

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМ ЗРІЗІВ,
УТВОРЮВАНИХ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРНИЧОГО МАСИВУ
ТОРОВИМИ ПЛАНЕТАРНИМИ ВИКОНАВЧИМИ ОРГАНАМИ
ПОРОДУРУЙНУВАЛЬНИХ МАШИН РІЗЦЕВОГО ТИПУ**

Довгаль Д. О., магістр*
Донецький національний технічний університет
Тел. (06242)4-73-31

Анотація – стаття присвячена питанню визначення геометричних параметрів процесу зрізоутворення при роботі торових планетарних виконавчих органів різцевого типу. Приведено методику визначення параметрів зрізоутворення. Встановлено аналітичні залежності форми поздовжнього профілю зрізів від конструктивних і кінематичних параметрів торових виконавчих органів, що дозволяють виконувати аналіз та оптимізацію форм і параметрів зрізів при різних конструктивних варіантах і режимах роботи виконавчого органа.

Ключові слова – виконавчий орган, різцевий інструмент, форма зрізу, перетворення координат, параметри зрізоутворення.

Постановка проблеми. Для руйнування гірничих порід і розробки корисних копалин з високою продуктивністю, мінімальною витратою енергії та інструменту створюються машини й установки з виконавчими органами різного принципу дії. Одними з найбільш перспективних виконавчих органів, використовуваних на породоруйнівальних машинах є, планетарні виконавчі органи з перехресними осями обертання, або, так звані, торові [1-4].

Результати теоретичних досліджень, присвячених питанню різання гірничих порід і вугілля [5, 6], показали, що ефективність цього процесу залежить не тільки від опору матеріалу різанню і геометрії інструмента, що ріже, але також, у значній мірі і від геометричних параметрів зрізів.

Зрізом називається обсяг породи або корисної копалини в масиві, що підлягає відділенню ріжучим інструментом у черговому циклі його роботи.

Загальновідомо, що планетарні виконавчі органи, у тому числі і торові, дозволяють руйнувати гірничий масив зрізами різних форм. Однак питання визначення раціональних форм зрізів зазначених виконавчих органів дотепер практично не вирішені.

Аналіз останніх досліджень. Для моделювання форм і оптимізації геометричних параметрів зрізів, необхідно, насамперед одержати їхній аналітичний опис. Для торових планетарних виконавчих органів

* Науковий керівник – д. т. н., професор Скідан І. А.

точний аналітичний опис зрізів і їхнє дослідження вкрай складне, що в першу чергу, обумовлено великою кількістю параметрів, які впливають на форму зрізів, що у свою чергу знаходяться в складному взаємозв'язку між собою. У раніше виконаній роботі [6,7], що стосується оптимізації процесу зрізоутворення при роботі торових виконавчих органів, поздовжній перетин зрізу розглядався, як область між дугами окружностей фрезеруючого диска, утворена при повторному проходженні інструмента по одному сліді через оберт водила. Такий підхід до визначення форм зрізів досить неточний, оскільки при цьому не враховуються багато конструктивних і кінематичних параметрів виконавчого органу, що у наслідку, негативно відбивається на результатах досліджень. Тому, для більш точного аналітичного опису форм зрізів, утворюваних при роботі різцевого інструмента, закріпленого на фрезеруючих дисках торових планетарних виконавчих органів, необхідно розглядати процес зрізоутворення з урахуванням усіх конструктивних та кінематичних параметрів виконавчого органу, а також особливостей його просторового руху відносно поверхні забою.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методики більш точного аналітичного опису форм зрізів, утворюваних при роботі різцевого інструмента торових виконавчих органів, що дозволить у подальшому виконати їх аналіз та оптимізацію при різних конструктивних варіантах і режимах роботи виконавчого органу.

Основна частина. Різцевий інструмент, торових планетарних виконавчих органів, описує у своєму русі складні просторові криві [8]. На робочих ділянках траєкторії, різцевий інструмент, під дією осьового й обертального зусиль, врізається в породний масив, утворюючи зрізи складної геометричної форми, що залежить від конструктивних і кінематичних параметрів виконавчого органу [9].

Розглянемо утворення зрізу одиничним різцем торового планетарного виконавчого органу у загальному випадку, коли робочий диск цілком по висоті врізається в масив (рис. 1).

Згідно рис. 1 за початок системи координат виконавчого органу прийнято точку O , що відповідає початковому положенню водила, закріпленого на головному валу. Вісь OZ паралельна осі головного вала, а її напрямок збігається з напрямком подачі виконавчого органу на забір. Точкою O_1 позначене початкове положення центра робочого диска, що розташований на відстані R від осі головного вала. При цьому різцевий інструмент здійснює рух, який визначається параметричними рівняннями [8]

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\varphi i) \cos(\varphi - \alpha) + R \cos \varphi; \\ y &= r \cos(\varphi i) \sin(\varphi - \alpha) + R \sin \varphi; \\ z &= \frac{h}{2\pi} \varphi \pm r \sin(\varphi i), \end{aligned} \quad (1)$$

де R – відстань від осі обертання водила до осі обертання фрезерую-

чого диска (радіус водила);

r – радіус фрезеруючого диска (визначається відстанню від осі обертання диска у відносному русі до ріжучих кромek інструментів на диску);

φ – кут повороту водила від початкового положення (параметр);

i – передаточне число планетарного механізму;

α – двогранний кут між вертикальною площиною та площиною обертання фрезеруючого диска у початковому положенні;

h – величина подачі виконавчого органу на забій за один оберт водила.

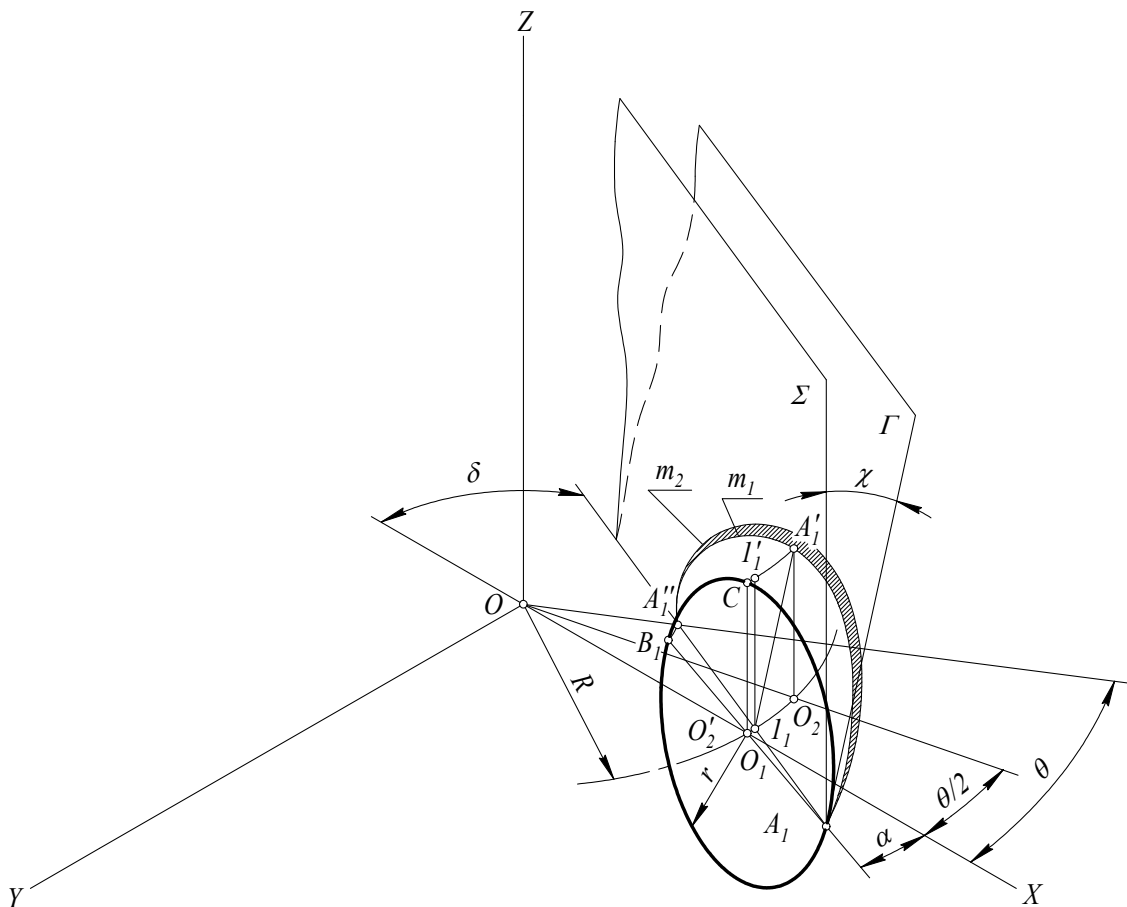


Рис. 1 – Схема до визначення параметрів зрізоутворення

У рівняннях (1) верхній знак відповідає підсумовуючій схемі роботи виконавчого органу, а нижній – віднімаючій [8].

Після повороту водила на кут $\theta = \pi/i$, інструмент фрезеруючого диска здійснює повний робочий оберт, який характеризується входженням інструменту в контакт з забоєм у точці A_1 та його виходом у точці A_1' . При цьому, ріжуча кромка різця утворює нарисову дугу m_1 . Здійснивши повний оберт, водило виконавчого органу повертається у початкове положення, та за умови цілочисельного значення передаточного числа i , різець проходить по попередньому сліду, але зміщеному у напрямку руху машини на величини подачі h . При цьому утво-

рюється нарисова дуга m_2 . Область між дугами m_1 і m_2 являє собою поздовжній профіль зрізу.

Схема роботи виконавчого органу не впливає на форми зрізів, оскільки траєкторії руху різцевого інструменту торових планетарних виконавчих органів при роботі за підсумовуючої та віднімаючої схемами дзеркально симетричні [8].

Для встановлення оптимальних співвідношень між параметрами зрізів (товщиною, периметром, площею поздовжнього профілю тощо) у сталому режимі роботи виконавчого органу, необхідно насамперед установити рівняння нарисових дуг одиночного зрізу.

Нарисові дуги m_1 та m_2 є дугами просторових епі- та гіпоциклоїдальних кривих що лежать на поверхні еліптичного гелікоїдального циліндра [8, 9], тому, аналіз параметрів зрізів, обмежених цими дугами, як зазначалося, вкрай складний.

Для полегшення аналізу процесу зрізоутворення та визначення параметрів зрізів пропонується розглядати не сам зріз, а проекцію його поздовжнього профілю на деяку площину, на якій ця проекція максимально наближена до натуральної величини.

Розглянемо визначення положення цієї площини. Через точки A_1 та A_1'' відповідно початку та кінця нарисових дуг m_1 та m_2 перпендикулярно координатній площині XOY проведемо площину Σ (рис. 1). Двогранний кут між площиною Σ та координатною площиною XOZ визначається кутом δ . Відстань від площини Σ до точки нарисової дуги $m_1 - A_1'$, якої досягає різець при здійсненні фрезеруючим диском половини робочого оберту, визначає максимальне відхилення дуги m_1 від площини Σ . Отже, площина Γ , побудована по трьох точках – A_1 , A_1'' та A_1' , є максимально наближеною до нарисової дуги m_1 площиною, а її положення відносно Σ , визначається двограними кутом χ . Тоді, нарисові дуг m_1 та m_2 наближено, але з достатньою точністю можна розглядати як проекції цих дуг на площину Γ або рівнобіжну їй площину.

Визначимо рівняння нарисових дуг зрізу m_1 та m_2 у площині Γ' рівнобіжній Σ_2 через перетворення відповідних координат.

Перемістимо центр координат – точку O у точку початкового положення фрезеруючого диска O_1 , положення якої на осі OX визначається радіусом водила R та одночасно виконаємо поворот координатних осей відносно площини XOZ на кут δ . При цьому координати руху різцевого інструменту у новій системі координат $O'X'Y'Z'$ будуть зв'язані з координатами інструменту у системі $OXYZ$ залежностями

$$\begin{aligned}x' &= (x - R) \cdot \cos \delta - y \cdot \sin \delta; \\y' &= (x - R) \cdot \sin \delta + y \cdot \cos \delta; \\z' &= z,\end{aligned}\tag{2}$$

Наступне перетворення координат виконаємо, нахиливши відповідні осі системи координат $O'X'Y'Z'$ на кут χ , та одночасно змістивши початок координат таким чином, щоб вісь аплікату співпала з точкою

A'_1 , тобто точкою, якої досягає різцевий інструмент при повороті фрезеруючого диску на кут $\varphi i = \pi/2$. Для визначення величини зміщення початку координат, розглянемо трикутник OO_2O_1 (рис. 2). Точка O_2 є положенням центру фрезеруючого диску у момент досягнення різцем точки A'_1 , а отже опустивши з неї перпендикуляр на відрізок A''_1O_1 , який збігається зі слідом площини Γ' , отримаємо точку O'_2 у яку слід перемістити початок нової системи координат $O''X''Y''Z''$. Для цього необхідно відшукати довжину відрізка $O_1O'_2$. З трикутника $O'_2O_2O_1$

$$O_1O'_2 = O_1O_2 \cdot \cos \angle O'_2O_1O_2,$$

де

$$\angle OO_1O_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{4} - \delta; \quad O_1O_2 = 2 \cdot OO_2 \cdot \sin \frac{\theta}{4}; \quad OO_2 = R,$$

тоді

$$O_1O'_2 = 2R \sin\left(\frac{\theta}{4}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{4} - \delta\right).$$

Таким чином, рівняння траєкторії руху різця в системі $O''X''Y''Z''$ матимуть вигляд

$$\begin{aligned} x'' &= x' - 2R \sin\left(\frac{\theta}{4}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{4} - \delta\right); \\ y'' &= y' \cdot \cos \chi - z' \cdot \sin \chi; \\ z'' &= y' \cdot \sin \chi + z' \cdot \cos \chi, \end{aligned} \quad (3)$$

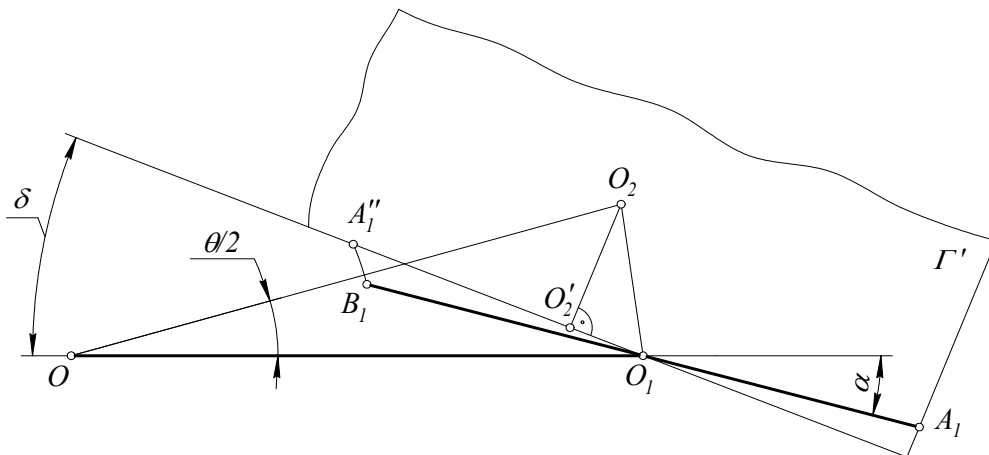


Рис. 2 – Схема до визначення величини зміщення центру системи координат $O''X''Y''Z''$

Підставивши відповідні значення координат (1) і (2) у рівняння (3) та виконавши ряд спрощуючих перетворень, отримаємо

$$x'' = R \left[\cos(\varphi + \delta) - \cos\left(\frac{\pi}{2i} + \delta\right) \right] + r \cos(\varphi i) \cos(\varphi - \alpha + \delta);$$

$$y'' = [R(\sin(\varphi + \delta) - \sin\delta) + r \cos(\varphi i) \sin(\varphi - \alpha + \delta)] \cos\chi - \left(\frac{h}{2\pi} \varphi + r \sin(\varphi i)\right) \sin\chi; (4)$$

$$z'' = [R(\sin(\varphi + \delta) - \sin\delta) + r \cos(\varphi i) \sin(\varphi - \alpha + \delta)] \sin\chi + \left(\frac{h}{2\pi} \varphi + r \sin(\varphi i)\right) \cos\chi,$$

Рівняння (4) є загальними рівняннями нарисової дуги зрізу m_1 у системі координат, осі абсцис та аплікату якої лежать у площині Γ''/Γ , а вісь ординат – у площині XOY системи координат виконавчого органу. При цьому, проекція нарисової дуги зрізу m_1 на площину Γ' , яка наближено розглядається як сама дуга m_1 , буде визначатися координатами x'' та z'' .

Рівняння дуги m_2 відрізняється від рівнянь дуги m_1 лише початковим значенням кута повороту водила φ , тобто, для отримання нарисової дуги зрізу m_2 , у рівняння (4), замість φ слід підставити $(2\pi + \varphi)$. Однак, такий підхід справедливий лише при цілочисельних значеннях передаточних чисел та за умови роботи по одному різцю у кожній лінії різання. У загальному ж випадку рівняння дуги m_2 слід узгоджувати з режимними параметрами та параметрами схеми різання, за якою працює даний торовий планетарний виконавчий орган. Але ці параметри впливають лише на товщину зрізів, при цьому їх форма та закономірності утворення залишаються незмінними.

Для здійснення моделювання форм зрізів за рівняннями (4) необхідно визначити значення кутів δ та χ , які характеризують положення площини проєкцій Γ' .

Визначимо величину кута δ . Для цього розглянемо проєкцію фрезеруючого диска на площину XOY (рис. 3). З рис. 3 видно, що $\delta = \angle O_2 A_1 A_1'' = \pi - \angle O_2 A_1 A_1$, при цьому $\angle O_2 A_1 A_1 = \pi - \angle O_1 A_1 A_2 - \alpha$, тоді

$$\delta = \angle O_1 A_1 A_2 + \alpha, \quad (5)$$

Отже, для визначення δ необхідно знайти величину $\angle O_1 A_1 A_2$. Розглядаючи трикутники $O A_1 A_1''$ та $O A_1 O_1$, помічаємо, що

$$\angle O_1 A_1 A_2 = \angle O A_1 A_1'' - \angle O A_1 O_1,$$

при цьому невідомі величини, можна знайти з трикутників $O A_1 A_1''$ та $O A_1 O_1$ за теоремами синусів та косинусів із наступних геометричних співвідношень:

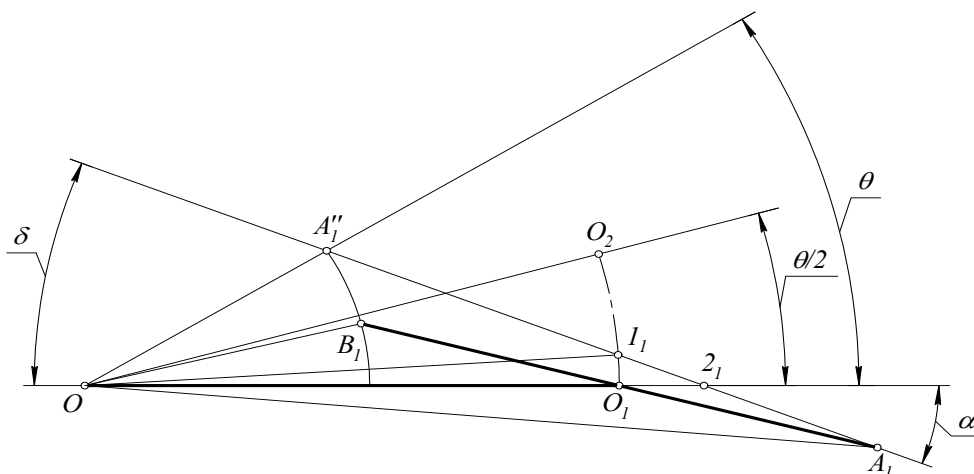


Рис. 3 – Схема до визначення кутів нахилу площин Σ та Γ

$$\begin{aligned} \angle OA_1A_1'' &= \arcsin\left(\frac{OA_1'' \cdot \sin \angle A_1OA_1''}{A_1A_1''}\right), \\ \angle A_1OA_1'' &= \theta + \angle A_1OO_1, \\ OA_1'' = OB_1 &= \sqrt{OO_1^2 + O_1B_1^2 - 2 \cdot OO_1 \cdot O_1B_1 \cdot \cos \angle OO_1B_1}, \\ \angle A_1OO_1 &= \arcsin\left(\frac{O_1A_1 \cdot \sin \angle OO_1A_1}{OA_1}\right), \\ A_1A_1'' &= \sqrt{OA_1''^2 + OA_1^2 - 2 \cdot OA_1'' \cdot OA_1 \cdot \cos \angle A_1OA_1''}, \\ OA_1 &= \sqrt{O_1A_1^2 + OO_1^2 - 2 \cdot O_1A_1 \cdot OO_1 \cdot \cos \angle OO_1A_1}, \\ \angle OA_1O_1 &= \arcsin\left(\frac{OO_1 \cdot \sin \angle OO_1A_1}{OA_1}\right). \end{aligned}$$

Тоді, підставивши значення параметрів виконавчого органу

$$OO_1 = R; A_1O_1 = O_1B_1 = r; \angle OO_1B_1 = \alpha; \angle OO_1A_1 = \pi - \alpha,$$

та виконавши деякі перетворення, рівняння (5) прийме вигляд

$$\begin{aligned} \delta &= \arcsin\left\{\sin\left[\frac{\pi}{i} + \arcsin\left(\frac{r \sin \alpha}{\sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \alpha}}\right)\right]\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha} : \right. \\ &: \left. \sqrt{2\left[R^2 + r^2 - \sqrt{R^4 + r^4 - 2R^2r^2 \cos 2\alpha} \cos\left(\frac{\pi}{i} + \arcsin\left(\frac{r \sin \alpha}{\sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \alpha}}\right)\right)\right]}\right\} - (6) \\ &\quad - \arcsin\left(\frac{R \sin \alpha}{\sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \alpha}}\right) + \alpha, \end{aligned}$$

Таким чином, рівняння (6) виражає співвідношення між кутом нахилу δ площини Σ_1 до координатної площини XOZ та параметрами торового планетарного виконавчого органу.

Для визначення кута χ , розглянемо прямокутник $1_1 1'_1 A'_1 O_2$ (рис. 1), де $\angle 1'_1 1_1 A'_1$ між його діагоналлю $1_1 A'_1$ та стороною $1_1 1'_1$ дорівнює шуканому куту χ .

Очевидно, що $\angle 1'_1 1_1 A'_1 = \angle 1_1 A'_1 O_2$, тоді має місце рівність

$$\chi = \operatorname{arctg}\left(\frac{1_1 O_2}{A'_1 O_2}\right), \quad (7)$$

де

$$A'_1 O_2 = r$$

Отже, у рівнянні (7) невідомою величиною є катет трикутника $1_1 A'_1 O_2 - 1_1 O_2$. Для його визначення розглянемо трикутник $OO_2 1_1$, звідси

$$1_1 O_2 = 2 \cdot O 1_1 \cdot \sin \frac{\angle 1_1 O O_2}{2},$$

де $\angle 1_1 O O_2$ у свою чергу дорівнює

$$\angle 1_1 O O_2 = \frac{\theta}{2} - \angle O_1 O 1_1.$$

Для визначення $\angle O_1 O 1_1$ розглянемо трикутник $O 1_1 2_1$. За теоремою синусів

$$\angle O_1 O 1_1 = \angle 2_1 O 1_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \angle O 2_1 1_1 \cdot 1_1 2_1}{O 1_1}\right),$$

де

$$\begin{aligned} \angle O 2_1 1_1 &= \delta; \quad 1_1 2_1 = O 2_1 \cdot \cos \delta - \sqrt{O 2_1^2 \cdot \cos^2 \delta + O 1_1^2 - O 2_1^2}; \\ O 2_1 &= O O_1 + O_1 2_1; \quad O_1 2_1 = \frac{O_1 A_1 \cdot \sin \angle O_1 A_1 A_1''}{\sin(\pi - \delta)}. \end{aligned}$$

Тоді, підставивши отримані величини у рівняння (7) та виконавши відповідні перетворення, отримаємо формулу для визначення кута χ

$$\chi = \arctg \left\{ \frac{2R}{r} \times \left[\sin \delta \left(\left(R + \frac{r \sin(\delta - \alpha)}{\sin \delta} \right) \cos \delta - \sqrt{R^2 - \left(R + \frac{r \sin(\delta - \alpha)}{\sin \delta} \right)^2 \sin^2 \delta} \right) \right] \right\} \times \sin \left[\frac{\theta}{4} - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\dots}{R} \right) \right] \quad (8)$$

Висновки. Отримані рівняння (4) та залежності (6) й (8), що виражають співвідношення між кутами δ і χ та параметрами виконавчого органу дають змогу моделювати та досліджувати форми зрізів, що утворюються різцевим інструментом при різних значеннях конструктивних та кінематичних параметрів торових планетарних виконавчих органів породоруйнувальних машин. Вони є вихідними для визначення співвідношень між конструктивними та кінематичними параметрами торових планетарних виконавчих органів, що обумовлюють оптимальні режими роботи виконавчого органу, високу продуктивність, мінімальні витрати енергії та різцевого інструменту.

У подальшому, отримані залежності, можуть бути використані при створенні комплексної методики розрахунку раціональних параметрів торових планетарних виконавчих органів та суттєво поліпшити роботу породоруйнувальних машин.

Література

1. Архангельский А. С. Некоторые вопросы теории планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов // Расчеты, конструирование и испытание горных машин. Сборник статей. – 1955. – №2. – с. 143-208.
2. Рогожин А. Г., Довгаль Д. О., Уткіна Р. В. До питання щодо раціональної конструкції різцевих виконавчих органів породоруйнувальних машин // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Динаміка наукових досліджень `2005». Том 67. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 44-48.
3. Рогожин А. Г., Довгаль Д. О., Уткіна Р. В. Дослідження швидкості різання торових планетарних виконавчих органів прохідницьких комбайнів // Матеріали III науково-практичної конференції «Донбас-2020: наука і техніка – виробництву». – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С. 290-295.
4. Барон А. И., Глатман Л. Б., Губенков Е. К. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. – М.: «Наука», 1968. – 215 с.
5. Резание угля / А. И. Берон, А. С. Казанский, Б. М. Лейбов, Е. З. Позин. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 437 с.
6. Дубянский В. М., Михайлов В. Г. К теории аналитического расчета параметров отделения стружки от массива инструментом планета-

- рных исполнительных органов горных машин. Труды НПИ, том 158, Новочеркасск, 1964. – С. 37-53.
7. *Рогожин А. Г., Воробйов Є. О., Довгаль Д. О., Софійський К. К.* Оптимізація параметрів процесу руйнування гірських порід торовими планетарними виконавчими органами гірничих машин // Геотехнічна механіка: Міжвід. Зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дн-ськ, 2005. – Вип. 57. – С. 118-123.
 8. *Довгаль Д. О.* Визначення основних характеристик руху різцевого інструменту при роботі торових планетарних виконавчих органів породоруйнівальних машин // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 31. – С. 103-111.
 9. *Довгаль Д. О., Рогожин А. Г.* Моделирование форм срезов, образующихся при разрушении горных пород торовыми планетарными исполнительными органами породоразрушающих машин // Материалы IX Международной студенческой научно-технической конференции (г. Севастополь, 25-30 сентября 2006 г.). – Севастополь: СевНТУ. – 2006. – С. 32-35.

GEOMETRIC MODELING OF THE FORMS CUT, WHICH ARE FORMED AT THE DESTRUCTION THE MOUNTAIN ROCKS BY CUTTING TOOL OF TORAHS PLANETARY EXECUTIVE UNITS

D. Dovgal

Summary

This article is dedicated to the question of the determination geometric parameter of chip formation at the destruction the mountain rocks by cutting tool of torahs planetary executive units. The scientific approach is carried out to the determinations parameter of chip formation at the destruction. Analytical dependencies of the form of the longitudinal profile cut are Determined from parameter constructive and kinematics.