

© Д.О. Довгаль¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

**ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОСТОРОВИХ ФОРМ ЗРІЗІВ, УТВОРЮВАНИХ РІЗЦЯМИ
ПЛАНЕТАРНО-ТОРОВИХ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ
ПОРОДОРУЙНУВАЛЬНИХ МАШИН**

© D. Dovhal¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**GEOMETRIC AND COMPUTER MODELING OF SPATIAL CUT SHAPES
FORMED BY THE CUTTERS OF PLANETARY-TOROIDAL EXECUTIVE
UNITS OF ROCK-DESTRUCTION MACHINES**

Мета. Метою роботи є розробка геометричної та комп'ютерної моделі процесу формування зрізу різцем планетарно-торового виконавчого органу (ПТВО) породоруйнувальної машини, а також визначення і аналіз основних параметрів зрізу залежно від характеристик планетарного механізму для підвищення ефективності руйнування гірничого масиву та зниження енерговитрат процесу.

Методика. Основною для розробки геометричної моделі зрізу став геометричний аналіз рівнянь руху різця з урахуванням кінематичних особливостей ПТВО. Для перевірки розрахунків було проведено комп'ютерне моделювання та візуалізація процесу зрізоутворення у системі SolidWorks. Числовий аналіз форм зрізів та вплив кінематичних параметрів ПТВО на параметри зрізів виконано засобами системи MATLAB.

Результати. Розроблено геометричну модель формоутворення зрізів. Отримано залежності товщини зрізу від кута повороту водила та передавального числа, виконано комп'ютерне моделювання процесу зрізоутворення. Визначено вплив основних параметрів ПТВО на рівномірність зрізу, а також запропоновано методику оптимізації параметрів руху різця для зменшення коливань товщини зрізу й підвищення ефективності процесу руйнування.

Наукова новизна. Отримано нові наукові результати, що розширюють розуміння процесу формування зрізів різцями ПТВО. Основна новизна дослідження полягає у розробленні геометричної та комп'ютерної моделі формування зрізів, отриманні залежностей товщини зрізу від основних параметрів ПТВО, виконанні комплексного моделювання процесу зрізоутворення, а також розробленні рекомендацій щодо зменшення нерівномірності товщини зрізу.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні ПТВО для підвищення ефективності процесу різання. Отримані аналітичні залежності та комп'ютерні моделі дозволяють оптимізувати кінематичні параметри руху різця, що сприяє зменшенню нерівномірності товщини зрізу, зниженню енерговитрат та підвищенню зносостійкості інструменту.

Ключові слова: породоруйнувальні машини, планетарно-торовий виконавчий орган, геометричне моделювання, комп'ютерне моделювання, кінематика руху різця, епіциклоїдальна траєкторія, товщина зрізу, передавальне число, оптимізація параметрів різання.

Вступ. Руйнування гірничого масиву механічними породоруйнівними машинами є основним процесом у видобувній промисловості. Планетарно-торовий виконавчий орган (ПТВО) широко застосовується у прохідницьких та очисних

комбайнах завдяки ефективності процесу відокремлення гірничої маси від масиву. Однак характер руху різців ПТВО призводить до нерівномірної товщини зрізу, що впливає на енергоємність процесу, пиловиділення та навантаження на інструмент робочі органи машини. Геометричне та комп'ютерне моделювання дозволяє з достатньою точністю визначити параметри зрізу та оптимізувати робочі режими породоруйнівних машин.

Раніше проведені дослідження [1–4] показали, що форма зрізу, утворюваного різцем ПТВО є просторово-серпоподібною, а його товщина змінюється залежно від конструктивних параметрів виконавчого органу та кінематики руху різця. Однак більшість існуючих моделей не враховують особливостей просторовий рух різця за епі- та гіпоциклоїдальними просторовими траєкторіями та вплив передавального числа планетарного механізму.

Товщина зрізу є критичним параметром у процесі руйнування гірничого масиву планетарно-торовими виконавчими органами. Вона визначає ефективність процесу різання, навантаження на ріжучий інструмент та енергетичні витрати [5, 6]. Для оптимізації роботи механізму необхідно враховувати зміну максимальних і мінімальних значень товщини зрізу при різних значеннях передавальних чисел. Отже, завдання розроблення геометричної та комп'ютерної моделі формування зрізу, визначення основних параметрів та їх залежностей від конструктивних і кінематичних характеристик ПТВО є актуальним.

Основна частина. У загальному випадку під час роботи планетарно-торового виконавчого органу різець формує умовно серпоподібний зріз, розташований уздовж просторової епі- або гіпоциклоїдальної кривої (рис. 1), незалежно від конструктивних і кінематичних параметрів. Товщина зрізу змінюється від нуля на периферії вибою до максимального значення $h_{\max}$, яке досягається на лінії рухомої центроїди миттєвих центрів швидкостей [5] (рис. 2).

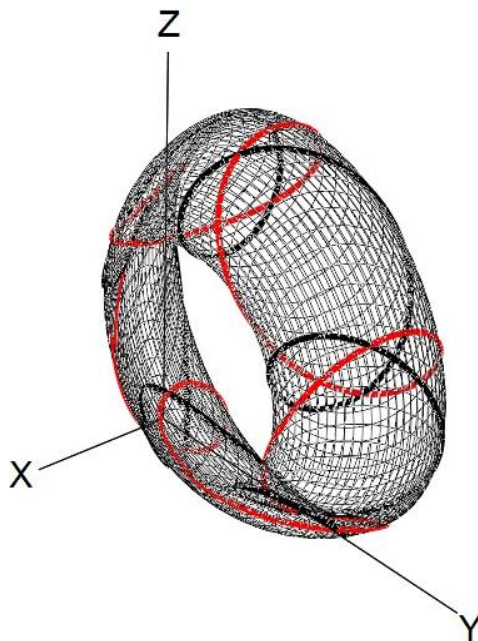


Рис. 1. Траєкторія руху одиничного ріжучого інструменту загального випадку планетарно-торового виконавчого органу

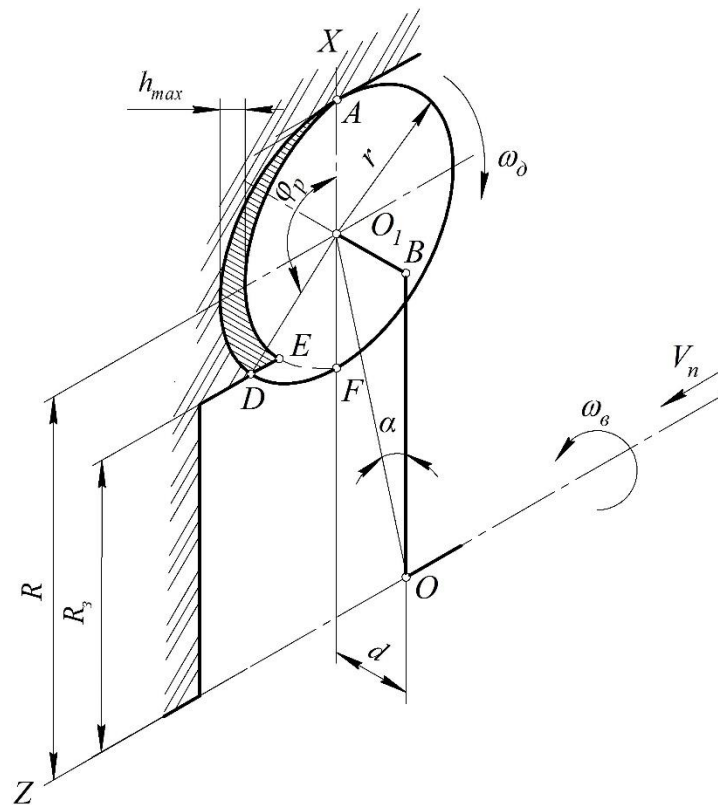


Рис. 2. Схема утворення зрізу одиничним ріжучим інструментом робочого диска

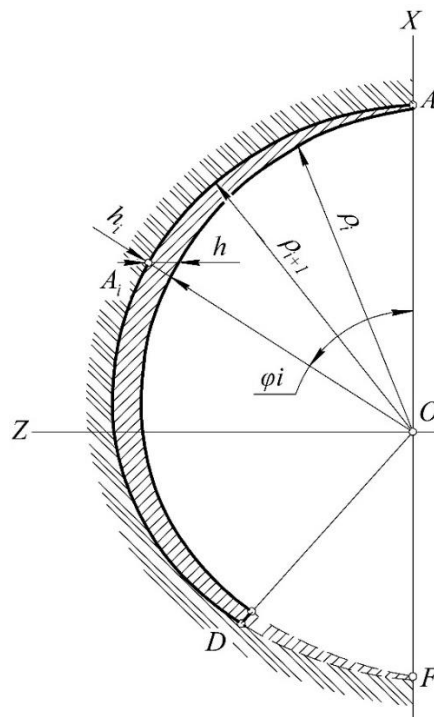


Рис. 3. Схема для визначення миттєвого значення товщини зрізу

Така форма зрізу має низку недоліків, зокрема нерівномірний розподіл силового навантаження на різець уздовж траєкторії, надмірне подрібнення матеріалу на периферійних ділянках забою, що спричиняє інтенсивне пилоутворення тощо [6]. Водночас зміна товщини зрізу є конструктивною особливістю цього

виконавчого органа та залежить від поточного значення кута повороту φ водила (планшайби), тому її усунення неможливе.

У загальному випадку, під час роботи планетарно-торового виконавчого органу у сталому режимі, контури зрізу формуються ділянками траєкторій руху i -го та $i+1$ -го різця, які є просторовими кривими циклоїдального типу та розташовані в межах однієї лінії різання. Об'єм матеріалу, розташований між цими лініями, визначає одиничний зріз (див. рис. 3).

Для розрахунку миттєвої товщини зрізу можна припустити, що поверхня вибою руйнується інструментом таким чином, що за m обертів виконавчого органу його переміщення вглиб вибою відбувається паралельно до попередньої поверхні на величину подачі $h_{\text{под}}$. У такому випадку миттєве значення товщини зрізу h_i можна визначити за допомогою наступної залежності:

$$h_i = \rho_{i+1}(\varphi) - \rho_i(\varphi), \quad (1)$$

де: $\rho_i(\varphi)$, $\rho_{i+1}(\varphi)$ – відповідно полярні радіуси i -го та $i+1$ -го різця, що працюють в одній лінії різання, які дорівнюють

$$\begin{aligned} \rho_i(\varphi) &= \sqrt{x_i(\varphi)^2 + z_i(\varphi)^2}; \\ \rho_{i+1}(\varphi) &= \sqrt{x_{i+1}(\varphi)^2 + z_{i+1}(\varphi)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де: $x_i(\varphi)$, $z_i(\varphi)$, $x_{i+1}(\varphi)$, $z_{i+1}(\varphi)$ – координати точок нарисових контурів зрізу, що відповідають траєкторіям i -го та $i+1$ -го різця, які визначаються рівняннями [5]:

$$\begin{aligned} x_i &= R \left[\cos(\varphi + \sigma) - \cos\left(\frac{\pi}{2i} + \sigma\right) \right] + r \cos(\varphi i) \cos(\varphi - \alpha + \sigma); \\ z_i &= \left[R (\sin(\varphi + \sigma) - \sin \sigma) + r \cos(\varphi i) \sin(\varphi - \alpha + \sigma) \right] \sin \chi + \\ &\quad + \left(\frac{h_{\text{под}}}{2\pi} \varphi + r \sin(\varphi i) + h \right) \cos \chi, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_i &= R \left[\cos(\varphi + \sigma) - \cos\left(\frac{\pi}{2i} + \sigma\right) \right] + r \cos(\varphi i) \cos(\varphi - \alpha + \sigma); \\ z_i &= \left[R (\sin(\varphi + \sigma) - \sin \sigma) + r \cos(\varphi i) \sin(\varphi - \alpha + \sigma) \right] \sin \chi + \\ &\quad + \left(\frac{h_{\text{под}}}{2\pi} \varphi + r \sin(\varphi i) \right) \cos \chi, \end{aligned} \quad (4)$$

де R – відстань від осі обертання водила до осі обертання робочого диска (радіус водила); r – радіус робочого диска; φ – кут повороту водила від початкового положення (параметр); i – передаточне число планетарного механізму; α – двогранний кут між вертикальною площиною та площиною обертання робочого диска у початковому положенні (визначається конструктивним параметром d (див. рис. 1); $h_{\text{под}}$ – величина подачі виконавчого органу на забій за один оберт водила; σ , χ – параметри, що відповідно визначаються наступними залежностями [5]:

$$\sigma = \arcsin \left\{ \sin \left[\frac{\pi}{i} + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{\sqrt{k^2 + 2k \cos \alpha + 1}} \right) \right] \sqrt{k^2 - 2k \cos \alpha + 1} : \right. \\ \left. : \sqrt{2 \left[k^2 + 1 - \sqrt{k^4 - 2k^2 \cos 2\alpha + 1} \cos \left(\frac{\pi}{i} + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{\sqrt{k^2 + 2k \cos \alpha + 1}} \right) \right) \right]} \right\} - \\ - \arcsin \left(\frac{k \sin \alpha}{\sqrt{k^2 + 2k \cos \alpha + 1}} \right) + \alpha; \\ \chi = \arctg \left\{ 2k \times \right. \\ \left. \times \sin \left[\frac{\theta}{4} - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\sin \sigma \left(\left(k + \frac{\sin(\sigma - \alpha)}{\sin \sigma} \right) \cos \sigma - \sqrt{k^2 - \left(k + \frac{\sin(\sigma - \alpha)}{\sin \sigma} \right)^2 \sin^2 \sigma}}{k} \right) \right] \right\},$$

де: k – коефіцієнт пропорційності радіусів водила та диска ($k = R/r$).

Отже, функція (1), при підстановці в неї значень (2), (3) та (4) виражає залежність миттєвої товщини зрізу h_i від значень кута повороту водила при заданих значеннях конструктивних та кінематичних параметрів планетарно-торового виконавчого органу (рис. 4).

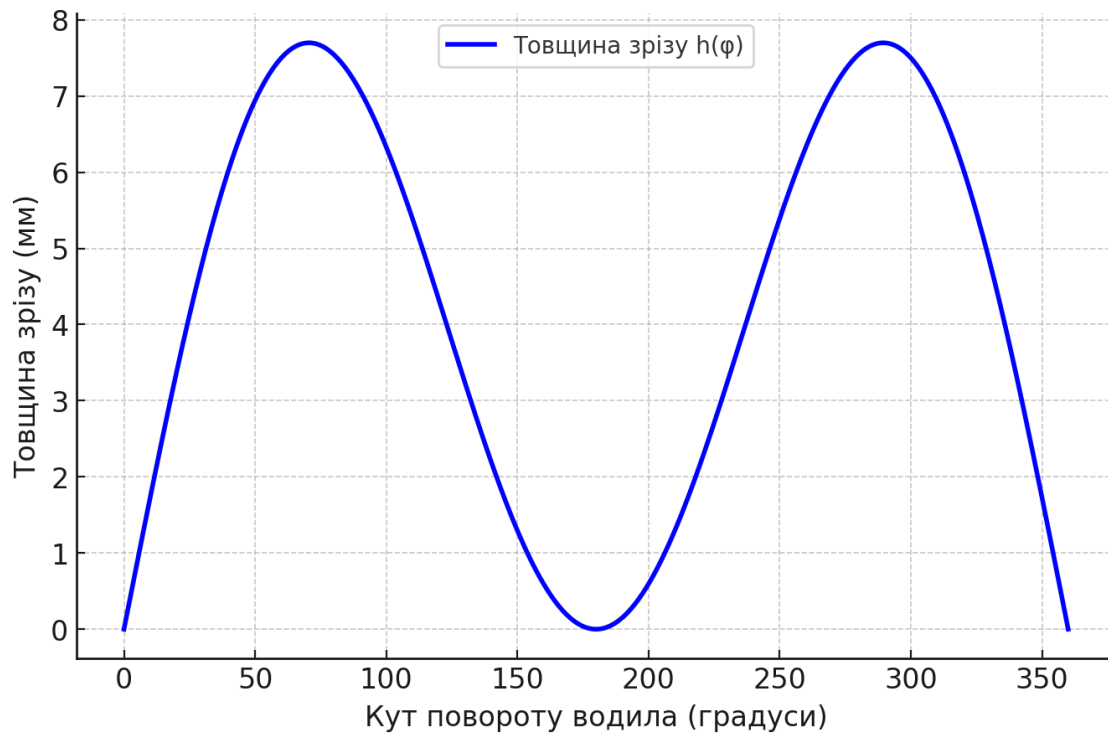


Рис. 4. Залежність миттєвої товщини h_i зрізу від кута повороту водила φ

З рис. 4 видно, що товщина зрізу змінюється синусоїдально відносно кута повороту водила, що пояснюється циклічним характером контакту різця з породою.

У попередніх дослідженнях [1, 2, 5, 6] було встановлено, що величина і характер зміни товщини зрізу суттєво залежить від передаточного числа i планетарного механізму виконавчого органу. Передавальне число i визначає кутову швидкість водила та сателітів. Зі збільшенням значення i швидкість руху різців відносно вибою змінюється, що впливає на параметри руйнування породи, а отже і на форму зрізів. Крім того, чим більше передавальне число, тим складнішою стає траєкторія руху різців, що може призвести до зміни розподілу товщини зрізу по ширині виконавчого органу. Товщина зрізу залежить від кроку руху різців по вибою. При збільшенні передавального числа крок зменшується, що знижує товщину зрізу.

На рис. 5 наведені графіки залежності товщини зрізу від кута повороту водила при різних значеннях передавального числа.

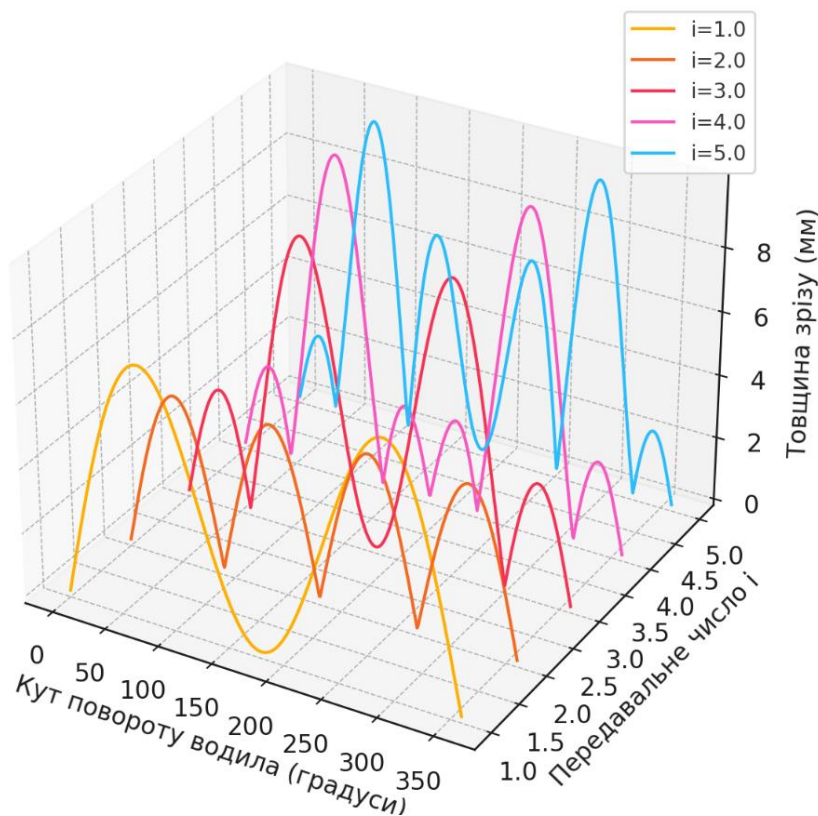


Рис. 5. Залежність миттєвої товщини зрізу h_i від значень кута повороту водила та передавального числа i

З рис. 5 видно, що при збільшенні передавального числа i крива функції товщини зрізу стає складнішою за формою, що вказує на вплив кінематики виконавчого органу на процес формування зрізу.

Максимальні значення товщини зрізу $h_{\max}$ спостерігаються при певних співвідношеннях кута повороту водила та передавального числа, що є критично важливим для оптимізації роботи механізму. Оцінити ступінь рівномірності зрізу, а отже і рівномірність навантаження на ріжучий інструмент та енергетичні

витрати можливо за допомогою аналізу функції зміни максимальних і мінімальних значень товщини зрізу при різних передавальних числах.

Отже, для забезпечення рівномірного процесу різання та зменшення коливань товщини зрізу необхідно оптимізувати кінематичні та конструктивні параметри планетарно-торового виконавчого органу з метою зменшення різниці між критичними значеннями $h_{\max}$ та $h_{\min}$ (рис. 6).

Аналіз графіків функцій критичних значень товщини зрізу (рис. 6) показує, що максимальна товщина зростає зі збільшенням передавального числа, що пояснюється впливом складної кінематики на глибину проникнення різця в масив. Мінімальна товщина зрізу має місця на крайніх периферійних ділянках (місцях входу і виходу різця із контакту з вибоєм) та не залежить від передавального числа.

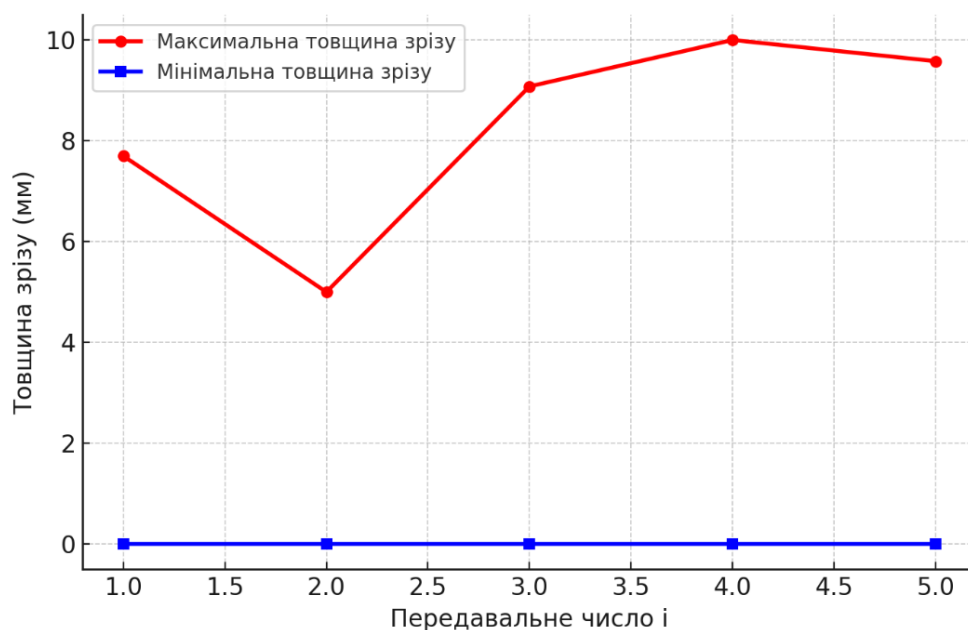


Рис. 6. Залежність максимального і мінімального значень товщини зрізу від передавального числа i планетарного механізму

При низьких значеннях i товщина зрізу коливається в меншому діапазоні, що сприяє більш стабільному процесу різання. При високих значеннях i (3,5 та більше) амплітуда змін товщини зрізу збільшується, що може призводити до нерівномірного навантаження на ріжучий інструмент і підвищеного зносу.

З рис. 6 видно, що раціональні значення i знаходяться в діапазоні 1,5–3, що забезпечує найбільш рівномірне різання. Крім цього, можна розглянути можливість впровадження змінного передавального числа. Використання адаптивної зміни i у процесі роботи дасть можливість підтримувати стабільну товщину зрізу.

Висновки.

1. Розроблено геометричну модель формування зрізів, яка враховує просторову епі-, гіпоциклоїдальну траєкторію руху різця планетарно-торового виконавчого органу, що дозволяє детально аналізувати процес руйнування гірничого масиву.

2. Встановлено аналітичні залежності товщини зрізу від кута повороту водила та передавального числа механізму, що дає змогу прогнозувати зміну товщини зрізу під час роботи виконавчого органу.

3. Виконано комп'ютерне моделювання процесу зрізоутворення у середовищах SolidWorks та MATLAB, що підтвердило правильність теоретичних розрахунків і дозволило отримати візуалізацію процесу різання.

4. Визначено вплив кінематичних і конструктивних параметрів на рівномірність товщини зрізу, що є критично важливим для оптимізації роботи виконавчого органу та зниження навантажень на ріжучий інструмент.

5. Встановлено, що при збільшенні величини передавального числа i зростає складність траєкторії руху різця, що впливає на варіацію товщини зрізу. Раціональні значення передавального числа знаходяться в діапазоні $i=1,5-3$, що забезпечує більш рівномірне різання.

6. Запропоновано методи мінімізації амплітуди коливань товщини зрізу, що включають адаптивне регулювання передавального числа та оптимізацію параметрів руху різця, що сприяє підвищенню ефективності руйнування гірничого масиву та зменшенню енерговитрат.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та вдосконаленні планетарно-торових виконавчих органів породоруйнувальних машин, що дозволить підвищити їхню продуктивність, зменшити зношення ріжучого інструменту та покращити якість процесу механічного руйнування гірничих порід та корисних копалин.

Перелік посилань

1. Kizilov, V. V. (1982). *Issledovanie i vybor ratsional'nykh konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov planetarnykh ispolnitel'nykh organov prokhodcheskikh kombaynov* (Doctoral dissertation).
2. Довгаль, Д. О. (2012). *Геометричне моделювання процесу руйнування гірничого масиву планетарно-торовими виконавчими органами гірничих машин: автореф. дис. .. канд. техн. наук*. Донецьк.
3. Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. Ernst&Sohn. https://www.researchgate.net/publication/286666326_Hardrock_Tunnel_Boring_Machines
4. Li, T., Zhang, Z., Jia, C., Liu, B., Liu, Y., & Jiang, Y. (2022). Investigating the cutting force of disc cutter in multi-cutter rotary cutting of sandstone: Simulations and experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 152, 105069. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105069>
5. Довгаль, Д. О. (2013). До питання щодо геометричних параметрів зрізоутворення при руйнуванні гірничого масиву планетарно-торовими виконавчими органами гірничих машин. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 4(57).
6. Gospodarczyk, P., Kotwica, K., Mendyka, P., & Stopka, G. (2016). Innovative roadheader mining head with asymmetrical disc tools, exploration and mining, mineral processing. *Int Multidiscip Sci GeoConf SGEM* 2. https://www.researchgate.net/publication/312345322_INNOVATIVE_ROADHEADER_MINING_HEAD_WITH_ASSYMETRICAL_DISC_TOOLS.

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the work is to develop a geometric and computer model of the process of forming a section by a cutter of a planetary-toroidal executive unit (PTEU) of a rock-breaking machine, as well as to determine and analyze the main parameters of the section depending on the

characteristics of the planetary mechanism to increase the efficiency of the destruction of the rock mass and reduce the energy consumption of the process.

Methodology. The main basis for developing a geometric model of the section was the geometric analysis of the equations of motion of the cutter taking into account the kinematic features of the PTEU. To verify the calculations, computer modeling and visualization of the section formation process in the SolidWorks system were carried out. Numerical analysis of the shapes of sections and the influence of the kinematic parameters of the PTEU on the section parameters were performed using the MATLAB system.

Results. A geometric model of the formation of sections was developed. The dependences of the section thickness on the angle of rotation of the carrier and the gear ratio were obtained, and computer modeling of the section formation process was performed. The influence of the main parameters of the cutting tool on the uniformity of the cut was determined, and a method for optimizing the cutter motion parameters was proposed to reduce the fluctuations in the cut thickness and increase the efficiency of the destruction process.

Scientific novelty. New scientific results were obtained that expand the understanding of the process of forming cuts by cutting tools of the cutting tool. The main novelty of the study is the development of a geometric and computer model of the formation of cuts, obtaining the dependences of the cut thickness on the main parameters of the cutting tool, performing a comprehensive modeling of the cut formation process, and developing recommendations for reducing the unevenness of the cut thickness.

Practical significance. The results of the study can be used in the design and improvement of the cutting tool to increase the efficiency of the cutting process. The obtained analytical dependencies and computer models allow optimizing the kinematic parameters of the cutter motion, which contributes to reducing the unevenness of the cut thickness, reducing energy consumption and increasing the wear resistance of the tool.

Keywords: *rock-breaking machines, planetary-toroidal executive unit, geometric modeling, computer modeling, kinematics of cutter motion, epicycloidal trajectory, slice thickness, gear ratio, optimization of cutting parameters.*