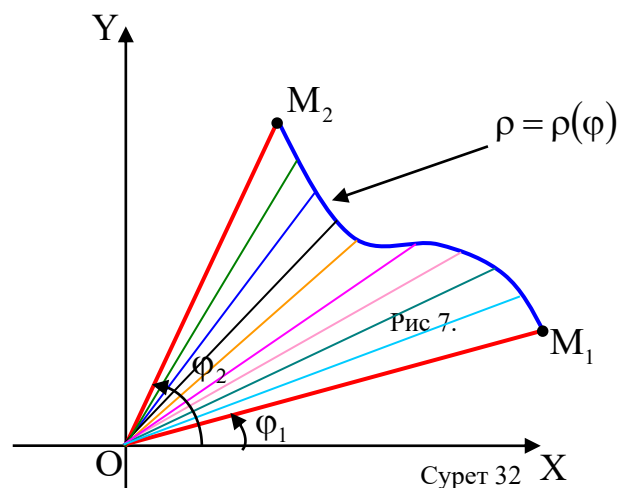
$$\begin{cases} \rho \geq 0 \\ 0 \leq \varphi < 2\pi \end{cases}$$

(немесе $-\pi < \varphi \leq \pi$).

M нүктесінің декарттық және полярлық координаталарының арасында мынадай байланыс бар:

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \varphi. \end{cases}$$

Координат басынан шыққан $\varphi = \varphi_1$ и $\varphi = \varphi_2$ сәулелерімен, мұндағы $\varphi_1 < \varphi_2$ және $[\varphi_1, \varphi_2]$ кесіндісінде үзіліссіз теріс емес $\rho = f(\varphi)$ функциясының графигімен шектелген жазықтықтағы G облысы қисық сызықты үшбұрыш деп аталады (сурет 32).



$[\varphi_1, \varphi_2]$ кесіндісін n бөлікке бөліп және әрбір бөлік қисық сызықты үшбұрыштың $\Delta\varphi_i$ ауданын радиусы $f(c_i)$ бұрышы $\Delta\varphi_i$ болатын дөңгелек секторлардың ауданымен ауыстырсақ, мынадай формуланы аламыз:

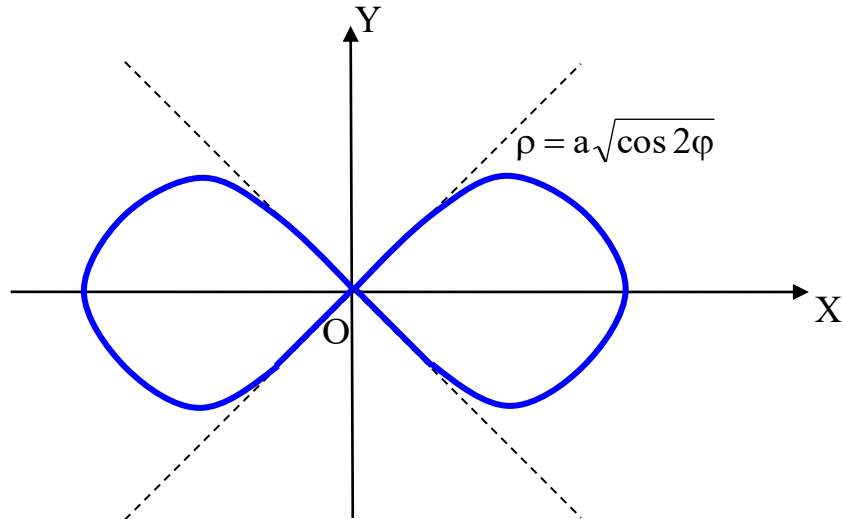
$$S(G) \approx \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} f^2(c_i) \Delta\varphi_i.$$

Бұл жердегі қосынды $\rho = \frac{1}{2} f^2(\varphi)$ функциясының $[\varphi_1, \varphi_2]$ кесіндісіндегі интегралдық қосындысы. Соңғы теңдікте максимал $\Delta\varphi_i \rightarrow 0$ ұмтылды деп шекке көшсек, қисық сызықты үшбұрыштың ауданын тура есептейтін өрнек аламыз:

$$S(G) = \frac{1}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f^2(\varphi) d\varphi.$$

Мысал 4. $\rho = a\sqrt{\cos 2\varphi}$ қисығымен шектелген фигураның ауданын тап.

Бұл қисық *Бернулли лемнискатасы* деп аталады. (сурет 33).



Сурет 33

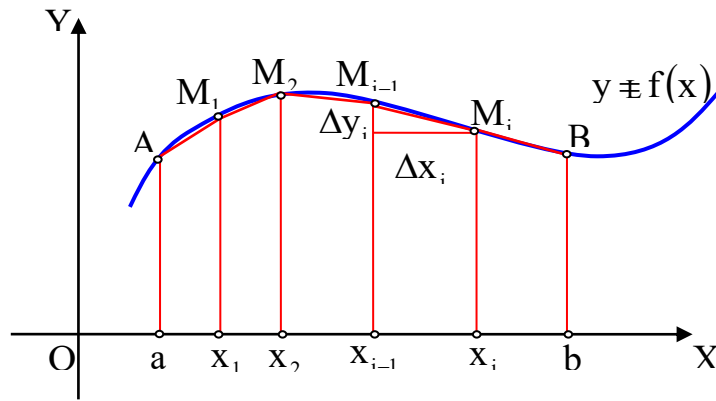
Интегралдау облысын алу үшін $\cos 2\varphi \geq 0$ шартын ескерсек, $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{4}\right] \cup \left[\frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}\right] \cup \left[\frac{7\pi}{4}, 2\pi\right]$.

Қисық сызықты үшбұрыштың $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$ аралығындағы ауданын табу жеткілікті, яғни, барлық облыстың төрттен бір бөлігінің ауданын табамыз:

$$\begin{aligned} S(G) &= 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\pi/4} (a\sqrt{\cos 2\varphi})^2 d\varphi = 2a^2 \int_0^{\pi/4} \cos 2\varphi d\varphi = a^2 \sin 2\varphi \Big|_0^{\pi/4} = \\ &= a^2 \sin \frac{\pi}{2} - a^2 \sin 0 = a^2. \end{aligned}$$

Қисықтың доғасының ұзындығын табу

Жазықтықта ұштары A және B болатын L қисығы үзіліссіз дифференциалданатын $y = f(x)$ функциясының графигімен берілген, мұндағы $x \in [a, b]$. Бұл қисықты $M_1, M_2, \dots, M_{n-1}$ нүктелерімен n бөлікке бөлеміз, мұндағы M_i нүктелерінің координаталары (x_i, y_i) , $x_i - x_{i-1} = \Delta x_i$, $y_i - y_{i-1} = \Delta y_i$ (сурет 34).



Сурет 34

Төбелері жоғарыдағы таңдап алынған нүктелер болатын L қисығына іштей сызылған сынықтың ұзындығын I_n деп белгілейік:

$$I_n = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}.$$

Анықтама 2. L қисығының ұзындығы деп осы қисыққа іштей сызылған сынықтың ұзындықтарының қосындысының максимал Δx_i нөлге ұмтылғандағы шегін айтамыз. Оны $I(L)$ арқылы белгілейміз.

$$I(L) = \lim_{\max \Delta x_i \rightarrow 0} I_n.$$

Ұзындығы бар қисық (егер көрсетілген шек табылса), *түзетілетін* деп аталады.

Теорема 1. $[a, b]$ аралығында үзіліссіз дифференциалданатын $y = f(x)$ функциясының графигі түзетілетін болады және оның ұзындығы былай есептелінеді:

$$I(L) = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx.$$

Салдар 1. L қисығы жазықтықта үзіліссіз дифференциалданатын параметрлік функцияның көмегімен берілген

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ t \in [\alpha, \beta]. \end{cases}$$

Онда бұл қисық түзетілетін болады және оның ұзындығы былай есептелінеді:

$$I(L) = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt.$$

Ескерту. Жоғарыда алынған формулалардың кеңістіктегі L қисығы үшін де жалпыланатынын тексеруге болады. Егер L қисығы кеңістікте үзіліссіз дифференциалданатын параметрлік функцияның көмегімен берілсе

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t), \\ t \in [\alpha, \beta], \end{cases}$$

онда оның ұзындығы мына формула бойынша есептеледі: $I(L) = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2 + (z'(t))^2} dt.$

Мысал 5. Параметрлік теңдеумен берілген винттік сызықтың бір орамының ұзындығын тап

$$\begin{cases} x = a \cos t, \\ y = b \sin t, \\ z = bt, \\ t \in [0, 2\pi]. \end{cases}$$

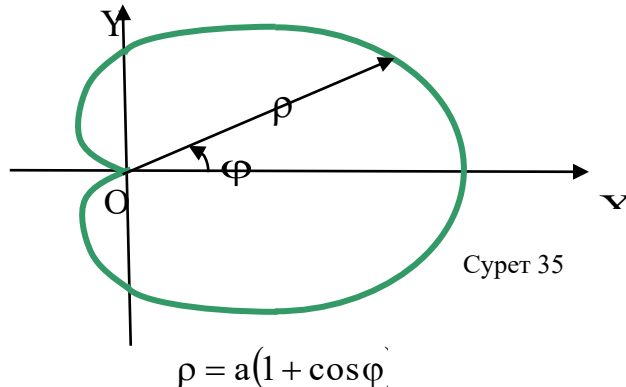
Бұл функцияның туындыларын формулаға қойсақ :

$$I(L) = \int_0^{2\pi} \sqrt{(-a \sin t)^2 + (a \cos t)^2 + b^2} dt = \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2 + b^2} dt = 2\pi \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Салдар 2. L қисығы полярлық координатада үзіліссіз дифференциалданатын теріс емес функция $\rho = f(\varphi)$, мұндағы $\varphi \in [\alpha, \beta]$, арқылы берілген. Онда бұл қисық түзетілетін және оның ұзындығы:

$$I(L) = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{(f(\varphi))^2 + (f'(\varphi))^2} d\varphi.$$

Мысал 6. $\rho = a(1 + \cos \varphi)$ ($a > 0$) теңдеуімен берілген кардиоданың ұзындығын тап (сурет 35).

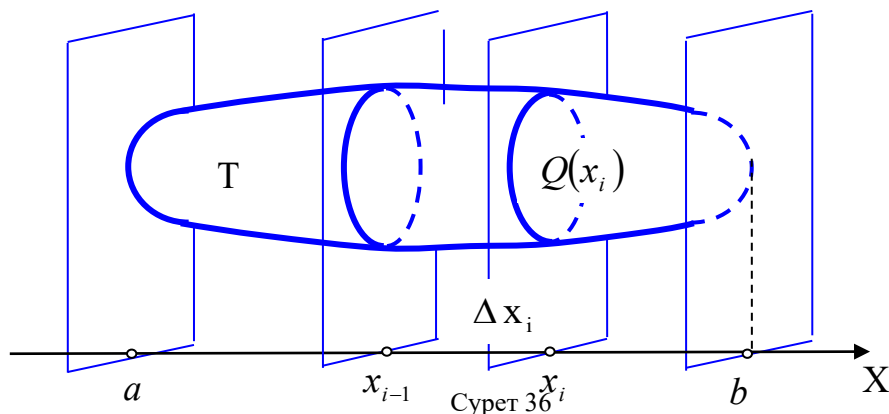


Барлық φ үшін $a(1 + \cos \varphi) \geq 0$ болғандықтан:

$$\begin{aligned} I(L) &= \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2(1 + \cos \varphi)^2 + a^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = a \int_0^{2\pi} \sqrt{2 + 2 \cos \varphi} d\varphi = 2a \int_0^{2\pi} \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right| d\varphi = \\ &= 2a \left(\int_0^{\pi} \cos \frac{\varphi}{2} d\varphi - \int_{\pi}^{2\pi} \cos \frac{\varphi}{2} d\varphi \right) = 4a \left(\sin \frac{\varphi}{2} \Big|_0^{\pi} - \sin \frac{\varphi}{2} \Big|_{\pi}^{2\pi} \right) = 4a(1 + 1) = 8a. \end{aligned}$$

Анықталған интегралдың көмегімен айналу денелерінің көлемін есептеу

Кеңістікте T денесі мен Ox осі берілсін. Ox осінің X нүктесі арқылы жүргізілген осы оське перпендикуляр жазықтық пен T денесінің қиылысу нәтижесінде пайда болған облыстың ауданын $Q(X)$ арқылы белгілелік. T денесінің Ox осіне түсірілген проекциясы $[a, b]$ кесіндісі, яғни, $y = Q(x)$ функциясы осы кесіндіде анықталған. $[a, b]$ кесіндісінде $Q(x)$ функциясы үзіліссіз деп есептейік (сурет 36).



$[a, b]$ кесіндісін X_i нүктелерімен n бөлікке бөлеміз және әрбір $[x_{i-1}, x_i]$ аралығында дененің көлемін биіктігі $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ және табанының ауданы $Q(c_i)$, мұндағы $c_i \in [x_{i-1}, x_i]$ болатын цилиндрдің көлемімен ауыстырамыз. Нәтижесінде T көлемін жуық шамамен есептейтін формула аламыз

$$V(T) \approx \sum_{i=1}^n Q(c_i) \Delta x_i .$$

Бұл теңдікте максимал $\Delta x_i \rightarrow 0$ ұмтылады деп шекке көшсек, T көлемінің тура мәнін аламыз:

$$V(T) = \int_a^b Q(x) dx .$$

Егер T денесі $[a, b]$ аралығында $y = f(x)$ үзіліссіз функциямен берілген қисық сызықты трапеция Ox осімен айналғанда пайда болса, $Q(x)$ дөңгелегінің ауданы $Q(x) = \pi f(x)^2$ формуласымен табылады, яғни, $f(x)$ осы дөңгелектің радиусы. Айналу денесінің көлемі:

$$V(T) = \pi \int_a^b f^2(x) dx .$$

Мысал 7. $y = x^2$ функциясының графигімен берілген, мұндағы $x \in [0, 1]$, қисық сызықты трапеция Ox осімен айналу кезінде пайда болған дененің көлемін тап. Жоғарыдағы формуланы қолдансақ:

$$V(T) = \pi \int_0^1 (x^2)^2 dx = \pi \frac{x^5}{5} \Big|_0^1 = \frac{\pi}{5} .$$

Ескерту. Жоғарыда көрсетілген қисық сызықты трапеция $a, b \geq 0$ және $f(x) \geq 0$ болғанда Oy осін айналсын. Онда айналу кезінде пайда болған дененің көлемі былай есептелінеді:

$$V(T) = 2\pi \int_a^b x f(x) dx .$$

Мысал 8. Алдыңғы мысалда берілген функцияның графигі Oy осін айналғанда пайда болған дененің көлемі: $V(T) = 2\pi \int_0^1 x \cdot x^2 dx = 2\pi \frac{x^4}{4} \Big|_0^1 = \frac{\pi}{2} .$

Айналу беттерінің аудандарын табу

$y = f(x)$, мұндағы $x \in [a, b]$ және $f(x) \geq 0$ үзіліссіз дифференциалданатын функцияның графигі Ox осін айналсын. Онда айналу денесінің бетінің ауданы H мына формуламен есептелінеді:

$$S(H) = 2\pi \int_a^b f(x) \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx .$$

Мысал 9. $z = x^2 + y^2$ параболоиданың $Z = 1$ жазықтығымен шектелген бөлігінің бетінің ауданын тап. Бұл бет - $y = \sqrt{z}$, мұндағы $z \in [0, 1]$ парабола бөлігінің Oz осін айналғанда пайда болатын бет. Сонымен, ізделінді аудан:

$$S(H) = 2\pi \int_0^1 \sqrt{z} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\sqrt{z}}\right)^2} dz = 2\pi \int_0^1 \sqrt{z + \frac{1}{4}} dz =$$

$$= 2\pi \left. \frac{\left(z + \frac{1}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{2}} \right|_0^1 = \frac{4\pi}{3} \left(\left(1 + \frac{1}{4}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{1}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \right) = \frac{\pi}{6} (5\sqrt{5} - 1) \approx 5,33.$$

Өз бетімен шығаруға арналған есептер

1. $y^2 = 9x$, $y = 3x$ сызықтарымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : 0,5.)
2. $y = x^2 + 4x$, $y = x + 4$ сызықтарымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : 0,5.)
3. $y = 1/(1+x^2)$, $y = x^2/2$ сызықтарымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : $\pi/2 - 1/3$.)
4. $y^2 = x^2 - x^4$ сызығымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : 4/3.)
5. Циклоиданың бірінші аркасымен $y = a(1 - \cos t)$, $x = a(t - \sin t)$ және Ox осімен шектелген фигураның ауданын тап. (Жауабы : $3\pi a^2$.)
6. $x = 3t^2$, $y = 3t - t^3$ сызығымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : $72\sqrt{3}/5$.)
7. $y = xe^{-x^2/2}$ сызығымен және оның асимптоталарымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : 0,5.)
8. $\rho = a(1 - \cos \chi)$ кардиодасымен шектелген фигураның ауданын тап. (Жауабы : $3\pi a^2/2$.)
9. $x^2 + y^2 = 4$, $x^2 + y^2 = 9$, $y = x$, $y = -x/\sqrt{3}$ сызықтарымен шектелген фигураның ауданын есепте. (Жауабы : $25\pi/24$.)
10. $y = 2\sqrt{x}$ параболасының абсциссалары $x_1 = 0$ және $x_2 = 1$. болатын нүктелері арасындағы доғасының ұзындығын тап. (Жауабы : $\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2}) \approx 2,29$.)
11. Астроиданың ұзындығын тап $x = a \cos^3 t$, $y = a \sin^3 t$. (Жауабы : $6a$.)
12. Кардиоданың ұзындығын тап $\rho = a(1 - \cos \varphi)$. (Жауабы : $8a$.)
13. $y = \frac{2}{3}\sqrt{(x-1)^3}$ қисығының абсциссасы $x_1 = 1$ нүктесінен абсциссасы $x_2 = 9$ нүктесіне дейінгі доғасының ұзындығын тап. (Жауабы : $52/3$.)
14. $z = \frac{x^2}{4} + \frac{y^2}{2}$, $z = 1$ беттерімен шектелген дененің көлемін есепте. (Жауабы : $\pi\sqrt{2}$.)
15. Oxy жазықтығына тиісті және $y = x^2$, $x = y^2$ сызықтарымен шектелген фигураның Ox осін айналу кезінде пайда болған дененің көлемін тап. (Жауабы : $3\pi/10$.)
16. Циклоиданың $x = a(t - \sin t)$, $y = a(1 - \cos t)$ бірінші аркасы мен Ox осімен шектелген фигураның абсцисса осін айналу кезінде пайда болған дененің көлемін тап. (Жауабы : $5a^2\pi^2$.)
17. $y = \frac{1}{2}\sqrt{4x-1}$ қисығының абсциссалары $x_1 = 1$ нүктесінен $x_2 = 9$ нүктесіне дейінгі доғасының Ox осін айналу кезінде пайда болған дененің бетінің ауданын тап. (Жауабы : $104\pi/3$.)
18. Мына сызықтарымен шектелген фигураның ауданын есепте:
 а) $y^2 = x + 5$, $y^2 = -x + 4$; б) $\rho = a \cos 2\varphi$. (Жауабы : а) $9\sqrt{2}$; б) $\pi a^2/2$.)

19. Мына фигуралардың аудандарын табыңдар:

а) $y = (x-4)^2$, $y = 16 - x^2$ қисықтарымен шектелген;

б) Архимед спиралінің бірінші және екінші орамдарымен шектелген:

$\rho = a\varphi$ ($a > 0$). (Жауабы : а) $64/3$; б) $8\pi^3 a^2$.)

20. Мына сызықтарымен шектелген фигураның ауданын есепте:

а) $4y = 8x - x^2$, $4y = x + 6$,

б) $y = 4t^2 - 6t$, $x = 2t$ және Ox осімен. (Жауабы : а) $\frac{49}{24} \approx 2,04$; б) $9/2$.)

21. $y = \frac{1}{3}\sqrt{(2x-1)^3}$ қисығының абсциссалары сәйкесінше $x_1 = 2$ және $x_2 = 8$ болатын M_1 және M_2 нүктелерінің арасындағы доғаның ұзындығын тап. (Жауабы : $56/3$.)

22. $y = 3x$ түзуінің абсциссалары $x_1 = 0$ және $x_2 = 2$ нүктелері арасындағы кесіндісінің Ox осін айналу кезінде пайда болған дененің бетінің ауданын тап. (Жауабы : $12\sqrt{10}\pi$.)

23. $y = \frac{4}{3}x$ қисығының абсциссалары $x_1 = 2$ және $x_2 = 5$ болатын нүктелері арасындағы доғасының ұзындығын тап. (Жауабы : 5.)

24. $y = \frac{x^2}{1} + \frac{z^2}{4}$, $y = 1$ беттерімен шектелген дененің көлемін есепте. (Жауабы : π .)

25. $y = \ln x$ қисығының абсциссалары $x_1 = \sqrt{3}$ және $x_2 = \sqrt{8}$ болатын нүктелері арасындағы доғасының ұзындығын тап. (Жауабы : $1 + \frac{1}{2}\ln \frac{3}{2} \approx 1,2$.)

26. Ox жазықтығына тиісті және $y = 2x - x^2$ және $y = 0$ сызықтарымен шектелген фигураның Ox осін айналу кезінде пайда болған дененің көлемін тап. (Жауабы : $\frac{16}{15}\pi$.)