

Герук С.М.

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» Національної академії аграрних наук України, смт.Глеваха Васильківського району Київської обл., Україна
E-mail: sgerukzt@mail.ru

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФРЕЗЕРНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ

УДК 631.31.22

На основі загальної теорії гвинтових поверхонь отримані математичні залежності енергетичних параметрів фрезерного робочого органу в залежності від кутів входу ножів у ґрунт та нахилу еліпса; товщини ножів та діаметра барабана за умов максимального кришення при мінімальній енергоємності процесу

Ключові слова: ґрунт , ніж, силовий аналіз, момент, кут, еліпс.

Актуальність проблеми

Найважливішою умовою реалізації продовольчої програми є прискорення науково-технічного прогресу, що дозволяє підвищити врожайність сільськогосподарських культур. Одним з найважливіших умов її підвищення є обробіток ґрунту. За своїм впливом на врожайність , а також з енергетичних і трудовим затратам вона займає провідне місце в землеробстві. Від усього обсягу польових робіт з вирощування та збирання сільськогосподарських культур на обробіток ґрунту припадає 40 % енергетичних і 25% трудових затрат.

Разом з тим , зростання енергоозброєності сільського господарства зумовило можливість інтенсифікації обробітку ґрунту . У результаті збільшилася кількість проходів агрегатів по полю , що призвело до руйнування ґрунтової структури , зниження родючості ґрунту і зростанню енергозатрат.

В даний час здійснюється перехід на ресурсозберігаючі технології обробітку ґрунту. Агрономічна наука розробляє наукові основи ресурсозберігаючої технології , відомої під назвою « мінімальний обробіток ґрунту».

Такий обробіток виконується за допомогою комбінованих ґрунтообробних машин і агрегатів, які доцільно створювати їх таким чином , щоб окремі їх складові могли використовуватися самостійно , як одно операційні, в тому числі ротаційні з активним приводом робочих органів від гідросистеми відбору потужності трактора.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми

Великий внесок у розробку питань вдосконалення робочих органів , процесів активного обробітку ґрунту з використанням фрезерних машин їх взаємодії з ґрунтом , кінематики руху та визначення енергетичних витрат внесли вчені В. П. Горячкін , В. А. Желіговський , П. М. Василенко , А. Д. Далін , А. І. Тимофєєв , В. І. Медведєв , І. М. Панов , Н. Б. Бок, Ю. Ф. Новіков , А. Н. Гудков , В. В. Кацігін , Г. Н. Синьооков , В. І. Виноградов , А. С. Кушнарєв , П. В. Павлов , М. Д. Подскребко , Ф. М. Канарєв , Л. С. Зенін , О. С. Марченко , В. Зоні , Г. Бернацький , Є. П. Яцук , І. М. Гринчук, Ю. І. Ма-

тяшин , А. І. Лещанкін , А.В.Клочков , Ю.А.Кузнецов , Г.Ф.Попов , Я.С.Гуков, В.І.Ветохін , З.В.Ловкіс та ін.

Перевагою фрезерних машин і агрегатів є якісне розпушування ґрунту , повне знищення і заробка рослинних рештків , а також рівномірне перемішування з ґрунтом мінеральних і органічних добрив по всій глибині обробітку . У той же час вони відрізняються значною енерго-і металоємністю , застосовуваний на них механічний привід барабанів має складну конструкцію , що стримує створення широкозахватних агрегатів і обмежує діапазон регулювання частоти обертання барабанів , який значною мірою залежить від фізико -механічних властивостей ґрунту (типу, вологості, твердості , задержанніям і т.п.).

Мета досліджень

Отримання залежностей для виконання силового аналізу та побудови механіко-математичної моделі руху частинки ґрунту по ротаційній шорсткій площині, що обертається навколо горизонтальної осі і нахилена до неї під довільним кутом.

Результати досліджень

Для визначення енергетичних затрат при поверхневому обробітку ґрунту необхідно задатися наступними фізико-механічними величинами:

- ✓ питоме зусилля різання ґрунту $q, H/m^2$;
- ✓ геометричні параметри ножа, m ;
- ✓ вид тертя (сухе та мокре) та відповідні коефіцієнти k та b (у припущенні, що мокре тертя пропорційне швидкості).

Розглянемо типовий випадок, що найбільше зустрічається на практиці, коли $z_0 = r$ (рис.1). У цьому випадку припускаємо, що кочення барабана відбувається по гладкій поверхні, так тому що нерівності деформуються при дії на них барабана. Приймаємо, що перпендикулярним перерізом ножа є прямокутник cod і в процесі взаємодії ножа з ґрунтом деформація ґрунту незначна і при визначенні тиску ґрунту на бокову поверхню виконується закон Гука:

$$F = c \frac{d}{2}, \quad (1)$$

де c - пружність ґрунту, яка залежить від її фізико-механічних властивостей.

Розглянемо процес входження в ґрунт одного з ножів. Без втрати узагальнення вибираємо ніж, який закріплений на великій півосі еліпса. За початок відрахунку часу $t_0 = 0$ вибираємо той момент, коли велика піввісь еліпса проектується на площину $y = 0$ у вертикальну пряму і точка кріплення ножа знаходиться у верхньому положенні.

Для визначення зусиль взаємодії ножа з ґрунтом спроектуємо еліптично розміщені ножі довжиною l_i на площину $y = 0$. Проекція довжини ножа

$$l_{r\delta} = l_i \sin \alpha \quad (2)$$

Визначимо кут φ_{ex} , при якому починається входження ножа в ґрунт:

$$\varphi = \omega t \quad (3)$$

На рис.1 зображена розрахункова схема для визначення кута φ_{ex} входу ножа в ґрунт. З $\triangle OCD$ знаходимо:

$$\tilde{N}\ddot{A} = rtg(\pi - \varphi) = rtg\varphi \quad (4)$$

З $\triangle AD_1B$:

$$A\ddot{A}_1 = l_{r\delta}(\pi - \varphi + \beta) = -l_{r\delta} \cos(\varphi - \beta) \quad (5)$$

$$\tilde{N}\ddot{A}_1 = r \sin(\pi - \varphi) = r \sin \varphi \quad (6)$$

$$\ddot{A}_1 B = l_{i\delta} \sin(\pi - \varphi + \beta) = l_{i\delta} \sin(\varphi - \beta) \quad (7)$$

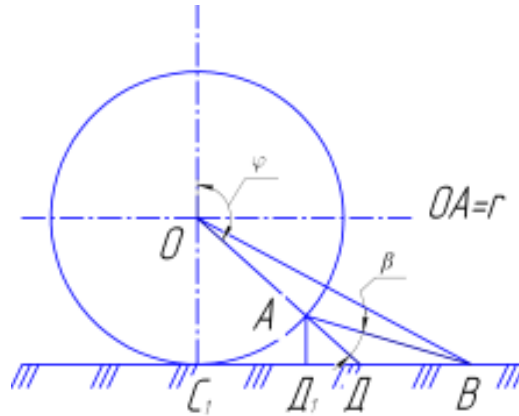


Рис.1. Розрахункова схема для визначення кута $\varphi_{вх}$ входу ножа в ґрунт

Тоді:

$$\tilde{N}\hat{A} = \tilde{N}\ddot{A}_1 + \ddot{A}_1\hat{A} = r \sin \varphi + l_{i\delta} \sin(\varphi - \beta) \quad (8)$$

$$\ddot{A}\ddot{A}_1 = \tilde{N}\ddot{A} - \tilde{N}\ddot{A}_1 = r \operatorname{tg} \varphi - r \sin \varphi \quad (9)$$

$$A\ddot{A}_1 = -l_{i\delta} \cos(\varphi - \beta) \quad (10)$$

$$\ddot{A}\hat{A} = \tilde{N}\hat{A} - \tilde{N}\ddot{A} = r \sin \varphi + l_{i\delta} \sin(\varphi - \beta) - r \operatorname{tg} \varphi \quad (11)$$

За теоремою Піфагора:

$$l_{i\delta}^2 = l_{i\delta}^2 \cos^2(\varphi - \beta) + r^2 (\operatorname{tg} \varphi - \sin \varphi)^2 \quad (12)$$

Звідси визначаємо $\varphi_{вх}$:

$$l_{i\delta}^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \beta + l_{i\delta}^2 \cos \varphi \sin \varphi \cos \beta \sin \beta + l_{i\delta}^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \beta + r^2 \sin^2 \varphi \frac{1 - 2 \cos \varphi + \cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi} \quad (13)$$

Прийнявши позначення $\cos \varphi = x$ та провівши спрощення, одержимо:

$$1 = x^2 \cos^2 \beta + x \sqrt{1 - x^2} \cos^2 \beta \sin \beta + (1 + x^2) \sin^2 \alpha + \lambda (1 - x^2) \frac{1 - 2x + x^2}{x^2} \quad (14)$$

де $\lambda = \frac{r^2}{l_{i\delta}^2}$.

Рівняння (14) досить складне і допускає лише числові вирішення (тому що може бути зведеним до алгебраїчного досить високого порядку).

$$x^2 = x^4 \cos^2 \beta + \frac{x^3}{4} \sqrt{1 - x^2} \sin^2 2\beta + x^2 (1 - x^2) \sin^2 \beta + \lambda (1 - x^2) (1 - 2x + x^2) \quad (15)$$

$$\cos^2 \beta = x^4 \cos 2\beta + \frac{x^3}{4} \sqrt{1 - x^2} \sin^2 2\beta + \lambda^2 - 2\lambda x + 2\lambda x^3 - \lambda x^4 \quad (16)$$

$$x^4 (\cos 2\beta - 1) + \frac{x^3}{4} \sqrt{1 - x^2} \sin^2 2\beta + 2\lambda x^3 - 2\lambda x + \lambda - x^2 \cos^2 \beta = 0 \quad (17)$$

Розглянемо окремі випадки вирішення рівняння (17):

1. Тонкий барабан, що перетворений у вал ($\lambda \gg 1$).

В цьому випадку одержимо:

$$x^4 \cos 2\beta + \frac{x^3}{4} \sqrt{1-x^2} \sin^2 2\beta - x^2 \cos^2 \beta \approx 0 \quad (18)$$

Перший розв'язок рівняння (18) очевидний:

$$x_1 = 0, (\varphi_{ex} = \pi/2) \quad (19)$$

У цьому випадку кут β втрачає зміст.

Рівняння, що залишилось, має вигляд:

$$x^2 \cos 2\beta + \frac{x}{4} \sqrt{1-x^2} \sin^2 2\beta - \cos^2 \beta = 0 \quad (20)$$

$$x^2 (1-x^2) \sin^4 2\beta = 16 \cos^4 \beta - 32x^2 \cos 2\beta \cos^2 \beta + 16x^4 \cos^2 2\beta \quad (21)$$

$$(16 \cos^2 2\beta + \sin^4 2\beta) x^4 - (32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta) x^2 + 16 \cos^4 \beta = 0 \quad (22)$$

Умовою існування рішення рівняння є:

$$(32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta) - 64 \cos^4 \beta (16 \cos^2 2\beta + \sin^4 2\beta) \geq 0 \quad (23)$$

Нерівність (23) можна записати у наступному перетвореному вигляді:

$$72 \sin^6 \beta \cos^2 \beta \geq 0 \quad (24)$$

Отже розв'язок буде при всіх значеннях β .

Запишемо розв'язок:

$$x = \sqrt{\frac{32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta \pm \sin^3 \beta \cos \beta \sqrt{72}}{2(32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta)}} \quad (25)$$

Для забезпечення позитивного значення підкореневого виразу приймаємо перший корінь (25). Враховуючи рівняння (21) визначимо час входу ножа в ґрунт $t_{вх}$:

$$t_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}} = \frac{1}{\omega} \arccos \sqrt{\frac{32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta \pm \sin^3 \beta \cos \beta \sqrt{72}}{2(32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta)}} \quad (26)$$

Визначимо кут і час виходу ножа з ґрунту:

$$\varphi_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}} = 2\pi - \varphi_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}} \quad (27)$$

$$t_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}} = \frac{2}{\omega} \left(\pi - \frac{\varphi_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}}}{2} \right) \quad (28)$$

Знаючи час входу і виходу ножа з ґрунту, можна визначити час взаємодії ножа з ґрунтом Δt :

$$\square t = t_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}} - t_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}} \quad (29)$$

$$\square t = \frac{2}{\omega} \left(\pi - \frac{\varphi_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}}}{2} \right) - \frac{\varphi_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}}}{\omega} = \frac{2(\pi - \varphi_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}})}{\omega} \quad (30)$$

Притягом цього інтервалу часу на ніж діє момент сил різання M_{pi3} , момент сил сухого та мокрого тертя M_{mp1} та M_{mp2} . Виразуємо ці моменти.

Для визначення моменту сил різання M_{pi3} виділимо на відстані l від точки кріплення ділянку довжиною dl . На нього діє сила $dF_{pi3} = qdl$. Момент цієї сили дорівнює:

$$dM_{\delta\zeta} = (r+l) qdl \quad (31)$$

Інтегруючи по всій довжині ножа, одержимо:

$$M_{\delta\zeta} = \int_0^{l_{i\delta}} dM_{\delta\zeta} = q \int_0^{l_{i\delta}} (r+l) dl = ql_{i\delta} \left(r + \frac{l_{i\delta}}{2} \right) \quad (32)$$

Враховуючи вираз (20), одержимо:

$$M_{\partial \dot{\varphi}} = ql \sin \beta \left(r + \frac{l}{2} \sin \beta \right) \quad (33)$$

Визначимо моменти сил сухого та мокрого тертя M_{mp1} та M_{mp2} . Нехай коефіцієнт тертя об ґрунт у випадку кулонівського тертя дорівнює k та мокрого b . Приймаємо, що боковий тиск на ніж визначається рівнянням (1).

$$P = \frac{F}{S} = \frac{cd}{2l_{i\delta}c_0} \quad (34)$$

Тоді на ділянку $ds=c_0dl$ діє сила:

$$dF_{\partial \dot{\delta}_1} = pds = \frac{cd}{2l_{i\delta}} dl \quad (35)$$

Її момент:

$$dM_{\partial \dot{\delta}_1} = (r+l)dF_{\partial \dot{\delta}_1} \quad (36)$$

Інтегруючи по всій довжині ножа, одержимо:

$$M_{\partial \dot{\delta}_1} = \frac{cd}{2l_{i\delta}} l_{i\delta} \left(r + \frac{l_{i\delta}}{2} \right) = \frac{cd}{2} \left(r + \frac{l \sin \alpha}{2} \right) \quad (37)$$

Для мокрого тертя:

$$dF_{\partial \dot{\delta}_2} = bvd s = bvc_0 dl, \quad (38)$$

$$\text{де } v = (r+l)\omega \quad (39)$$

$$\text{Тоді: } dM_{\partial \dot{\delta}_2} = b\omega(r+l)^2 c_0 dl \quad (40)$$

Інтегруючи по всій довжині ножа, одержимо:

$$M_{\partial \dot{\delta}_2} = bc_0\omega \int_0^{l_{i\delta}} (r+l)^2 dl = bc_0\omega \left(r^2 l_{i\delta} + r l_{i\delta}^2 + \frac{l_{i\delta}^3}{3} \right) = bc_0\omega l \sin \alpha \left(r^2 + r l \sin \alpha + \frac{l^2 \sin^2 \alpha}{3} \right) \quad (41)$$

Усереднюючи ці моменти сил за часом їх дії:

$$\tilde{M} = \frac{\square t}{T} (\dot{I}_{\partial \dot{\varphi}} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_1} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_2}), \quad (42)$$

$$\text{де } \dot{\Theta} = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\tilde{M} = \frac{\square t\omega}{2\pi} (\dot{I}_{\partial \dot{\varphi}} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_1} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_2}) \quad (43)$$

Підставляючи вираз (30) у (43), одержимо:

$$\tilde{M} = \left(1 - \frac{\varphi_{\dot{\omega}}}{\pi} \right) (\dot{I}_{\partial \dot{\varphi}} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_1} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_2}) \quad (44)$$

Визначимо момент сил за числом ножів z , пам'ятаючи, що вони зсунуті один відносно одного на фазу:

$$\square \Theta = \frac{2\pi}{z} \quad (45)$$

В цьому випадку взаємодія ножів з ґрунтом Δt_i перекривається. На рис.2 зображений графік взаємодії ножів з ґрунтом ($z=4$).

З певною точністю можна прийняти:

$$\tilde{I} = z\tilde{M} = z \left(1 - \frac{\varphi_{\dot{\omega}}}{\pi} \right) (\dot{I}_{\partial \dot{\varphi}} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_1} + \dot{I}_{\partial \dot{\delta}_2}) \quad (46)$$

Якщо на барабані розміщено m еліпсів, то результуючий момент на барабані буде рівним:

$$M_0 = m\tilde{l} = mz\tilde{M} \quad (47)$$

або:

$$M_0 = mz \left(1 - \frac{1}{\pi} ar \cos \sqrt{\frac{32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta + \sin^3 \beta \cos \beta \sqrt{72}}{2(32 \cos 2\beta \cos^2 \beta - \sin^4 2\beta)}} \right) \times \left[ql \sin \alpha \left(r + \frac{l \sin \alpha}{2} \right) + \frac{cd}{2} \left(r + \frac{l \sin \alpha}{2} \right) + bc_0 \omega l \sin \alpha \left(r^2 + lr \sin \alpha + \frac{l^2 \sin^2 \alpha}{3} \right) \right] \quad (48)$$

Потужність на валу визначиться за формулою:

$$N = M_0 \omega \quad (49)$$

При мокрому терті потужність $N=f(t)$ має квадратичну залежність.

На рис.2 зображені усереднені за часом взаємодії моменти. Насправді залежність $M=f(t)$ не є прямокутною, а має передній і задній фронти певної довжини, яка визначається часом повного входження ножа в ґрунт та часом від початку до кінця його виходу. При $z_0=r$ ця залежність перетворюється в трикутну, так як

$$\square t_{\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} = \square t_{\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} = \frac{\square t}{2} \quad (50)$$

Це співвідношення не залежить від кута входження ножа в ґрунт. На рис.3 зображені реальні залежності $M=f(t)$, а пунктирною лінією позначений усереднений момент $M_{Iсер}$. Без втрати спільності рис.3 виконаний для одного ножа. Навантаження для решти ножів відрізняються від зображеного на рис.3 зсувом за фазою згідно формули (42).

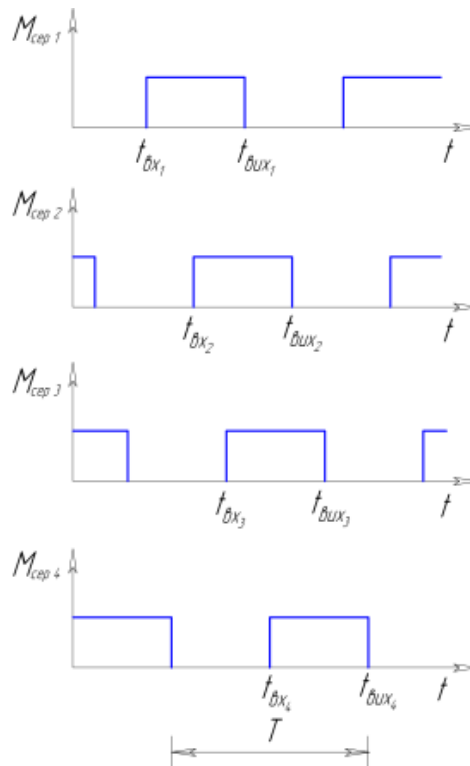


Рис.2. Періодичність взаємодії ножів з ґрунтом при $z=4$

Максимальне значення моменту приймається до уваги при розрахунку жорсткого кріплення ножа на валу. Варто відзначити, що виникаючі при взаємодії ножа і ґрунту вібрації призводять до зменшення коефіцієнта сухого тертя, питомої сили різання та до збільшення сухого тертя. Тому залежність, зображена на рис.3, справедлива лише для жорстких ножів, зроблених з великим запасом міцності, у яких власні коливання незначні.

Для тонких ножів, з урахуванням викладеного, залежність $M=f(t)$ приймає вигляд, зображений на рис.4.

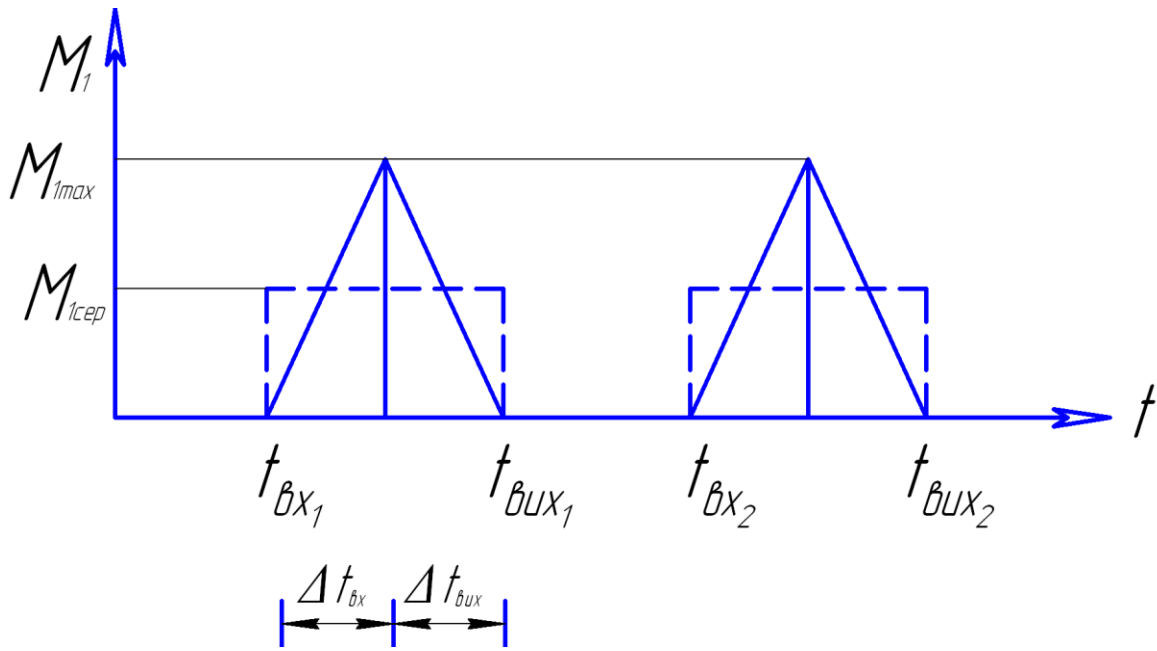


Рис.3. Реальний та усереднений сумарний момент окремого робочого органу

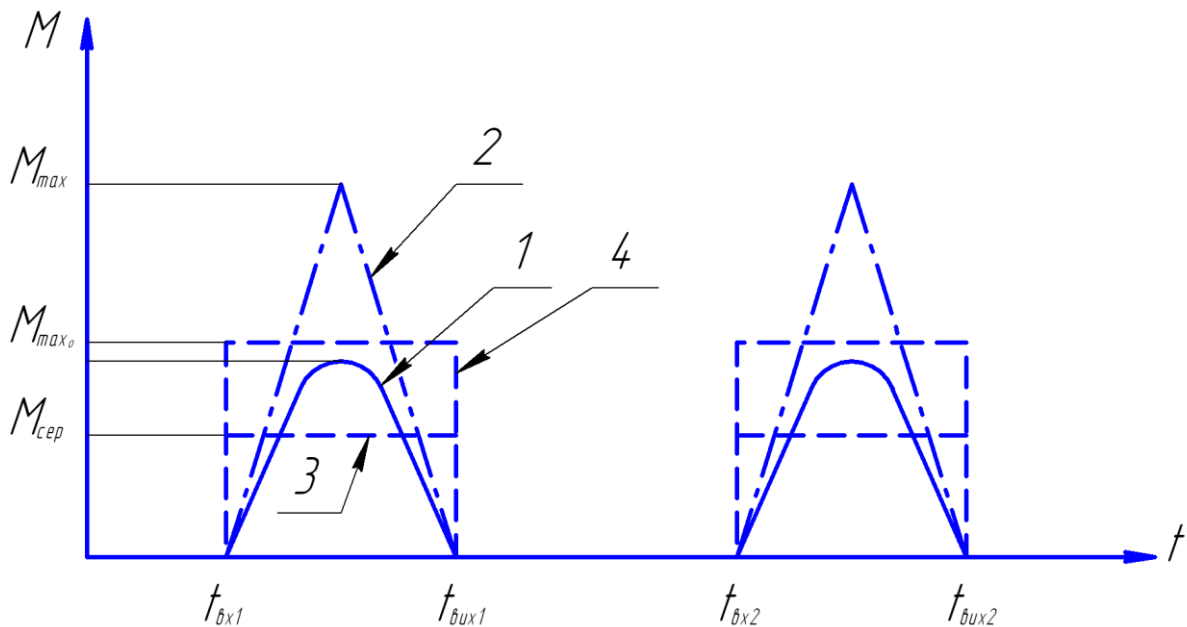


Рис.4. Реальний та усереднений сумарний момент для товстого і тонкого ножів: 1- реальний момент для тонкого ножа; 2- реальний момент для товстого ножа; 3-усереднений момент для тонкого ножа; 4 - усереднений момент для товстого ножа

Розглянемо рівняння (17) для випадку, коли $\lambda=1$. Це трансцендентне рівняння. Його розв'язок проведемо методом половинного ділення.

Корені рівняння для визначення кута входження ножа в ґрунт

$\beta, \text{град}$	X_1	X_2
0	0,5	$\pm 1,0$
15	0,51025	-0,98730
30	0,53857	-0,95850
45	0,52080	-0,92920

На рис.5 представлена графічна інтерпретація розв'язку рівняння (17).

Виконавши розрахунки, аналогічні першому випадку, одержимо:

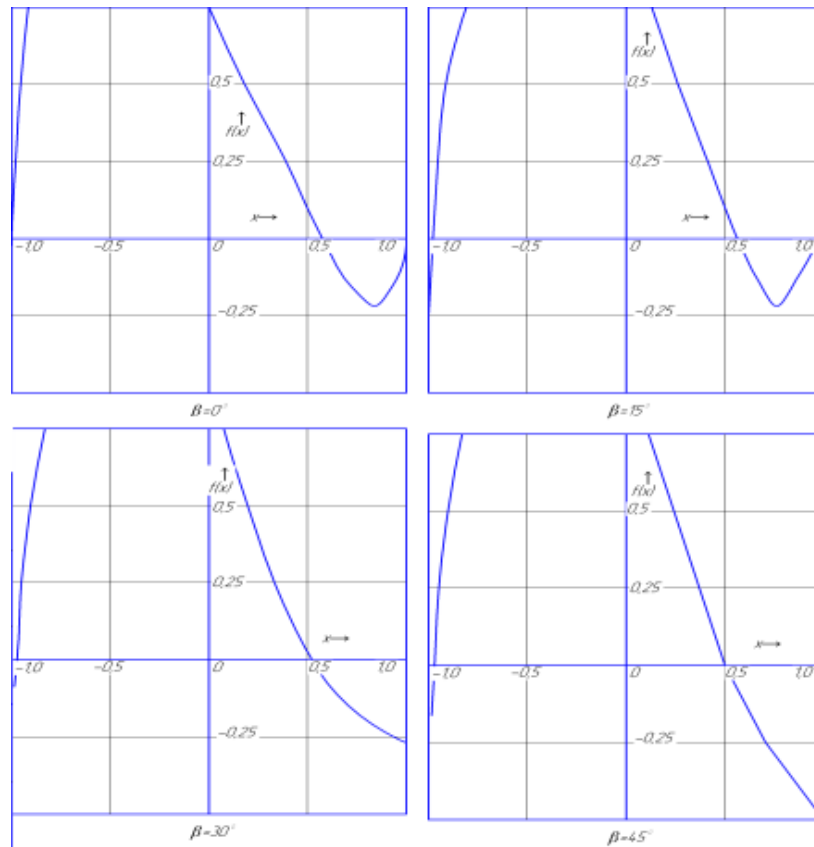


Рис.5. Графічний розв'язок рівняння (17) по визначенню кута входу ножа в ґрунт.

$$M_0 = mz \left(1 - \frac{1}{\pi} \arccos \alpha \right) \left[\begin{aligned} & ql \sin \alpha \left(r + \frac{l \sin \alpha}{2} \right) + \frac{cd}{2} \left(r + \frac{l \sin \alpha}{2} \right) + \\ & + bc_0 \omega l \sin \alpha \left(r^2 + lr \sin \alpha + \frac{l^2 \sin^2 \alpha}{3} \right) \end{aligned} \right] \quad (51)$$

де l – корінь рівняння (35).

Висновок

Розв'язуючи рівняння (51) за умов максимального кришення при мінімальній енергоємності, визначимо кут нахилу еліпса, що має значення $\alpha=28,6^{\circ}$, а нахил різальних елементів у площині еліпса $\beta=31,2^{\circ}$ проти напрямку обертання ротора.

Література

1. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин.-К.: Изд. УАСХН, 1060.- 283 с.
2. Герук С.М. Механічна модель рихлення ґрунту/ С.М.Герук// Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.- Вип. 43. Ч. I. – Кіровоград: КНТУ- 2013.- С.276-284.
3. Герук С.М. Обоснование параметров почвообрабатывающего орудия для поверхностной обработки почвы / С.М.Герук// Механізація та електрифікація сільськогосподарства. Випуск 98.Т.1.-Глеваха, 2013.- С.467-474.
4. Бондаренко А.А., Дубінін О.О., Переяславцев О.М. Теоретична механіка: Підручник у 2 ч.-Ч.1: Статика. Кінематика.- К.: Знання, 2004.- 599 с.
5. Павловський М.А. Теоретична механіка.- К.: Техніка, 2004.- 510 с.
6. Марченко О.С. Обоснование параметров рабочего органа фрезы для обработки переувлажненных почв/Марченко О.С., Воробьев В.И.// Научно-технический бюллетень./ВИМ, 1982, вып.51, с.12-15.
7. Ротационные почвообрабатывающие машины. Конструкция, расчет и проектирование/Яцук Е.П., Панов И.М., Ефимов Д.Н., Марченко О.С., Черненков А.Д./ М., Машиностроение, 1971, 256 с.
8. Чаткин М.Н.Повышение эффективности функционирования комбинированных почвообрабатывающих машин с ротационными активными рабочими органами: дис.доктор.тех.наук 05.20.01/Чаткин Михаил Николаевич.-Саранск,2008.-385с.

Geruk S. Theoretical basis of energy parameters tenon body work

The purpose of research. Getting dependencies for performing power analysis and construction of mechanical-mathematical model of soil particles by rotating rough plane rotates around a horizontal axis and is inclined to it at an arbitrary angle.

Based on the general theory of helical surfaces obtained mathematical dependence of energy parameters milling working body, depending on the entry angles of the blades into the ground and tilt the ellipse, the thickness of the blade and the diameter of the drum in terms of maximum kroshehnyya at minimum power consumption of the process.

Conclusion: Solving equation (69) in terms of maximum kroshehnyya at the lowest energy intensity will determine the angle of the ellipse that has the values $\alpha = 28,60$, and the slope of the cutting elements in the plane of the ellipse $\beta = 31,20$ against the direction of rotation of the rotor.

Key words: soil than power analysis, time, angle, ellipse.

References

1. Vasilenko P.M. Teoriya dvizhenija chasticy po sherohovatym poverhnostjam sel'skohozejstvennyh mashin.-K.: Izd. UASHN, 1060.- 283 s.
2. Geruk S.M. Mehanichna model' rihlennja gruntu/ S.M.Geruk// Zagal'noderzhavnij mizhvidomchij naukovo-tehnichnij zbirnik. Konstrujuvannja, virobniectvo ta ekspluatacija sil'skogospodars'kih mashin, vip. 43, ch. I. – Kirovograd: KNTU, 2013.- S.276-284.
3. Geruk S.M. Obosnovanie parametrov pochvoobrabatyvajuwegu orudija dlja poverhnostnoj obrabotki pochvy / S.M.Geruk// Mehanizacija ta elektrifikacija sil'skogo gospodarstva. Vipusk 98.T.1.-Glevaha,2013.- S.467-474.
4. Bondarenko A.A., Dubinin O.O., Perejaslavcev O.M. Teoretichna mehanika: Pidručnik u 2 ch.-Ch.1: Statika. Kinematika.- K.: Znannja, 2004.- 599 s.
5. Pavlovs'kij M.A. Teoretichna mehanika.- K.: Tehnika, 2004.- 510 s.
6. Marchenko O.S. Obosnovanie parametrov rabocheho organa frezy dlja obrabotki pereuvlazhnennyh pochv/Marchenko O.S., Vorob'ev V.I.// Nauchno-tehnicheskij bjulleten'./VIM, 1982, vyp.51, s.12-15.
7. Rotacionnye pochvoobrabatyvajuwie mashiny. Konstrukcija, raschet i proektirovanie/Jacuk E.P., Panov I.M., Efimov D.N., Marchenko O.S., Chernenkov A.D./ M., Mashinostroenie, 1971, 256 s.
8. Chatkin M.N.Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija kombinirovannyh pochvoobrabatyvajuwih mashin s rotacionnymi aktivnymi rabochimi organami: dis.doktor.teh.nauk 05.20.01/Chatkin Mihail Nikolaevich.-Saransk,2008.-385s.