

УДК 625.768.5

Голотюк М.В., асистент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ПРУТКІВ ДРОТУ ДОРОЖНЬОЇ ШІТКИ ПРИ ВИДАЛЕННІ ШАРУ ЛЬДОВИХ УТВОРЕНЬ

Викладено теоретичні дослідження траєкторії руху прутків дроту дорожньої щітки при видаленні шару льодових утворень та обґрунтовано оптимальні параметри щітки.

Изложены теоретические исследования траектории движения прутков проволоки дорожной щетки при удалении слоя ледовых образований и обоснованы оптимальные параметры щетки.

Theoretical researches of trajectory of motion of small twigs of wire of road brush are expounded at the delete of layer of ice formations and grounded optimal parameters of brush.

Ключові слова: льодові утворення, прутки дроту, видалення, траєкторія руху, щітка, прогин прутка, рівняння руху прутка.

Існуючі технології видалення сніжно-льодових утворень, які утворилися на поверхні дорожнього покриття, зокрема застосування солей, на території міст є недостатньо ефективними, оскільки викликають корозію металічних поверхонь, негативно впливають на дорожнє покриття, шини автомобілів, потрапляючи в лід, на придорожню рослинність, забруднюють стічні води, а також практично не застосовуються при температурі нижче -10°C .

Мега досліджень полягала у визначенні залежності між конструктивними (радіус щітки, довжина прутків дроту, їх кількість) і кінематичними (швидкість руху, швидкість обертання щітки) параметрами циліндричної щітки з горизонтальною віссю обертання [1] та умовами її роботи, для встановлення оптимальних робочих параметрів.

Матеріали і методика досліджень. В основу досліджень покладено теорію згину довгих тонких стержнів при великих деформаціях [2] з використанням методу еліптичних параметрів.

Визначення рівняння руху прутка дроту циліндричної щітки по поверхні льоду з урахуванням деформації прутка дасть змогу знайти залежність між робочими параметрами щітки та умовами її роботи, а також визначити вплив цих параметрів на виконання технологічного процесу.

Спочатку запишемо рівняння довжини прутка дроту, використовуючи по-

передні дослідження:

$$\ell_{\varepsilon} = \int_{\psi_0}^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \psi}} \cdot \sqrt{\frac{H}{F}}, \quad (1)$$

де ℓ_{ε} – довжина прутка дроту, мм; H – жорсткість прутка дроту, Н-мм²; F – сила, що діє на пруток дроту, Н; k – модуль еліптичного інтеграла; ψ – амплітуда еліптичного інтеграла.

Далі визначимо проекцію прутка дроту на вісь y . При великих переміщеннях принципи незалежності дії сил є неприйнятними, оскільки їх напрям та її величина змінюються у процесі згину. На рис. 1 зобразимо ще одну систему координат $x'0y'$ так, щоб вісь y' була паралельною напрямку дії сили F . Згідно з [3] маємо:

$$\frac{y' - y_0'}{\ell_{\varepsilon}} = \frac{2}{\varepsilon} (E(\xi) - E(\xi_0)) - \frac{h}{\ell_{\varepsilon}}, \quad (2)$$

$$\frac{x' - x_0'}{\ell_{\varepsilon}} = \frac{2}{\varepsilon} k (\cos \xi_0 - \cos \xi)$$

де ε – силовий коефіцієнт подібності; y' та x' – координати кінця прутка дроту за осями, що відцентровані в напрямку дії сили F , м; y_0' та x_0' – координати початку прутка дроту за осями, що відцентровані в напрямку дії сили F , м; $E(\xi)$ та $E(\xi_0)$ – еліптичний інтеграл Лежандра другого роду.

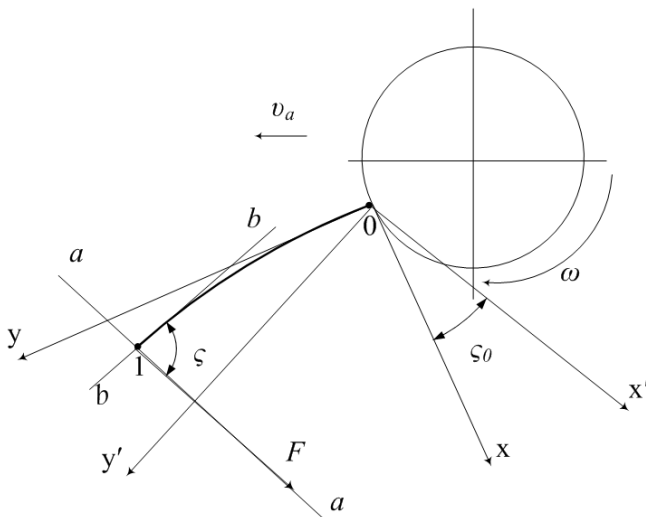


Рис. 1. Розрахункова схема прогину прутка

У нашому випадку координати y'_0 та x'_0 дорівнюють нулю, а $h = \ell_\epsilon$. Звідси матимемо:

$$\frac{y'}{\ell_\epsilon} = \frac{2}{\epsilon} \left(\int_{\xi_0}^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} \cdot d\xi \right) - 1 \quad (3)$$

$$\frac{x'}{\ell_\epsilon} = \frac{2}{\epsilon} k (\cos \xi_0 - \cos \xi)$$

Далі знайдемо координати точки 1 кінця прутка дроту з рівняння (3) пружної лінії. Враховуючи, що координата y_1 кінця прутка дроту дорівнює

$$y_1 = y' \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) + x' \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \quad (4)$$

матимемо таку формулу для її визначення:

$$y_1 = \left(\left(\frac{2}{\epsilon} \int_{\xi_0}^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \xi} \cdot d\xi - 1 \right) \cdot \cos \zeta_0 + \frac{2}{\epsilon} k \cos \xi_0 \cdot \sin \zeta_0 \right) \cdot \ell_\epsilon \quad (5)$$

Визначимо величину прогину прутка дроту $\Delta \ell_\epsilon$

$$\Delta \ell_\epsilon = \ell_\epsilon - y_1 \quad (6)$$

Якщо винести ℓ_ϵ за дужки отримаємо:

$$\Delta \ell_\epsilon = \ell_\epsilon \cdot \left(1 - \left(\left(\frac{2}{\epsilon} \int_{\xi_0}^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \xi} \cdot d\xi - 1 \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos \zeta_0 + \frac{2}{\epsilon} k \cos \xi_0 \cdot \sin \zeta_0 \right) \right) \quad (7)$$

Підставивши в рівняння (7) рівняння (1), довжини прутка дроту матимемо:

$$\Delta \ell_\epsilon = \int_{\xi_0}^{\pi/2} \frac{d\xi}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \xi}} \cdot \sqrt{\frac{H}{F}} \cdot \left(1 - \left(\left(\frac{2}{\epsilon} \int_{\xi_0}^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \xi} \cdot d\xi - 1 \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) + \frac{2}{\epsilon} k \cdot \cos \xi_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \right) \right) \quad (8)$$

Координата x_1 кінця прутка дроту дорівнює:

$$x_1 = x' \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) - y' \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \quad (9)$$

Підставивши значення y' та x' , отримаємо:

$$x_1 = \left(\left(\frac{2}{\varepsilon} \int_{\xi_0}^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \xi} \cdot d\xi - 1 \right) \cdot \cos \zeta_0 - \frac{2}{\varepsilon} k \cdot \cos \xi_0 \cdot \sin \zeta_0 \right) \cdot \ell_6. \quad (10)$$

Розглянемо роботу щітки (рис. 2). Пруток дроту 1 під час руху по льоду описує траєкторію ОА. Після контакту з його поверхнею в точці О сила F опору переміщенню прутка зростає і досягає максимального значення в точці А. Відповідно до зростання сили опору переміщення збільшується і прогин прутка дроту. При досягненні прутком точки А сила F різко зменшується і пруток різким рухом випрямляється. Траєкторія ОА, яку описує пруток у своєму абсолютному русі, буде залежати від поступальної швидкості v_a руху машини та від швидкості обертання ω щітки.

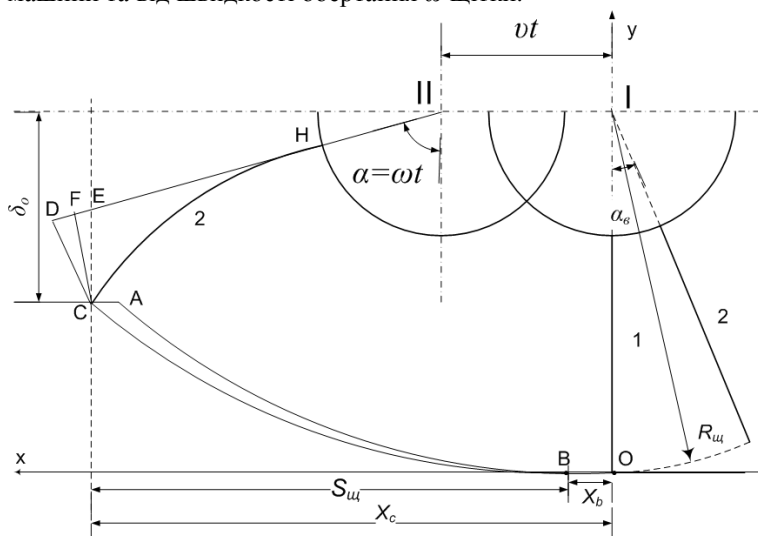


Рис. 2. Схема роботи щітки

Рівняння руху прутка 1 по цій траєкторії можна записати так:

$$x_{K1} = v_a \cdot t + R_{щ} \cdot \sin \omega t - x^*; \quad y_{K1} = R_{щ} \cdot (1 - \cos \omega t) - y^*, \quad (11)$$

де v_a – поступальна швидкість машини, м/с; t – час, у який визначаються координати кінця прутка, с; $R_{щ}$ – радіус щітки, м; ω – кутова швидкість щітки, с⁻¹; x_1^* – проекція величини відхилення прутка дроту внаслідок прогину на вісь x , м; y_1^* – проекція величини відхилення прутка дроту внаслідок прогину на вісь y , м.

Кінець прутка дроту 2 викреслює таку ж саму траєкторію [5] тільки зміщену в напрямку руху машини на величину:

$$x_b = v_a \frac{\alpha}{\omega}, \quad (12)$$

де α – кут між двома сусідніми дротинами, які рухаються по одному і тому ж сліду.

Тоді рівняння руху кінця прутка дроту 2, що описує траєкторію ВС, набуде вигляду:

$$\begin{aligned} x_{K2} &= v_a \cdot t + R_{\omega} \cdot \sin(\omega t - \alpha_g) - x^* ; \\ y_{K2} &= R_{\omega} \cdot (1 - \cos(\omega t - \alpha_g)) - y^* . \end{aligned} \quad (13)$$

Запишемо зону роботи щітки в проекції на вісь x .

$$S = x_c - x_b . \quad (14)$$

При підході до точки С пруток дроту 2 випрямляється в пряму ДН. Це відбувається внаслідок перевищення значення напруження деформації згину, що залежить від жорсткості дроту, сили опору F переміщенню прутка дроту [4]. Зробимо припущення, що ордината кінця прутка дроту в точці С $y_c = \delta_0$, δ_0 – відстань від осі обертання щітки до поверхні льодового валка, запишемо:

$$\delta_0 \approx y_c = R_{\omega} \cdot (1 - \cos(\omega t_c - \alpha_g)) - y_c^* , \quad (15)$$

де t_c – час, в який кінець прутка дроту 2 буде знаходитись в точці С, y_c^* – проекція величини відхилення CD прутка дроту в наслідок прогину на вісь y , м.

З рівняння (15) одержимо:

$$t_c = \frac{1}{\omega} \left(\arccos \left(1 - \frac{\delta_0 + y_c^*}{R_{\omega}} \right) + \alpha_g \right) . \quad (16)$$

Тоді

$$x_c = v_a \cdot t + R_{\omega} \cdot \sin(\omega t_c - \alpha_g) - x_c^* , \quad (17)$$

де x_c^* – проекція величини відхилення CD прутка дроту внаслідок прогину на вісь x , м.

Використавши заміну [2]

$$\sin(\omega t_c - \alpha) = \frac{1}{R_{\omega}} \sqrt{R_{\omega}^2 - \delta_0^2} , \quad (18)$$

одержимо:

$$\begin{aligned} S_{\omega} &= \frac{v_a}{\omega} \left(\arccos \left(1 - \frac{\delta_0 + y_c^*}{R_{\omega}} \right) + \alpha_g \right) + \sqrt{R_{\omega}^2 - \delta_0^2} - x_c^* - \frac{v_a}{\omega} \alpha_g = \\ &= \frac{v_a}{\omega} \left(\arccos \left(1 - \frac{\delta_0 + y_c^*}{R_{\omega}} \right) \right) + \sqrt{R_{\omega}^2 - \delta_0^2} - x_c^* . \end{aligned} \quad (19)$$

Рівняння (19) дає можливість визначити зону роботи щітки з урахуванням прогину прутків дроту в процесі роботи.

Значення x_c^* та y_c^* можна знайти з трикутника CDE (рис. 2), де CF – проєкція прутка дроту x_1 , а FD – величина його прогину $\Delta\ell_\epsilon$.

З трикутника CDE маємо:

$$\begin{aligned} x_c^* &= CD \cdot \sin \alpha_k, \\ y_c^* &= CD \cdot \cos \alpha_k, \end{aligned} \quad (20)$$

де α_k – кут між сторонами CD та CE.

$$CD = \sqrt{CF^2 + FD^2} = \sqrt{x_1^2 + \Delta\ell_\epsilon^2}, \quad (21)$$

$$\alpha_k = 180 - \arctg \frac{x_1}{\Delta\ell_\epsilon} - \omega \cdot t_c. \quad (22)$$

Враховуючи рівняння (21) і (22) отримаємо:

$$x_c^* = \sqrt{x_1^2 + \Delta\ell_\epsilon^2} \sin \left(180 - \arctg \frac{x_1}{\Delta\ell_\epsilon} - \omega \cdot t_c \right), \quad (23)$$

$$y_c^* = \sqrt{x_1^2 + \Delta\ell_\epsilon^2} \cos \left(180 - \arctg \frac{x_1}{\Delta\ell_\epsilon} - \omega \cdot t_c \right). \quad (24)$$

Рівняння (19) з урахуванням формул (23) і (24) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} S_{щ} &= \frac{v_a}{\omega} \arccos \left(1 - \frac{\delta_0 + \sqrt{x_1^2 + \Delta\ell_\epsilon^2} \cdot \cos \left(180 - \arctg \frac{x_1}{\Delta\ell_\epsilon} - \alpha \right)}{R_{щ}} \right) + \\ &+ \sqrt{R_{щ}^2 - \delta_0^2} - \sqrt{x_1^2 + \Delta\ell_\epsilon^2} \cdot \sin \left(180 - \arctg \frac{x_1}{\Delta\ell_\epsilon} - \alpha \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Розглянемо роботу щітки від точки В до точки С (рис. 2). Цей проміжок є зоною роботи щітки $S_{щ}$, в якій вона має видалити шар льоду товщиною h .

$$h = R_{щ} - \delta_0, \quad (26)$$

де h – товщина шару льоду, що видаляється щіткою, м.

Визначимо кут φ , на який повернеться щітка, проходячи відстань ВС:

$$\varphi = S_{щ} \frac{\omega}{v_a}. \quad (27)$$

Робота щітки вважається ефективною тоді, якщо повністю видаляється шар льоду товщиною h . Оскільки кожен пруток дроту знімає шар льоду тов-

щиною b , визначимо необхідну кількість прутків дроту z_φ , що мають пройти на відріжку ВС, щоб забезпечити ефективну роботу щітки:

$$z_\varphi = \frac{S_{щ} \cdot h \cdot B \cdot \rho}{W_n}, \quad (28)$$

де W_n – продуктивність одного прутка дроту, кг.

Результати досліджень. Для забезпечення виконання технологічного процесу відкриття кореневої системи щіткою її дріт повинен ефективно видаляти лід за всією висотою валка, що вкриває рослини, в будь-який момент.

Якщо ширина прутка дроту a , висота льодового валка B , то можна записати формулу для визначення загальної кількості прутків дроту на щітці для її ефективної роботи:

$$z_\varphi = z_\varphi \frac{2\pi}{\varphi} = \frac{2\pi \cdot n_n \cdot h \cdot H \cdot v_a \cdot \rho}{K_\gamma \cdot \omega \cdot W_n}, \quad (29)$$

де n_n – коефіцієнт перекриття дротом поверхні валка, що обробляється; K_γ – коефіцієнт рівномірності розташування дроту на щітці.

Коефіцієнт перекриття n_n вводиться в зв'язку з тим, що в процесі експлуатації щітки кількість дроту зменшується (випадіння дроту внаслідок дефектів його виготовлення та монтажу), тому іноді потрібна повторна дія прутка дроту на поверхню.

Через неможливість розташування прутків дроту рівномірно на всій поверхні маточини та враховуючи те, що дріт закріплюється пучками, потрібно вводити коефіцієнт рівномірності K_p . Така нерівномірність призводить до утворення на поверхні щітки скупчень дроту і пустот, що значно зменшує ефективність роботи.

Отже, рівняння (25) та (29) дають змогу встановити залежності між конструктивними, кінематичними параметрами циліндричної щітки з горизонтальною віссю обертання та умовами її роботи, які дозволяють визначити оптимальні робочі параметри для забезпечення якісного виконання технологічного процесу видалення сніжно-льодових утворень, які утворилися на поверхні дорожнього покриття.

1. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких и упругих стержней. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
3. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие: в 4 т. / под общей редакцией Панасюка В.В. – Киев: Наук. думка, 1988 – 620 с.
4. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука. 1977. – 224 с.

Рецензент: к.т.н., професор Сухарев Е.О. (НУВГП)