

## АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.316.022

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.51-65>

Г.В. Теслюк, доц., канд. техн. наук, Е.Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, Ю.В. Теслюк, д-рка філософії

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна*  
e-mail: [aliev@meta.ua](mailto:aliev@meta.ua)

## Техніко-економічне обґрунтування геометричних параметрів біонічних культиваторних лап на основі морфології риб

Метою досліджень є проведення геометричного розрахунку біонічних культиваторних лап на основі морфології риб та побудова їх тривимірних моделей.

У результаті аналізу морфології і локомоції риб та обробки їх фотозображення з використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV та методів зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію зовнішнього і внутрішнього контурів хвостового плавника деяких риб. У результаті аналітичних досліджень проведено геометричний розрахунок рівнянь регресії опуклого і увігнутого зовнішнього контуру біонічних культиваторних лап на основі морфології хвостового плавника риби та побудовані їх тривимірні моделі в SolidWorks.

**культиваторна лапа, ґрунт, біоніка, морфологія, риби, хвостовий плавник, зворотній інжиніринг, проєктування, аналіз, методика**

**Постановка проблеми.** Культиваторні лапи можна умовно віднести до групи робочих органів, поверхня яких виконує функції розпушування і переміщення агрегатів ґрунту в межах їх геометричних розмірів [1].

Більшість наукових праць [2–5] досліджують поверхню робочого органу, що обробляє ґрунт, з огляду на мінімізацію тягового опору. Деякі автори [7–9] досліджують взаємозв'язок бічного профілю лапи з якістю обробки ґрунту. В їхніх дослідженнях найкращі результати досягаються завдяки поверхні, що створює зони локальних зсувів у ґрунті. Ця форма поверхні відповідає розподілу тиску, що найбільше схожий на коло або криву другого порядку.

Останнім часом тривають дискусії щодо оптимальної форми поверхні розпушувальної лапи. Варіанти включають опуклі та увігнуті лемеші в горизонтальних і вертикальних площинах, представлені у вигляді дуг різних радіусів кривизни. У теоретичному відношенні розглядається взаємодія робочого органу для розпушування з ґрунтом, щоб обґрунтувати його геометричні параметри з точки зору енергетичних та якісних характеристик роботи. Якість роботи розпушувального органу оцінюється за ступенем розпушення ґрунту на агрегати фракції розміром не більше 50 мм і відсутністю значного ущільнення окремих його елементів [2].

Як зазначається у [1, 4, 6], ґрунтообробний робочий орган визначається значною кількістю параметрів, так як його поверхня, перш за все, являє собою геометричний об'єкт. Всі параметри, які приймають участь в проєктуванні ґрунтообробного робочого органу, можна поділити на наступні групи:

– технологічні, які визначаються технологією вирощування культур або обробіткою ґрунту (глибина обробітки, розпушування ґрунту, вирівнювання дна борозни, знищення бур'янів, заробка рослинних решток тощо);

– параметри ґрунту, які визначають його фізико-механічні властивості на момент обробки (коефіцієнт внутрішнього тертя, коефіцієнт зовнішнього тертя, агрегатний склад ґрунту, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона, робота сил адгезії, яка залежить від вологості і типу ґрунту тощо);

– параметри рослин, з якими взаємодіє робочий орган (коефіцієнт тертя рослин по сталі, коефіцієнт тертя рослин по ґрунту, зв'язність дерні, границя міцності дерні тощо);

– параметри поверхні робочого органу, які визначають його конструкцію (кривина поверхні, габаритні геометричні розміри, параметри леза тощо).

Стандартна узагальнена методика проектування поверхонь робочих органів зводиться до наступних дій [1, 4]:

– задання технологічних параметрів;

– визначення параметрів ґрунту і рослин;

– вибір параметрів поверхонь в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту;

– обчислення координат на прямої поверхні;

– формування каркасу поверхні;

– побудова обрізу поверхонь;

– побудова шаблонів вертикальними і горизонтальними січними площинами.

Такий концептуальний підхід на сьогодні є застарілий через появу великої кількості САД і САЕ-систем, що дозволяють системно проектувати нові ґрунтообробні робочі органи.

Окрім цього, набуває розвитку застосування біоніки [7, 9–11] при проектуванні ґрунтообробних робочих органів, що є більш ефективним за свої традиційні аналоги. Біонічні робочі органи спираються на морфологію і локомоцію ґрунтової і водної фауни.

Тому вирішення проблеми співставлення морфології ґрунтової і водної фауни з поверхнею ґрунтообробних робочих органів є актуальним і потребує вирішенню.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Провівши аналіз літературних джерел, виявлено, що найбільш схожою на процес взаємодії культиваторної лапи із ґрунтом є локомоція риб, які використовують власну форму тіла і наявність допоміжних елементів (плавників) для переміщення у водному середовищі.

Отримані дані досліджень [12–14] дали змогу на основі факторного аналізу оцінити морфологічні особливості риб і їх поліморфізм.

Так в роботі [14] на основі багаторічних статистичних даних виявлено приховану структуру морфології берша (*Stizostedion Volgensis*).

В роботі [12] отримані функціональні зв'язки між морфологією річкових риб та їх гідродинамічними здібностями. Досліджено потенційні залежності між мінімальними коефіцієнтами лобового опору, використанням швидкостей, морфологією риби та опором у заданій течії.

В роботі [13] розглянуті гідродинамічні характеристики риби-вітрильника (*Istiophorus platypterus*) і риби-меч (*Xiphias gladius*) в планерних позах на їх крейсерських швидкостях.

В роботі [14] розглянута морфологія та експериментальна гідродинаміка поверхонь управління плавниками риб.

Також в деяких наукових роботах проведено чисельне моделювання локомоції риб у водному середовищі. У статті [15] на основі CFD моделювання досліджено гідродинаміку плавців із трьома хвостовими плавцями: круглим, що відповідає змієголовій риби (*Channidae*), заглибленим, що відповідає сайді (*Pollachius virens*), і

місячним, що відповідає тунцю (*Thunnus thynnus*). В дослідженнях [16] тіло риби функціонує як аеродинамічне крило: поверхневий тиск генерує тягу під час карангіформної локомоції.

Широке розповсюдження має робототехніка на основі біоніки риб. В статті [17] проведено огляд моделювання, матеріалів і приводів водних безпілотних транспортних засобів на основі біоніки водної фауни. В роботі [18] проведені дослідження впливу складного рельєфу на гідродинамічні характеристики глибоководного рибоподібного робота-дослідника для відбору проб, що рухається поблизу морського дна.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про велике різноманіття форм тіла риб, які можна згрупувати і використати в якості характеристичної поверхні лапи культиватора.

**Постановка завдання.** Провести геометричний розрахунок біонічних культиваторних лап на основі морфології риб та побудувати їх тривимірні моделі.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз літературних джерел [7, 15, 19–21] щодо морфології риб дозволяє їх узагальнити у вигляді форм, які наведені на рис. 1.

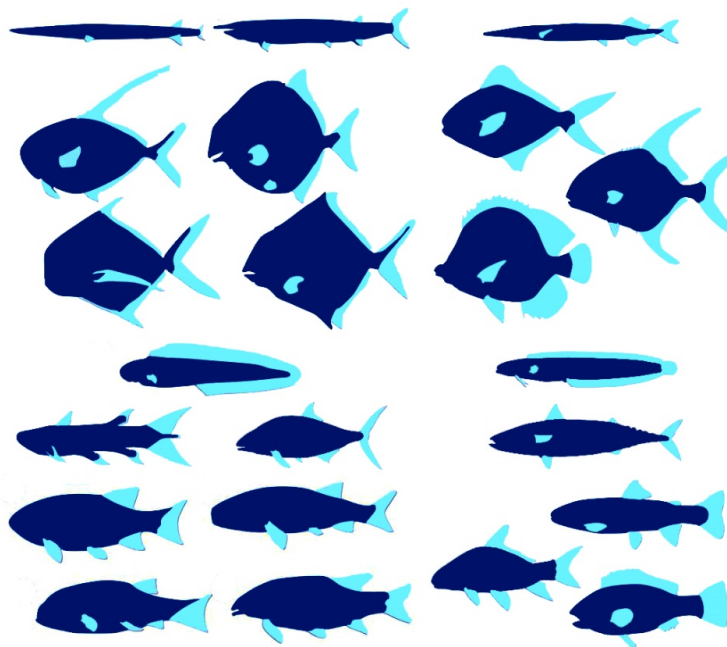


Рисунок 1 – Узагальнені структура морфології риб  
Джерело: за даними [7, 15, 19–21]

Особливий інтерес в будові тіла риби при проектуванні поверхні лапи культиватора має хвостовий плавник. Обробку фотозображення плавників проведено з використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV. Для визначення рівняння контуру хвостового плавника риби в розробленій програмі виконується наступна послідовність дій (рис. 2). На першому етапі відбувається завантаження фотозображення хвостового плавника і вибір відповідної прямокутної області. Другим етапом є перетворення зображення у бінарний вид (чорно-біле зображення), використовуючи методи сегментації. Подальше усунення шумів і пропусків з використанням функцій Erode і Dilate бібліотеки OpenCV. На третьому етапі визначаються контури чорних областей, використовуючи функції FindContour бібліотеки OpenCV (перетворення Хафа і детектор границь Кенні). Програма в автоматичному режимі знаходить контур хвостового плавника і надає його координати для наступного аналізу.

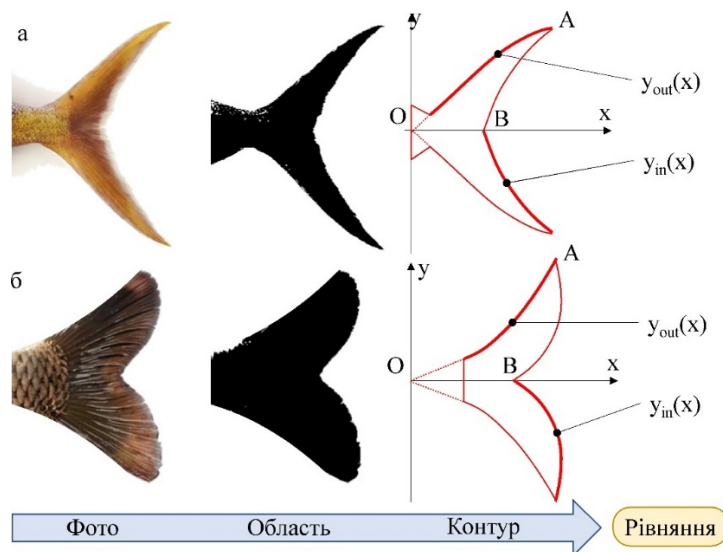


Рисунок 2 – Етапи обробки фотозображення хвостового плавника риби

Джерело: розроблено авторами

Використовуючи методи зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію хвостових плавників деяких риб. Особлива увага приділена результатам досліджень. В загальному вигляді зовнішній і внутрішній контури хвостового плавника можна апроксимувати наступним чином:

$$\begin{cases} y_{\text{out}} = a_0 + a_1x + a_2x^2, \\ y_{\text{in}} = b_0 + b_1x + b_2x^2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $x, y$  – декартові координати, мм;

$y_{\text{out}}(x), y_{\text{in}}(x)$  – рівняння зовнішнього і внутрішнього контурів, мм;

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  – коефіцієнти регресії рівнянь.

Подальший аналіз рівнянь (1) зводиться до визначення коефіцієнтів регресії.

Перш за все приймаємо, що зовнішній контур перетинає початок координат  $O(0, 0)$ . Тоді коефіцієнт  $a_0 = 0$ . По-друге, приймаємо ширину лапи  $W = 330$  мм і довжину  $L = 230$  мм (за умови подібності до звичайної 330 стрілчастої лапи) – точка  $A$ . Тоді маємо наступну умову для точки  $A(-L, W/2)$ :

$$\begin{cases} y_{\text{out}}(-L) = -a_1L + a_2L^2 = \frac{W}{2}, \\ y_{\text{in}}(-L) = b_0 - b_1L + b_2L^2 = \frac{W}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Згідно спостережень за даними морфології хвостових плавників, точка  $B$  у більшості випадків знаходиться посередині довжини  $L$ . Тоді умовою для точки  $B(-L/2, 0)$  є:

$$y_{\text{in}}\left(-\frac{L}{2}\right) = b_0 - b_1\frac{L}{2} + b_2\frac{L^2}{4} = 0. \quad (3)$$

Також наочно виявлено, що внутрішній контур у більшості випадків повторює зовнішній, зменшений у два рази. Математично це можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} y_{\text{in}}(x) &= y_{\text{out}}(2x + L) \Rightarrow \\ b_0 + b_1x + b_2x^2 &= a_1(2x + L) + a_2(2x + L)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2)–(4) отримуємо

$$\begin{cases} b_0 = a_1L + a_2L^2, \\ b_1 = 2a_1 + 4a_2L, \\ b_2 = 4a_2. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_{\text{out}} = a_1x + a_2x^2, \\ y_{\text{in}} = a_1L + a_2L^2 + (2a_1 + 4a_2L)x + 4a_2x^2, \end{cases} \quad (5)$$

Цікавим є те, що при  $a_2 = 0$  отримуємо форму звичайної стрілкової лапи:

$$\begin{cases} y_{\text{out}} = \frac{W}{2L}x \approx 0,717x, \\ y_{\text{in}} = -\frac{W}{2} + \frac{W}{L}x \approx -165 + 1,434x. \end{cases} \quad (6)$$

Для повної побудови тривимірної поверхні культиваторної лапи необхідно враховувати рівняння напрямної поверхні, яку згідно досліджень [1, 4, 22] можна представити у вигляді логарифмічної спіралі (рис. 3):

$$\begin{cases} z = z_C - r_0 e^{\theta \tan \theta} \sin(\varphi_k - \varphi), \\ x = x_C + \frac{r_0}{2} e^{\theta \tan \theta} \cos(\varphi_k - \varphi), \\ 0 \leq \varphi \leq \varphi_k, \end{cases} \quad (7)$$

де  $x, z$  – декартові координати, мм;

$x_C = -x(0), z_C = -z(0)$  – координати центра спіралі, мм;

$\varphi$  – кут полярної системи координат, рад;

$\varphi_k$  – кінцевий полярний кут полярної, рад;

$\theta$  – кут внутрішнього тертя, рад;

$r_0 = \frac{W/2}{\sin \varphi_k}$  – початковий радіус-вектор, мм.

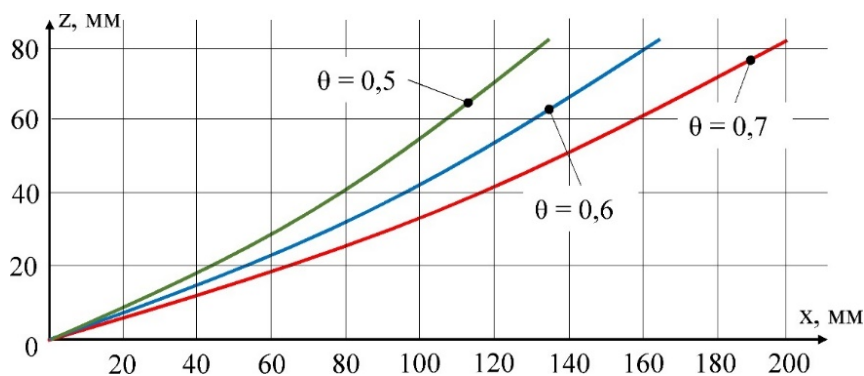


Рисунок 3 – Форма напрямної поверхні культиваторної лапи

Джерело: розроблено авторами

Враховуючи рівняння (5) і (7), остаточно маємо рівняння зовнішньої поверхні (однієї з симетричних частин) лапи культиватора  $S(x, y, z)$ :

$$\begin{cases} x = \rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi), \\ y = a_1 (\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi)) + a_2 (\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi))^2, \\ z = z_C - r_0 e^{\varphi t g \theta} \sin(\varphi_k - \varphi), \\ 0 \leq \varphi \leq \varphi_k, \\ 0 \leq \rho \leq \frac{W}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

де  $\rho$  – змінна, мм.

Графік залежності контурів звичайної стрілкової лапи (при  $\varphi_k = \pi/8$  рад.,  $\theta = 0,7$  рад.) в програмному пакеті Wolfram Cloud і відповідна 3D-модель в SolidWorks наведена на рис. 4.

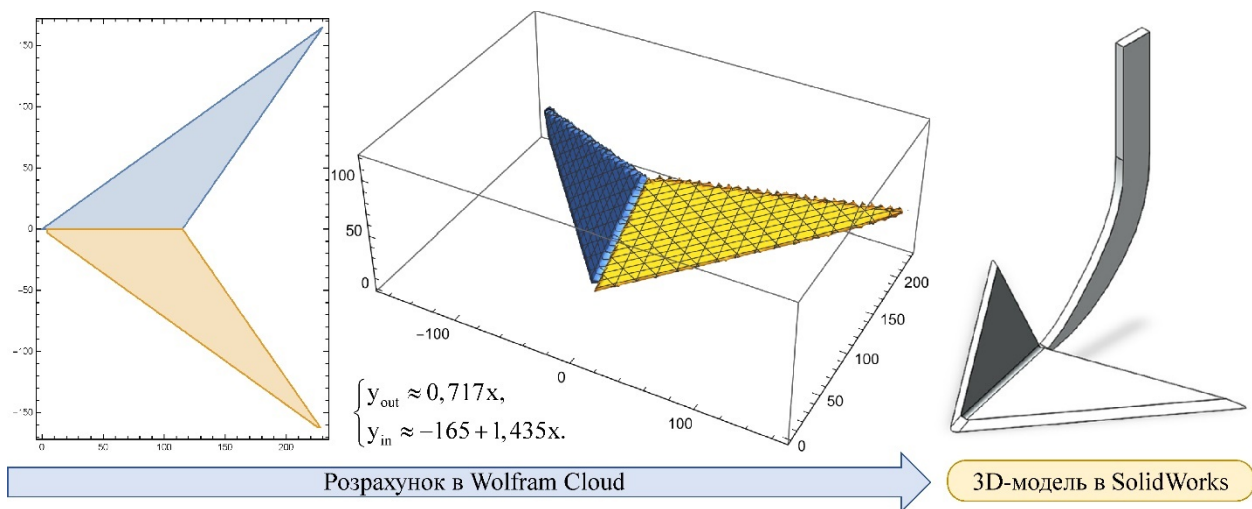


Рисунок 4 – Візуалізація звичайної стрілкової лапи

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи рівняння (2), виявлено, що при  $a_2 < 0$  контур лапи культиватора схожий на хвостовий плавник риби, як на рис. 2, а. В свою чергу, якщо  $a_2 > 0$ , то контур лапи культиватора подібний на хвостовий плавник риби, як на рис. 2, б. Тому в подальшому будемо розглядати саме два варіанти.

В процесі переміщення лапи культиватора зі швидкістю  $V$  перше рівняння системи (8) приймає вигляд:

$$\begin{cases} x' = \rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi) - Vt, \\ y' = a_1 (\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi) - Vt) + \\ + a_2 (\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi) - Vt)^2, \\ z' = z_C - r_0 e^{\varphi t g \theta} \sin(\varphi_k - \varphi), \\ 0 \leq \varphi \leq \varphi_k, \\ 0 \leq \rho \leq \frac{W}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

де  $V$  – швидкість переміщення лапи культиватора, м/с;  $t$  – час, с.

Для обґрунтування раціональних коефіцієнтів регресії рівняння (8), що визначають форму поверхні культиваторної лапи, яка є найбільш раціональною для виконання умови руйнування ґрунтового середовища необхідно теоретично дослідити його напружено-деформований стан. Теоретичні дослідження цього стану зводяться до складання узагальнених закономірностей: рівняння рівноваги, законів, що зв'язують напруження і відносні деформації тощо [23]. Причому взаємозв'язок напруження і відносних деформацій визначає механічну модель ґрунтового середовища. Найбільш цікавою є модель пружно-в'язко-пластичного середовища.

В роботі [24] детально розглянуто процес визначення фізичних рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформацій для ґрунтового середовища. Тому немає сенсу його повторювати і в подальших дослідженнях використаємо остаточне рівняння:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (2\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_z) - \frac{e^{K_2(1+\nu)}(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu} \right), \\ \sigma_y &= \frac{2}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (2\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_z) - \frac{e^{K_2(1+\nu)}(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu} \right), \\ \sigma_z &= \frac{2}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (2\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_x) - \frac{e^{K_2(1+\nu)}(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu} \right), \\ K_2 &= \frac{27l(-1+2\nu) \left( \tau_0 \cos \theta + \frac{2e^{K_1} \mu (1+\nu) (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z) \sin \theta}{9-18\nu} \right)}{4\sqrt{2}\mu(1+\nu) \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}} (-3+\sin \theta)}, \\ K_1 &= \frac{3El}{(2\mu+2\mu\nu) \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}}}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальне напруження опору ґрунтового середовища, Па;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – компоненти відносної деформації в нормальному напрямку;

$\mu$  – коефіцієнт в'язкості зсувних деформацій, Па·с;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$l$  – відстань, на якій затухає хвиля напружень у даному середовищі, м;

$\theta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу (ґрунту), рад;

$E$  – модуль пружності лінійних деформацій, Па;

$\rho$  – щільність середовища, кг/м<sup>3</sup>.

Для доповнення рівнянь (10) скористаємось критерієм Кулона-Мора, який заснований на припущенні, що міцність залежить, головним чином, від величини та знаку головних напруг. Якщо при деяких напругах виникає плинність, то коло Мора, побудоване на цих напругах, відповідає граничному стану матеріалу. Тривимірний критерій Кулона-Мора часто виражається як

$$\begin{cases} \pm \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right] \sin \theta + C_0 \cos \theta, \\ \pm \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} = \left[ \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \right] \sin \theta + C_0 \cos \theta, \\ \pm \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} = \left[ \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} \right] \sin \theta + C_0 \cos \theta, \end{cases} \quad (11)$$

де  $C_0$  – коефіцієнт зчеплення ґрунтового середовища, Па.

Підставляючи (10) в (11), маємо:

$$\begin{aligned} & \pm \frac{1}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (3\dot{\varepsilon}_x - 3\dot{\varepsilon}_y) \right) - \\ & - \left[ \frac{1}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y - 2\dot{\varepsilon}_z) - \frac{e^{K_2} (1+\nu) (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu} \right) \right] \sin \theta = C_0 \cos \theta, \\ & \pm \frac{1}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (3\dot{\varepsilon}_y - 3\dot{\varepsilon}_z) \right) - \\ & - \left[ \frac{1}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (\dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z - 2\dot{\varepsilon}_x) - \frac{e^{K_2} (1+\nu) (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu} \right) \right] \sin \theta = C_0 \cos \theta, \\ & \pm \frac{1}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (3\dot{\varepsilon}_z - 3\dot{\varepsilon}_x) \right) - \\ & - \left[ \frac{1}{9} \mu \left( 3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_x - 2\dot{\varepsilon}_y) - \frac{e^{K_2} (1+\nu) (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu} \right) \right] \sin \theta = C_0 \cos \theta, \end{aligned} \quad (12)$$

Також слід відмітити, що три компонента деформації в кожній точці ґрунтового середовища повністю визначаються трьома функціями компонентів переміщення. Відповідно до цього компоненти відносної деформації повинні підпорядковуватися наступним співвідношенням [23]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{x' - x}{x} = \frac{-Vt}{\rho + x_c + 0,5r_0 e^{\rho t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi)}, \\ \varepsilon_y = (y' - y)/y = -1 + \\ + \frac{a_1 (\rho + x_c + 0,5r_0 e^{\rho t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi) - Vt) + a_2 (\rho + x_c + 0,5r_0 e^{\rho t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi) - Vt)^2}{a_1 (\rho + x_c + 0,5r_0 e^{\rho t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi)) + a_2 (\rho + x_c + 0,5r_0 e^{\rho t g \theta} \cos(\varphi_k - \varphi))^2}, \\ \varepsilon_x = (z' - z)/z = 0. \end{cases} \quad (13)$$

де  $x' - x$ ,  $y' - y$ ,  $z' - z$  – компоненти переміщення вздовж осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  відповідно, м. Знайдемо швидкості зміни компонентів відносної деформації:



$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_x = \frac{-V}{\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\theta \text{tg} \theta} \cos(\varphi_k - \varphi)}, \\ \dot{\epsilon}_y = \frac{-Va_1 - 2Va_2(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\theta \text{tg} \theta} \cos(\varphi_k - \varphi) - Vt)}{a_1(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\theta \text{tg} \theta} \cos(\varphi_k - \varphi)) + a_2(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\theta \text{tg} \theta} \cos(\varphi_k - \varphi))^2}, \\ \dot{\epsilon}_x = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Підставляючи (14) у (12) і вирішуючи отриману систему рівнянь в програмному пакеті Wolfram Cloud для прийнятих властивостей ґрунтового середовища ( $\mu = 102$  кПа·с;  $\nu = 0,41$ ;  $l = 0,4$  м;  $\theta = 0,7$  рад;  $E = 1,5 \cdot 10^7$  Па;  $\rho = 1270$  кг/м<sup>3</sup> [24]), отримані значення коефіцієнтів регресії:  $a_1 = 1,451$ ,  $a_2 = -0,00319$  і  $a_1 = 0,423$ ,  $a_2 = 0,00128$ .

Тоді рівняння контурів лапи культиватора для опуклого варіанту (рис. 2, а) мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} y_{\text{out}} \approx 1,451x - 0,00319x^2, \\ y_{\text{in}} \approx -502,5 + 5,837x - 0,01276x^2. \end{cases} \quad (15)$$

Графік залежності контурів опуклої стрілкової лапи (при  $\varphi_k = \pi/8$  рад.,  $\theta = 0,7$  рад.) в програмному пакеті Wolfram Cloud і відповідна 3D-модель в SolidWorks наведена на рис. 5.

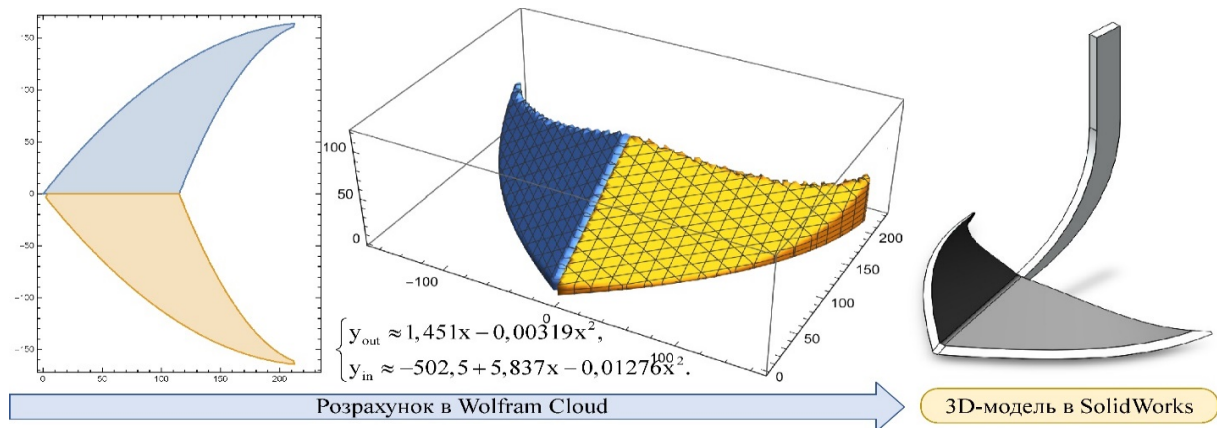


Рисунок 5 – Візуалізація опуклої стрілкової лапи

Джерело: розроблено авторами

Рівняння контурів лапи культиватора для увігнутого варіанту (рис. 2, б) мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} y_{\text{out}} \approx 0,423x - 0,00128x^2, \\ y_{\text{in}} \approx -29,663 - 0,3305x - 0,005117x^2. \end{cases} \quad (16)$$

Графік залежності контурів увігнутої стрілкової лапи (при  $\varphi_k = \pi/8$  рад.,  $\theta = 0,7$  рад.) в програмному пакеті Wolfram Cloud і відповідна 3D-модель в SolidWorks наведені на рис. 6.

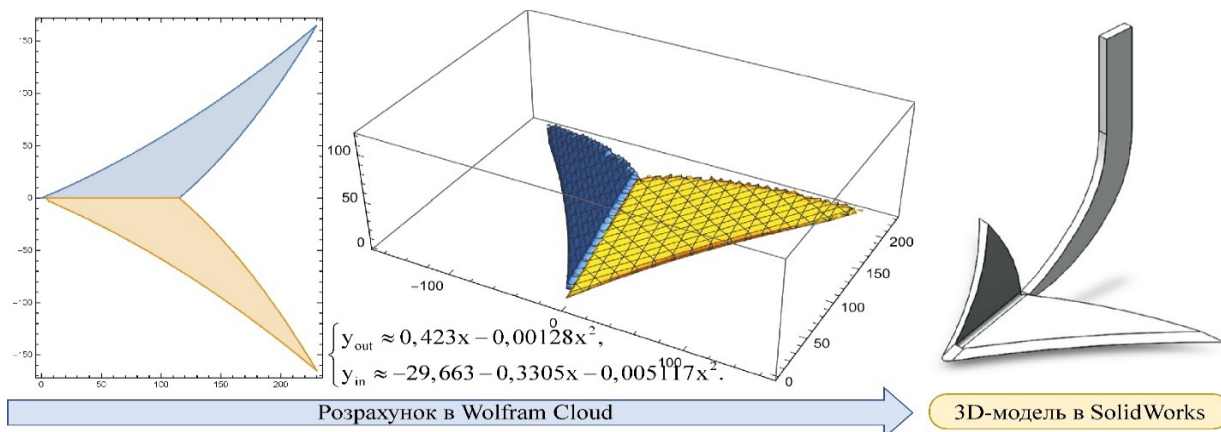


Рисунок 6 – Візуалізація увігнутої стрілкової лапи

Джерело: розроблено авторами

При аналізі морфології хвостових плавників помічено цікавий елемент – їх промені (радіалії). Вони розташовані вздовж осьової лінії хвостового плавника зі зміщенням на зовнішній контур (рис. 7) та виконують додаткову функцію локомоції і зменшують гідродинамічний опір при русі. Тому окрім форми контурів стрілкової лапи культиватора доцільно використовувати подібні промені на її зовнішній поверхні.

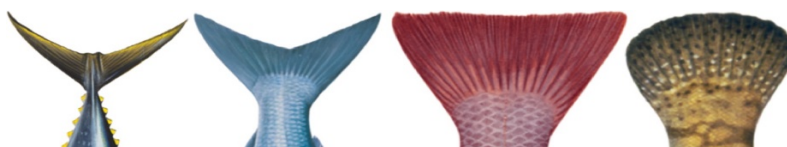


Рисунок 7 – Промені (радіалії) на різних типах хвостових плавників

Джерело: за даними [7, 15, 19–22]

Аналізуючи морфологію хвостового плавника багатьох риб, встановлено загальну закономірність їх розташування, яку можна представити у вигляді рівняння:

$$\begin{cases}
 y_{out} = a_1x + a_2x^2, \\
 y_{N-1} = (N-1)(a_1x + a_2x^2)/N, \\
 \dots, \\
 y_i = i(a_1x + a_2x^2)/N, \\
 \dots, \\
 y_1 = 1(a_1x + a_2x^2)/N,
 \end{cases}
 \tag{17}$$

де N – загальна кількість променів;  
i – порядковий номер променя.

Загальну кількість променів обрано з наступних міркувань. Розпушувальна лапа культиватора працює на глибині 8–16 см. Згідно досліджень [2] на цій глибині оптимальний агрегатний склад ґрунту становить 10–20 мм. Тому для вільного переміщення агрегату ґрунту розміром 20 мм вздовж поверхні лапи культиватора відстань між променями також повинна складати в середньому 20 мм. Тоді на одній половині культиваторної лапи кількість відповідних жолобків між променями повинна складати  $N = (W/2)/20 = (330/2)/20 \approx 8$  шт.

Побудуємо відповідні моделі культиваторних лап із направляючими променями в програмних пакетах Wolfram Cloud і SolidWorks (рис. 8–10).

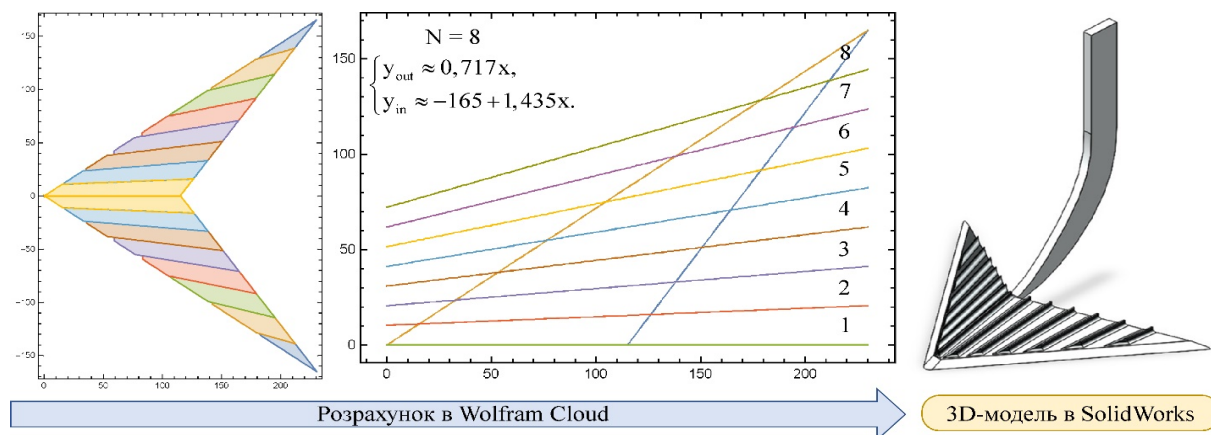


Рисунок 8 – Візуалізація звичайної стрілкової лапи із направляючими променями  
Джерело: розроблено авторами

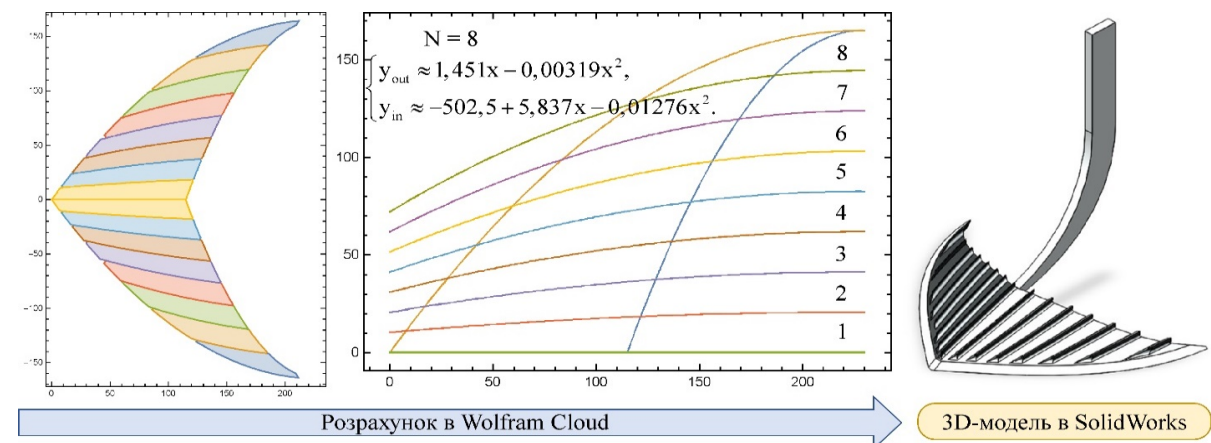


Рисунок 9 – Візуалізація опуклої стрілкової лапи із направляючими променями  
Джерело: розроблено авторами

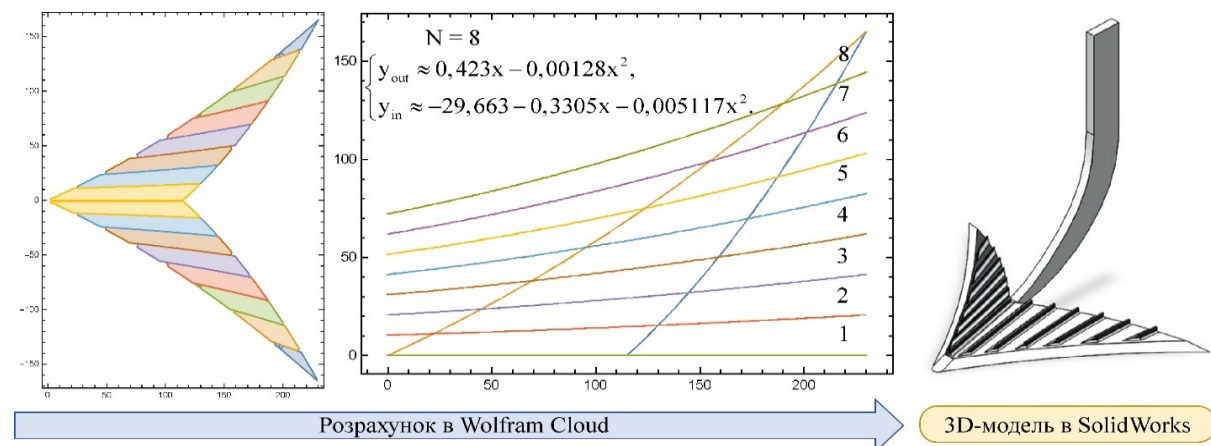


Рисунок 10 – Візуалізація увігнутої стрілкової лапи із направляючими променями  
Джерело: розроблено авторами

Для перевірки і визначення найбільш ефективної конструкції культиваторної лапи необхідно провести додаткове чисельне моделювання в САЕ-системі (наприклад, Simcenter Star-CCM+) [26] і лабораторно-експериментальні дослідження в ґрунтовому каналі.

**Висновки.** У результаті аналізу морфології і локомоції риб та обробки їх фотозображення з використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV та методів зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію зовнішнього і внутрішнього контурів хвостового плавника деяких риб.

У результаті аналітичних досліджень проведено геометричний розрахунок рівнянь регресії опуклого і увігнутого зовнішнього контуру біонічних культиваторних лап на основі морфології хвостового плавника риби та побудовані їх тривимірні моделі в SolidWorks.

Аналіз морфології хвостових плавників дозволив застосувати до культиваторних лап промені (радіалії). Вони розташовані вздовж осьової лінії хвостового плавника із зміщенням на зовнішній контур. Встановлено загальну закономірність їх розташування, яку можна представити у вигляді системи рівнянь. Побудовані відповідні моделі культиваторних лап із направляючими променями в програмних пакетах Wolfram Cloud і SolidWorks.

З техніко-економічної точки зору забезпечення розробленої форми біонічних культиваторних лап дозволяє зменшити тяговий опір знаряддя на 5–10 %, що дозволить отримати більш високий економічний ефект від їх впровадження.

## Список літератури

1. Тищенко С.С., Карась В.В. Машини для основного обробітку ґрунту: теорія та проектування поверхонь ґрунтообробних робочих органів: навч. посіб. Дніпро: Домінанта-Прінт, 2017. 204 с.
2. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
3. Гуков Я.С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України. К.: Нора-Прінт, 1999. 280 с.
4. Тищенко С.С., Карась В.В. Геометричні основи проектування поличних робочих органів: монографія. Дніпро: ТОВ «Домінанта-Прінт», 2019. 356 с.
5. Кобець А.С., Волик Б.А., Пугач А.М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія. Дніпропетровськ: Свідлер А. Л., 2011. 140 с.
6. Тищенко С.С., Дубровін В.О., Теслюк В.В., Волянський М.С. Сільськогосподарські машини. Теорія і розрахунок робочих органів машин для поверхневого обробітку ґрунту: навч. посіб. К.: Компанія «Аграр Медіа Груп», 2014. 162 с.
7. Бабицький Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин. К.: Урожай, 1998. 164 с.
8. Алієв Е.Б., Лабатюк Ю.М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві*: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 180. С.67–71.
9. Ren L. Q., Tong J., Li J. Q., Chen B. C. (2001). SW-Soil and Water: Soil adhesion and biomimetics of soil engaging components: a review. *Journal Agricultural Engineering Research*, 79(3): 239–263. <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0722>
10. Tong J., Sun J. Y., Chen D. H., Zhang S. J. (2005). Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements. *Soil and Tillage Research*, 80 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.012>.
11. Dai Z. D., Tong J., Ren L. Q. (2006). Researches and developments of biomimetics in tribology. *Chinese Science Bulletin*, 51(22): 2681–2689. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2184-z>

12. Sagnes P., Statzner B. (2009). Hydrodynamic abilities of riverine fish: a functional link between morphology and velocity use. *Aquatic Living Resources*, 22: 79-91. <https://doi.org/10.1051/ALR/2009008>
13. Sagong W., Jeon W. P., Choi H. Hydrodynamic Characteristics of the Sailfish (*Istiophorus platypterus*) and Swordfish (*Xiphias gladius*) in Gliding Postures at Their Cruise Speeds. *PLOS ONE*. 2013. 8 (12): e81323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081323>
14. Lauder G. V., Drucker E. G. Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004. 29 (3): 556–571. <https://doi.org/10.1109/JOE.2004.833219>
15. Song J., Zhong Y., Du R., Yin L., Ding Y. Tail shapes lead to different propulsive mechanisms in the body/caudal fin undulation of fish. *J Mechanical Engineering Science*. 2021. 235 (2): 351–364. <https://doi.org/10.1177/0954406220967687>
16. Lucas K. N., Lauder G. V., Tytell E. D. The fish body functions as an airfoil: surface pressures generate thrust during carangiform locomotion. *BioRxiv*. (2020. 958389. <https://doi.org/10.1101/2020.02.20.958389>
17. Salazar R., Campos A., Fuentes V., Abdelkefi A. A review on the modeling, materials, and actuators of aquatic unmanned vehicles. *Ocean Engineering*. 2019. 172: 257–285. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.047>
18. Xue G., Bai F., Guo L., Ren P., Liu Y. Research on the effects of complex terrain on the hydrodynamic performance of a deep-sea fishlike exploring and sampling robot moving near the sea bottom. *Front. Mar. Sci*. 2023. 10: 1091523. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1091523>
19. Fletcher T., Altringham J., Peakall J., Wignall P., Dorrel R. Hydrodynamics of fossil fishes. *Proc. R. Soc. B*. 2014. 281: 20140703. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0703>
20. Fish morphology. The Education Program at the New Jersey Sea Grant Consortium. 22 Magruder Road Fort Hancock, 2014. NJ 07732 732-872-1300.
21. Keat-Chuan Ng C., Aun-Chuan Ooi P., Wong W. L., Khoo G. A Review of Fish Taxonomy Conventions and Species Identification Techniques. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*. 2017. 4 (1): 54–93.
22. Кушнарев А. С., Кочев В. И. Механико-технологические основы обработки. К.: Урожай, 1989. 144 с.
23. Лабатюк Ю. М., Алієв Е. Б. Математичне моделювання процесу взаємодії робочого органу глибокорозпушувача з ґрунтом. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип.5 (2). С.133–140.
24. Timoshenko S. P., Goodier J. N. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, Third Ed., New York, 1970. 522 p.
25. Гуцол О. П., Ковбаса В. П. Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: монографія. Київ, 2016. 145 с.
26. Aliiev, E., Tesliuk, H., Puhach, A., Kobets, O., Zolotovska, O., Boiko, V. Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 4 (1 (124)), 60–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284597>.

## Referencis

1. Tyshchenko, S. S. & Karas, V. V. (2017). *Mashyny dlia osnovnoho obrobittu gruntu: teoriia ta proektuvannia poverkhon gruntoobrobnykh robochykh orhaniv: navch. posib [Machines for basic tillage: theory and design of surfaces of tillage working bodies: training. manual]*. Dnipro: Dominanta-Print ISBN 978-617-646-234-8 [in Ukrainian].
2. Shevchenko, I. A. (2016). *Keruvannia ahrofizychnym stanom gruntovoho seredovyshcha [Management of the agrophysical state of the soil environment]*. Kyiv: Vydavnychiy dim «Vinichenko» ISBN 978-966-2622-22-5 [in Ukrainian].
3. Hukov, Ya. S. (1999). *Obrobittok gruntu. Tekhnolohiia i tekhnika. Mekhaniko-tekhnolohichne obgruntuvannia enerhozberihaiuchykh zasobiv dlia mekhanizatsii obrobittu gruntu v umovakh Ukrainy [Tillage. Technology and equipment. Mechanical and technological substantiation of energy-saving means for the mechanization of soil cultivation in the conditions of Ukraine]*. Kyiv: Nora-Print [in Ukrainian].
4. Tyshchenko, S. S. & Karas, V. V. (2019). *Heometrychni osnovy proektuvannia polychnykh robochykh orhaniv: monohrafiia [Geometric bases of design of shelf working bodies: monograph]*. Dnipro: TOV «Dominanta-Print». ISBN 978-617-7371-46-4 [in Ukrainian].
5. Kobets, A. S., Volyk, B. A. & Puhach, A. M. (2011). *Gruntoobrobni mashyny: teoriia, konstruktsiia, rozrakhunok: monohrafiia [Soil tillage machines: theory, design, calculation: monograph]*. Dnipropetrovsk: Svidler A. L. [in Ukrainian].

6. Tyshchenko, S. S., Dubrovin, V. O., Tesliuk, V. V. & Volianskyi, M. S. (2014). *Silskohospodarski mashyny. Teoriia i rozrakhunok robochykh orhaniv mashyn dlia poverkhnevoho obrobitku gruntu: navch. posib. [Agricultural machinery. Theory and calculation of working bodies of machines for surface tillage: training. manual]*. K.: Kompaniia «Ahrar Media Hrup» . ISBN 978-617-646-234-7 [in Ukrainian].
7. Babytskyi, L. F. (1998). *Bionichni napriamy rozrobky gruntoobrobnykh mashyn [Bionic directions of development of tillage machines]*. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
8. Aliiev, E. B. & Labatiuk, Yu. M. (2017). *Chyselne modeliuвання mekhaniko-tehnologichnykh protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva [Numerical modeling of mechanical and technological processes of agro-industrial production]*. Suchasni problemy vdoskonalennia tekhnichnykh system i tekhnolohii u tvarynnytstvi: Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka, 180: 67–71 [in Ukrainian].
9. Ren, L. Q., Tong, J., Li, J. Q. & Chen, B. C. (2001). *SW-Soil and Water: Soil adhesion and biomimetics of soil engaging components: a review*. Journal Agricultural Engineering Research, 79(3): 239–263. <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0722> [in English].
10. Tong, J., Sun, J. Y., Chen, D. H. & Zhang, S. J. (2005). *Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements*. Soil and Tillage Research, 80 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.012> [in English].
11. Dai, Z. D., Tong, J. & Ren, L. Q. (2006). *Researches and developments of biomimetics in tribology*. Chinese Science Bulletin, 51(22): 2681–2689. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2184-z> [in English].
12. Sagnes, P. & Statzner, B. (2009). *Hydrodynamic abilities of riverine fish: a functional link between morphology and velocity use*. Aquatic Living Resources, 22: 79–91. <https://doi.org/10.1051/ALR/2009008> [in English].
13. Sagong, W., Jeon, W. P. & Choi, H. (2013). *Hydrodynamic Characteristics of the Sailfish (Istiophorus platypterus) and Swordfish (Xiphias gladius) in Gliding Postures at Their Cruise Speeds*. PLOS ONE 8 (12): e81323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081323> [in English].
14. Lauder, G. V. & Drucker, E. G. (2004). *Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29 (3): 556–571. <https://doi.org/10.1109/JOE.2004.833219> [in English].
15. Song, J., Zhong, Y., Du, R., Yin, L. & Ding, Y. (2021). *Tail shapes lead to different propulsive mechanisms in the body/caudal fin undulation of fish*. J Mechanical Engineering Science, 235 (2): 351–364. <https://doi.org/10.1177/0954406220967687> [in English].
16. Lucas, K. N., Lauder, G. V. & Tytell, E. D. (2020). *The fish body functions as an airfoil: surface pressures generate thrust during carangiform locomotion*. BioRxiv, 958389. <https://doi.org/10.1101/2020.02.20.958389> [in English].
17. Salazar, R., Campos, A., Fuentes, V. & Abdelkefi, A. (2019). *A review on the modeling, materials, and actuators of aquatic unmanned vehicles*. Ocean Engineering, 172: 257–285. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.047> [in English].
18. Xue, G., Bai, F., Guo, L., Ren, P. & Liu, Y. (2023). *Research on the effects of complex terrain on the hydrodynamic performance of a deep-sea fishlike exploring and sampling robot moving near the sea bottom*. Front. Mar. Sci. 10: 1091523. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1091523> [in English].
19. Fletcher, T., Altringham, J., Peakall, J., Wignall, P. & Dorrel, R. (2014). *Hydrodynamics of fossil fishes*. Proc. R. Soc. B. 281: 20140703. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0703> [in English].
20. Fish morphology. (2014). *The Education Program at the New Jersey Sea Grant Consortium*. 22 Magruder Road Fort Hancock, NJ 07732 732-872-1300 [in English].
21. Keat-Chuan, Ng C., Aun-Chuan, Ooi P., Wong, W. L. & Khoo, G. (2017). *A Review of Fish Taxonomy Conventions and Species Identification Techniques*. Journal of Survey in Fisheries Sciences, 4 (1): 54–93.
22. Kushnarev, A. S. & Kochev, V. I. (1989). *Mekhaniko-tehnologicheskie osnovy obrabotki pochvyi [Mechanical and technological foundations of soil cultivation]*. Kyiv: Urozhay [in Ukrainian].
23. Labatiuk, Yu. M. & Aliiev, E. B. (2015). *Matematychni modeliuвання protsesu vzaiemodii robochoho orhanu hlybokorozpushuvacha z gruntom [Mathematical modeling of the process of interaction between the working body of the soil-corrosion agent and the soil]*. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnologichnoho universytetu, 5 (2): 133–140 [in Ukrainian].
24. Timoshenko, S. P. & Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, Third Ed., New York [in English]

25. Hutsol, O. P. & Kovbasa, V. P. (2016). *Obgruntuvannia parametriv i rezhymiv rukhu gruntoobrobnykh mashyn z dyskovymy robochymy orhanamy* [Setting parameters and operating modes of soil-processing machines with disk working bodies]. Kyiv [in Ukrainian].
26. Aliiev, E., Tesliuk, H., Puhach, A., Kobets, O., Zolotovska, O., Boiko, V. (2023). Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (124)), 60–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284597>.

**Hennadii Tesliuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

**Elchyn Aliiev**, Senior Researcher, Prof., DSc.

**Yuliia Tesliuk**, PhD

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

### **Technical and Economic Justification of Geometric Parameters of Bionic Cultivation Tines Based on Fish Morphology**

Therefore, the challenge of aligning the morphology of terrestrial and aquatic fauna with the surface of soil cultivation implements is relevant and requires attention.

The research objective is to perform geometric calculations for bionic cultivation tines based on fish morphology and create their three-dimensional models. The analysis of fish morphology and locomotion, along with image processing using developed software in the Visual Studio C++ environment, OpenCV library, and reverse engineering methods, facilitated the approximation of the outer and inner contours of the tail fin of certain fish species.

Through analytical investigations, the geometric calculations for the regression equations of convex and concave outer contours of bionic cultivation tines based on the morphology of fish tail fins were conducted, and their three-dimensional models were built using SolidWorks. The analysis of tail fin morphology allowed for the application of rays (radials) to cultivation tines. These rays are aligned along the axial line of the tail fin with displacement toward the outer contour. A general regularity in their arrangement was established and represented as a system of equations. Corresponding models of cultivation tines with guiding rays were constructed using software packages such as Wolfram Cloud and SolidWorks.

From a technical and economic perspective, the implementation of the developed bionic cultivation tine shapes can reduce the equipment's drag resistance by 5–10%, leading to a higher economic benefit upon their adoption.

**cultivator paw, soil, bionics, morphology, fish, tail fin, reverse engineering, design, analysis, technique**

*Одержано (Received) 29.09.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 08.10.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023*